한국청정기술학회 2025년도 **30 주년기념**

추계 총회 및 학술대회 초록집

2025 THE KOREAN SOCIETY OF CLEAN TECHNOLOGY FALL CONFERENCE
(30th Anniversary)

2025. 9. 24(수) ~ 27(토) 휘닉스 아일랜드 제주



주 최 : 한국청정기술학회

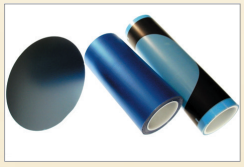
후 원 : (주)화인테크놀리지 Bio Technology Adhesive Tape, 고려아연, MCT 주식회사 엠오티, KITECH 한국생산기술연구원, KITECH-PNU HYDROGEN INDUSTRY UNI-CORE 생기원-부산대 학연협력플랫폼 사업단, KRICT 한국화학연구원, 충북대학교 IR-NBM 기업수요 대응 차세대 이차전지 소재 선도연구센터, ZEUS, VOICE CADDIE, MIRAE ULTRASONIC, Rotec 로텍엔지니어링, YOUNG IN Chromass, NH RECYTECH, 원광대학교 RISE사업단, UNIS, 한국에너지기술연구원 KOREA INSTITUTE OF ENERGY RESEARCH, SK picglobal, 한국요업주식회사, 한국폴리텍대학 석유화학공정기술교육원, 한양, WINTECH, ceracomb (주)세라컴 http://www.ceracomb.co.kr, CRS (주) 켐 리 시 스, (주)상신금속 SANGSHIN METALLIC CO.,LTD., KGU 경기대학교, RIMS 중소조선연구원, EnTeCs, CNS INT Carbon Negative Solution, KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

KSCT 한국청정기술학회 The Korean Society of Clean Technology

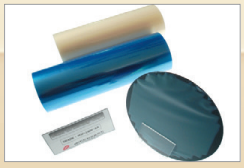
산업용특수테이프
분야를 선도하는
화인테크놀리지



반도체용 점착 TAPE



DICING TAPE



BACK GRINDING TAPE



HEAT SEAL TAPE

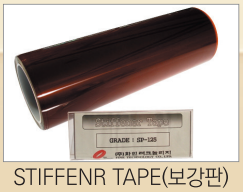


EMC MOLD CUTTING TAPE

FPC MATERIL



COVERLAY TAPE



STIFFENR TAPE(보강판)



CARRIER TAPE



CARRIER TAPE

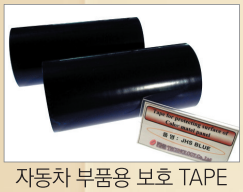
산업용보호 TAPE



건축자재용 보호 TAPE



건축자재용 보호 TAPE

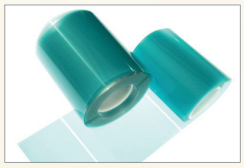


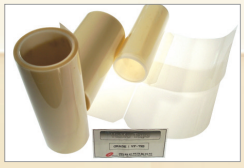
자동차 부품용 보호 TAPE



자동차 부품용 보호 TAPE

세라믹가공·발포용 TAPE





라벨스티커





(주)화인테크놀리지
www.finetechnology.co.kr
경남 양산시 어곡공단1길 10
TEL : 055)362-8110 FAX : 055)362-8113

PREMIUM LUBRICANTS

ZEO

Having accumulated know-how and technology more than 35 years.







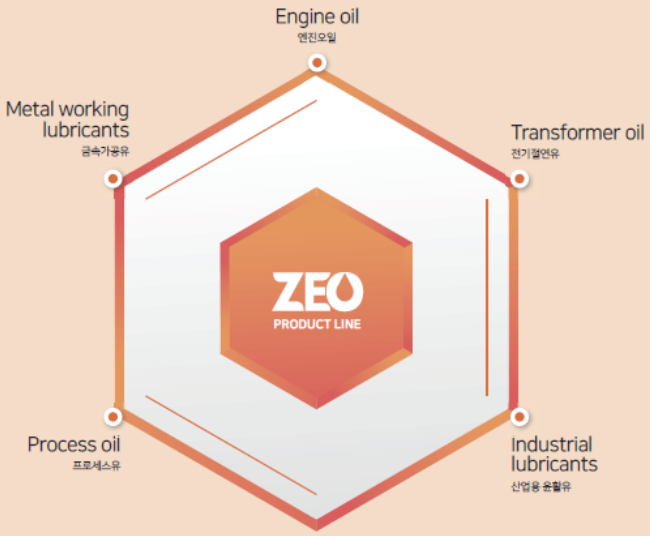






PRODUCT LINE

제우스유화공업 제품



본사및 부산공장
Head office & Busan factory
부산광역시 사상구 낙동대로 943번길 105 (감전동)
TEL:(051)315-8182~4 FAX:(051)326-2118
http://www.zeusoil.co.kr
sales100@zeolub.com

울 산 공 장
Onsan factory
울산광역시 울주군 온산읍 당월로 402
TEL:(052)239-8006 FAX:(052)239-8007

화 성 공 장
Hwasung factory
경기도 화성시 서신면 전곡리 1105-5번지 (전곡산업단지 내)
TEL:(031)366-8168 FAX:(032)714-3917 (031)357-6386

2025 NEW

대한민국 No.1
골프&러닝워치



AI 캐디, 보이스캐디

VOICE CADDIE®

T12 PRO



대한민국 러닝워치

NU:RUN

R21

부산대학교 공과대학 탄소중립기후변화학과 소속 일반대학원

수소미래에너지융합전공
26학년도 전기 신입생 모집

2025.12.01(월) - 12.05(금)

부산대학교 & 한국생산기술연구원
학과공동운영

학연협력플랫폼사업
(과학기술정보통신부 지원사업)

교육 Track 구성
수소생산 / 수소저장 / 수소활용

모집인원

• 석사과정 (00명) • 박사과정 (0명) • 석/박사 통합과정 모집

지원자격

- 석사과정 : 국내/외 대학에서 학사학위 취득(예정)자
- 박사과정 : 국내/외 대학에서 석사학위 취득(예정)자
- 석/박사과정: 국내/외 대학에서 학사학위 취득(예정)자

* 법령에 의하여 위 항과 동등 이상의 학력이 있다고 인정된 자

모집일정

서류접수 2025.12.01 (월) - 2025.12.05 (금)
면접고사 2026.01.08 (목)
합격발표 추후공지
접수방법 부산대학교 일반대학원 홈페이지 참조

제출서류 및 지원안내

원서접수 **부산대학교 입학정보 홈페이지** (http://go.pusan.ac.kr)
홈페이지 > 대학원 입학홈페이지 > 2025학년도 전기 일반대학원 모집요강공고(수정)
진학어플라이 (http://jinhakapply.com)

전공문의 부산대학교 수소미래에너지융합전공 (051-510-3778)
담당자 이메일 (kk0912@pusan.ac.kr)

모집학과 및 전공

부산대학교 & 한국생산기술연구원 공동융합 일반대학원
부산대학교 공과대학 - 탄소중립기후변화학과 - 수소미래에너지융합전공

교육 Track 구성

수소 생산 그린수소 생산을 위한 촉매, 단위셀 및 시스템분야 전문인력 양성
수소 저장 수소저장/ 운송용 소재, 장비, 시스템분야 전문인력 양성
수소 활용 수소연료전지, 수소발전 등 수소에너지활용분야 전문인력 양성

참여교수 및 연구분야

부산대학교

최경민 교수
연구분야 | 연료전지, 에너지시스템 사이클해석

염은섭 교수
연구분야 | 유동계측 및 가시화, 전산해석

권세훈 교수
연구분야 | 나노박막, 에너지 저장 및 변환

제정호 교수
연구분야 | 촉매기술, 수소생산 및 저장

황진율 교수
연구분야 | 기계공학, 난류유동, 전산해석

이제명 교수
연구분야 | 조선해양공학, 수소선박

헬레나 교수
연구분야 | 플라즈마 화학, 탄소촉매

김민철 교수
연구분야 | 신재생에너지소자, 나노소자

이경훈 교수
연구분야 | 항공우주공학, 모델차수축소

KITECH
한국생산기술연구원

이만식 교수
연구분야 | 촉매합성, 고부가가치화, 수소활용

김수한 교수
연구분야 | 촉매 및 공정 개발, plasma chemistry

김동현 교수
연구분야 | 3D프린팅, 시뮬레이션, 알고리즘 개발

임동하 교수
연구분야 | 공정설계, 에너지 및 물질수지

지창욱 교수
연구분야 | 용접소재 & 설계, 공정최적화

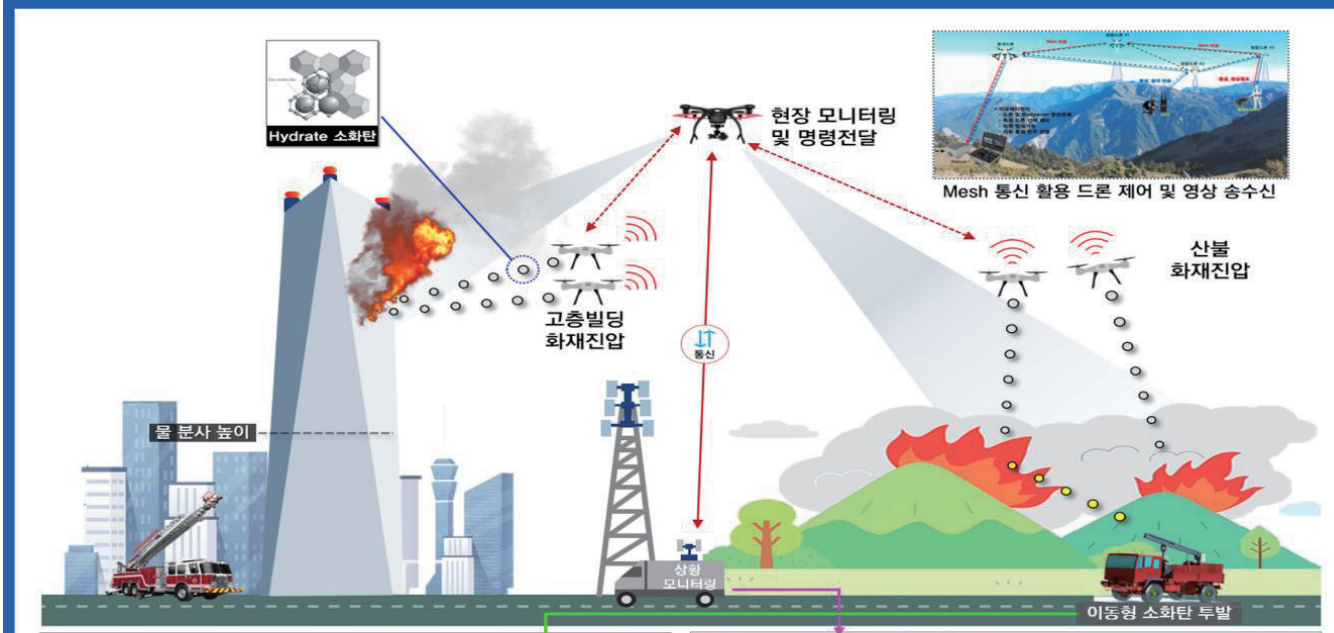
김태효 교수
연구분야 | 소자의 전기화학적 평가

부산대학교 PUSAN NATIONAL UNIVERSITY
KITECH 한국생산기술연구원

난접근성 특수화재 진화를 위한 고기능성 소화탄 및 무인 능동진압 기술개발

KITECH 한국생산기술연구원

최종 목표



추진 체계

다부처 공동사업

난접근성 화재 대응을 위한 가스하이드레이트 소화탄 및 화재 진압 기술개발

산업통상자원부

01 청정소화가스가 주입된 고기능성 가스하이드레이트 소화약제 제조 기술

▶ 소화약제 제조/생산 및 저장/운반 공정 최적화



- 한국생산기술연구원: 가스하이드레이트 소화약제 제조 및 화재별 성능평가 및 50kg/h급 소화약제 대량생산 공정 수립
- 동아대학교: 가스하이드레이트 소화약제 핵심 물성 확보
- 유니온: 하이드레이트 소화약제 대량 생산/저장/수송 공정
- 부산대학교: 소화약제 분말입자 안정화 및 뭉침기술 개발

소방청

02 가스하이드레이트 소화탄 제조기술 및 투척 장치 개발

▶ 소화탄 화재 적용 검증 및 기술기준(안) 마련



- 소방기구제작소: 가스하이드레이트 소화탄 제조 및 공정기술 개발
- 부산대학교: 가스하이드레이트 소화탄 탱창제 개발
- 소방산업기술원: 용도별 소화탄/소화기구 기술기준(안) 개발
- 에스엔: 하이드레이트 소화탄용 이동식 투발시스템 개발
- 쓰리디오토메이션: 하이드레이트 소화탄 생산공정 시스템 개발
- 파미티: AR 기반 개인용 투발 플랫폼 개발

과학기술정보통신부

03 AI 화재확산 감지 및 소화탄 활용 화재 대응 지원 시스템

▶ AI기반 화재 감지 및 화재대응 시스템 구축



- 지디엘시스템: 다중센서 활용 AI기반 화재 평가 및 지원시스템 개발
- KISTI: 화재영상 불꺼리 마스킹 및 미세 알고리즘 고도화
- 그리폰다이나믹스: 화재감지 및 소화탄 활용 매커니즘 시스템 지원
- 연세대학교: 화재영상 데이터 기반 화재평가 및 대응모듈 개발
- 미소테크: AI기반 화재 평가용 화재영상 기계학습데이터 개발
- 부산대학교: AI센서 기반 화재정보 연산 및 디지털 트윈기법

행정안전부

04 가스하이드레이트 소화탄 화재 현장 적용 시스템

▶ 소화탄 화재 현장 적용 및 대동 매뉴얼 개발 구축



- 부산테크노파크: 고층화재 대응 프로세스 개발 및 현장능력 검증
- 경남테크노파크: 산불화재 모사 및 소화탄 성능검증/대응매뉴얼 개발
- 그리폰다이나믹스: 화재 진압용 소화탄 탑재 드론 플랫폼
- 카토즈: 소화탄 저장설비 및 드론 연계 시스템 구축
- 경남대학교: 화재 모사를 통한 유형별 소화탄 성능 검증
- 대동계측: 드론 시스템 연계 강화유리 파공 장치 개발

기대 효과

지원부처	참여기관
산업통상자원부 행정안전부 과학기술정보통신부 소방청	KITECH 외 2개 기관 소방기구제작소 외 4개 기관 지디엘시스템 외 4개 기관 부산TP 외 5개 기관

과학·기술적 측면

- 소화가스와 물 분자가 결합된 가스하이드레이트를 소화약제로 사용시 신속한 화재진압 가능
- 하이드레이트 소화탄은 대량의 소화가스 및 물이 분출되며, 원거리 투척 가능하여 효율적 화재진압 가능
- 소화탄 탑재 드론에 AI기능을 부여하여 화재 진압 임무수행이 가능한 고성능 제품으로 개발
- 산불 및 고층 화재 등 난접근성 소화에 대한 새로운 패러다임 제공

경제적·산업적 측면

- 가스하이드레이트 기반의 소화약제는 신개념 소화약제로, 원천기술 선점을 통한 경쟁력 제고
- 소화탄의 안전성 및 소화효과 홍보를 통한 국외 기술이전 및 수출 창출
- 영상 기반 지동형 소화 프로세스 및 능동진압 관제 시스템 구축을 통한 관련 세계 시장 선도
- 5,000억원 이상 규모의 세계 소화약제 시장에 진출할 수 있는 교두보 마련

사회적 측면

- 소화 후 잔여물을 남기지 않는 하이드레이트를 이용하여 소화약제에 의한 2차 피해 최소화
- 원거리 투척이 가능한 소화탄을 이용하여 장거리 화재 진압 및 인명피해 최소화
- 화재 진압용 드론 시스템을 산불 및 고층 건물 화재 등 소화에 시범 적용
- 신개념 소화 플랫폼 개발을 통해 사회적 대형 재난 대비 안전망으로 국가 안전에 기여

성과 활용 방안



기업수요 대응 차세대 이차전지 소재 선도연구센터

Industry-Responsive Next-generation Battery Materials Regional Leading Research Center (IR-NBM RLRC)

충북대학교 CHUNGBUK NATIONAL UNIVERSITY

센터소개

센 터 명

기업수요 대응 차세대 이차전지 소재 선도연구센터

센터 목표

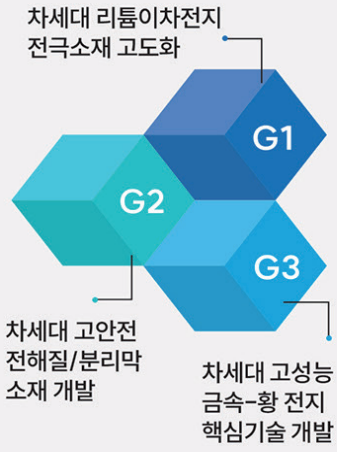
충청권역 이차전지 기업수요 맞춤형 기초-원천기술 개발 및 차세대 연구 R&D 전문 인력 양성

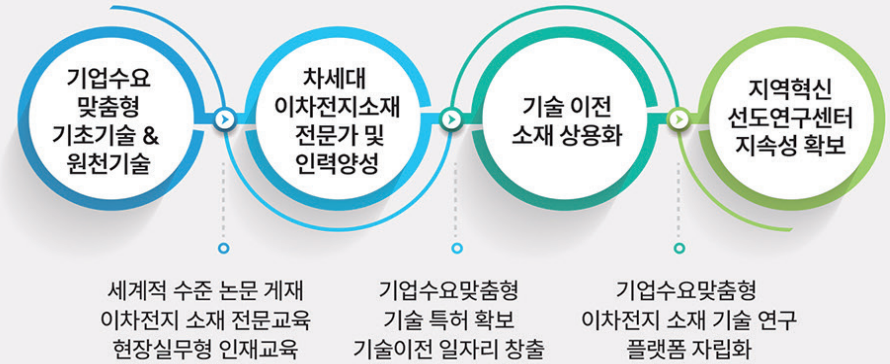
- 센 터 장 | 충북대학교 화학공학과 정상문 교수
- 사 업 기 간 | 2023. 07. 01. ~ 2030. 02. 28.(7년)
- 총 사 업 비 | 107억원(현금기준)
- 지 원 기 관 | 과학기술정보통신부 NRF 한국연구재단
- 주관연구기관 | 충북대학교
- 참 여 기 업 | EcoPro BM, CSIM, 더블유씨피(주), Puree chem, EasyChem
- 참여지자체 | 충청북도, 청주시

연구목표

충청권 미래 모빌리티 산업생태계 조기 구현을 위한 이차전지 핵심소재 원천 기술개발 및 고도화

기업수요 대응 차세대 이차전지 소재 선도연구센터 (IR-NBM RLRC)





연구협력 및 네트워킹

기업수요

에코프로비엠, 이지켐, CSIM, 더블유씨피, 퓨리켐

- 기업수요맞춤형 연구 주제 공동 기획 및 실행
- 이차전지 기업 차세대 연구 R&D 전문 인력 수급

지역산업생태계

충청북도, 청주시

- 이차전지 관련 충청지역 산-학-연 네트워크 구축
- 충청권 미래 모빌리티 산업생태계 조기 구현

연구특화

한국원자력연구원, 한국전자기술연구원
충북테크노파크, 한국기초과학지원연구원

- 고도 분석 장비 활용을 통한 기술 개발 원천성 확보 계획 구체화

국제공동연구

- 이탈리아 La Sapienza
- 미국 PNNL
- 독일 HIU

센터문의

충청북도 청주시 서원구 충대로1, E8-8동 110호(행정실) | E8-10동 209호(연구센터)
Tel. 043-249-1681, 1689 Homepage. http://ir-nbmrlrc.chungbuk.ac.kr/

SK picglobal

Our Journey to Sustainable Growth

Improving Quality of Life

SK picglobal은 ESG 기반의 지속가능한 성장을 통해 삶의 질을 높이는
글로벌 친환경 소재 전문 기업으로 도약해 나가겠습니다.

국내 최초 PO 생산 성공



세계 최초 친환경 PO 생산 공법 상업화 성공



PG 중심의 고부가/친환경 제품



Global Partnership을 통한 성장 기회 확보





SK 피아이씨글로벌 SK picglobal

한국요업주식회사

한국요업㈜는 최고의 제품, 최상의 품질과 차별화된 서비스를 기반으로 한국은 물론 전세계 건축문화 발전에 기여하고 있습니다.
울산광역시 온산 국가공단 내 최첨단의 생산설비를 갖추고, 외장 및 바닥타일을 전문으로 생산 공급하고 있으며,
내장재타일은 해외의 엄선된 자사 OEM 공장을 통해 수입 공급하는 종합 타일 전문 회사 입니다.
또한 한국요업㈜는 온산국가공단, 석유화학공단의 특징적인 촉매 기술을 개발하여 세라믹 회사로 발돋움하고 있습니다.
향후에도 지속적인 연구 개발을 바탕으로 “언제나 고객과의 새로운 만남” 이라는 슬로건으로 품질, 영업, 서비스 등의
전 부문에서 최선의 노력을 다할 것을 약속 드립니다.



INNOBIZ 기술혁신형중소기업 | ISO 9001 / 14001 / 45001 | ASME

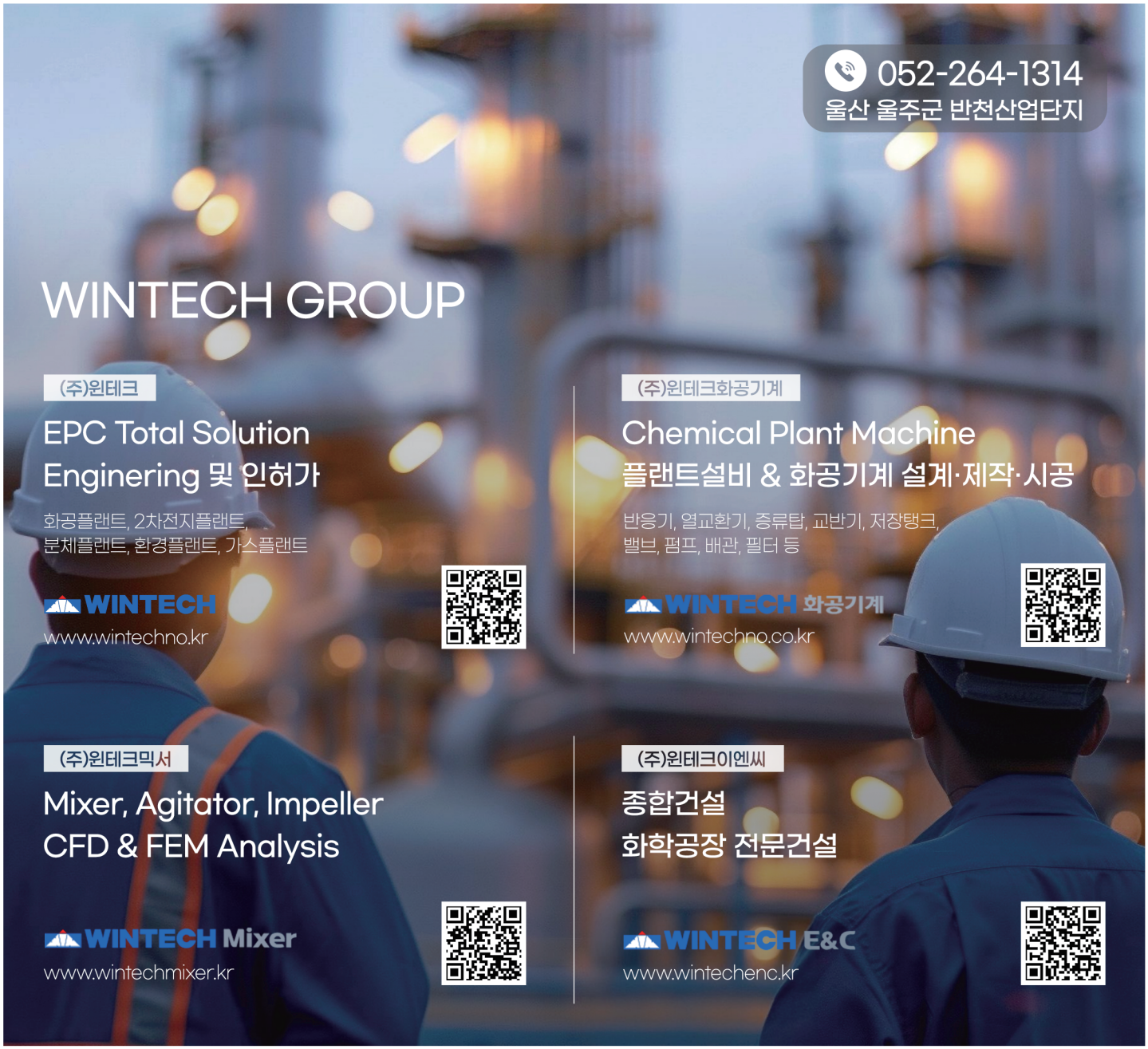
KITA 한국무역협회 수출의 탑

Chemical Plant EPC Total Solution

WINTECH

플랜트 산업의 혁신을 주도하는 기업 (주)윈테크

화공플랜트, 2차전지플랜트, 분체플랜트, 환경플랜트, 가스플랜트
플랜트 설비 & 화공기계 설계 · 제작 · 시공



YOUNG IN Chromass



chrozen
TQ LC/MS



chrozen
HPLC



chrozen
GC



chrozen
TQ GC/MS

chrozen Family

aquapuri 5
(Water Purification System)



aquapuri Essence
(Water Purification System)



Advion
Compact Mass Spectrometer



전용 분석 시스템

전처리부터 데이터 관리,
소모품까지
– 전 과정을 아우르는
통합 솔루션 제공

정밀 분석기기 국산화 선도

HPLC, GC, 질량분석기, 초순수
제조장치 등 지속적인 연구개발로
분석기기 국산화 선도

고객 맞춤 서비스

자체 개발·생산 기반의
경제적이고 효율적인
맞춤형 서비스 제공

YOUNG IN Chromass

영인크로매스 경기도 안양시 동안구 안양천동로 60
TEL 031-428-8700 | FAX 031-428-8787 | E-mail mkt@youngincm.com | www.youngincm.com

한국폴리텍대학 석유화학공정기술교육원
(XR 기반 체험형 산업안전센터

XR 기반 체험형 산업안전센터

설립 목적

산업현장에서 발생할 수 있는 누출, 폭발, 화재 등 주요 사고 상황에 효과적으로 대응할 수 있는 역량 강화를 위해, 울산·여수·대산 등 석유화학산업 및 관련 산업군의 신규 인력(일학습병행과정)과 재직자 대상으로 이론교육으로는 체득하기 어려운 고위험 작업 환경을 실제와 유사하게 체험할 수 있는 가상현실(VR)·확장현실(XR)기반의 산업안전 체험 교육장을 설립하였습니다.
이를 통해 기계·전기·가스·화공 등 다양한 위험 상황을 가상현실에서 직접 경험함으로써, 산업재해 발생 시 현장 대응능력을 실질적으로 높이고자 합니다.

연혁

2021 **일학습병행 공동훈련센터 실감형콘텐츠(VR·AR) 개발지원사업 선정**
- 과제명 : XR (eXtended Reality)기반 체험형 산업안전 콘텐츠(누출·폭발·화재) 개발
- 과제기간 : 2021. 6. 1. ~ 2022. 2. 28.(9개월)
- 과제금액 : 4억원

2022 **XR 기반 체험형 산업안전(누출·폭발·화재) 실습실 개관**
일학습병행 실감형콘텐츠 개발활용 지역별체험센터 선정
- 기간 : 2022. 9. 28. ~ 2022. 12. 31.(3개월)
- 실적 : 총 763명 활용(확산활동 501명, 기타훈련 238명, 일학습 4개기업 24명)

2023 **일학습병행 실감형콘텐츠 지역별체험센터 역할 고도화 선정**
- 기간 : 2023. 5. 22. ~ 2023. 12. 31.(7개월)
- 실적 : 총 827명 활용(확산활동 522명, 기타훈련 281명, 일학습 4개기업 24명)

2025 **일학습병행 실감형콘텐츠 지역별체험센터 선정**
- 기간 : 2025. 5. 20. ~ 2025. 12. 31.(7개월)

한국폴리텍대학 석유화학공정기술교육원

입학이 곧 취업

한국폴리텍대학 석유화학공정기술교육원은 4차 산업혁명 시대를 리드하는 글로벌 기술인재 양성 대학입니다.



현장 실무형 학사제도

산업체와 연계한 프로젝트 수업 기반의 PBL 시스템 융합형 교과과정을 운영함으로써 신기술 융합형 기술인재를 양성하고 있습니다.



정부 운영 국책대학

한국폴리텍대학은 고용노동부 산하 우리나라 대표 평생직업능력개발 국책대학입니다.



맞춤형 진로설계

입학부터 졸업까지 교수와 학생 1:1 밀착 지도로 졸업 후까지 책임지고 관리하고 있습니다. 소그룹 지도교수제 운영으로 학생과 교수 간 지속적인 커뮤니케이션을 강화하고 있습니다.



초음파기술의 파이오니어 .. **미래초음파기술**

1997년 설립한 이래 20여년간 Sonochemistry 분야를 개척하고 있는
미래초음파기술은 전자 • 화학• 바이오 •환경분야의 파트너입니다.

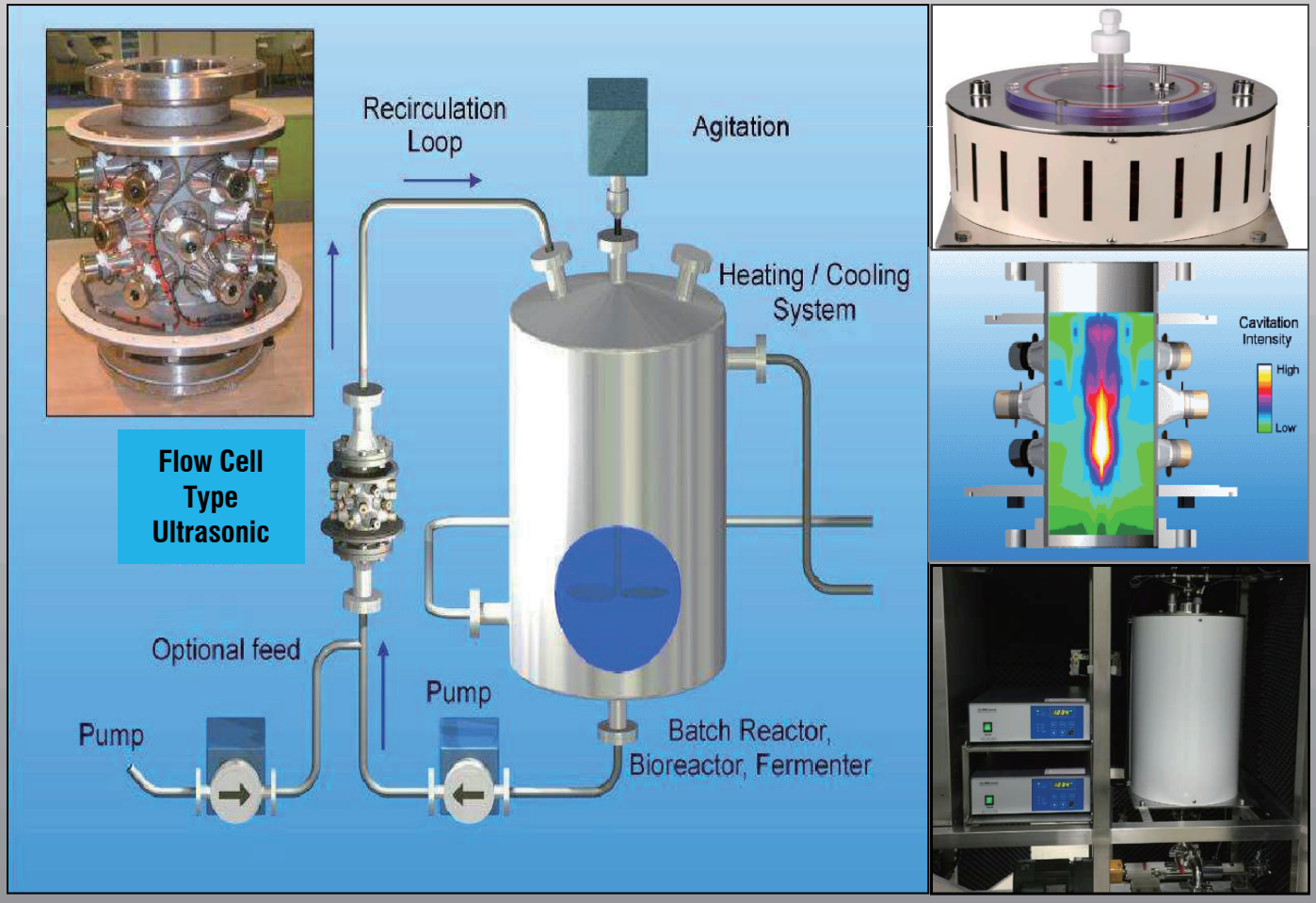
Sonochemistry : New Opportunities for Green Chemistry

Main Product

- **Flow Cell Type Ultrasonic**
- **Large scale Sonotrode Ultrasonic**
- **In line type Ultrasonic Treatment System**
- **Batch type Ultrasonic Treatment System**

Application

- **Bio-Diesel • Extraction • Homogenizing • Mixing • Dispersion**



MIRAE ULTRASONIC TECH. CO.

14502 경기도 부천시 원미구 평천로 655 부천테크노 파크 402동 1101호

T 032-234-6661 / F 032-234-6663 http//www.msonic.co.kr



사업분야

정비사업



- Rotating Equipment
  - Liquid Pump, Compressor, Fan & Blower
  - Turbine, Gwnerator, Motor
  - Mixer, Gear Box, Agitator
  - Cooler, Cooling Fan, Extruder
- Stationary Equipment
  - Heater, Heat Exchanger
  - Dryer, Scraper
  - Pressure Vessel
  - Marine Loading Arm

건설사업

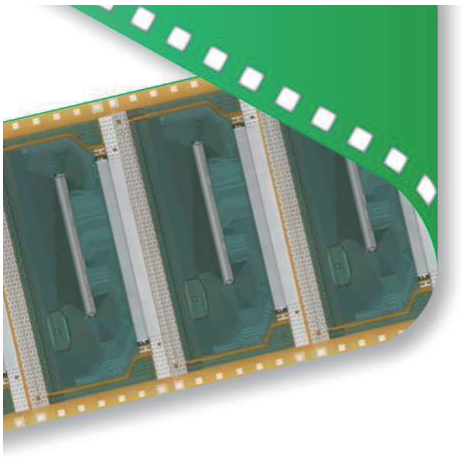


- Installation of Equipment
- Foundation Site
- Marine Structure
- Exchange of Tank
- Remodeling of Equipment

엔지니어링 사업



- Equipment Design & Modification
- Test & Instrumentation
- Vibration Analysis
- Aligenment





THE BEST PARTNER UNIS

UNIS

Developing fine chemicals for semiconductor components

Developing special alloy-plating chemicals and researching process technology

Developing fine chemicals for printed circuit boards and researching plating technology

Developing chemicals for manufacturing processes of various industries



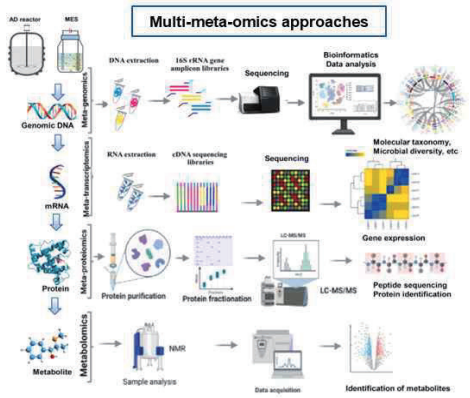
UNIS

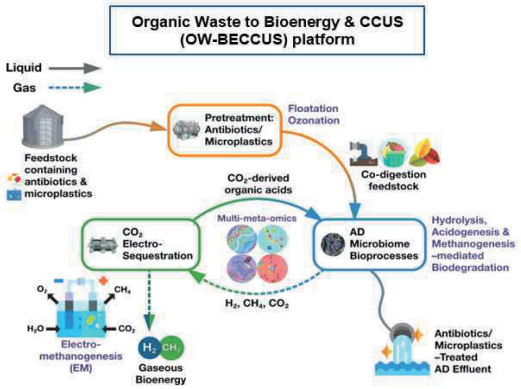
uniss.asia

ISO 9001/ ISO 14001

Global Leading Specialty Chemical Company Profile

Headquartered 1394, Nakdong-daero, Sasang-gu, Busan, Republic of Korea
Factory2 360-9, Samnak-dong, Sasang-gu, Busan, Republic of Korea
Factory3 384-3 Deokpo-dong, Sasang-gu, Busan, Republic of Korea
Tel 051-303-5080 I **Fax** 051-303-6080





OW-BECCUS 플랫폼 기반 항생제/미세플라스틱 제어 기초연구실

주관기관: 한양대학교 산학협력단

총괄책임자: 전병훈 교수

문제 제기

1. 코로나 19의 전세계적 범유행 및 육류 소비의 증가에 따라 **항생제의 사용량 증가**
2. **인간의 활동**에 따라 **미세플라스틱이 발생**되며 특히 세탁과정에서 다량 발생
3. **미세플라스틱은 항생제**를 흡착하여 운반 및 항생제 내성균을 증폭함으로써 **인간 및 생태계에 악영향**을 끼침
4. **혐기소화**는 다양한 박테리아를 이용한 다단계 생화학과정으로 **바이오에너지 생산 및 항생제/미세플라스틱 분해**가 가능함
5. 그러나 바이오에너지 생산과 항생제/미세플라스틱 분해 등 다양한 원핵생물 개체군 대상의 **종합적인 연구/검증 시도가 전무**한 실정

항생제/미세플라스틱 혐기소화 처리

마이크로바이옴 영향 규명

OW-BECCUS 플랫폼 구축

기초 연구실 비전

- 본 기초연구실은 항생제/미세플라스틱의 배출 증가에 따른 **인류의 건강 및 생활환경의 위험 해결과 친환경 바이오에너지를 확보**하기 위한 **OW-BECCUS 플랫폼을 구축**하고자 함
- 이를 위해, **Multi-meta-omics 접근 및 2단 혐기소화조**의 상호보완적 공동연구를 수행하고자 함: 항생제 미세플라스틱의 혐기소화조 내 영향 규명, 바이오가스 유지/향상 및 CO_2 포집 및 활용 등
- 또한, **혐기소화조 내 영향 및 인간에게 미칠 영향의 상호비교**를 통해 공동연구를 수행하고자 함: 산모, 신생아 등 환경 취약한 계층의 영향 분석 및 대응방안 개발

OW-BECCUS 플랫폼 기반 혐기성 소화조 내 항생제 영향에 따른 마이크로바이옴의 바이오에너지 생산 기초 연구

Cross-disciplinary 추진 체계

전병훈
- OW-BECCUS 플랫폼 생물적 구성요소 전반 multi-meta-omics 기술 적용 파이프라인 구축 및 활용
- Multi-meta-omics 로 도출된 핵심 신규 지식 기반의 OW-BECCUS 플랫폼 고도화 전략 도출 및 적용

MES-EM 생물막 Microbiome — AD Microbiome — Human Gut Microbiome

바삭 비크람
- MES-Electromethanogenesis
- 바이오가스 내 (또는 LNG 개질 공정 유래) CO_2 배출 최소화 고정 기술 연구 및 적용

AD-MES 공정 연계

정 우 진
- AD 유입/유출 미세플라스틱 분석 및 저감
- OW-BECCUS 적용 2단 AD 바이오에너지 공정 개발 및 구축

항생제 미세플라스틱 영향 종합 공동 연구

박 현 경
- AD 유입/유출 항생제 분석 및 저감
- 항생제/미세플라스틱의 인체 마이크로바이옴 대상 영향 분석 (Human gut 모사환경)



Anaerobic Digestion
- Stand-alone microbiome
- Higher microbial diversity (10+ phyla)
- Substrate is solely utilized by the microbes
- Ultimately produces CH_4, CO_2 and AD sludge, resulting CO_2 can further be sequestrated (EM)
- Low water loss (AD sludge: 1–3 % total solids)
- Subjected to relatively lower concentration of antibiotics

Engineering
- Comprised of anaerobic microbiota
- Metabolizes organic matter
- Produces semi-solid byproducts with fertilizing traits
- Dominating phyla: Firmicutes, Proteobacteria, Actinobacteriota, Bacteroidota
- Archaea-mediated methanogenesis
- Directly affected by antibiotics

Medicine

Human Gut



- Direct connection to the health of the host
- Lower microbial diversity
- The host absorbs significant portion of the metabolites, resulting CO_2 is emitted through breathing
- Ultimately produces feces with +50 % microbial biomass
- High water loss (Feces: ~25 % total solids)
- Can be subjected to very high concentration of antibiotics

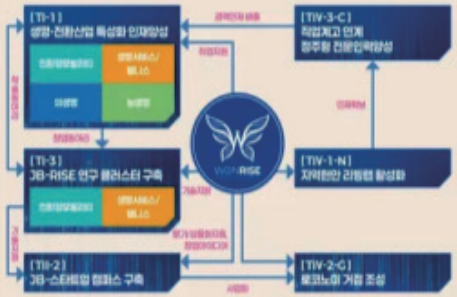
WONRISE 원광대학교 전북 지역혁신중심 대학지원체계

원광대학교 RISE사업단

비전

01 인구절벽기, 산업 및 사회수요, 미래 세대의 변화
02 국내외 청년이 찾는 지역, 창의적 인재가 육성되는 지역
03 개인의 역량이 발휘되는 산업생태계와 정주문화 조성
04 지·산·학·연 협력 활성화 및 지역 일자리 창출
05 행복한 삶을 영위할 수 있는 지속가능한 지역

추진 체계



RISE 지·산·학·연 협력체제

지자체(3)	익산시, 남원시, 임실군
교육기관(3)	전북특별자치도교육청, 원광보건대학교, 전주비전대학교
산업체(91)	(주)참프레, (주)풍림파마텍 ,(주)황등산업, (주)진우에스엠씨 등
혁신기관(11)	한국식품산업클러스터진흥원, 전북바이오융합산업진흥원 등



트랙 1.1 JB-SPARK 생명·전환산업 혁신

생명·전환산업 특성화 인재양성

산업분야	참여교수	협업기관	총 학생
농생명	김철민 외 11명	FOODPOLIS 외 28개	490
웰니스	이숙현 외 40명	황등산업 외 29개	2,198
의생명	권오상 외 43명	풍림파마텍 외 12개	2,058
모빌리티	이승재 외 33명	전주비전대학교 외 17개	1,149
소계			5,895

농생명

스마트팜에서 푸드테크까지, 혁신을 이끄는 농생명 인재양성

SAFTI-Won사업 Sustainable AgriFoodBio Talent for Innovation
- 스마트팜·종자
- 푸드테크
- 미래농업/환경

생명서비스

웰니스 삼(자연·몸·마음)·삶 문화 인재양성

LIFE-E 사업 Leader wellness purpose regional FrIEndly, innovative EduLab
- 마음 중심
- 자연 중심
- 물 중심

의생명

삶의 질 향상을 위한 바이오소재 전주기 전문인력양성

RELAX 사업 Regional Edulab for Long, healthy and Active eXuberance
- 기능성 바이오 소재
- 기능성물질 생산
- 유효성·안전성

친환경모빌리티

미래형모빌리티 기술융합혁신인재양성

SPECIAL-E 사업 Special Purpose ECo-friendly, Intelligent Automotive EduLab
- 특장·농기계
- AI·XR 분야
- 친환경 분야

트랙 1.3 JB-SPARK 생명·전환산업 혁신

JB-RISE 연구클러스터 구축

산업분야	참여교수	협업기관	총 학생
웰니스	민경철 외 42명	국립전안고원산림치유원 외 23개	1,465
모빌리티	심재오 외 17명	JIAT 외 6개	816
소계			2,281

생명서비스

통합적 웰니스 문화 산업 프로그램 개발 및 기술고도화

LIFE-R 사업 Leader wellness purpose regional FrIEndly, innovative Research-cluster
- 마음
- 자연
- 몸

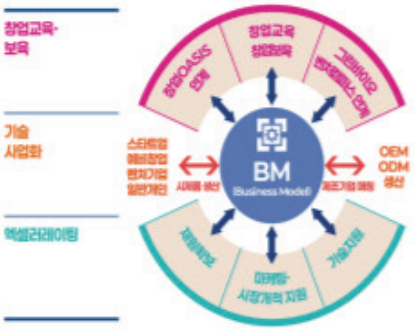
친환경모빌리티

미래형모빌리티 융합기술개발

SPECIAL-T 사업 Special Purpose ECo-friendly, Intelligent Automotive TechLab
- 소재
- 자동화 부품
- 시스템

트랙 2 JB-ROOT 지역 주력산업 성장

JB-스타트업 캠퍼스 구축



트랙 4 JB-TEAM 동행협력 지역발전

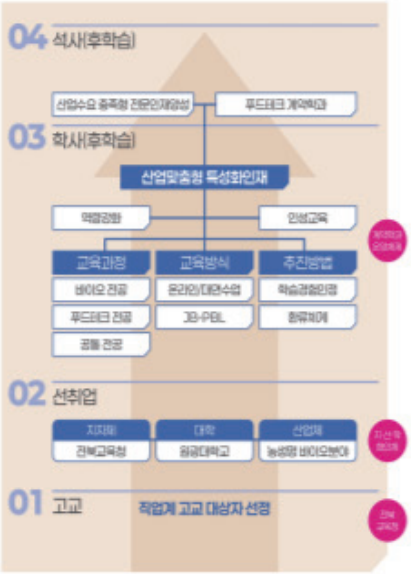
[남원] 곤충 이노베이션 리빙랩

신공법 원료 생산	곤충산업거점단지 운용 및 스마트시스템 도입	시제품 개발 및 실증
남원시, 남원시바이오연구원	의해과, 식품생명공학과	한국식품산업클러스터진흥원, (주)황조아

[임실] 반려동물친화도시를 위한 도약

반려동물 전북도시거점 구축	반려동물 전문 인력양성	반려동물 관광·산업 브랜드화
임실군 해건치즈가	반려동물산업학과, 동물보건학과	붐볼, 협동조합나무

선취업·후학습 농생명·바이오 계약학과



WonRISE와 전북특별자치도와 함께 더 큰 미래를!

Tel. 063-850-7998
E-mail. bon7998@wku.ac.kr
wonrise.wku.ack.kr
54538 전북특별자치도 익산시 익산대로로 460
원광대학교 RISE 사업단

교육부 NRF 한국연구재단 전북특별자치도 JB지산학협력단 원광대학교 WONRISE

KETEP 한국에너지기술평가원

미세조류를 이용한 탄소저감형 바이오항공유 업그레이드용
바이오오일 생산 통합시스템 개발

주관연구책임자 박 명 수 엔텍스(주)

참여기관연구책임자 홍 수 열 ((주) 씨엔에스아이엔티), 전 병 훈 (한양대학교)
정 우 진 (경기대학교), 최 상 규 (한국기계연구원)

EnTeCs · CNS INT · 한양대학교 HANYANG UNIVERSITY · KGU 경기대학교 · KIMM 한국기계연구원

주관기관 — 엔텍스(주)
저에너지 소비형 연속식 하이브리드 수열액화 공정 개발 및 생산 공정 통합관리 시스템 구축

공동기관1 — (주)씨엔에스아이엔티
CO_2 저감형 미세조류 바이오매스 대량 생산 공정 및 시스템 개발

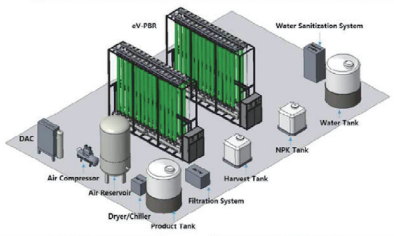
공동기관2 — 한양대학교 산학협력단
바이오항공유 업그레이드용 정제기술 개발 및 액상 부산물 활용 Biofertilizer 가용화 연구

한국형 바이오항공유 업그레이드용 미세조류 활용 바이오오일 생산 통합시스템

공동기관3 — 경기대학교 산학협력단
수열액화 공정 연구 및 부산 하이드로차 활용 제제 개발

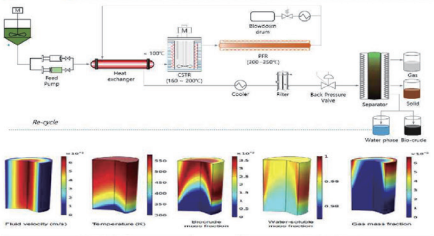
공동기관4 — 한국기계연구원
수열액화설비 유동 해석 모델 개발 및 반응 특성 동시 분석

주요공정 01 CO_2 저감형 미세조류 대량생산 및 공급 시스템



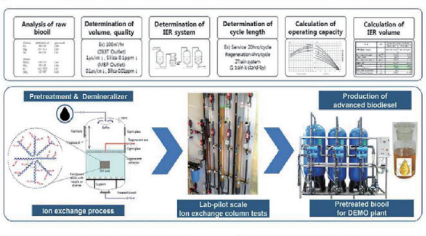
연속형 미세조류 대량 배양기술 및 CO_2 재활용 기술

주요공정 02 바이오 원유 생산을 위한 연속식 하이브리드 수열액화 공정 최적화



저에너지소비형 연속식 하이브리드 수열액화 공정 최적화

주요공정 03 바이오항공유 업그레이드용 바이오오일 정제 시스템



바이오오일 / 불순물 정제 시스템

한국형 바이오항공유 업그레이드용 미세조류 활용 바이오오일 생산 통합 시스템

연구과제 핵심 주안점

1	미세조류 대량생산	연속형 모듈화 미세조류 배양 시스템
2	저에너지 바이오오일 생산	연속형 하이브리드 수열액화공정 시스템
3	탄소저감/자원순환형 공정	발생 부산물(CO_2, Bio-fertilizer, 하이드로차) 재활용 시스템
4	2세부 연계 바이오오일 품질향상	수열액화반응 촉매 적용 및 후단 정제 시스템

탄소중립과 **자원순환**의 지속가능성을 추구하는 기업

NH RECYTECH



엔에이치리사이텍

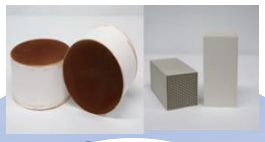
CERACOMB

Environmental Technologies

ceracomb (주) 세라컴

Technology





Catalyst

Excellent Catalyst and its Coating Technologies





Ceramic Honeycomb

Manufacturing the best quality Ceramic Honeycomb



Catalytic Converter



Environment Energy System

Offering the most suitable Engineering and Solutions

Products & Application

Catalyst

Exhaust Gas Purification

- **Gasoline Catalysts**
  - ✓ TWC
  - ✓ GHP
- **Diesel Catalysts**
  - ✓ DOC
  - ✓ DPF
  - ✓ SCR/SDPF
  - ✓ AOC

Environmental & Safty

- **Environmental Catalyst**
  - ✓ VOC
  - ✓ DeNOx
  - ✓ GHGs (PFCs, N_2O, CH_4)
  - ✓ HCHO&CO
- **Safety Catalyst**
  - ✓ Hydrogen removal

Hydrogen & Chemical

- **Hydrogen Production Catalyst**
  - ✓ Ammonia Cracking
  - ✓ LNG Reforming
    - SMR
    - WGS
    - PROX
- **Hydrogenation Catalyst**

Material

Adsorbent Filter-1

- **Fuel Vapors Adsorbent**
  - ✓ Canister Filter
- **VOCs Adsorbent**
  - ✓ CHF(Carbon Honeycomb Filter)

Adsorbent Filter-2

- **Living Odor & VOCs**
  - ✓ ZDF (Zeolite Deodorant Filter)
  - ✓ ZHF

Substrate

- **Catalyst Support**
- **Heat Storage Media**

System / Device

After Treatment System

- **Diesel Engine ATS**
  - ✓ Genset
  - ✓ Vehicle
  - ✓ Marine

Adsorption/Desorption System

- **Carbon Honeycomb Filter System**
- **Zeolite Deodorant Filter System**

Hydrogen Eliminator

- **Hydrogen Removal System**
  - ✓ Nuclear Power Plant
  - ✓ Submarine

http://ceracomb.co.kr TEL : 041-531-0657 FAX : 041-531-0659 E-mail : ohs@ceracomb.co.kr

CRS ChemRe SYSTEM (주) 켐 리 시 스

(주) 켐리시스는 급변하는 화학시장에 발맞춰, 다채롭게 사용할 수 있는 화학 반응 장치 (고온 고압 반응기, 유리 반응기, 촉매 반응기, 초임계 추출 장치, 다목적 반응기, 소프트웨어 프로그램)를 개발/제작하고 있습니다. 25년의 경험과 기술력을 바탕으로, 젊은 인원들의 혈기왕성한 열정을 더하여 고객 여러분들이 원하시고 편리하게 사용하실 수 있는 다양한 장치를 구성하고 있습니다.

Reactor Model List

R-101 Model Metal High Pressure Bomb : 교반 없는 고압반응기
R-111 Model Glass High Pressure Bomb : 교반 없는 유리반응기
R-201 Model High Pressure Stirred Reactor System : 고온고압반응기
R-202 Model High Press Oven Reactor System : 오븐형 고온고압반응기
R-211 Model High Pressure Stirred Reactor System : 유리반응기
R-301 Model Catatest Reactor System : 촉매반응기
R-302 Model Oven Catatest Reactor System : 오븐형 촉매반응기

R-401 Model Supercritical Fluid Extractor : 초임계추출장치
R-402 Model Oven Type S.F.E : 오븐형 초임계추출장치
R-501 Model Automation p.H . Control Reactor System : 다목적 반응기
R-UHP Series Ultra High Pressure Reactor System : 초고압 반응장치
Software Program : 소프트웨어 프로그램
Magnetic Drive : 교반 장치



R-101



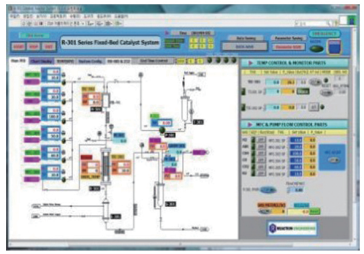
R-201



R-211



R-202



Software Program



R-301



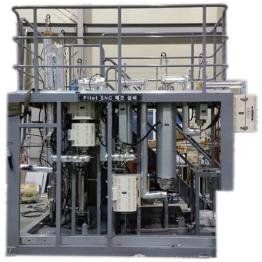
R-302



R-403



R-501



Pilot Plant

(주) 켐리시스
14059 경기도 안양시 동안구 흥안대로 427번길 16 (디지털엠파이어 101호, 1013-1014호)
T. 031-8069-5511~3 F. 031-8069-5515 H.www.chemresys.com M. heobaram@chemresys.com

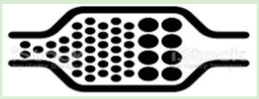
지역혁신클러스터육성 R&D(중추기술)

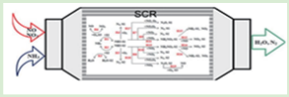
RIA 부산지역산업진흥원
Busan Regional Institute of Industrial Advancement

친환경선박 통합 대기오염물질 저감 및 에너지관리 시스템(플랫폼) 개발 사업단

친환경선박 통합 대기오염물질 저감 및 에너지 관리 플랫폼 및 서비스 개발

서비스


고성능 촉매 개발 및 교환주기 서비스

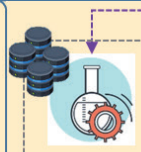


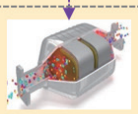
후처리 시스템 및 성능예측 서비스


연료 소모량 예측 서비스


최적 운항 서비스

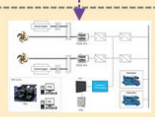
플랫폼

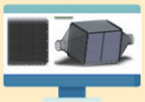

촉매 모델


후처리 모델



엔진 모델


전력 관리 모델

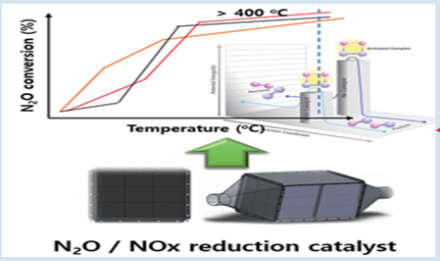

촉매 성능 예측


후처리 성능 예측

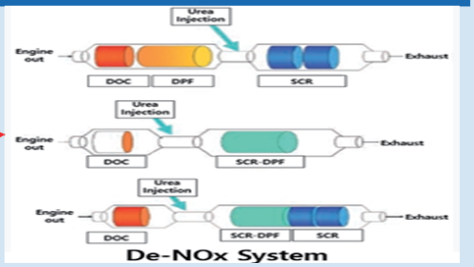

에너지 성능 예측

대기오염물질 저감 시스템 및 친환경 선박용 통합 관리 플랫폼 개발

(1세부) 고효율/고내구성 N_2O/NO_X 촉매 개발



(2세부) N_2O/NO_X 저감 후처리 제어 시스템 개발



(3세부) 하이브리드 전력 통합 관리시스템 개발



(총괄→1세부) 플랫폼을 통한 성능 예측
(1세부→총괄) 촉매성능모델 / 실험데이터

(총괄→2세부) 플랫폼을 통한 성능 예측
(2세부→총괄) 시스템성능모델 / 실험데이터

(총괄→3세부) 플랫폼을 통한 연료량 예측
(3세부→총괄) CO_2 Emission, 전력관리모델

외부 데이터

장비데이터



실선 데이터



기상 데이터

NOAA

플랫폼

플랫폼 서비스


촉매 성능/ 교환주기 서비스


후처리 시스템 성능 예측 서비스


연료 소모량 예측 서비스


최적운항 서비스

서비스 개발환경

Apache Tomcat
TensorFlow
JEUS
Open API

가상모델 개발


촉매 모델


후처리 모델



엔진 모델


선박 모델


전력관리 모델

데이터베이스

ORACLE
SAP
MariaDB
mongoDB
Tibero
DBMS

친환경선박 통합 대기오염물질 저감 및 에너지 관리 플랫폼

사용자


항해사

HMM
ONE
CMA CGM
Hapag-Lloyd
선주사


조선소/ 기자재 업체

[총괄] RIMS 중소조선연구원 [1세부] KITECH 한국생산기술연구원 [2세부] DH controls [3세부] KOMERI 한국조선해양기자재연구원

Troika Drive

고려아연의 신성장동력

자원 소재 산업의 불모지에서
오직 비철금속제련 사업 한길만 걸어온 고려아연은
끊임없는 혁신과 차별화된 기술력으로
세계 비철금속 시장의 일류 기업으로 성장해왔습니다.

이제 고려아연은 다시 새로운 도전에 나섭니다.
지난 50년간 축적해온 경험과 전문성을 바탕으로
"우리의 미션은 다양한 원료 및 에너지원을 가장 안전하고,
가장 친환경적이며, 가장 효율적인 방법으로
세상이 필요한 형태의 소재와 에너지로 전환하는 것입니다."

무엇보다도 안전과 환경의 중요성을 강조하고,
친환경과 순환경제의 미래 가치를 창출하는 혁신 기업
고려아연은 앞으로도 끊임없는 변화와
한계를 넘어선 혁신을 통해
지속가능한 미래를 개척해 나가겠습니다.

KOREA ZINC

한국청정기술학회 2025년도 30 주년기념

추계 총회 및 학술대회 초록집

2025 THE KOREAN SOCIETY OF CLEAN TECHNOLOGY FALL CONFERENCE
(30th Anniversary)

2025. 9. 24(수) ~ 27(토) 휘닉스 아일랜드 제주

주 최 : 한국청정기술학회

후 원 :

한국청정기술학회
KSCT The Korean Society of Clean Technology

국가의 미래를 위해 나아갈 길, 청정기술

(사)한국청정기술학회

문 서 번 호 청정기술 2025-33 (2025.7.18)

수 신 청정기술 전문가 및 소속기관

참 조

제 목 한국청정기술학회 2025년도 추계 총회 및 학술대회 (30주년 기념) 개최

1. 귀 기관의 무궁한 발전을 기원합니다.

2. 한국청정기술학회에서 2025년도 추계 총회 및 학술대회 (30주년 기념)를 아래와 같이 개최하오니 귀 기관의 소속 전문가가 참석할 수 있도록 협조하여 주시길 바랍니다.

- 아 래 -

가. 행 사 명: 한국청정기술학회 2025년도 추계 총회 및 학술대회 (30주년 기념)

나. 행사일시: 2025년 9월 24일(수)~27일(토)

다. 장 소: 휘닉스 아일랜드 제주

라. 등 록 비:

	정회원	학생회원
사전등록(9월 5일(금) 마감)	180,000원	100,000원
온라인/현장등록(9월 5일(금) 이후)	200,000원	120,000원

(사)한국청정기술학회장

한국청정기술학회 사무국[(02856) 서울특별시 성북구 안암로 119 한국화학회관 3층]
전화 070-7636-7939 / ksct@cleantechnol.or.kr / http://www.cleantechnol.or.kr

인 사 말



존경하는 한국청정기술학회 회원 여러분!!

안녕하십니까? 봄과 가을을 먼저 알리고 가장 정이 많은 학회 “한국청정기술학회” 제23대 회장 이만식입니다.

한국청정기술학회는 창립 30주년을 기념하여 '한국청정기술학회 2025년도 추계 총회 및 학술대회(30주년 기념)'를 아름다운 제주도에서 9월 24일부터 27일까지 개최합니다. 이번 행사는 한국청정기술학회가 지난 30년간 국내외 연구와 산업 발전에 기여한 업적을 기념하며, 앞으로의 30년을 위한 ‘확장성과 국제화’를 목표로 야심차게 준비된 자리입니다.

먼저 학회 창립 30주년을 기념하기 위해 1) 청정기술 30주년 기념 영상, 2) 과학기술 유튜브 인플루언서 초청, 3) 맥북 등이 포함된 차별화된 경품, 4) Special issue invitation(SCIE): Journal of Materials Chemistry A 외 4개 저널, 5) 30주년 공연 및 Gala Dinner 등이 준비되었으며, 특히 학회 확장성과 국제화를 위해 5개국 이상이 참여하는 6) 국제세션도 마련되어 있어 글로벌 교류의 장이 될 예정입니다.

이번 학술대회는 산·학·연 연계와 젊은 연구자들의 참여를 활성화하기 위해 여러 특별세션이 기획되었습니다. 산업체 주관의 세션은 고려아연, ㈜엔에이치리사이텍컴퍼니, 엔텍스(주) 등이 중심이 되어 이차전지와 미세조류를 이용한 청정기술을 주제로 산·학·연이 협력하는 자리를 마련하였으며, 한국생산기술연구원, 한국화학연구원, 한국에너지기술연구원 등 연구기관 주도의 세션과 충북대학교와 원광대학교가 중심이 되는 학계 세션이 진행되어 다양한 분야의 전문가들이 참여하는 풍성한 프로그램이 계획되어 있습니다.

또한 학회의 확장성과 국제화를 위해 1) 한국생산기술연구원을 중심으로 국내·외 최고의 연구자들이 참여하는 ‘가스하이드레이트 응용 및 청정기술(Gas Hydrate Application and Clean Technology)’과 2) 한양대학교를 중심으로 ‘첨단 청정기술(Advance Clean Technology)’라는 주제로 각 5개국 이상이 참여하는 국제세션이 마련되어 있으며, 차년도 부문위원회 신설 목표로 조선해양 분야 연구자들이 모여 ‘조선해양 청정기술’이라는 새로운 세션도 계획되어 있습니다. 이러한 다양한 세션들을 통해 이번 학술대회는 산·학·연이 함께하는 13개의 특별세션, 8개의 부문위원회(수소 및 재생에너지, 에너지저장, 에너지전환, 청정융합, 대기환경, 자원순환, 청정생산, 공정시스템) 일반 구두발표, 학생 구두발표 및 포스터발표 등으로 구성되어 역대 최대 규모로 진행될 예정입니다.

사랑하는 학회 회원 여러분!

아름다운 제주도에서 회원 여러분께서 마음을 모아 정을 나누고 소통하며 ‘청정기술’이라는 내용으로 가득 채워주시기를 희망합니다. 마지막으로 이번 행사의 성공을 위해 애써 주신 30주년 TFT 위원님들, 운영위원회, 부문위원장님들, 그리고 물심양면으로 후원해 주신 기관과 기업 관계자 여러분께 머리 숙여 감사를 드립니다.

고맙습니다.

2025년 9월

한국청정기술학회 회장 **이 만 식**

한국청정기술학회 2025년도 추계 총회 및 학술대회(30주년 기념) 진행표

9월 24일(수)	아일랜드볼룸A	아일랜드볼룸B	아일랜드볼룸C	윈드홀A	윈드홀B	스톤홀A	스톤홀B	스톤홀C
13:00~17:00	등 록							
13:00~17:00	**[30주년 기념 Gala Dinner]** 17:40~20:00	**[자문회의/ 부문위원장 회의]** 15:30~16:20 **[강연]** 16:30~17:00 **[추계 평의원회]** 17:00~17:30	**특별세션(XIII)** 한국생산기술연구원 저탄소 수소 통합시스템 기술 성과 발표 14:20~17:00	**특별세션(XI)** 친환경 이차전지 산업을 위한 고순도 탄산리튬 실증기술 및 ESG 대응전략 13:00~15:00	**특별세션(XII)** 조선해양 청정기술의 융합과 미래전략: 기후변화 대응 중심으로!! 13:00~17:40	**특별세션(I)** 이차전지 순환이용성 향상 기술 개발 Workshop (비공개) 14:00~16:15	**특별세션(II)** 동남권 학연협력플랫폼 (탄소중립선도 수소산업 전주기 밸류체인 구축) 성과공유회 15:00~17:10	**특별세션(III)** [원광대학교 RISE 사업단] 미래형모빌리티 융합기술개발 세미나 15:00~17:00
13:00~17:00	**홍보전시회 (2층 로비)**							

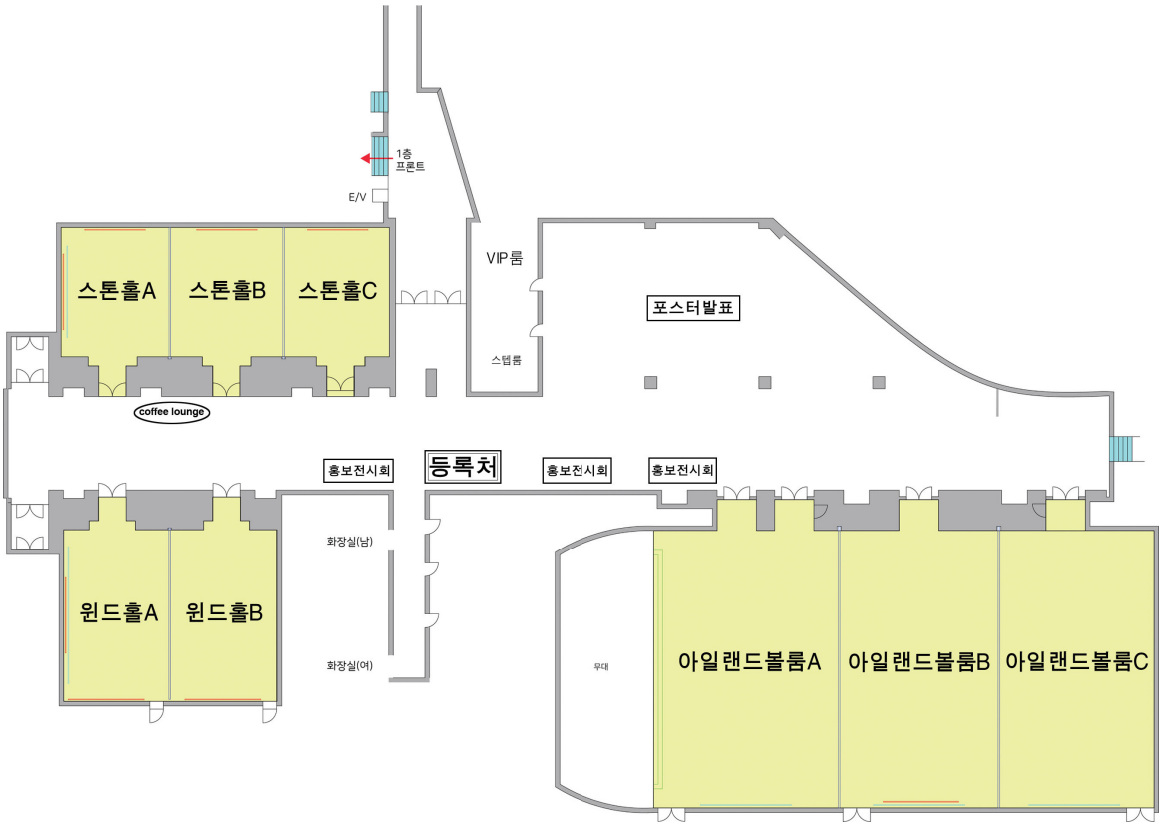
9월 25일(목)	아일랜드볼룸A	아일랜드볼룸B	아일랜드볼룸C	윈드홀A	윈드홀B	스톤홀A	스톤홀B	스톤홀C
08:30~17:00	등 록							
09:00~11:20	**특별세션(X)** 미세조류를 이용한 지속가능한 항공유 09:00~10:50	[일반 구두발표] 청정생산 09:00~11:15	**특별세션(IV)** (다부처) 화재 능동대응을 위한 소화탄 개발 및 활용 기술 심포지엄 09:00~11:30	[학생 구두발표I] 수소및재생에너지 09:00~10:30	[일반 구두발표] 자원순환 09:00~11:20 [학생 구두발표III] 11:20~11:30	[일반 구두발표] 대기환경 09:00~11:10	[학생 구두발표II] 공정시스템 09:00~10:30	[일반 구두발표] 청정융합 09:00~11:15
11:30~12:00	**초청강연: "청정기술의 발전은 에너지 믹스와 환경 규제의 함수" 한국기초과학지원연구원 양성광 원장 (아일랜드볼룸A)**							
12:00~13:00	**점심 시간(B동 1층 코지)**							
13:00~15:00	**30주년 기념 국제세션** **특별세션(IX)** International Online session: Advance Clean Technology 13:00~16:00	[일반 구두발표] 에너지저장 13:00~14:00 [학생 구두발표VII] 에너지저장 14:10~15:30	**30주년 기념 국제세션** **특별세션(V)** 가스하이드레이트 응용 및 청정기술 13:00~17:30	[일반 구두발표] 수소및재생에너지 13:00~13:40 [학생 구두발표VI] 청정생산 14:00~14:30	**특별세션(VII)** 정유산업 탈탄소화를 위한 CCU 기반 연료 및 화학제품 전환 기술 13:00~17:00	[학생 구두발표V] 대기환경 13:00~14:20	[일반 구두발표] 공정시스템 13:00~14:20	[학생 구두발표IV] 청정융합 13:00~13:30 에너지전환 13:50~15:00 [일반 구두발표] 에너지전환 15:10~15:50
15:00~17:00		**특별세션(VI)** 충청권 지역혁신선도연구센터 및 학연협력플랫폼 공동 이차전지 소재 연구 개발 심포지엄 15:30~17:30		**특별세션(VIII)** 암모니아 기반 수소 저장 및 생산 기술 개발 연구 심포지엄 15:00~17:00				
17:40~18:30	**총회, 시상, 경품추첨 (아일랜드볼룸A, B)**							
09:00~11:00	**포스터발표 I: 대기환경, 에너지저장, 에너지전환, 청정생산, 청정융합, 특별세션(III): [원광대학교 RISE 사업단] 미래형모빌리티 융합기술개발 세미나 (2층 로비)**							
13:00~15:00	**포스터발표 II: 공정시스템, 수소및재생에너지, 자원순환, 특별세션(IV): (다부처) 화재 능동대응을 위한 소화탄 개발 및 활용 기술 심포지엄, 특별세션(V): 가스하이드레이트 응용 및 청정기술 (2층 로비)**							
09:00~17:00	**홍보전시회 (2층 로비)**							
9월 26일(금)	**09:00~12:00 Technical Tour (제주광역 음식물류 폐기물 자원화시설(제주도 서귀포시 색달동 산6))**							
9월 27일(토)	**10:00~12:00 30주년 한국청정기술학회 발전 회의(스톤홀)**							

■ 추계 평의원회 및 30주년 기념 Gala Dinner

일 시: 2025년 9월 24일(수) 16:30~20:00
장 소: 아일랜드볼룸A, B홀
프로그램:

16:30~16:45 [강연 1] 스포츠 테크놀로지: 경기력과 경험을 바꾸는 혁신-by Voice Caddie
((주)브이씨 김준오 대표이사)
16:45~17:00 [강연 2] 국제환경규제 동향과 청정생산기술의 미래
(한국생산기술연구원 국가청정생산지원센터 김성덕 소장)
17:00~17:30 추계 평의원회 개최
17:40~20:00 30주년 기념 Gala Dinner 개최 - 밴드 이강 공연

휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 발표장 안내



- 사전 및 현장등록처: 2층 로비
- 평의원회: 아일랜드볼룸B
- 포스터발표, 홍보전시회: 2층 로비
- 목요일 점심: 1층 코지
- Gala Dinner, 초청강연, 총회, 시상, 경품 추첨: 아일랜드볼룸A
- 구두발표: 아일랜드볼룸, 윈드홀, 스톤홀
- VIP룸: 2층 입구
- Coffee Lounge: 2층 로비

※ 2층: wifi 가능

※ 주차: 무료(세션 끝나는 시간 및 점심시간에 주차게이트를 오픈할 예정)
- 그외 시간에 출차 원할시 체크인센터에 별도로 차량 등록해야 함.
- 투숙객은 반드시 체크인센터에 주차등록해야 함.

경품추첨 행사



■ 추첨방법

- 등록자 중에서 랜덤 추첨

■ 추첨 및 경품지급

- 추첨: 2025년 9월 25일(목), 17:40 총회 장소(아일랜드볼룸A, B)
- 맥북 프로 14: 1대
- 골프워치: 3대, 러닝워치: 2대
- 에어팟 4세대: 2대
- 도서상품권: 10만원권 5매, 5만원권 10매

휘닉스 아일랜드 제주 오시는 길



❶ **동부산업도로 이용**
제주국제공항 → 신제주 → 연삼로 or 연북로 방면 →
번영로(동부관광도로)진입구간 →
화북방향 삼양 검문소(국도 1132번 진입) →
조천읍(1132번) → 구좌읍(1132번) → 성산읍(섭지코지) →
휘닉스 제주

❷ **중산간도로 이용**
제주국제공항 → 신제주 → 해군제주방어 사령부 →
난자농업연구소 → 제주대학교 교차로 → 교래리 입구 →
비자림로(1112) → 교래사거리 → 산굼부리 →
대천통사거리 → 서성로(1119번 도로) →
성산읍(섭지코지)→휘닉스 제주

❸ **일주도로 이용**
제주국제공항 → 연삼로 or 연북로 방면 →
번영로(동부관광도로) 집입구간 →
화북방향 삼양 검문소(1132번 진입) → 조천읍(1132번) →
구좌읍(1132번) → 성산읍(섭지코지) → 휘닉스 제주

주소: 제주특별자치도 서귀포시 성산읍 섭지코지로 107 (대표전화: 064-731-7000~5)

[공항 무료 셔틀버스]

공항 → 플레이스 캠프 → 휘닉스 아일랜드		
구분	1회차	2회차
공항	12:00	16:10
플레이스 캠프	13:10	17:20
휘닉스 아일랜드	13:20	17:30
탑승 장소	제주공항 B-Zone(1, 2번) 주차장	

휘닉스 아일랜드 → 플레이스 캠프 → 공항		
구분	1회차	2회차
휘닉스 아일랜드	10:20	14:30
플레이스 캠프	10:30	14:40
공항	11:40	15:50
탑승 장소	체크인 센터 출입 방면 계단	

[급행버스]

버스 탑승장	버스 번호
공항 2번 출구 앞	공항 → 고성리 하차 101번(소요 시간: 약 100분), 111번(소요 시간: 약 80분)

※ 고성리 하차 후 택시 이용 시 거리는 약 3km입니다.

초청강연

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 11:30~12:00**

■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸A**

chair: 김정환 총무이사(연세대학교)

11:30(30') **청정기술의 발전은 에너지 믹스와 환경 규제의 함수**

양성광 원장(한국기초과학지원연구원)

연사소개



□ **주요경력**

- 2023~현재 한국기초과학지원연구원 원장
- 2021~2023 (주)혁신과경제연구소 대표
- 2018~2021 연구개발특구진흥재단 이사장
- 2016~2017 국립중앙과학관 관장
- 2013~2016 대통령비서실 과학기술비서관
- 2013~2013 미래창조과학부 미래선도연구실장
- 2012~2013 교육과학기술부 연구개발정책실장
- 2011~2012 교육과학기술부 기초연구정책관
- 2011~2011 교육과학기술부 전략기술개발관
- 2010~2011 교육과학기술부 교육정보정책관
- 2009~2010 교육과학기술부 인재정책분석관, 인재기획분석관
- 2008~2009 대통령실 과학비서관실 행정관/선임행정관
- 2007~2008 제17대 대통령직인수위원회 실무위원
- 2007~2007 과학기술부 기초연구정책과장, 부이사관
- 2006~2007 과학기술부 원자력협력과장
- 2002~2006 한반도에너지개발기구(KEDO) 원자력안전과장
- 2001~2002 과학기술부 기술개발지원과장
- 2001~2001 과학기술부 과학기술문화과 서기관
- 1998~2001 과학기술부 연구개발기획과 서기관
- 1995~1998 과학기술부 원자력협력과 사무관/서기관
- 1986~1995 과학기술부 연구개발조정관실, 원자력안전과 사무관

□ **학 력**

- 1979 한양대학교 화학공학 학사
- 1984 서울대학교 화학공학 석사
- 1989 미국 퍼듀대학교 화학공학 박사

특별세션(I): 이차전지 순환이용성 향상 기술 개발 Workshop (비공개)

Workshop on the Development of Technologies for Enhancing the Circular Utilization of Secondary Batteries

■ **일시** **2025년 9월 24일(수) 14:00~16:15**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀A**
■ **Organizer** **최재형 수석(고려아연(주) 기술연구소)**
■ **주관** **고려아연(주)**

chair: 최재형 수석(고려아연(주) 기술연구소)

14:00('15) CT-S1-1 **폐배터리 화재 예방 및 초기 진압을 위한 보관 선반 시스템 개발**
최경섭, 최헌식, 김용석, 김지윤, 최재형, 김정우 (고려아연(주))

14:15('15) CT-S1-2 **다종 폐이차전지 해체·분리 지능로봇 무인 자동화 공정 개발**
김응천 (에스아이에스(주))
(초록 비공개)

14:30('15) CT-S1-3 **건식방전 및 화학방전용 친환경 충방전시스템 개발 현황**
정승효, 홍진우, 김준성, 김정한, 도경민, 김월영, 김종재 ((주)솔라라이트)

14:45('15) CT-S1-4 **리튬 이온 배터리 열폭주 전이 메커니즘 분석을 위한 수치해석 기반 CFD 모델링에 대한 연구**
서효민, 김승우, 배재영, 박경렬, 김현종 (고등기술연구원)

15:00('15) coffee break

15:15('15) CT-S1-5 **이차전지 순환이용성 향상 기술개발을 위한 UNIST 연구내용 및 목표 달성 현황 공유**
김하은, 김영식 (울산과학기술원)

15:30('15) CT-S1-6 **선 리튬추출 화학방전 및 재활용 자동화 공정설계 및 실증기술 개발**
전부곤 (이지마이닝)
(초록 비공개)

15:45('15) CT-S1-7 **폐이차전지 재활용 공정에서의 친환경성 논의**
이원주 (한국화학연구원)
(초록 비공개)

16:00('15) CT-S1-8 **폐이차전지 친환경 재활용을 위한 현장 실증**
김민재 (제주테크노파크)
(초록 비공개)

특별세션(II): 동남권 학연협력플랫폼 (탄소중립선도 수소산업 전주기 밸류체인 구축) 성과공유회

Performance Sharing Conference of the Southeast Region UNI-CORE (Innovative Hydrogen Industry Platform for Carbon Neutrality)

■ **일시** **2025년 9월 24일(수) 15:00~17:10**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀B**
■ **Organizer** **이만식 단장(한국생산기술연구원), 최경민 교수(부산대학교)**
■ **주관** **동남권 학연협력플랫폼사업단**

chair: 김대욱 박사(한국생산기술연구원)

15:00('15) CT-S2-1 Electricity-Driven Joule-Heating Reactors for Energy-Efficient and Durable Hydrogen Production
Jungho Jae, Jichan Kim (Pusan National University)

15:15('15) CT-S2-2 **액화수소 저장탱크용 저온용 강재의 기계적 특성 관련 연구 결과 소개**
박정열, 지창욱, 박재한 (한국생산기술연구원)

15:30('15) CT-S2-3 **고체산화물 연료전지(SOFC)의 열관리를 위한 4분할 채널 설계**
염은섭, 이준학 (부산대학교)

15:45('15) CT-S2-4 Enhancing Startup and Scale-Up Toward Green Hydrogen Production in Single-Chamber Microbial Electrolysis Cells
Minsoo Kim, Jiin Yoo, Jung Rae Kim (Pusan National University)

chair: 박정열 박사(한국생산기술연구원)

16:00('15) CT-S2-5 **리브 설치에 따른 차량용 액체수소 탱크 내 슬로싱 거동 및 기화율 저감 효과 분석**
이영준, 석시협, 정용진, 정현서, 이창용, 황진율 (부산대학교)

16:15('15) CT-S2-6 Surrogate Modeling Approach to the Design Optimization of Launch Vehicle Propellant Tanks
Kyunghoon Lee[1], Bongseok Kim[2], Heesung Lee[1]
([1]Pusan National University, [2]Purdue University)

16:30('15) CT-S2-7 Development of a Technological Roadmap and Commercialization Platform for Water Electrolysis based Green Hydrogen Production
Dong-Ha Lim, Hee Soo Kim, Seong Ji Kim, Seongmin Park, Jeongha Kim (Korea Institute of Industrial Technology)

16:45('15) CT-S2-8 Role of microstructure on the electrochemical performance of mixed ionic electronic conducting oxygen electrodes
Beom-Kyeong Park, Hae-In Jeong (Pusan National University)

17:00('10) CT-S2-9 Hybrid Bimetallic Sulfide (FeCoS)-doped Conductive Polymer as Efficient Oxygen Evolution Reaction Electrocatalyst for Direct Seawater Electrolysis
Oi Lun Li, Aye Myint Myat Kyaw (Pusan National University)

특별세션(III): [원광대학교 RISE 사업단] 미래형모빌리티 융합기술개발 세미나

[Wonkwang University RISE Center] Seminar on Convergent Technology Development for Next-Generation Mobility

■ **일시** **2025년 9월 24일(수) 15:00~17:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀C**
■ **Organizer** **심재오 교수(원광대학교)**
■ **주관** **원광대학교 RISE 사업단**

chair: 김태희 교수(원광대학교)

15:00('15) CT-S3-1 **CoMo 촉매를 이용한 Oleic acid의 탈산소 반응 및 차량 적용 가능성 평가**
윤은수[1], 전이정[1], 김창현[1], 임재학[1], 윤채민[1], 전경원[2], 심재오[1]
([1]원광대학교, [2]국립군산대학교)

15:15('15) CT-S3-2 **Green Hydrogen Production from Ammonia Decomposition: Performance and Characterization of DC Thermal Plasma Technology**
Han Jun Lee, Seong-Pyo Kang, Se Jin Oh, Tae-Hee Kim
(Wonkwang University)

15:30('15) CT-S3-3 **역수성가스전이 반응을 위한 Cu-$Ce_{(x)}Zr_{(1-x)}O_2$ 촉매의 $Ce_{(x)}Zr_{(1-x)}O_2$ 조성 최적화**
임재학, 전이정, 김창현, 윤은수, 윤채민, 심재오 (원광대학교)

15:45('15) CT-S3-4 **Designing Nanofibrous Air Electrode for Interfacial Delamination Mitigation and Enhanced Performance in Reversible Solid Oxide Cells**
Ji-Yeoung Choi, Young-Wan Ju (Wonkwang University)

16:00('15) CT-S3-5 **Strategic Engineering of Carbon Supports for Platinum-Efficient Electrocatalysts in Hydrogen Evolution**
SeoJeong Yoon, In-Yup Jeon (Wonkwang University)

16:15('15) CT-S3-6 **역수성가스전이반응용 High Entropy Oxide(HEO) 촉매 개발**
윤채민, 전이정, 김창현, 윤은수, 임재학, 심재오 (원광대학교)

16:30('15) CT-S3-7 **근사 차량모형에서 타이어 사이드월 냉각핀의 공력 및 방열성능**
전수원, 유경미, 박현우, 이상욱 (원광대학교)

16:45('15) CT-S3-8 **스마트 e모빌리티 대회용 1인용 전기자작차 제작**
강호선, 박경훈, 김준성, 이승재 (원광대학교)

특별세션(IV): (다부처) 화재 능동대응을 위한 소화탄 개발 및 활용 기술 심포지엄

Symposium on the Development of Advanced Fire Extinguishing Projectile for Fire Suppression

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 09:00~11:30**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸C**
■ **Organizer** **이주동 박사(한국생산기술연구원)**
■ **주관** **한국생산기술연구원**

chair: 방창훈 교수(경남대학교)

09:00('15) CT-S4-1 **가스하이드레이트 형성 원리를 이용한 소화약제 제조 및 화재 진압**
이주동, 서성덕, 전창수 (한국생산기술연구원)

09:15('15) CT-S4-2 Synthesis of Clean Gas Hydrate Fire Extinguishing Agent and Evaluation of Fire Extinguishing Performance
Jeong-Hoon Sa (Dong-A University)

09:30('15) CT-S4-3 **나노고에너지물질 기반 가스팽창제의 연소 특성 및 소화장치 응용 연구**
김수형, 김호성, 런치파, 바시르압둘, 차정근 (부산대학교)

09:45('15) CT-S4-4 **산불 대응 드론 활용 통신시스템 최적화 연구**
김영민, 김혜문 ((주)지디엘시스템)

10:00('15) CT-S5-5 **GIS 디지털트윈 시뮬레이터 기반 드론 영상 목표지점 도출 기법**
고은성, 최호진, 김원석 (부산대학교)

10:15('15) coffee break

chair: 이주동 박사(한국생산기술연구원)

10:30('15) CT-S4-6 **산불 확산에 따른 소화탄 활용 방안 연구**
방창훈, 방성혁 (경남대학교)

10:45('15) CT-S4-7 **난접근성 화재 대응을 위한 가스하이드레이트 소화탄 탑재 고중량 무인비행장치 시스템 개발**
차수현, 이한솔, 양희철 ((주)그리폰다이나믹스)

11:00('15) CT-S4-8 Deep Learning-Based Fire Tracking Algorithm for Nighttime Adaptation and Tracking Speed Enhancement
Gyeongphjl Park[1], Dongbin Kim[2] ([1]Yonsei University, [2]University of Hartford)

11:15('15) CT-S4-9 **파이로테크닉을 이용한 가스 인플레이터 개발**
정순용, 이진희, 백종현 (한국소방기구제작소)

30주년 기념 국제세션
특별세션(V): 가스하이드레이트 응용 및 청정기술
International Session: Gas Hydrate Application and Clean Technology

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 13:00~17:30**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸C**
■ **Organizer** **이주동 박사(한국생산기술연구원)**
■ **주관** **한국생산기술연구원**

chair: 서용원 교수(UNIST)

13:00('20)	CT-S5-1	Development of hydrate-based desalination and water treatment Ju Dong Lee (Korea Institute of Industrial Technology)
13:20('20)	CT-S5-2	Sustainable Decarbonization through Clathrate Hydrates Praveen Linga (National University of Singapore)
13:40('20)	CT-S5-3	Use of Gas Hydrates in Sustainable Technological Solutions Related to NetZero CO_2 Rajnish Kumar (Indian Institute of Technology Madras)
14:00('20)	CT-S5-4	Understanding the Roles of Cations and Anions in Gas Hydrate Formation Pramoch Rangsunvigit[1], Teerapat Pongpuak[1], Kan Jeenmuangand[2], Phuwadej Pornaroontham[1] ([1]Chulalongkorn University, [2]National University of Singapore)
14:20('20)	CT-S5-5	Unveiling how hydrophobic amino acid L-methionine enhances CO_2 clathrates kinetics from liquid CO_2 Zhenyuan Yin (Tsinghua Shenzhen International Graduate School)
14:40('20)	CT-S5-6	Dissociation-Dissolution-Metastable State-Reformation phase transition of natural gas hydrate Mingjun Yang (Dalian University of Technology)
15:00('40)		Hydrate세션 포스터발표 관람

chair: 이주동 박사(한국생산기술연구원)

15:40('20)	CT-S5-7	CO_2 hydrate Crystallization in heterogeneous Porous Media Lanlan Jiang, Yingying Liu, Yongchen Song (Dalian University of Technology)
16:00('20)	CT-S5-8	CO_2 Capture/Storage/Transportation Technologies and Clathrate Hydrates Yongwon Seo (Ulsan National Institute of Science and Technology)
16:20('20)	CT-S5-9	Carbon Dioxide Ocean Storage in the Form of Solid Clathrate Hydrates in the East Sea of Korea Jeong-Hoon Sa (Dong-A University)
16:40('20)	CT-S5-10	Development of Combined Approaches for Gas Hydrate Production Young-ju Seo (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)
17:00('20)	CT-S5-11	Economic Implications of Hydrate-Based Cold Energy Systems Santosh Kumar Sahu[1,2], Abhishek Bhadani[1], Omkar Singh Kushwaha[1,2], Rajnish Kumar[1,2] ([1]IIT Madras, [2]Indian Institute of Technology Madras)
17:20('10)	CT-S5-12	Breaking the Fire Flames: Gas Hydrates for Fire Suppression Sai Kiran Burla, Seong Deok Seo, Sang-Gyu Cho, Sohee Hong, Changsu Jeon, Subhash Kumar Sharma, Ju Dong Lee (Korea Institute of Industrial Technology)

특별세션(VI): 충청권 지역혁신선도연구센터 및 학연협력플랫폼 공동 이차전지 소재 연구 개발 심포지엄

Chungcheong Regional Innovation Leading Research Center & Industry-Academia Cooperation Platform Joint Symposium on Secondary Battery Materials Research and Development

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 15:30~17:30**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸B**
■ **Organizer** **정상문 교수(충북대학교), 박기대 교수(충북대학교)**
■ **주관** **기업수요 대응 차세대 이차전지 소재 선도연구센터, 차세대 이차전지 학연협력 플랫폼 구축 시범사업**

chair: 박기대 교수(충북대학교)

15:30('25) CT-S6-1 **이중층 복합 고체전해질과 탄소촉매를 통한 리튬-이산화탄소 이차전지의 전기화학적 특성 개선**
김재광, 임학범 (청주대학교)

15:55('25) CT-S6-2 Boosting Ni-Rich Cathode Capacity and Cycle Stability via Lithium Distribution and Particle Size Engineering
Hyungsub Kim[1,2] ([1]Korea Atomic Energy Research Institute, [1]Chungbuk National University)

16:20('10) coffee break

16:30('25) CT-S6-3 X-ray based characterization for structural studies of energy materials
In Hye Kwak (Korea Basic Science Institute)

16:55('25) CT-S6-4 **지속가능한 리튬이온전지를 위한 Ni/Co-free 망간 기반 고성능 차세대 양극재 개발**
이은렬 (충북대학교)

17:20('10) photo time

특별세션(VII): 정유산업 탈탄소화를 위한 CCU 기반 연료 및 화학제품 전환 기술
Fuel and Chemical Conversion Technologies for Refinery Decarbonization via CCU

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 13:00~17:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀B**
■ **Organizer** **황선미 박사(한국에너지기술연구원)**
■ **주관** **한국에너지기술연구원**

chair: 황병욱 박사(한국에너지기술연구원)

13:00('30) CT-S7-1 **Development of On-site CCU Technology for the Direct Utilization of Off-gas from Oil Refining Industry**
Sun-Mi Hwang, Byung Wook Hwang, Yooseop Won, Ho-Jung Ryu, Yu Jin Choi, Sun A Choi, Soon Kwan Jeong
(Korea Institute of Energy Research)

13:30('30) CT-S7-2 **CO_2 수소화 촉매의 현재 상태 및 전망**
김재훈 (성균관대학교)

14:00('30) CT-S7-3 **이산화탄소 전환을 위한 유동층 반응기 전산 모사**
김석기 (아주대학교)

14:30('30) CT-S7-4 **기후변화 대응을 위한 저탄소 산업으로의 전환과 정유산업의 역할**
오진호 (GS칼텍스)

15:00('30) **coffee break & 사진 촬영**

chair: 김석기 교수(아주대학교)

15:30('30) CT-S7-5 **정유산업 CCUS 기술개발과 기업의 탄소중립 전략**
정민서, 최문석, 김학성 ((주)지에스건설)

16:00('30) CT-S7-6 **정유공정 포집 CO_2 활용 e-SAF 액체연료 생산 공정 핵심기술 개발**
김학주 (한국에너지기술연구원)

16:30('30) CT-S7-7 **CCU 기반 합성연료의 지속가능항공유 적용 방안 연구**
이미은, 민영제, 김신 (한국석유관리원)

특별세션(VIII): 암모니아 기반 수소 저장 및 생산 기술 개발 연구 심포지엄

Symposium on the Development of Ammonia-Based Hydrogen Storage and Production Technologies

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 15:00~17:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀A**
■ **Organizer** **채호정 박사(한국화학연구원)**
■ **주관** **한국화학연구원 수소 C1가스 연구센터**

chair: 김영민 박사(한국화학연구원)

15:00('30) CT-S8-1 **고려아연의 그린수소 및 그린암모니아 사업 전략 및 현황**
최재형, 최헌식, 류재길, 김정우 (고려아연(주))

15:30('30) CT-S8-2 **비귀금속계 촉매 기반 그린 암모니아 합성 기술 현황**
강기혁, 박선영, 김영민, 이수언, 김태완, 채호정 (한국화학연구원)

16:00('30) CT-S8-3 **한국화학연구원에서 수소추출용 암모니아 분해 기술 개발 및 성과**
임영환, Le Thien An, 권성민, 김영민, 채호정 (한국화학연구원)

16:30('30) CT-S8-4 **Nitrogen-doped CeO_2 with Defect-rich Sites Enhances Ru-Catalyzed Ammonia Decomposition for High-Efficiency Hydrogen Production**
Thien An Le, Youngmin Kim, Seung Ju Han, Younghwan Im, Min Sik Kim, You-Jin Lee, Ho-Jeong Chae (Korea Research Institute of Chemical Technology)

30주년 기념 국제세션
특별세션(IX):
International Online Session : Advance Clean Technology

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 13:00~16:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸A**
■ **Organizer** **전병훈 교수(한양대학교)**
■ **주관** **한양대학교, 경기대학교**

chair: 안용태 교수(경기대학교)

13:00('30) CT-S9-1 **Enhancing Biohydrogen Production in Microalgae through External H^+ Ion Supplementation in a Dual Photobioreactor System**
Jae-Hoon Hwang, Wonjun Lee (Concordia University)

13:30('30) CT-S9-2 **Recovering phosphorus from water via engineered (nano)biochar and repurposing it as a slow-release fertilizer**
Rahul Kumar Dhaka, Anuj Rana
(Chaudhary Charan Singh Haryana Agricultural University)

14:00('20) CT-S9-3 **Enhancing ammonia recovery from anaerobic digestate by modifying activated carbon membrane electrodes**
Kyoung-Yeol Kim[1], Hyun-Jo Ahn[1,2]
([1]State University of New York at Albany, [2]Hanyang University)

14:20('20) CT-S9-4 **Physiological Stress Responses in Freshwater Microalgae for the Sustainable Bioremediation of Emerging Contaminants**
Hyun-Jo Ahn[1,2], Kyoung-Yeol Kim[2], Byong-Hun Jeon[1]
([1]Hanyang University, [2]State University of New York at Albany)

14:40('20) **coffee break**

chair: 정우진 교수(경기대학교)

15:00('20) CT-S9-5 **Antibiotic resistome in Indian *Labeo rohita***
Shouvik Saha (Brainware University)

15:20('20) CT-S9-6 **Real-time monitoring of analytes using conjugated functional chromophores**
Jayant Sindhu (Chaudhary Charan Singh Haryana Agricultural University)

15:40('20) CT-S9-7 **Multi-Feedstock to Multi-Product Integrated Lignocellulosic Biorefinery : A Comparative Techno-Economic Assessment**
Gopalakrishnan Kumar, Georgeio Semaan (University of Stavanger)

특별세션(X): 미세조류를 이용한 지속가능한 항공유
Sustainable Aviation Fuel Using Microalgae

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 09:00~10:50**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸A**
■ **Organizer** **정우진 교수(경기대학교)**
■ **주관** **엔텍스(주), (주)씨엔에스아이엔티, 한양대학교, 경기대학교, 한국기계연구원**

chair: 박명수 연구소장(엔텍스(주))

09:00('20) CT-S10-1 **지속가능 항공유 전환을 위한 엔지니어링 기반 미세조류 바이오매스 연속생산 기술개발**
홍수열, 박상용, 송지호, 김소원, 김용희, 사영호, 정지훈, 손주동
((주)씨엔에스아이엔티)

09:20('20) CT-S10-2 **Application of Machine Learning for Prediction and Optimization of Lipid Enriched Microalgal Biomass Production**
Deok-Won Kim, Aliya Alvi, Ghulam Mustafa, Liao Ziqiao, Nikita Yadav, Swabhiman Mohanty, Rahul Tanpure, Byong-Hun Jeon (Hanyang University)

09:40('20) CT-S10-3 **수열액화를 활용한 미세조류의 지속 가능한 항공유용 원유 생산 연구**
정우진, 장순웅, 이건호 (경기대학교)

10:00('10) **coffee break**

chair: 박명수 연구소장(엔텍스(주))

10:10('20) CT-S10-4 **수열 액화 공정을 이용한 미세조류 유래 바이오오일 생산 시스템 개발**
박명수, 구슬기, 남궁현민 (엔텍스(주))

10:30('20) CT-S10-5 **미세조류의 수열액화 바이오오일 생산을 위한 PFR 반응기에 대한 수치해석**
최상규[1,2], 정연우[1], 한소영[1] ([1]한국기계연구원, [2]과학기술연합대학원대학교)

특별세션(XI): 친환경 이차전지 산업을 위한 고순도 탄산리튬 실증기술 및 ESG 대응전략

ESG-Responsive Demonstration Technologies for High-Purity Lithium Carbonate in the Sustainable Battery Industry

■ **일시** **2025년 9월 24일(수) 13:00~15:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀A**
■ **Organizer** **전병훈 교수(한양대학교)**
■ **주관** **(주)엔에이치리사이텍컴퍼니**

chair: 권주혁 박사(한양대학교)

13:00('30) CT-S11-1 Experimental investigations of maximum lithium extraction from its synthetic solution as high-purity lithium carbonate using precipitation and adsorption processes
Eun-Ji Lee, Soon-Ho Cho, Kung-Won Choi, Ramesh Kumar, Chejarla Venkatesh Reddy, Byong-Hun Jeon (Hanyang University)

13:30('30) CT-S11-2 **Li_3PO_4에서 Li_2CO_3로의 전환 공정에 대한 실험 연구**
이석희 ((주)엔에이치리사이텍컴퍼니)

14:00('30) CT-S11-3 **막증류공정을 활용한 리튬 수용액 농축 기술개발**
김백암, 석진국 (앵스트롬스(주))

14:30('30) CT-S11-4 **탄산리튬 제조공정 대상 ESG 부합성 검토를 위한 평가지표 도출 및 탄소발자국 산정 연구**
박지형, 이한솔, 권도은, 김혜현 ((주)엔디렉션)

특별세션(XII): 조선해양 청정기술의 융합과 미래전략: 기후변화 대응 중심으로!!

Convergence of Clean Technologies and Future Strategies in Shipbuilding and Offshore Engineering: Focusing on Climate Change Response

■ **일시** **2025년 9월 24일(수) 13:00~17:40**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀B**
■ **Organizer** **임동하 박사(한국생산기술연구원), 진송한(중소조선연구원)**
■ **주관** **한국생산기술연구원, 중소조선연구원**

chair: 임동하 박사(한국생산기술연구원)

13:00('20) CT-S12-1 **해운부문의 녹색연료 도입 필요성과 과제: 암모니아를 중심으로**
문건필, 임동국, 김상훈, 강수민 (한국선급)

13:20('20) CT-S12-2 **선박용 암모니아 혼소 중속엔진 개발**
노희환, 서민우, 손성우, 설동일, 김병윤 (STX엔진)

13:40('20) CT-S12-3 **고압 분사식 단기통 엔진을 이용한 암모니아-디젤 혼소 엔진 연소 특성 연구**
장진영[1], 유동규[1,2], 이강산[1,3], 표영덕[1], 우영민[1], 고아현[1], 황선미[1], 임옥택[2], 박성욱[3] ([1]한국에너지기술연구원, [2]울산대학교, [3]한양대학교)

14:00('20) CT-S12-4 **Development of Emission Reduction Technologies for Alternative Fuel Ships under IMO Regulations and AI-Integrated Catalytic Process Systems**
Dong-Ha Lim, Hee Soo Kim (Korea Institute of Industrial Technology)

14:20('20) CT-S12-5 **지속 가능한 해양 기술 동향 및 전망**
김희경, 강종대, 이승필 (HD한국조선해양)

14:40('20) CT-S12-6 **Net Zero 선박 달성을 위한 차세대 연료용 촉매 기술 개발 동향**
송진우, 김대건, 김용술, 박한별, 박건면, 이강현, 한재욱 (희성촉매(주))

15:00('20) CT-S12-7 **발표취소**

15:20('20) coffee break

chair: 장재환 박사(중소조선연구원)

15:40('20) CT-S12-8 **수소선박 및 기자재 개발의 국내외 동향**
김정현, 김태욱, 이동하, 장민정, 박한솔, 이경훈, 김부희, 김태빈, 이제명 (부산대학교)

16:00('20) CT-S12-9 **LNG 엔진 선상 이산화탄소 포집용 열교환기 성능 및 열성능 저하 원인에 관한 연구**
김규덕, 장재환 (중소조선연구원)

16:20('20) CT-S12-10 **저농도 이산화탄소 포집/저장을 위한 극저온 탄소 포집 개발 현황 및 실증 결과 고찰**
박성호, 최광순, 이창형, 정소명, 임종웅, 박준석, 윤상희 (고등기술연구원)

16:40('20) CT-S12-11 **Energy Flow Optimization in a Hybrid ORC Powertrain for Emission Reduction in Marine Applications**
Dong Wook Kim, Gyu Deok Kim (Research Institute of Medium & Small Shipbuilding)

17:00('20) CT-S12-12 **온실가스 저감을 위한 전기 하이브리드 추진 선박 개발 전략**
김현준, 강정호 (한국자동차연구원)

17:20('20) CT-S11-13 **중·대형 선박 하이브리드 추진시스템 성능평가용 육상 실증 인프라 개발 및 활용 연구**
강무경, 최주형, 배징도, 김종립, 이원의, 채일주, 이나영 ((재)한국조선해양기자재연구원)

특별세션(XIII): 한국생산기술연구원 저탄소 수소 통합시스템 기술 성과 발표

Low-Carbon Hydrogen Integrated Systems: Achievements and Applications from KITECH

■ **일시** **2025년 9월 24일(수) 14:20~17:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸C**
■ **Organizer** **김수한 수석(한국생산기술연구원)**
■ **주관** **한국생산기술연구원 울산기술실용화본부**

chair: 지창욱 수석(한국생산기술연구원)

14:20('20) CT-S13-1 **고안정성 수계아연전지 활용을 위한 아연 음극 안정화 기술 개발**
김대욱, 김영국, 김신, 이인식, 차병철 (한국생산기술연구원)

14:40('20) CT-S13-2 **Sodium Silicate-Based 바인더를 활용한 냉간 브리켓 제조 공정 최적화**
배민아, Tran Thi Ten, 백재호 (한국생산기술연구원)

15:00('20) CT-S13-3 **막접촉기를 이용한 컴팩트형 CO_2 포집기술 개발**
박현식[1], 김희준[1,2], 황선엽[1], 강조홍[1,2], 송호준[1] ([1]한국생산기술연구원, [2]연세대학교)

15:20('20) coffee break

chair: 김수한 수석(한국생산기술연구원)

15:40('20) CT-S13-4 **고속·고품질 적층을 위한 이중 열원 WAAM 공정 및 품질 모니터링 연구**
천주용, 김재훈, 신현준, 지창욱 (한국생산기술연구원)

16:00('20) CT-S13-5 **산업용 X-ray CT를 활용한 내부 결함 시각화 및 정량화 기술**
이규흔, 강호정, 장호성, 윤필환, 신선미, 박진영 (한국생산기술연구원)

16:20('20) CT-S13-6 **적층 제조 공정 특성화 및 기상계측 시스템 개발에 관한 연구**
김정섭 (한국생산기술연구원)

16:40('20) CT-S13-7 **극저온 환경용 고기능성 고강도 단열소재 개발**
이영철 (한국생산기술연구원)

일반 구두발표: 수소 및 재생에너지

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 13:00~13:40**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀A**
■ **Organizer** **고창현 교수(전남대학교)**

chair: 고창현 교수(전남대학교)

13:00('20) CT-A1 **HDPE 열분해 기반 수소 생산시스템에서 바이오차의 촉매 및 고체탄소 흡착제로서의 역할에 대한 실험적 연구**
조경일, 이영재, 이용운 (한국생산기술연구원)

13:20('20) CT-A2 **블루수소 생산을 위한 이산화탄소 셔틀 기술 개발**
박성수, 김인재, 김경덕 (한국가스기술공사)

일반 구두발표: 에너지저장

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 13:00~14:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸B**
■ **Organizer** **조중상 교수(충북대학교)**

chair: 김정현 박사(한국세라믹기술원)

13:00('20) CT-B1 **전이 금속 규화물 및 이중 탄소 쉘 복합화 전략을 이용한 고성능 Si 음극용 다공성 마이크로스피어 제조**
이재섭[1], 조중상[2] ([1]고려대학교, [2]충북대학교)

13:20('20) CT-B2 **공융염 기반 준액상 공정을 통한 폐배터리 양극재 업사이클링**
박진성 (아주대학교)

13:40('20) CT-B3 **전기화학적 보조를 활용한 DBD 공기 플라즈마 질소 고정을 통한 암모니아 생성**
황건덕[1,2], 장민[1,2] ([1]광운대학교, [2]플라즈마바이오연구센터)

일반 구두발표: 에너지전환

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 15:10~15:50**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀C**
■ **Organizer** **라호원 박사(한국에너지기술연구원)**

chair: 라호원 박사(한국에너지기술연구원)

15:10('20) CT-C1 **유동층 반응기에서의 Polylactic acid(PLA)와 Polyhydroxybutyrate(PHB)의 열화학적 전환 특성 연구**
이태원, 정의명, 안태휘, 이찬영, 심지빈, 오예은, 박영권, 서명원 (서울시립대학교)

15:30('20) CT-C2 **Coupled Electrosynthesis of Formate via Formaldehyde Oxidation and CO_2 Reduction**
Jin Ho Lee, Hee Soo Kim, Dong-Ha Lim
(Korea Institute of Industrial Technology)

일반 구두발표: 청정융합

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 09:00~11:15**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀C**
■ **Organizer** **장 민 교수(광운대학교)**

chair: 김우열 교수(한국에너지공과대학교)

09:00('15) CT-D1 Eco-friendly Textile Dyes Remediation Using the Ciliated Protist *Dexiostoma* sp.
Muhammad Tariq Zahid, Ghulam Mustafa, Ju-Hyeok Kwon, Nikita Yadav, Byong-hun Jeon (Hanyang University)

09:15('15) CT-D2 **오픈소스 데이터를 활용한 분리막 성능 예측**
손문[1,2] ([1]한국과학기술연구원, [2]과학기술연합대학원대학교)

09:30('15) CT-D3 Boosting Methane Recovery in Microbial Electrochemical System by Using Food Waste-Fed Anolyte
Bikram Basak, Chanyeong Lee, Byong-Hun Jeon (Hanyang University)

09:45('15) CT-D4 Plugging into Fermentation — External Electrons as a New Metabolic Axis for Sustainable and Redox-Limited Bioprocesses
Changman Kim[1], Da Seul Kong[2], Jung Rae Kim[2]
([1]Chonnam National University, [2]Pusan National University)

10:00('15) CT-D5 Enhanced Adsorptive Removal of Genotoxic Dyes Using Zinc-Activated Rice Straw Cellulose: A Parametric Study
Ramesh Kumar[1], Sankha Chakrabortty[2], Kilhong Seol[1], Kung-Won Choi[1], Muhammad Tariq Zahid[1], Byong-Hun Jeon[1] ([1]Hanyang University, [2]Kalinga Institute of Industrial Technology)

10:15('15) CT-D6 **태양광 기반 H_2O_2 생성 성능 향상을 위한 SnS_2/g-C_3N_4 이종접합 광촉매 개발**
종초은[1,2], 장민[1,2] ([1]광운대학교, [2]플라즈마바이오과학연구센터)

10:30('15) CT-D7 Bioremediation of emerging contaminants using aquatic macrophytes
Nikita Yadav, Sanjay P. Govindwar, Byong-Hun Jeon (Hanyang University)

10:45('30) CT-D8 (Invited Lecture) Sustainable Photocatalytic Approaches for Addressing Emerging Contaminant Challenges through Advanced Oxidative Pathways
Hyoung-il Kim[1,2] ([1]Yonsei University, [2]Pohang University of Science and Technology)

일반 구두발표: 대기환경

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 09:00~11:10**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀A**
■ **Organizer** **박정훈 교수(동국대학교), 이종석 교수(서강대학교)**

chair: 유현정 박사(고등기술연구원)

09:00('15) CT-E1 **철강산업의 탄소중립을 위한 저에너지형 CO_2 포집기술 개발**
김광휘, 최예지, 김경택, 최정호, 안치규 (포스코홀딩스)

09:15('15) CT-E2 **플라즈마 처리를 통한 결함 제어 MOF의 메탄 흡착 성능 향상**
이희정, 최재령 (한국재료연구원)

09:30('15) CT-E3 **탄소중립 달성을 위한 DAC 기술개발 현황**
최정호, 김광휘, 최예지, 이가영, 안치규, 이만수 (포스코홀딩스)

09:45('15) CT-E4 **Atomically Dispersed Silver on Nanosheet-Stacked Amorphous Alumina for Enhanced NOx Reduction**
Jungseob So[1], Jeong-un Jang[2], Ji Hoon Park[1], Young Woo You[1], Young Jin Kim[3], Dong-Yeun Koh[2] ([1]Korea Research Institute of Chemical Technology, [2]Korea Advanced Institute of Science and Technology, [3]Kyungpook National University)

10:00('10) **coffee break**

10:10('15) CT-E5 **블루수소와 합성가스 동시 생산을 위한 흡착 소재 및 공정 기술 개발**
윤형진, 강신욱, 박지찬, 박종호 (한국에너지기술연구원)

10:25('15) CT-E6 **DFT-TST/CVT 기반 예측 방법론을 통한 반도체 공정가스의 GWP 산출 연구**
최희철, 박영춘, 장현우, 박준형 (한국핵융합에너지연구원)

10:40('15) CT-E7 **Engineering Polymeric Architectures for CO_2 Separation: Molecular Design via Thermal Cross-Linking**
Jong Suk Lee (Sogang University)

10:55('15) CT-E8 **Catalyst design and reaction characterization for high-concentration NOx reduction in ammonia co-combustion exhaust**
Jong-Hoon Lee, Hee Soo Kim, Dong-Ha Lim (Korea Institute of Industrial Technology)

일반 구두발표: 자원순환

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 09:00~11:20**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀B**
■ **Organizer** **한요셉 박사(한국지질자원연구원)**

chair: 한요셉 박사(한국지질자원연구원)

09:00('20) CT-F1 **(Invited Lecture) The Recycling of Used Lithium-ion Battery Cathode Active Material with Electrochemical system**
Minjoon Park (Pusan National University)

09:20('20) CT-F2 **Sustainable Synthesis of Porous Materials from Industrial Waste for Environmental Applications**
Yu-Ri Lee[2,5], Sang Jeong Park[1,2], A Ra Cho[2,3], Hyungseok Nam[4]
([1]Korea University, [2]Korea Institute of Energy Research, [3]Yonsei University, [4]Kyungpook National University, [5]Kunsan National University)

09:40('20) CT-F3 **함리튬 공정 부산물과 소각재를 활용한 청정 자원 순환 기술**
김영재[1], 한요셉[2] ([1]인하대학교, [2]한국지질자원연구원)

10:00('20) CT-F4 **Manufacturing high purify gallium for compound semiconductors using a recycling process**
Jaesik Yoon (Korea Basic Science Institute)

10:20('20) CT-F5 **Development of circulated fluidized bed reactor for integrated biomass gasification and CO_2 capture technology**
Hyungseok Nam[1], Jaeeon Ha[1], Se-Eun Jeong[1], Moonyoung Kim[1], Eunho Jang[1], Ho Jin Chae[1], Sushil Adhikari[2], Sergio Capareda[3] ([1]Kyungpook National University, [2]Auburn University, [3]Texas A&M University)

10:40('20) CT-F6 **Reduction of Carbon Emissions through Incorporating Carbon Dioxide to the Pyrolysis of Biomass**
Taewoo Lee, Eilhann E. Kwon (Hanyang University)

11:00('20) CT-F7 **물-물 계면 형성 및 안정화 메커니즘 분석을 통한 미세 플라스틱 비중 선별 기술로의 응용**
김규한 (서울과학기술대학교)

일반 구두발표: 청정생산

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 09:00~11:15**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸B**
■ **Organizer** **이홍식 박사(한국생산기술연구원)**

chair: 백자연 박사(한국생산기술연구원)

09:00('25) CT-G1 (Invited Lecture) Low-carbon Propylene Production by Circulating Fluidized-Bed Propane Dehydrogenation
Dae Sung Park (Korea Research Institute of Chemical Technology)

09:25('25) CT-G2 **(Invited Lecture) 저데이터 상황의 재료 최적화 가속을 위한 능동기계학습 연구**
하민영 (경희대학교)

09:50('20) CT-G3 Thermally stable Ni-CeO_2 nanoparticles-encapsulated with SiO_2(-Al_2O_3) shells for dry reforming of CH_4 with CO_2
Jong Wook Bae, Jae Hyeon Kwon (Sungkyunkwan University)

chair: 성기명 교수(수원대학교)

10:10('20) CT-G4 Carbon dioxide fixation into single-walled carbon nanotubes
Jungpil Kim, Junghoon Yang, Eunchae Oh, Jaewon Jang
(Korea Institute of Industrial Technology)

10:30('15) CT-G5 Strategic Pathway from C6 Sugars to Adipic Acid: Mechanism-Driven Catalyst Engineering
Yesub Keum[1], Tae Yong Kim[2], Geonwoo Kim[1], Hayoung Jeong[3], Anh Vy Tran[1], Jeong Woo Han[3], Yong Jin Kim[1], Jayeon Baek[1]
([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Korea University of Technology and Education, [3]Seoul National University)

10:45('15) CT-G6 *In-Situ* Water Removal for Enhanced Se-Catalyzed Oxidative Carbonylation in a Recirculating Pervaporation-Assisted Membrane Reactors
Min-Zy Kim, Hye Jin Lee, Chul Ho Lee, Woo-Yong Jung, Yu-Jin Lee, Yong Jin Kim, Jayeon Baek (Korea Institute of Industrial Technology)

11:00('15) CT-G7 Enhanced Cellulose Hydrolysis Using a Heterogeneous Catalyst under Supercritical CO_2 Conditions
Han-Ung Kim, Dong-Ha Lim (Korea Institute of Industrial Technology)

일반 구두발표: 공정시스템

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 13:00~14:20**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀B**
■ **Organizer** **박진우 교수(동국대학교), 홍무선 교수(서울대학교)**

chair: 박진우 교수(동국대학교)

13:00('20) CT-H1 Is Acidic Environment Favored for Electrochemical CO_2 reduction? – A process-wise perspective
Kyeongsu Kim, Hyerim Kim, Youngrok Lee, Woong Hee Lee
(Korea Institute of Science and Technology)

13:20('20) CT-H2 **가스 하이드레이트를 활용한 청정 탄소 포집 공정 설계 및 평가**
오태훈 (울산과학기술원)

13:40('20) CT-H3 **화학공학 청정기술 분야에서 전산유체역학 연구사례**
김신혁 (국립한밭대학교)

14:00('20) CT-H4 Deep Learning-Based PPE Monitoring System Integrated with Digital Twin for Biomass Plant Safety Management
Chae-Young Lim, Chae-Eun Yeo, Myung-Ok Lee, Ho-Jin Sung
(Institute for Advanced Engineering)

학생 구두발표 I: 수소 및 재생에너지

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 09:00~10:30**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀A**
■ **Organizer** **고창현 교수(전남대학교)**

chair: 고창현 교수(전남대학교)

09:00('10) CT-SO1 **Defect engineered Co/CeO_2 catalysts for high temperature water gas shift reaction using waste-derived syngas**
Su-jin Ryu, Beom-Jun Kim, Ho-Ryong Park, Hyun-Seog Roh
(Yonsei University)

09:10('10) CT-SO2 **Boosting Stability and Photoelectrochemical Performance of Cu_2O-Based Photoelectrodes for Solar Water Splitting**
Milana Rudak, Yiseul Park (Pukyong National University)

09:20('10) CT-SO3 **빠르게 성장하는 바이오매스를 활용한 열화학적 공정 기반 바이오디젤 생산**
박경남, 권일한 (한양대학교)

09:30('10) CT-SO4 **고온에서의 메탄 및 천연가스 열분해를 통한 수소, 탄화수소 및 탄소 생성에 관한 실험 연구**
이승현[1,2], 임성균[1], 이은도[2], 김성일[2], 이영재[2] ([1]고려대학교, [2]한국생산기술연구원)

09:40('10) CT-SO5 **Analysis of Current Density and Flow Variations under Overpotential via Bubble Behavior Observation in a Visualization PEMWE Cell**
Seongmin Park[1,2], Hae In Lee[1], Hee Soo Kim[1], Mino Woo[3], Joon-Young Choi[2], Dong-Ha Lim[1] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan National University, [3]Korea Maritime and Ocean University)

09:50('10) **coffee break**

10:00('10) CT-SO6 **Additive-Assisted Surface Modification of Porous Nickel Foam for Optimized Zero-Gap Alkaline Water Electrolysis Anodes**
Jeongha Kim[1,2], Hae In Lee[1], Hee Soo Kim[1], Se Hun Kwon[2], Dong-Ha Lim[1] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan National University)

10:10('10) CT-SO7 **Fe-Cr 촉매를 이용한 폐기물 가스화 합성가스의 고온 수성가스전환 반응 조건 최적화**
공지현, 김민주, 권재민, 장원준 (아주대학교)

10:20('10) CT-SO8 **Enhanced CO_2-to-CH_4 Conversion Using a Modified Microbial Electrosynthesis System**
Swabhiman Mohanty, Bikram Basak, Soon-Ho Cho, Kil-Hong Seol, Byong-Hun Jeon (Hanyang University)

학생 구두발표 II: 공정시스템

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 09:00~10:30**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀B**
■ **Organizer** **박진우 교수(동국대학교), 홍무선 교수(서울대학교)**

chair: 홍무선 교수(서울대학교)

09:00('10) CT-SO9 **CO_2 첨가 프로판 산화 탈수소 반응기의 다중스케일 통합 설계·최적화 및 CFD 기반 성능 검증**
정재민, 도윤정, Gbadago Dela Quarme, 정지민, 황성원 (인하대학교)

09:10('10) CT-SO10 **Temperature-Dependent Performance Analysis of the Electrolyzer–Pressure Retarded Membrane Distillation (E-PRMD) Hybrid Process for Wastewater Treatment**
Sunyoung Oh[1], Heun-Se Kim[2], Kiho Park[2], Boram Gu[1]
([1]Chonnam National University, [2]Hanyang University)

09:20('10) CT-SO11 **이산화탄소 저온전기분해-Fischer Tropsch 통합 공정 모델링 및 경제성·운전조건 최적화**
도윤정, 정경호, 홍혜림, 황성원 (인하대학교)

09:30('10) CT-SO12 **Integrated Process Design for Electrochemical Nitrate Reduction Wastewater Treatment and Ammonia Purification**
Minsuk Lim, Konan Alain Cedric Nzisso, Jungjae Oh, Inhye Kim, Sunghyun Cho (Jeonbuk National University)

09:40('10) **coffee break**

09:50('10) CT-SO13 **최적화된 아민 혼합물을 활용한 선상 CO_2 포집의 통합 공정 시뮬레이션 및 경제성 평가**
정경호, 황성원 (인하대학교)

10:00('10) CT-SO14 **조류 응집 기반 미세플라스틱 제거를 위한 초임계 수열 산화 공정 개발 및 환경·경제성 평가**
김인혜, 오정재, 임민석, 조성현 (전북대학교)

10:10('10) CT-SO15 **그린 암모니아 기반 수소 생산을 위한 촉매 비용 인덱스 개발**
김선우[1], 가성빈[2], 김정환[1] ([1]연세대학교, [2]울산대학교)

10:20('10) CT-SO16 **Valorization of PVC Waste Film for Gold Recovery: Techno-Economic and Environmental Assessments**
Seungho Lee, Wangyun Won (Korea University)

학생 구두발표 III: 자원순환

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 11:20~11:30**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀B**
■ **Organizer** **한요셉 박사(한국지질자원연구원)**

chair: 김성민 박사(한국지질자원연구원)

11:20('10) CT-SO17 **폐플라스틱 열분해로부터 생성된 염화수소의 용융 금속 기포 컬럼에서의 분해 특성 연구**
이은지[1,2], 양원[1,2], 이은도[1,2], 이용운[1], 이영재[2] ([1]과학기술연합대학원대학교, [2]한국생산기술연구원)

학생 구두발표 IV: 청정융합, 에너지전환

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 13:00~15:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀C**
■ **Organizer** **청정융합: 장민 교수(광운대학교)**
에너지전환: 라호원 박사(한국에너지기술연구원)

청정융합

chair: 손문 박사(KIST)

13:00('10) CT-SO18 **인산리튬으로부터 리튬 회수를 위한 환원제 보조 습식공정 연구**
박소현, 권동혁, 이준호, 민유빈, 안용태 (경기대학교)

13:10('10) CT-SO19 **유기고분자 함유 광산배수 슬러지 내 고농도 희토류 분리 공정 개발**
오동윤, 김민지, 김연화, 종초은, 장민 (광운대학교)

13:20('10) CT-SO20 **TiO_2에서 공기를 활용한 광촉매적 암모늄 생성에서 산소 영향 이해**
김연화[1], 태싀젠[1], 장민[1,2], 종초은[1,2] ([1]광운대학교, [2]플라즈마바이오연구센터)

13:30('20) coffee break

에너지전환

chair: 서명원 교수(서울시립대학교)

13:50('10) CT-SO21 **지속가능한 바이오디젤 생산을 위한 과일 씨앗 폐기물의 열화학적 고부가가치화**
김민영, 권일한 (한양대학교)

14:00('10) CT-SO22 **이산화탄소 활용 촉매 열분해를 통한 지속가능한 페플라스틱 처리 및 합성가스로의 전환**
이상윤, 권일한 (한양대학교)

14:10('10) CT-SO23 **해외 도입 바이오에탄올 기반 지속가능항공유 생산방식의 이산화탄소 배출 감축 전략 평가 Alcohol-to-Jet 공정설계, 경제성평가 및 환경성평가**
정형준, 황성원 (인하대학교)

14:20('10) coffee break

14:30('10) CT-SO24 **Synergistic Roles of Fe/Co Ratio and Na Promotion in Direct CO_2 Hydrogenation toward C_{5+} Hydrocarbons**
Hae Won Jung[1,2], Sun A Choi[1], Soon Kwan Jeong[1], Ki Bong Lee[2], Sun-Mi Hwang[1] ([1]Korea Institute of Energy Research, [2]Korea University)

14:40('10) CT-SO25 **Investigation of ruthenium loaded zeolite beta catalyst performance in vanillin hydrodeoxygenation yielding both monomeric and dimeric cycloalkanes**
Jae Hyun Park[1], Hyungjoo Kim[1], Hyeongdong Jung[1], Jeong-Myeong Ha[2], Do Heui Kim[1] ([1]Seoul National University, [2]Korea Institute of Science and Technology)

14:50('10) CT-SO26 **Cu-Zn-Al 기반 고정층에서의 CO 공투입 효과 : COx-메탄올 전환 성능 비교**
박경두[1], 장은호[1], 채호진[1], 배종욱[2], 박노국[3], 이수출[1], 남형석[1]
([1]경북대학교, [2]성균관대학교, [3]영남대학교)

학생 구두발표 V: 대기환경

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 13:00~14:20**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀A**
■ **Organizer** **박정훈 교수(동국대학교), 이종석 교수(서강대학교)**

chair: 소중섭 박사(한국화학연구원)

13:00('10) CT-SO27 **Qualitative Validation of Core-shell Silica-Encapsulated Carbon-Zeolite Composites with Covalently Grafted PEI for Enhanced CO_2 Adsorption under Humid Conditions**
Wathone Oo, Ji Hye Park, May Zaw Win, Kwang Bok Yi
(Chungnam National University)

13:10('10) CT-SO28 **메탄 열분해 기반 연료 탈탄소화 연계 무화염 연소에서의 이산화탄소-질소산화물 동시 저감 연구**
유지호[1,2], 홍종섭[1], 김성일[2], 이은도[2], 이영재[2] ([1]연세대학교, [2]한국생산기술연구원)

13:20('10) CT-SO29 **Enhancing SO_2 resistance in vanadium catalysts with tungsten disulfide for NH_3-SCR**
Donghyeok Kim[1,2], Myeung-Jin-Lee[1], Bora Jeong[1], Bora Ye[1], Seungho Cho[2], Hong-Dae Kim[1] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Ulsan National Institute of Science and Technology)

13:30('10) CT-SO30 **Preparation of N-doping controlled carbon derived from crab shell for enhanced CO_2 adsorption**
Jiyull Kim, Deok Woo Kim, Dong Seop Choi, Ji Bong Joo
(Konkuk University)

13:40('10) **coffee break**

13:50('10) CT-SO31 **Simultaneous NO_x and SO_x Removal for Flue Gas Applications via Single and Double Stage Absorption Columns with Additives**
Jeong Min Lee, Jiyull Kim, Sang Bin Kim, Deok Woo Kim, Ji Bong Joo
(Konkuk University)

14:00('10) CT-SO32 **Carbonized Titanium-MIL-125-Derived Anatase TiO_2 as a Novel Support for Enhanced Selective Catalytic Reduction**
Hyejin Kim[1,2], Hee Soo Kim[1], Jungho Jae[2], Dong-Ha Lim[1]
([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan National University)

14:10('10) CT-SO33 **Revealing the active Cu species in Cu/ZSM-5 catalysts for the selective catalytic oxidation of ammonia**
Sein Hwang, Dong Chan Park, Hyeongdong Jung, Eunwon Lee,
Do Heui Kim (Seoul National University)

학생 구두발표 VI: 청정생산

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 14:00~14:30**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀A**
■ **Organizer** **이홍식 박사(한국생산기술연구원)**

chair: 김정필 박사(한국생산기술연구원)

14:00('10) CT-SO34 **Molecular dynamic simulations to estimate the solubility of fatty acids in water at elevated temperatures and pressures**
Jeongho Park, Wonbin Seo, Tae Jun Yoon (Seoul National University)

14:10('10) CT-SO35 **Bilayer gas sensors with a catalytic CeO_2 overlayer for exclusive detection of aromatic compounds**
Seong-Young Yoon, Jung-Hoo Seo, Seong-Yong Jeong
(Kongju National University)

14:20('10) CT-SO36 **Ammonia separation using metal halides by high temperature pressure swing adsorption**
HyeokSang Ryu[1,2], HeeSu Kim[1], Jung-Ho Jae[2], Dong-Ha Lim[1]
([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan National University)

학생 구두발표 VII: 에너지저장

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 14:10~15:30**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸B**
■ **Organizer** **조중상 교수(충북대학교)**

chair: 박상백 교수(충남대학교), 박진성 교수(아주대학교)

14:10('10) CT-SO37 **Structurally Engineered Liquid Crystalline $Ti_3C_2T_X$ MXene Films via Bio-Inspired Molecules for High-Performance Energy Storage**
Seojin Woo, Sunghee Choi, Ingyu Choi, Dongju Lee
(Chungbuk National University)

14:20('10) CT-SO38 **금속-유기 골격체 기반 전이금속 질화물/탄소 복합체 합성 및 리튬 이차전지 음극 소재로의 적용**
정승호, 조중상 (충북대학교)

14:30('10) CT-SO39 **이중 양·음이온 도핑한 Co-free $LiNi_{0.9}Mn_{0.08}Al_{0.02}O_2$ 양극재의 합성 및 고안정성 리튬이온이차전지로의 응용**
김준, Srinivasan Alagar, 박기대, 정상문 (충북대학교)

14:40('10) CT-SO40 **리튬이온전지용 실리콘 내재된 3차원 CNT/rGO 복합 마이크로스피어 합성 및 피치 유래 탄소 코팅 최적화**
조범수, 조중상 (충북대학교)

14:50('10) CT-SO41 **Structural Engineering of $Ti_3C_2T_x$ MXene with Cellulose Nanocrystals toward High-performance Flexible Supercapacitors**
Sunghee Choi, Seojin Woo, Dongju Lee (Chungbuk National University)

15:00('10) CT-SO42 **Novel Uniformly sized Yolk-Shell Microspheres Synthesis by One-Pot Spray Pyrolysis and Application as Potassium-Ion Battery anode**
Tae Ha Kim[1], Yun Chan Kang[2], Gi Dae Park[1]
([1]Chungbuk National University, [2]Korea University)

15:10('10) CT-SO43 **Core-Shell structured composite Synthesis and Electrode Design for High-Energy-Density All-Solid-State Batteries**
Jin Woong Lee[1,3], Jin Sung Park[2], Do Woong Yoon[1], Yoon Chan Kang[3], Dae Soo Jung[1] ([1]Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, [2]Ajou University, [3]Korea University)

15:20('10) CT-SO44 **Spray pyrolysis of waste-derived solutions for the synthesis of heteroatomdoped cobalt oxide yolk-shell microspheres with enhanced lithium storage**
Yeong Beom Kim[1,2], Yun Chan Kang[1], Gi Dae Park[2]
([1]Korea University, [2]Chungbuk National University)

포스터발표 I: 대기환경

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 09:00~11:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비**
■ **Organizer** **정성엽 교수(경북대학교)**

PE-1 **탄닌산 기반 금속-킬레이트 복합체를 이용한 저온 환원 촉매 제조 및 암모니아 분해 반응 적용**
황성범, 김나연, 최동섭, 주지봉 (건국대학교)

PE-2 **Al_2O_3 중공사막 모듈의 혈액투석 성능 및 혈액적합성 평가**
황재연, 박소희, 허승희, 박정훈 (동국대학교)

PE-3 **Structure Modulation of SBA-15-Based Porous Materials for Enhanced CO_2 Capture Performance**
So Hee Park, Min Yeong Ko, Jae Yeon Hwang, Jung Hoon Park (Dongguk University)

PE-4 **리그닌 고순도화 및 염분 분리 기술 개발**
강은희, 장학룡, 신민창, 황재연, 박정훈 (동국대학교)

PE-5 **항공유의 흡열량 향상과 코킹 저감을 위한 개시제 첨가 연구**
신민창[1], 박상민[1], 정병훈[2], 박정훈[1] ([1]동국대학교, [2]국방과학연구소)

PE-6 **Pd-Ru 중공사 분리막의 제작 및 성능 향상: γ-Al_2O_3로 개질한 α-Al_2O_3 지지체 기반 고온 수소 분리**
한성우, 장학룡, 박정훈 (동국대학교)

PE-7 **알루미나 중공사 기반 팔라듐 합금 분리막의 수소 투과 특성 향상을 위한 표면 조도 개선과 진공 보조 도금 기법**
허승희, 한성우, 박정훈 (동국대학교)

PE-8 **다성분 합금설계를 통한 Pd-Ag-Cu 수소 분리막 제조 및 성능 검증**
박상민, 한성우, 신민창, 장학룡, 박정훈 (동국대학교)

PE-9 **Chitosan-Functionalized Prussian Blue/TiO_2 Nanohybrids for Photocatalytic Mineralization of PFOA in Water**
Gaeun Kim, Kyubeom Lee, Yujeong Jeong, Sungwook Chung (Pusan National University)

PE-10 **Comparative Analysis of Adsorption Energy Distributions of CO_2 and N_2 on Microporous Activated Carbon**
Tae Heon Kim[1], Min Ju Kim[1], Soon Do Yoon[2], Heseong An[1], Sung Ho Song[3], Wang Geun Shim[1] ([1]Sunchon National University, [2]Chonnam National University, [3]Kongju National University)

PE-11 **Preparation and Characterization of Carbonaceous Materials from Waste Denim Fabrics for CO_2 Adsorption**

Min Ju Kim[1], Tae Heon Kim[1], Soon Do Yoon[2], Heseong An[1], Sung Ho Song[3], Wang Geun Shim[1] ([1]Sunchon National University, [2]Chonnam National University, [3]Kongju National University)

PE-12 **Effect of Design Parameter Variations on CO_2 Absorption Performance of a Membrane Contactor**

Huijun Kim[1,2], Hojun Song[1], Jo Hong Kang[1,2], Seonyeop Hwang[1], Hyun Sic Park[1], Jong Hak Kim[2] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Yonsei University)

PE-13 **$MgAl_2O_4$ 지지체 기반 Ni 촉매의 CO_2 해리 반응 및 건식 개질 반응 특성**

장정규, 권병찬, 김민규, 이승우, 박노국 (영남대학교)

PE-14 **알루미늄 기반 MOF(Metal-Organic Framework)의 제조 및 CF_4 흡착 특성 평가**

박제성 (한국생산기술연구원)

PE-15 **Enhanced surface and catalytic behaviour of the NH_3-SCR catalyst**

Bora Jeong[1,2], Myeung-jin Lee[1], Ye Jin Choi[1], Donghyeok Kim[1], Hong-Dae Kim[1] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan National University)

PE-16 **Simultaneous Reduction of Methane Slip and CO over a Non-Noble $NiCo_2O_4$ Catalyst for LNG-Powered Ships**

Wonjung Cho[1,2], Gyungmin Choi[2], Hee Soo Kim[1], Dong-Ha Lim[1,2] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan National University)

PE-17 **아민 조합 및 혼합에 따른 이산화탄소 포집 특성**

손주희[1,2], 강조홍[1,2], 백경민[1,2], 이승윤[1,2], 송호준[1], 배윤상[2] ([1]한국생산기술연구원, [2]연세대학교)

PE-18 **Evaluation of the Effect of Nanoparticle Addition on the CO_2 Capture Performance of the CO_2 Absorbents with High Concentration**

Gyeongmin Baek[1,2], Jo Hong Kang[1,2], Hyun Sic Park[1], Hojun Song[1], Youn-Sang Bae[2] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Yonsei University)

PE-19 **금속 재료 부식 및 NO_X 열화 분석을 통한 이산화탄소 흡수제의 장기 성능 평가**

이승윤[1], 백경민[1,2], 강조홍[1,2], 박현식[1], 송호준[1] ([1]한국생산기술연구원, [2]연세대학교)

PE-20 **반도체 식각 공정 내 NO_2-N_2 환원 특성 분석 관련 실험적 연구**

한유진[1,2], 이승연[1,3], 이용운[1] ([1]한국생산기술연구원, [2]건국대학교, [3]성균관대학교)

PE-21 **대기오염물질 배출기준의 강화가 소형·중형 소각로에 미치는 환경적 영향의 전과정평가(LCA) 기반 정량평가**

이수민[1,2], 조경일[1], 이용운[1] ([1]한국생산기술연구원, [2]건국대학교)

PE-22 **Stepwise pH-Controlled Seawater Carbonation for Efficient Mg^{2+} and Ca^{2+} Recovery**
Jaeyong Yang[1,2], Taejong Jang[1], Young Bok Ryu[1] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Dongguk University)

PE-23 **Design and Performance Evaluation of Metal Monolith-Based Coated Catalysts with Enhanced Low-Temperature Activity and Water Resistance for NH_3-SCR**
Chaekyeong Kim[1,2], Jong-Hoon Lee[1], Jungho Jae[2], Hee Soo Kim[1], Dong-Ha Lim[1,2] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan National University)

PE-24 **고성능 및 고내구성 CF_4 가수분해 촉매에 관한 연구**
이은한[1,2], 조원섭[1,3], 조재현[4], 김한성[2], 이신근[1] ([1]한국에너지기술연구원, [2]연세대학교, [3]고려대학교, [4]나노화인테크(주))

PE-25 **Red mud 촉매를 이용한 복합 냉매 분해에 관한 연구**
조원섭[1,2], 이은한[1,3], 김세호[2], 이신근[1] ([1]한국에너지기술연구원, [2]고려대학교, [3]연세대학교)

PE-26 **Development of transition metal-based catalysts for unburned ammonia mitigation in ammonia co-firing with coal**
Yeon-Jeong Jo, Sangmin Lee, Kyoungil Park, Min Eui Lee (KEPCO Research Institute)

PE-27 **비 귀금속 복합 산화물 촉매의 스케일 업 및 성형 촉매 연구 개발**
이연진, 임영환, 김영민, 채호정 (한국화학연구원)

PE-28 **Performance and Stability of CHA Zeolite Membranes under Humid Conditions for Biogas Purification**
Yubin Lee[1,2], Ahrumi Park[1], Jungkyu Choi[2], Jaesung Park[1] ([1]Korea Research Institute of Chemical Technology, [2]Korea University)

PE-29 **마이크로웨이브 보조 탈착을 적용한 산화구리/제올라이트 복합체 기반 고효율 CO_2 흡착제 개발**
이준상, 손수빈, 정주현, 김정철 (국립한밭대학교)

PE-30 **H_2-SCR의 산화물 지지체의 산화마그네슘 담지량에 따른 유해 가스 저감 특성**
서충길 (호원대학교)

포스터발표 I: 에너지저장

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 09:00~11:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비**
■ **Organizer** **정성엽 교수(경북대학교)**

PB-1 **Electrodeposition-Driven Surface Engineering for High-Performance Lithium Metal Anodes**
Da Eun Hyun, Jong Chan Choi, Yoon Ho Kim, Myungsung Sohn, Jiyeon Seo, Yun Chan Kan (Korea University)

PB-2 **Balancing Insulating and Conductive Component in Composite Scaffolds for Stable Lithium Metal Anodes**
Min Kim, Yeon Woo Nahm, Ju Young Kim, Kyung Yoon Hong, Yun Chan Kang (Korea University)

PB-3 **Engineered $Na_3V_2(PO_4)_3$/Carbon Composites for High-Performance Symmetric Sodium-Ion Batteries**
Yejin Ra, Jae Wook Kang, Jaesol Sim, Jihoon Lee, Yun Chan Kang (Korea University)

PB-4 **Advanced carbon-transition metal oxide 3D hosts for stable lithium deposition in metal anodes**
SungJu Kim, Jae Hun Choi, Noeul Kim, EunHye Kim, Yun Chan Kang (Korea University)

PB-5 **Hierarchically Porous Sn-NiO-carbon-CNT Framework via One-step Spray Pyrolysis Enabling Synergistic Conversion-Alloying Reactions for Stable Lithium Metal Anodes**
Hyo Yeong Seo[1], Ji Hong Park[2], Jae Won Lee[2], Yun Chan Kang[1], Gi Dae Park[2]
([1]Korea University, [2]Chungbuk National University)

PB-6 **Fabrication Process of Supercapacitor Separator Using Waste Resources**
Min Jun Lee, Kwang Se Lee (Gyeongkuk National University)

PB-7 **Characterization of Cellulose Depending on the Contents of Carbon Nanotube**
Hyun Woo Hong, Kwang Se Lee (Gyeongkuk National University)

PB-8 **안정적인 수계 아연 금속 전지를 위한 PVA/PVP 블렌드 폴리머 코팅**
이태현, 엄지현 (국립공주대학교)

PB-9 **나노 크기의 TiO_2 및 PVDF를 활용한 수계 아연 전지의 안정화**
김현서, 엄지현 (국립공주대학교)

PB-10 **수계아연전지의 폴리도파민 코팅 전극 적용**
김희성, 김진현, 엄지현 (국립공주대학교)

PB-11 **Yolk-Shell 구조의 Sn/Sn-Chalcogenide@Carbon 복합체 설계를 통한 리튬 이온 배터리 전기화학 특성 개선**
이진형, 정슬, 박지면, 박진성 (아주대학교)

PB-12 **에어로졸 기반 3차원 나노기공이 내포된 탄소 복합 이종금속 황화물 마이크로 구형입자의 합성 및 소듐 이온 배터리 음극재 적용**
박지면, 정슬, 이진형, 박진성 (아주대학교)

PB-13 **중공 탄소 나노스피어에 캡슐화된, 전이금속이 도핑된 금속 셀레나이드 합성 전략 및 소듐 이온 전지 음극에의 적용**
정슬, 이진형, 박지면, 박진성 (아주대학교)

PB-14 **배터리 셀 간 편차를 고려한 파라미터 확률 모델링 기반 팩 수준 전압·온도 예측 방법론 개발**
박훈, 김찬호, 이나은, 김정환 (연세대학교)

PB-15 **급속 충전 기반 배터리 열화 예측 통계 모델 개발**
이나은, 김찬호, 박훈, 김정환 (연세대학교)

PB-16 **Water adsorption based heat storage agent : Applications of zeolite 13X in various cation forms and heteroatom-doped aluminophosphate-based adsorbent**
정원준, 김영훈, 김가영, 조강희 (인하대학교)

PB-17 **고전압 리튬이온전지를 위한 유연성과 확장성을 갖춘 NASICON 구조 $LiZr_2(PO_4)_3$ 하이브리드 고체전해질**
박강환, 김재광 (청주대학교)

PB-18 **친수성 고분자 기반 친환경 수계 바인더를 이용한 리튬-황 전지 성능 향상 연구**
강채은, 류잉, 김재광 (청주대학교)

PB-19 **PEO 기반 리튬 치환 고분자 고체 전해질의 전기화학적 특성**
박주은[1], 박평용[2], 김재광[1] ([1]청주대학교, [2]더블유스코프코리아)

PB-20 **PAN/Al_2O_3 복합 고체 전해질 고전압 안정성에 대한 Sodium ion battery**
김태욱, 김재광 (청주대학교)

PB-21 **고성능 리튬-황 전지를 위한 Tri-금속 하이브리드 개질 분리막 설계: 원리 분석과 실용적 응용**
정태훈, 김재광 (청주대학교)

PB-22 **Anode-Free All-Solid-State Batteries with Liquid Metal–LiFSI Core–Shell Nanoparticle Interlayer**
Jimin Kwon, Do-Hun Kim, Sangbaek Park (Chungnam National University)

PB-23 **Synergistic Template and Dopant Engineering for Low-Temperature, Pressureless Sintering of $Li_7La_3Zr_2O_{12}$ Electrolyte**
Seung Hoon Chun, Sangbaek Park (Chungnam National University)

PB-24 **LiF Nano-Island Interfacial Design for Dendrite-Free Li Nanorod Growth in Anode-Free Lithium Batteries**
Jiwoo Kim, Mee-Ree Kim, Sangbaek Park (Chungnam National University)

PB-25 **Artificial Dual-Layer Coatings for Interface-Stabilized Lithium Metal Batteries**
Mee-Ree Kim, Jiwoo Kim, Sangbaek Park (Chungnam National University)

PB-26 **Laser-Irradiated Coffee Waste: Green Anode Materials for Lithium-Ion Batteries**
Si Eun Park[1], Tongmei Jing[2], Han Ku Nam[1], Sangbaek Park[1], Young-Jin Kim[2]
([1]Chungnam National University, [2]Korea Advanced Institute of Science and Technology)

PB-27 **Biomimetic PEO/BNNS Hybrid Interface for Stabilizing Li Anodes in High-performance Lithium–Sulfur Batteries**
Yechan Kim, Hyunsu Yu, Dongju Lee (Chungbuk National University)

PB-28 **분무 열분해 공정을 이용한 Ni-rich NCA 양극재의 합성 및 전이 금속 도핑 효과**
김하경, 김태하, 박기대, 정상문 (충북대학교)

PB-29 **탄소 코팅된 Nb MXene 지지 전이금속 셀레나이드 음극재의 합성 및 리튬이온이차전지로의 응용**
이응준, Erdenebayar Baasanjav, 정상문 (충북대학교)

PB-30 **고엔트로피 금속산화물 나노 파이버 합성을 통한 리튬이온 배터리 음극의 전기화학적 성능 특성**
명준재, 김승리, 김은미, 정상문 (충북대학교)

PB-31 **다성분계 고엔트로피 산화물 도핑을 통한 Ni-Rich 코발트-프리 리튬이온이차전지용 양극재의 합성 및 성능 최적화**
김승리, 김은미, 정상문 (충북대학교)

PB-32 **Spray Pyrolysis-Based Pre-Lithiation Strategy with Lithium Flux for Co-Free Single-Crystal Ni-Rich Cathodes**
Seung Woo Chun, Jae Hyeon Choi, Gi Dae Park, Sang Mun Jeong
(Chungbuk National University)

PB-33 **Enhanced Polysulfide Conversion in Lithium–Sulfur Batteries Using a V_2CT_x MXene/Porous Carbon Nanofiber Interlayer**
Hyunsu Yu, Yechan Kim, Dongju Lee (Chungbuk National University)

PB-34 **분무 건조 공정 기반 이성분계 전이금속 산화물/질소-도핑 탄소 복합 마이크로스피어의 합성 및 리튬 이차전지 음극 성능 평가**
곽영신, 조중상 (충북대학교)

PB-35 **Ethylene-based triamine/전이 금속 산화물 complex 복합 중공형 N-도핑 탄소 마이크로스피어의 단일 분무 열분해 기반 합성과 리튬 이차전지 음극 성능 연구**
김진웅, 조중상 (충북대학교)

PB-36 **Stabilizing Zinc Metal Anodes with Surface Engineered MXene for Aqueous Zinc Ion Batteries**
Minseo Kim, Ingyu Choi, Dongju Lee (Chungbuk National University)

PB-37 **Stable Lithium Metal Batteries Enabled by 3D Porous Yolk–Shell Carbon Integrated with Multi-Anion Metal Compound ZnSSe Nanocrystals**
Jin Won Yang[1], Hyo Yeong Seo[2], Seung Yup Baek[1], Gi Dae Park[1]
([1]Chungbuk National University, [2]Korea University)

PB-38 **폴리도파민 유래 질소-도핑 탄소 코팅 이원 금속 셀레나이드/그래핀 복합 마이크로스피어의 합성 및 소듐이온배터리 음극소재로의 적용**
유동국, 조중상 (충북대학교)

PB-39 **Enhancing Zinc Anode Stability via Surface-Modified BN Nanosheet Protective Coatings in Aqueous Zinc-Ion Batteries**
Ingyu Choi, Seojin Woo, Minseo Kim, Dongju Lee (Chungbuk National University)

PB-40 **전기차 배터리팩 케이스의 압축 및 진동 해석을 통한 구조 신뢰성 평가**
김현수[1], 조민구[1], 강성욱[2], 이창연[3], 김재웅[1] ([1]한국생산기술연구원, [2]창원대학교, [3]대주코레스(주))

PB-41 **외기 온도 변화에 따른 차량용 PVT 시스템의 열전달 해석 평가**
하을용, 김영현, 정현정, 김재웅 (한국생산기술연구원)

PB-42 **리튬-황전지용 계층적 기공 구조를 갖는 Co-NC/CNT 복합체의 전기화학적 특성**
신성민[1,2], 김수연[1,2], 정휘돈[1,2], 한수진[1,2], 한승엽[1,2], 강윤찬[1], 김정현[2]
([1]고려대학교, [2]한국세라믹기술원)

PB-43 **Cathode Design for High-Performance All-Solid-State Batteries with High Active Material Loading**
Do Woong Yoon[1], Jin-Sung Park[2], Jin Woong Lee[1,3], Yun Chan Kang[3], Dae Soo Jung[1]
([1]Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, [2]Ajou University, [3]Korea University)

PB-44 **폐자원 업사이클링을 통한 리튬이온 배터리용 차세대 음극 소재 개발**
이인욱[1,2], 김가은[1], 이종덕[1,2], 강윤찬[2], 정대수[1] ([1]Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, [2]Korea University)

PB-45 **High-Performance Lithium-Ion Battery Anodes Based on Novel Structured Silicon–Graphite Composites with Two-Dimensional Graphite Framework**
Ga Eun Kim[1], Inuk Lee[1,2], Yun Chan Kang[2], Dae Soo Jung[1] ([1]Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, [2]Korea University)

PB-46 **단일 공정으로 합성된 개방형 다공성 SnO_2-SiO_2 복합체의 리튬이온전지 음극 특성**
한수진[1,2], 신성민[1,2], 김수연[1,2], 정휘돈[1,2], 한승엽[1,2], 강윤찬[1], 김정현[2]
([1]고려대학교, [2]한국세라믹기술원)

PB-47 **리튬-황 전지용 Co-NC/NCNT 복합 계면층의 합성 및 전기화학적 특성 연구**
정휘돈[1,2], 김수연[1,2], 신성민[1,2], 한수진[1,2], 한승엽[1,2], 강윤찬[1], 김정현[2]
([1]고려대학교, [2]한국세라믹기술원)

PB-48 **리튬-황전지 양극용 Co 기반 다성분계 촉매/CNT 복합체의 전기화학적 특성**
한승엽[1,2], 신성민[1,2], 정휘돈[1,2], 한수진[1,2], 강윤찬[1], 김정현[2] ([1]고려대학교, [2]한국세라믹기술원)

포스터발표 I: 에너지전환

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 09:00~11:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비**
■ **Organizer** **정성엽 교수(경북대학교)**

PC-1 **BMP test를 통한 미세플라스틱과 항생제의 혐기성 소화에 미치는 영향 분석**
지태현, 이지섭, 장순웅, 정우진 (경기대학교)

PC-2 **미세조류 수열액화를 통한 바이오항공유 원료 생산의 최적화 연구**
이건호, 이아영, 장순웅, 정우진 (경기대학교)

PC-3 **바이오매스 가스화에서 폐자원 기반 CaO-Ni DFM을 이용한 수소 생산**
정세은, 김문영, 채호진, 남형석 (경북대학교)

PC-4 **파라핀계 탄화수소 제조를 위한 방향족의 촉매 수소화 반응 특성**
한기보, 장정희, 이지은, 장현성, 윤여진, 이재홍 (고등기술연구원)

PC-5 **전해질 엔지니어링을 통한 (광)전기화학적 과산화수소 생성 및 전극 안정성 향상**
한재빈, 박이슬 (국립부경대학교)

PC-6 **Mechanochemical synthesis of multicomponent bismuth-based molybdate catalysts for propylene ammoxidation to produce acrylonitrile**
ChangJin Han[1], Jeong Hwan Chun[2], Chan Hun Kim[2], Do Heui Kim[1]
([1]Seoul National University, [2]Hanwha Solutions)

PC-7 **Sensitivity of Spin Initialization, Cell Parameters, and Dispersion Corrections in DFT Modeling of ORR on Pt-Na Single-Atom Catalysts**
Ye Won Kang, Seok Ki Kim (Ajou University)

PC-8 **CPFD Simulation for Enhanced Heat Management in CO_2 Fischer-Tropsch Fluidized Bed Reactors**
Seo Young Park, Seok Ki Kim (Ajou University)

PC-9 **발표취소**

PC-10 **침전제에 따른 메탄올 합성 촉매 전구체의 침전 특성 영향 조사**
권병찬[1], 장정규[1], 박노국[1], 이승우[1], 김병기[2], 배종욱[2] ([1]영남대학교, [2]성균관대학교)

PC-11 **합성 pH 조건에 따른 Cu-Zn-In 촉매의 조성 안정성 및 메탄올 합성 성능**
권민석[1], 장정규[1], 권병찬[1], 박노국[1], 배종욱[2], 권재현[2] ([1]영남대학교, [2]성균관대학교)

PC-12 **매체순환-산화탈수소화 공정용 Ti 치환 $SrFeO_{3-\delta}$ 산소전달입자 연구**
백승훈, 김향동, 신지현, 손정민 (전북대학교)

PC-13 **바나듐계 매체순환-산화탈수소화용 산소전달입자 연구**
김향동, 백승훈, 신지현, 손정민 (전북대학교)

PC-14 **칼슘루핑이 접목된 매체순환 메탄부분산화용 철산화물 산소전달입자 연구**
신지현, 백승훈, 김향동, 손정민 (전북대학교)

포스터발표 I: 청정생산

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 09:00~11:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비**
■ **Organizer** **정성엽 교수(경북대학교)**

PG-1 **Development of Graphene Synthesis Methodology : Enhanced Dispersibility and Substrate Adhesion for Solution-Based Processing**
Yonghyun Lee, Chungmin Ahn, Chang-Ho Choi (Gyeonsnag National University)

PG-2 **Size-controllable, High-yield, and Additive-free $Ti_3C_2T_x$ MXene Inks for Inkjet and Slot-die Printed MXene Film with High-quality**
Yeongwon Kwak, Sujin Park, Chang-Ho Choi (Gyeongsang National University)

PG-3 **VOCs 농도 측정용 PID 센서를 이용한 실시간 모니터링 특성 연구**
윤성필, 이지은, 전동환 (고등기술연구원)

PG-4 **고압가스의 안전 배출을 위한 볼밸브 개도율 변화에 따른 가스 배출 특성 연구**
윤성필, 윤덕규, 전동환 (고등기술연구원)

PG-5 **고농도 VOCs 측정을 위한 센서 비교 연구**
이지은, 윤성필, 윤덕규, 전동환 (고등기술연구원)

PG-6 **실란화된 ZSM-5 제올라이트 촉매에서 Mo 담지 조건과 바인더 함량 최적화 및 성형 형태의 영향**
김지연[1], 이중엽[1], 김민채[1], 김민희[1], 백승주[1], 이소정[1], 김도희[2], 전종기[1] ([1]국립공주대학교, [2]서울대학교)

PG-7 **Bead-type NiO-Mo/HZSM-5 성형 촉매의 전처리가 메탄 탈수소방향족화에 미치는 영향**
이중엽[1], 김민희[1], 김민채[1], 김지연[1], 백승주[1], 이소정[1], 김도희[2], 전종기[1] ([1]국립공주대학교, [2]서울대학교)

PG-8 **실란 처리한 NiO-Mo/ZSM-5 Powder 촉매와 Extrudate 촉매의 재생**
백승주[1], 이중엽[1], 김민채[1], 김민희[1], 김지연[1], 이소정[1], 김도희[2], 전종기[1] ([1]국립공주대학교, [2]서울대학교)

PG-9 **외부산점 실란화가 NiO-Mo/ZSM-5 촉매의 Methane DehydroAromatization 반응에 미치는 영향**
김민채[1], 이중엽[1], 김민희[1], 김지연[1], 백승주[1], 이소정[1], 김도희[2], 전종기[1] ([1]국립공주대학교, [2]서울대학교)

PG-10 **$PdO-SnO_2$ 다공성 분말을 활용한 초고속·고감도·고선택성 H_2 가스센서 설계**
서정후, 윤성영, 정성용 (국립공주대학교)

PG-11 **메탄 탈수소화 반응용 실란 처리한 NiO-Mo/HZSM-5 Powder 및 Bead 성형 촉매의 재생**
이소정[1], 이중엽[1], 김민희[1], 김민채[1], 백승주[1], 김지연[1], 김도희[2], 전종기[1] ([1]국립공주대학교, [2]서울대학교)

PG-12 **Mo/ZSM-5 촉매에서 Mo 담지 조건이 메탄 탈수소 방향족화 반응에 미치는 영향**
김민희[1], 이중엽[1], 김민채[1], 김지연[1], 백승주[1], 이소정[1], 김도희[2], 전종기[1] ([1]공주대학교, [2]서울대학교)

PG-13 **해조류 바이오매스와 생분해성 폐플라스틱의 공동수열액화 반응 특성 연구**
정승묵, 강주원, 차재원, 전혜린, 이도연 (국립한밭대학교)

PG-14 **In-situ activation of photoelectrochemical performance and high stability of three-dimensional hierarchical BiOBr in bromide electrolyte**
Wonjung Choi, Yiseul Park (Pukyong National University)

PG-15 **Electrocatalytic Reduction of Lignin to Aromatic Compounds and Cyclohexenes**
Seoyeon Kim[1], Neha Karanwal[1], Noritatsu Tsubaki[2], Jaehoon Kim[1]
([1]Sungkyunkwan University, [2]University of Toyama)

PG-16 **저순도 e-메탄의 증기 혼합 연소 시 화학 반응 메커니즘 비교**
류익환, 한태훈 (수원대학교)

PG-17 **Life cycle assessment of e-methane fueled marine powertrain systems**
Taegeun Lee, Taehoon Han (University of Suwon)

PG-18 **Lattice Hydroxyl-Driven Mechanism of Zn-gallate-Catalyzed PO/CO_2 Copolymerization**
Hye Jeong Joe, Seok Ki Kim (Ajou University)

PG-19 **머신러닝 기반 이산화탄소-메탄올 전환 촉매 조성 최적화**
김남규, 김석기 (아주대학교)

PG-20 **Mesoporous Zeolite Beta Nanosponge with Enhanced Acidity for High-Performance Tributyrin Transesterification**
Kyungmin Cho, Jaewhan Lee, Kanghee Cho (Inha University)

PG-21 **김(*Pyropia* spp.)의 육상 양식을 위한 영양분 물질수지 및 에너지 수지**
김승건[1], 박상현[2], 이호원[1], 목영선[1] ([1]제주대학교, [2]제이케이푸드)

PG-22 **파이롯 분무건조 공정 기반 다공성 수산화아파타이트 마이크로스피어의 제조 및 콜라겐 생성능 평가**
정재인, 조중상 (충북대학교)

PG-23 **Process Understanding of 3D Lattice Structure Fabrication by Metal Binder**
고종완, 조희준, 하정홍 (Korea Institute of Industrial Technology)

PG-24 **열수처리를 이용한 폐펄프의 리그닌-셀룰로오스 전환 연구**
김성현[1,2], 이철진[2], 이홍식[1] ([1]한국생산기술연구원, [2]중앙대학교)

PG-25 **레이저 쇼크 피닝을 통한 L-DED 316L 스테인리스강의 기계적 특성 및 수소 취성 저항성 향상**
하정홍 (한국생산기술연구원)

PG-26 **Surface and Pore Modification of Activated Carbon Using HNO_3 and H_2O_2 for Regenerable VOC Adsorbents**
방나현, 김수한 (한국생산기술연구원)

PG-27 **CP Ti-WC 복합재 레이저 클래딩 하드페이싱의 미세조직 및 기계적 특성 분석**
하정홍 (한국생산기술연구원)

PG-28 **Quantitative Evaluation of CO_2 Release from Carbonate-Based Reactions under High-Temperature Hydrothermal Conditions**
Ji Sun Lim[1,2], Sung Hyun Kim[1,3], Gun Woo Shin[1,2], Jaehoon Kim[2], Chul-Jin Lee[3], Hong-shik Lee[1] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Sungkyunkwan University, [3]Chung-Ang University)

PG-29 **Effects of Different Humectants on Binder Properties for Additive Manufacturing of Metal Powders by Binder Jetting Technique**
Tran Thi Yen[1], Min A Bae[1,2], Jae Ho Baek[1] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan University)

PG-30 **Cultivation optimization of *Bacillus* spp.: Strain Selection and RSM-based Medium Optimization for Hair-Loss Applications**
Kyeongju Kang, Hyeonseon Lee, Doyeon Kim, Jaehoon Cho, Woo-Shik Shin (Korea Institute of Industrial Technology)

PG-31 **Optimized Alkyl Ester Derivatives of Protocatechuic Acid Suppress TNF-α and LPS-Mediated Inflammation in HaCaT Keratinocytes**
Woo-Shik Shin[1], Dong Young Kang[2], Kyoung-Jin Jang[2], Jaehoon Cho[1] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Sejong University)

PG-32 **지속 가능한 CMP 공정을 위한 BTA 대체 Slurry 개발**
이준희, 임지혜, 정주현, 김정철 (국립한밭대학교)

PG-33 Ammonia adsorption-desorption performance of metal oxide supported $MgCl_2$

HyeokSang Ryu[1,2], HeeSu Kim[1], Jung-Ho Jae[2], Dong-Ha Lim[1]
([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan National University)

포스터발표 I: 청정융합

■ **일시** 2025년 9월 25일(목) 09:00~11:00
■ **장소** 휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비
■ **Organizer** 정성엽 교수(경북대학교)

PD-1 리튬 회수 공정 중 발생하는 슬러지를 활용한 지오폴리머 제조

권동혁[1], 설길홍[2], 최궁원[2], 전병훈[2], 안용태[1] ([1]경기대학교, [2]한양대학교)

PD-2 Cloning, overexpression, and purification of putative 5-aminolevulinate CoA ligase from *Streptomyces nodosus* subsp. *asukaensis*

Putri Hanna Kristian, Chang Joon Kim (Gyeongsang National University)

PD-3 광촉매 암모니아 생산율 증가를 위한 아르곤 제트 플라즈마 개질 TiO_2

강태이[1], 고윤서[1], 백승우[1], 김연화[1], 종초은[1,2], 장민[1,2] ([1]광운대학교, [2]플라즈마바이오연구센터)

PD-4 In Situ Formed Sulfide-Mediated Aging of Microplastics and Its Impact on the Removal of Heavy Metals in Anaerobic Digestion

Eun-Ju Kim[1], Jihee Kim[1], Kyungjin Cho[2] ([1]Seoul National University of Science and Technology, [2]Korea Institute of Science and Technology)

PD-5 Optimizing Ce/Al Ratio for enhanced catalytic performance in the synergistic coupling of DRM and RWGS

Jong-Hoon Han, Beom-Jun Kim, Ho-Ryong Park, Su-jin Ryu, Hyun-Seog Roh
(Yonsei University)

PD-6 피셔-트롭쉬 합성에서 가솔린 범위 가지형 탄화수소 생산을 위한 코발트 나노입자 담지 제올라이트 나노스폰지 촉매 개발

김진태[1], 배대영[1], 조강희[1], 김정철[2] ([1]인하대학교, [2]국립한밭대학교)

PD-7 Evaluation of Magnesium Silicate as an Efficient Adsorbent for Na^+ Removal in High-Salinity Water Treatment

Kyung Chan Kang (Korea Institute of Industrial Technology)

PD-8 Process-intensified pretreatment of SCG-derived biocrude oil: Removal of inorganics for sustainable biofuel applications

Chejarla Venkatesh Reddy, Liao Ziqiao, SoonHo Cho, Byong-Hun Jeon
(Hanyang University)

PD-9 Microalgae as Nature's Solution to Phthalate Pollution
Ghulam Mustafa, Aliya Alvi, Muhammad Tariq Zahid, Nikita Yadav, Ramesh Kumar, Raul Tanpure Sadashive, Deok-Won Kim, Ju HyeokWon, Eunji Lee, Byong-Hun Jeon (Hanyang University)

PD-10 Comparative Biochemical Profiling of *Arthrospira platensis* and *Chlorella vulgaris* Under Stress Conditions for Aviation Biofuel Production
Aliya Alvi, Ghulam Mustafa, Nikita Yadav, Ramesh Kumar, JuHyeok Kwon, Hyelim Kwon, Eunji Lee, Deok-Won Kim, Raul Tanpure Sadashive, Byong-Hun Jeon (Hanyang University)

PD-11 Metaproteomics reveals enzymatic strategies deployed by anaerobic microbiomes to maintain methanogenic process at different lipid content
Rahul Tanpure, Bikram Basak, Swabhiman Mohanty, Mustafa Ghulam, Deok-Won Kim, Byong-Hun Jeon (Hanyang University)

PD-12 **폐기물 유래 흑연질 탄화 질소물 광촉매 활용 대기오염물질 제어 연구**
김유관, 이태우, 박종현, 권일한 (한양대학교)

포스터발표 I: 특별세션(III): [원광대학교 RISE 사업단] 미래형모빌리티 융합기술개발 세미나

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 09:00~11:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비**
■ **Organizer** **심재오 교수(원광대학교)**

PS3-1 Evaluation of Bacterial Filtration Performance of Biocompatible Polymers-based Nanofibrous Membranes
Hye Jin U, Hee-Kyeong Kim, Yoon Han Nam, Kyoung Duck Seo, Young-Sam Cho, Hyun-Ha Park (Wonkwang University)

PS3-2 Inhibitory Effects of Diospyros lotus Leaf Extract and Myricitrin on Histamine-Dependent and -Independent Pruritus
Ga-Hyun Kim, Jeongeun Bang, Bo-Mi Kim (Wonkwang University)

PS3-3 Electrochemical Evaluation of Manganese Oxide-Integrated Biomass-Derived Carbon for Supercapacitor Electrodes
Seung Heon Ryu, Young Wan Ju (Wonkwang University)

PS3-4 Influence of Calcination Temperature on the ORR/OER Activity of SSC Perovskite Nanofibers
Seong-Min Lim, Woo-Suck Oh, Min-Seok Jeong, Young-Wan Ju (Wonkwang University)

PS3-5 **소형 소방차용 물탱크의 슬로싱 거동에 대한 수치해석적 연구**
김준성, 허범기, 이상욱 (원광대학교)

PS3-6 **Eco-Friendly Synthesis of Cubic Boron Nitride Nanoparticles using Reactive Nitrogen Species Generated from Nitrogen Thermal Plasma**
Se Jin Oh, Han Jun Lee, Seong-Pyo Kang, Tae-Hee Kim (Wonkwang University)

PS3-7 **Effect of Electrocatalyst Distribution within Carbon Nanofibers on Electrochemical Performance**
Eun-Sae Han, Young-Wan Ju (Wonkwang University

포스터발표 II: 공정시스템

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 13:00~15:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비**
■ **Organizer** **정성엽 교수(경북대학교)**

PH-1 **ML-Based Cascade Framework with Genetic Algorithm for CO_2-to-Methanol Catalyst Discovery**
Hyunjin Kang[1,2], Hyundo Park[3], Youngjin Kim[4], Hyungtae Cho[5], Jaeho Baek[1], Jaewon Lee[6] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan National University, [3]Northwestern University, [4]Hanwha Totalenergies Petrochemical, [5]Kyung Hee University, [6]Hanyang University)

PH-2 **GCMC-Based Construction of a CO_2 and O_2 Adsorption Isotherm and Heat of Adsorption Database for a Large Set of MOFs**
안용상[1], 안나현[2], 박준영[1], 백재호[2], 가성빈[3], 조형태[1] ([1]경희대학교, [2]한국생산기술연구원, [3]울산대학교)

PH-3 **폐 PET 열분해를 통한 수소 생산 공정 제안**
이수민[1], 최동호[1], 길진우[1], 신창범[2], 이세영[3,4], 백재호[4], 조형태[1] ([1]경희대학교, [2]한양대학교, [3]연세대학교, [4]한국생산기술연구원)

PH-4 **신발 폐기물 열분해를 통한 수소 생산 공정 개발**
길진우[1], 최동호[1], 백재호[2], 신창범[3], 이재원[3], 조형태[1] ([1]경희대학교, [2]한국생산기술연구원, [3]한양대학교)

PH-5 **Optimizing Plastic Waste Sorting Process with Diversified Sorting Machine Capacity**
손준기, 안유찬 (계명대학교)

PH-6 **Economic Evaluation of Byproduct Separation from Electrochemical Glycerol Oxidation and Application of a Heat Exchanger Network**
Seohee Park, Yuchan Ahn (Keimyung University)

PH-7 Numerical Evaluation of Cryogenic Heat Exchanger Performance Using LNG Cold Energy for Data Center Cooling Applications
Chae-Young Lim, Chae-Eun Yeo, Myung-Ok Lee, Seong-Yool Ahn
(Institute for Advanced Engineering)

PH-8 Simulation and parameter optimization of PSA system for hydrogen recovery in SMR-based processes
Seungho Lee, Wangyun Won (Korea University)

PH-9 **발표취소**

PH-10 **발표취소**

PH-11 Effect of Baffle Design and Motion Dynamics on Boil-Off Gas in Cryogenic Liquid Hydrogen Transport
Jingyeong Im[1], Boram Gu[2], Wangyun Won[1]
([1]Korea University, [2]Chonnam National University)

PH-12 **블루 메탄올에서 그린 메탄올로의 전환에 맞춘 천연가스의 활용방안 탐색**
김태현, 박진우 (동국대학교)

PH-13 Food waste gasification integrated with CO_2 electrochemical reduction for enhanced hydrogen production
오세빈, 박진우 (동국대학교)

PH-14 High Temperature Fuel Cells (HTFCs) Applied for Carbon-Free and Low Carbon Fuels
백소현, 박진우 (동국대학교)

PH-15 **직접 공기 포집과 이산화탄소 전기분해, 가스화 기술을 통합한 지속 가능한 항공유 생산 공정**
김도희, 박진우 (동국대학교)

PH-16 Reversible solid oxide cell의 유연한 운전을 통한 저탄소·저비용 Power-to-Methanol 시스템
김윤건, 박진우 (동국대학교)

PH-17 Biogas-Derived Hydrogen Production Process Design for Hydrogen Turbine
문태현, 박진우 (동국대학교)

PH-18 Design and Optimization of CO_2 Capture from Flue Gas Using Single and Blended Amine Absorbents
Bogeon Kim, Jeong-Hoon Sa (Dong-A University)

PH-19 **Evaluating Low-Carbon Hydrogen Pathways for Decarbonizing Petroleum Refinery Hydroprocessing**
Khan Muhammad Ansub, Jay Liu (Pukyong National University)

PH-20 **Unlocking the Regional Economic Potential of Power-to-Methanol Pathway through Spatial Techno-Economic Mapping**
Hira Mahmood, Jay Liu (Pukyong National University)

PH-21 **An Integrated Anaerobic Digestion and Dry Methane Reforming Process for Sustainable Aviation Fuel Production**
Seungeun Kim, Jeongheon Kim, Inkyu Lee (Pusan National University)

PH-22 **4E analysis of synthetic natural gas production process using plastic waste via tar steam reforming and external hydrogen utilization**
Doyeong Ahn, Dongyeop Yeom, Inkyu Lee (Pusan National University)

PH-23 **Comprehensive environmental, economic, and uncertainty assessment of sustainable methanol pathways**
Hyewon Jeong, Sihwan Park, Inkyu Lee (Pusan National University)

PH-24 **Development of Hydrogen Liquefaction Process with Three-Stage Refrigeration: Focusing on Thermodynamic Perspective**
Sihwan Park[1], Duho Kang[1], Minseo Jeong[2], Haksung Kim[2], Moonsuk Choi[2], Inkyu Lee[1]
([1]Pusan National University, [2]GS Engineering & Construction Corporation)

PH-25 **Utilizing Liquid Hydrogen for the CO_2-to-Olefin Production to Improve Energy, Economic, and Environmental Performance**
Duho Kang, Sihwan Park, Inkyu Lee (Pusan National University)

PH-26 **Sustainable Hydrogen Production Process Integrating Waste Plastic Gasification and Carbon Dioxide Electrolysis**
Dongyeop Yeom, Doyeong Ahn, Inkyu Lee (Pusan National University)

PH-27 **Process Integration of Waste Tire Pyrolysis and CO_2-based Fischer-Tropsch Synthesis for Sustainable Aviation Fuel Production**
Jeongheon Kim, Hyunju Cho, Inkyu Lee (Pusan National University)

PH-28 **Design of Sustainable Urea Production Process: Integration of Methane-to-Urea with Power-to-Urea**
Sebin Park, Seoyeon Cho, Inkyu Lee (Pusan National University)

PH-29 **탄소세 시나리오에 따른 그레이, 블루, 그린 암모니아 생산 공정의 기술-경제성 평가**
이예진, 조서연, 이인규 (부산대학교)

PH-30 **암모니아 분해 촉매 종류에 따른 공정 최적화 및 기술-경제성 평가**
조서연, 이예진, 이인규 (부산대학교)

PH-31 **혼합 아민의 CO_2 흡수 성능 예측을 위한 도메인 지식 기반 머신러닝 모델 개발**
김민재[1], 주종효[2], 김정환[1] ([1]연세대학교, [2]한국생산기술연구원)

PH-32 **상용 리튬이온배터리 바인더의 제조 및 재활용 공정에 관한 기술경제성 평가**
김은서, 김정동, 김정환 (연세대학교)

PH-33 **재생에너지 불확실성을 고려한 수소 메탄올 동시 생성 공정 개발**
이성민, 김정동, 문일, 김정환 (연세대학교)

PH-34 **친환경 수소 운송과 저장 효율 향상을 위한 LNG-SMR-액화 수소 결합**
송경민, 변주영, 고진, 김정환 (연세대학교)

PH-35 **혼합 신가스 기반 메탄올 생산 공정의 설계-운영 연계 최적화**
최현준, 변주영, 김정동, 김정환 (연세대학교)

PH-36 **탄소 포집 및 막 증류 융합을 통한 고효율 리튬 생산 공정의 기술경제적 분석**
김민지, 김선우, 김정환 (연세대학교)

PH-37 **바이오전력 공급망 최적화: 텍사스 사례 연구**
정세민, 김정동, 김정환 (연세대학교)

PH-38 **지열발전소의 황화수소 배출을 활용한 수소 생산 시스템의 기술경제성 분석**
고진, 김유림, 김정환 (연세대학교)

PH-39 **국내 수입 액화수소 분배 공급망의 multi-period 최적화**
김영근[1], 최현준[1], 권휘웅[2], 김정환[1] ([1]연세대학교, [2]순천향대학교)

PH-40 **분자 구조를 이용한 인공지능 기반 CO_2 흡수량 예측 일반화 모델**
정재빈, 주종효, 김정환 (연세대학교)

PH-41 **양자 머신러닝을 통한 윤활유 물성 예측 모델의 일반화 성능 개선**
김찬호, 주종효, 김정환 (연세대학교)

PH-42 **재생에너지의 불확실성을 고려한 AEM 수전해 공정 최적화**
이동균[1], 김민수[2], 문일[1], 김정환[1] ([1]연세대학교, [2]Massachusetts Institute of Technology)

PH-43 **파과실험 데이터를 이용한 흡착제 평가를 위한 질량 전달 계수 및 다중 등온 매개변수의 동시 추정**
진석환, 진현석, 박재현, 이찬현, 가성빈 (울산대학교)

PH-44 **Xe/Kr 분리를 위한 양자 금속-유기 골격체의 multiscale high-throughput screening 및 경제성 분석**
정민주, 진석환, 진현석, 가성빈 (울산대학교)

PH-45 **Dynamic Simulation of Cyclic Steady-State Operation in Layered Sorption-Enhanced Water-Gas Shift Reactors: Effect of Bed Structuring and Adsorption Characteristics**
Dabin Yang, Seongbin Ga (University of Ulsan)

PH-46 **메탄올 합성 반응기의 수학적 모델링 및 반응 속도식 파라미터 추정**
Yunju Yu, Minju Jung, Seongbin Ga (University of Ulsan)

PH-47 **TEAchem: 화학공정의 기술 경제성 분석을 위한 범용 Python 패키지 개발**
허준우, 가성빈 (울산대학교)

PH-48 **Hybrid Modeling for Long-term Plant Performance Prediction in Reverse Osmosis Process**
Dongkyu Kim, Boram Gu (Chonnam National University)

PH-49 **Surrogate-Based Upscaling of Reverse Osmosis with Spacer-Resolved CFD**
Yu-hyeok Jeong, Boram Gu (Chonnam National University)

PH-50 **Mathematical Modeling and Simulation of Multi-Stage Hollow Fiber Membrane Contactors for Dissolved Oxygen Removal under Sweep Gas, Vacuum, and Combined Degassing Modes**
Sihyeon Lee, Boram Gu (Chonnam National University)

PH-51 **Thermal conductivity maximisation of thermal interface material with hybrid particle random distribution algorithm**
Dong-Gi Lee, Boram Gu (Chonnam National University)

PH-52 **Modeling Strategy for Bipolar Membrane Electrodialysis Systems with Acid-Base Equilibrium**
Jiun Yun, Boram Gu (Chonnam National University)

PH-53 **세라믹 적층제조를 위한 슬롯다이 코팅 공정 안정성 해석 및 기판 젖음성 영향 평가**
하정홍 (한국생산기술연구원)

PH-54 **Development of an Innovative Ceramic 3D Printing Method for Clean Technology**
고종완, 하정홍, 최지환 (Korea Institute of Industrial Technology)

PH-55 **흡착제의 상용 가능성 평가를 위한 PSA 공정 기반 MACO (Maximum Adsorbent Cost) 분석**
안나현[1], 윤승관[1], 이재원[2], 조형태[3], 백재호[1], 가성빈[4] ([1]한국생산기술연구원, [2]한양대학교, [3]경희대학교, [4]울산대학교)

PH-56 **석유화학 폐촉매로부터 메탄올 회수를 위한 증류공정**
정창훈[1], 강성진[2], 이만식[1,3] ([1]한국생산기술연구원, [2]한국폴리텍대학, [3]부산대학교)

PH-57 Comparative techno-environmental Study on SFW pyrolysis integration with hydrogen and methanol production
이세영[1,2], 백재호[1], 조형태[3], 이재원[4] ([1]한국생산기술연구원, [2]연세대학교, [3]경희대학교, [4]한양대학교)

PH-58 LSTM-Transformer Autoencoder-Based Anomaly Detection to Improve Process Safety
권혁인[1], 신창범[1], 안용상[2], 권혁원[3], 고태언[1], 이현지[1], 심유리[1], 백재호[3], 이재원[1]
([1]한양대학교, [2]경희대학교, [3]한국생산기술연구원)

PH-59 Green Methanol Production via CO_2-Assisted Blended Textile Waste Pyrolysis and biogas Steam Methane Reforming Process
신창범[1], 고태언[1], 권혁인[1], 심유리[1], 이현지[1], 박준영[2], 안용상[2], 이세영[3], 백재호[3], 이재원[1]
([1]한양대학교, [2]경희대학교, [3]한국생산기술연구원)

PH-60 A Study on Optimizing Scrubber Design to Reduce Channeling in Microbubble Scrubbers
고태언[1], 신창범[1], 권혁인[1], 심유리[1], 이현지[1], 길진우[2], 백재호[3], 이재원[1] ([1]한양대학교, [2]경희대학교, [3]한국생산기술연구원)

PH-61 Optimal Serpentine Mini-Channel Design for EV Batteries
이현지[1], 신창범[1], 고태언[1], 권혁인[1], 심유리[1], 백재호[2], 이재원[1] ([1]한양대학교, [2]한국생산기술연구원)

포스터발표 II: 수소 및 재생에너지

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 13:00~15:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비**
■ **Organizer** **정성엽 교수(경북대학교)**

PA-1 Sustainable Production of Bio-Methanol via CO_2-assisted Pyrolysis of Biomass: Techno-economic Analysis
박준영[1], 최동호[1], 안용상[1], 이세영[2,3], 백재호[3], 권일한[4], 이재원[4], 조형태[1] ([1]경희대학교, [2]연세대학교, [3]한국생산기술연구원, [4]한양대학교)

PA-2 Optimization of precipitant dropwise addition time in co-precipitated Ni-$Ce_{0.8}Zr_{0.2}O_2$ catalyst for dry reforming of methane
Geon-Hyeong Lee[1], Hyun-Seok Kang[1], Jung-Hoon Lee[1], Dong-Seong Kim[1], Hyun-Seog Roh[2], Yeol-Lim Lee[1] ([1]Keimyung University, [2]Yonsei University)

PA-3 **메탄 열분해를 위한 촉매 유동층 반응기 설계**
박동규, 유현정, 류재홍 (고등기술연구원)

PA-4 **통합 플라즈마-촉매 공정을 적용한 청록수소 생산의 기술경제성 평가**
정재형, 이진희, 박동규, 박수남, 류재홍 (고등기술연구원)

PA-5 **Methane Pyrolysis for Turquoise Hydrogen Production Using Ni-YSZ Catalysts via HASI Method**
Jin Hee Lee, Jae Hyung Jung, Soo Nam Park, Dong Kyu Park, Hyun Jung Yoo, Jae Hong Ryu (Institute of Advanced Engineering)

PA-6 **혼합 경질올레핀 기반 지속가능항공유 생산을 위한 Ni/ASA와 MFI 제올라이트 이중층 촉매 연구**
정주현, 손수빈, 이준상, 김정철 (국립한밭대학교)

PA-7 **Computational Fluid Dynamics Study on Multi-Stage Hydrogen Compression Process**
Suhyeon Son, Bogeon Kim, Jeong-Hoon Sa (Dong-A University)

PA-8 **다양한 버섯폐배지들의 촉매 열분해**
박영권, 장현준, 황세진 (서울시립대학교)

PA-9 **Optimizing HER at MoS_2 interfaces via Ni_3S_2 Facet Engineering**
Jeong Min Woo, Seok Ki Kim (Ajou University)

PA-10 **Ab Initio Study on the Synergistic Effects of Boron Doping on ORR Performance and Stability in PtNi**
Hyun Wook Hwang, Seok Ki Kim (Ajou University)

PA-11 **Microwave Synthesis Strategy for Enhancing the Selectivity of HEA Catalysts in Acetylene Hydrogenation**
이하늘, 김석기 (아주대학교)

PA-12 **DFT 기반 Au(111), AuOH(111), CuO(OH)(111) 표면에서의 Glucose 말단 산화 경로 비교**
황지영, 김석기 (아주대학교)

PA-13 **Condition Tuning for Selective Acetylene Hydrogenation over Pd Catalysts**
Ji Young Lee, Seok Ki Kim (Ajou University)

PA-14 **혼합 알케인 탄화수소 수증기 개질 반응: Ni계 촉매의 담체 영향**
김민주, 공지현, 권재민, 장원준 (아주대학교)

PA-15 **폐플라스틱 유래 합성가스로부터 나프타 생산을 위한 Fischer-Tropsch 촉매 반응**
권재민, 공지현, 김민주, 장원준 (아주대학교)

PA-16 **Semantic segmentation mask generation for wildfire images using independent HSV color ranges**
Jeong Kyu Kim[1], Jeonghwan Kim[2], Jongseok Kang[2], Tae-Eung Sung[1] ([1]Yonsei University, [2]Korea Institute of Science and Technology Information)

PA-17 **Physics-Informed Neural Network 기반 폐배터리 전구체 회수 공정 결정화 모델링**
박경근, 김정동, 김정환 (연세대학교)

PA-18 **수전해 기술별 경제성 분석을 통한 2050년 한국 그린수소 가격 전망**
김동현, 김유림, 김정환 (연세대학교)

PA-19 **AI 기반 광촉매 수소 생산을 위한 촉매 설계: 기술 경제 및 지역 최적화**
변주영, 김정환 (연세대학교)

PA-20 **CFD Modeling of Hollow Fiber Membrane Contactors for Oxygen Removal in Ultrapure Water Systems**
Ariyan Zare Ghadi, Boram Gu (Chonnam National University)

PA-21 **Molecular Passivation of Perovskites for Stable and Efficient Solar Cells**
Ashique Kotta, Abdullah, Hyung Kee Seo (Jeonbuk National University)

PA-22 **Organic Additive-Driven Interface Modulation and Crystallization Control for Enhanced and Stable Perovskite Solar Cells**
Abdullah, Ashique Kotta, Hyung Kee Seo (Jeonbuk National University)

PA-23 **석탄 복합발전 기반 수소·암모니아·메탄올 혼소 공정의 경제성 및 환경성 비교**
오정재, 임민석, 김인혜, 조성현 (전북대학교)

PA-24 **La-Fe계 산소전달입자 매체순환-산화탈수소화용 촉매 연구**
조수민, 이연지, 조민규, 백승훈, 김향동, 신지현, 손정민 (전북대학교)

PA-25 **코발트 도핑 FeNi/니켈폼 전극의 알칼리 수전해 특성 연구**
송채희, Lan Nguyen, Kannan Krishnan, Mohan Kumar, 목영선 (제주대학교)

PA-26 **Porous Metal Oxide-Functionalized Silica Adsorbents with High Palletisation Feasibility for Industrial Removal of Residual Ammonia**
May Zaw Win, Ji Hye Park, Wathone Oo, Thu Zar San, Kwang Bok Yi
(Chungnam National University)

PA-27 **N-도핑된 탄소 코팅층을 적용한 다공성 이종 금속 산화물 복합 마이크로스피어의 설계 및 리튬 이차전지의 음극소재로의 활용**
백지훈, 조중상 (충북대학교)

PA-28 **금속-유기 골격체 유래 주석 기반 다중 음이온 화합물/질소 도핑 탄소 복합 나노섬유 합성 및 리튬 이차전지 음극 소재로의 적용**
염혜원, 조중상 (충북대학교)

PA-29 **극저온 조건에서 고망간강의 인장 거동 분석**
하정홍 (한국생산기술연구원)

PA-30 **제조 공정에 따른 316L 스테인리스강의 미세조직 특성과 수소취성 저항성 비교 분석**
하정홍 (한국생산기술연구원)

PA-31 **스테인리스강 Laser-Arc Hybrid Welding(LAHW) 용접부의 초저온 충격 인성 평가**
지창욱, 박재한, 박정열 (한국생산기술연구원)

PA-32 **Small Data-Driven Machine Learning for Catalyst Screening toward Selective Hydrogenation of Furfural**
Ye Eun Kim[1], Hyeonjun Choi[2], Yong-Hee Lee[1,2], Junghwan Kim[2], Man Sig Lee[2]
([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Yonsei University)

PA-33 **머신 러닝 기반 공정 데이터 보간을 통한 실시간 제품 조성 예측 모델 개발**
권혁원[1], 조형태[2], 이재원[3], 백재호[1] ([1]한국생산기술연구원, [2]경희대학교, [3]한양대학교)

PA-34 **효율적인 화학적 순환 메탄 건식 개질을 위한 MgO 생성 제어 및 환원성 향상**
Jong Hwi Park[1], Sung Wan Kwon[1], Ji Hoon Kim[1], Ryun Na Kim[1], Da Hin Kim[2], Whi Dong Kim[1] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]University of Seoul)

PA-35 **pH-Dependent Synthesis of Ru/Al_2O_3 Catalysts for Toluene Hydrogenation**
Seonju Park[1], Ye Eun Kim[1], Man Sig Lee[1,2] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan National University)

PA-36 **알카라인 수전해의 부하변동 제어를 위한 온도와 압력에 따른 시스템 운전 영향성 평가**
양아윤[1,2], 이용운[1] (1한국생산기술연구원, 2건국대학교)

PA-37 **액상 유기 수소 운반체 수소화 반응에서 활성금속(M=Pt, Pd, Rh, Ru, Ir)에 따른 Al_2O_3기반 촉매의 활성 비교**
이용희[1,2], 김정환[2], 이만식[1,3] ([1]한국생산기술연구원, [2]연세대학교, [3]부산대학교)

PA-38 **Effect of solvent on the coating uniformity and catalytic performance of egg-shell $Pd@Al_2O_3$ catalysts for selective hydrogenation**
Phuong Nam Nguyen[1,2], Ye Eun Kim[1], Inkyu Lee[2], Man Sig Lee[1,2]
([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan National University)

PA-39 **Effect of reducing agent on the surface properties of Pd/C for benzaldehyde hydrogenation**
Anna Hwang[1,2], Ye Eun Kim[1], Jungho Jae[2], Man Sig Lee[1,2]
([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan National University)

PA-40 **Alkali and Alkaline Earth Metal Promoted Ru/Al_2O_3 Catalysts for Toluene Hydrogenation**
Hayoon Park[1,2], Chang-Hoon Jeong[1], Jungho Jae[2], Man Sig Lee[1,2]
([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan National University)

PA-41 **Optimization of Low-Temperature Water-Gas Shift Reaction over Cu-Zn-Al Catalysts through Controlled Preparation Parameters**
Minsang Jo[1,2], Jungho Jae[2], Hee Soo Kim[1], Dong-Ha Lim[1,2]
([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan National University)

PA-42 **Synthesis of Highly Active Low-Iridium OER Catalysts via a Simple Reducing Agent-Assisted Wet alloying Process**
Seong Ji Kim[1,2], Jin Ho Lee[2], Oi Lun Li[1], Dong-Ha Lim[1,2], Hee Soo Kim[2]
([1]KITECH & Pusan National University, [2]Korea Institute of Industrial Technology)

PA-43 **저온 암모니아 분해 성능 향상을 위한 비귀금속 CeO_2-CoFe 층상 이중산화물 촉매 개발 및 특성 연구**
이수언, Thien An Le, 김영민, 이유진, 김정랑, 김태완, 정광은, 채호정 (한국화학연구원)

PA-44 **암모니아 분해 Scale-Up을 위한 비귀금속계 성형 촉매 개발**
심기동[1], 권성민[1,2], 김영민[1], 임영환[1], 채호정[1] ([1]한국화학연구원, [2]고려대학교)

PA-45 **전기화 반응기를 통한 암모니아 기반 수소 생산**
고유진, 김승은, 김민식, 임영환, 김영민, 채호정 (한국화학연구원)

PA-46 **수소 캐리어로서 저압 암모니아 합성 촉매 성능 향상을 위한 세리아 기반 복합산화물 지지체 연구**
최진아[1,2], 이수언[1], 김태완[1], 김영민[1], 강기혁[1], 박선영[1], 문준혁[2], 채호정[1] ([1]한국화학연구원, [2]고려대학교)

PA-47 **수소추출을 위한 저비용 고효율의 암모니아 분해 촉매 개발**
권성민[1,2], 심기동[1], 김영민[1], 임영환[1], 채호정[1] ([1]한국화학연구원, [2]고려대학교)

PA-48 **메조기공 도입 및 Ni 분산 최적화를 통한 제올라이트 기반 에틸렌 올리고머화 촉매 설계 및 지속가능항공유 생산 향상**
손수빈, 이준상, 정주현, 김정철 (국립한밭대학교)

PA-49 **수소 생산 기지의 이산화탄소 포집 후 고순도 탄산 칼슘 생산기술 개발**
김경덕, 김인재, 박성수 (한국가스기술공사)

포스터발표 II: 자원순환

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 13:00~15:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비**
■ **Organizer** **정성엽 교수(경북대학교)**

PF-1 **소수성 분리막 기반 폐수내 고농도 암모니아 회수공정 최적화 연구**
차재훈, 윤다은, 정우진, 이인규, 장순웅 (경기대학교)

PF-2 **열-알칼리 전처리를 통한 PLA와 음폐수의 공동 혐기성 소화 최적화 및 메탄 수율 평가**
김남규, 임동재, 장순웅, 정우진 (경기대학교)

PF-3 **폐 플라스틱 빨대(PLA)와 커피 찌꺼기(CF)의 공수열 액화 반응 연구**
강주원, 차재원, 정승묵, 전혜린, 이도연 (국립한밭대학교)

PF-4 **괭생이모자반과 커피 찌꺼기의 공동 수열탄화를 통한 고품질 하이드로차 생산 가능성 연구**
차재원, 강주원, 정승묵, 전혜린, 이도연 (국립한밭대학교)

PF-5 **광산 폐기물을 활용한 이종 촉매 개발 및 활성 평가**
김수림, 이제찬 (성균관대학교)

PF-6 **지속 가능한 건설을 위한 친환경 소재와 혁신적 건축 기법의 결합**
김승원, 장희은, 이제찬 (성균관대학교)

PF-7 **HZSM-11 촉매를 이용한 폴리프로필렌 폐기물의 연료범위 탄화수소 전환 공정**
임삼열, 이제찬 (성균관대학교)

PF-8 **아산화질소를 산화제로 활용한 이종 촉매 기반 온실가스 고부가가치화**
이선호, 안진영, 이제찬 (성균관대학교)

PF-9 **자동차 폐기물 폴리카보네이트(PC)의 기계적 재활용 한계를 해결하는 화학적 모노머 회수 전략**
허성욱, 이제찬 (성균관대학교)

PF-10 **Applicability Study of Magnesium Silicate for Acid Value Control in Used Cooking Oil**
류영복 (한국생산기술연구원)

PF-11 **플라스틱 열분해 데이터의 AI 활용을 위한 표준화 및 DB 구축**
김형진, 최수현, 김종수, 정수화 (한국생산기술연구원)

PF-12 **폐타이어 열분해 촤의 비표면적 증대를 위한 물리적·화학적 활성화 연구**
윤주형[1,2], 이다경[1], 김종수[1], 김창용[3], 주용태[3], 정수화[1] ([1]한국생산기술연구원, [2]한양대학교, [3]현대자동차)

PF-13 **고순도 카본블랙 생산을 위한 폐타이어 열분해 촤의 2단계 정제 연구**
이다경[1,2], 윤주형[1], 김종수[1], 주용태[3], 김창용[3], 정수화[1] ([1]한국생산기술연구원, [2]서울시립대학교, [3]현대자동차)

PF-14 **Study on the Recovery of Vinylene Carbonate(VC) Additive from the Electrolyte of Lithium Ion Waste Battery**
Hayoon Park[1,2], Sungjin Kang[3] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pusan National University, [3]Korea Polytechnics University)

PF-15 **Cu CMP 폐슬러리에서 SiO_2 연마입자 회수 및 표면 개질을 통한 재활용 가능성 평가**
임지혜, 이준희, 정주현, 김정철 (국립한밭대학교)

PF-16 **Carbon Emission Mitigation from the Pyrolysis of Invasive Biomass**
Gitae Moon, Taewoo Lee, Eilhann E. Kwon (Hanyang University)

PF-17 Recycling of cathode materials from spent LFP batteries through ultrasonication reaction

Hye-Lim Kwon, Kung-Won Choi, Ju-Hyeok Kwon, Kil-Hong Seol, Bong-Hun Jeon (Hanyang University)

포스터발표 II: 특별세션(IV): (다부처) 화재 능동대응을 위한 소화탄 개발 및 활용 기술 심포지엄

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 13:00~15:00**

■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비**

■ **Organizer** **이주동 박사(한국생산기술연구원)**

PS4-1 **소화탄 화재 현장 적용 시 고층빌딩의 강화유리 파공에 대한 연구**

노희종 ((주)대동계측)

PS4-2 **AI 학습용 화재 이미지 데이터 처리 방안 연구**

박진현, 류인원, 이우형, 오재민, 진병삼 ((주)미소테크)

PS4-3 **차량용 소화탄 투척장치의 개발 현황**

이병채, 최종원 ((주)에스엔)

PS4-4 **가스하이드레이트 소화탄의 난접근성 화재 현장적용을 위한 매뉴얼 개발에 관한 연구**

이규창[1], 구우회[2], 손혜정[2], 박상진[2], 조성준[1] ([1](재)경남테크노파크, [2](재)부산테크노파크)

PS4-5 **Experimental study on the CF_3I gas hydrate as potential clean fire extinguishing agent**

Jonghwan Lee[1], Yebom Shin[1], Seung Uk Hwang[1], Sang-Gyu Cho[1,2], Ju Dong Lee[2], Jeong-Hoon Sa[1] ([1]Dong-A University, [2]Korea Institute of Industrial Technology)

PS4-6 **Thermodynamic study of HFC-125 + CO_2 mixed hydrate for high-efficiency fire extinguishing applications**

Yebom Shin, Jonghwan Lee, Jeong-Hoon Sa (Dong-A University)

PS4-7 **니트로셀룰로스로 캡슐화된 Al/Bi_2O_3/NaN_3 기반 고에너지 복합체 분말의 점화, 연소 및 가스발생 특성**

김호성, 차정근, 바시르 압둘, 런치파, 김수형 (부산대학교)

PS4-8 **Surface-Modified Flowable HFC-125a Gas Hydrate Powders with Improved Dispersibility**

Kyubeom Lee, Eun-Hye Jang, Yujeong Jeong, Sungwook Chung (Pusan National University)

PS4-9 **Molecular Dynamics Underlying the Regulation of a Gas Hydrate by Amylose**

Jaeyoung Kim, Kiduk Kim, Joonkyung Jang (Pusan National University)

PS4-10 **Gas Hydrate Nucleation Mechanism Study by Molecular Dynamics and Forward Flux Sampling**
Kiduk Kim, Jaeyoung Kim, Joonkyung Jang (Pusan National University)

PS4-11 **고기능성 Gas Hydrate 소화약제 생산, 저장, 수송시스템의 IoT기반 실시간 원격관리 시스템에 관한 연구**
이창우, 안영준 (주식회사 유니온)

PS4-12 **HFC-125a 가스하이드레이트 소화탄 저장설비 구축에 관한 연구**
이진우[1], 서성덕[2], 전창수[2], 정재욱[1], 이주동[2] ([1]카토즈(주), [2]한국생산기술연구원)

PS4-13 **환경에 따른 가스 하이드레이트 소화탄 낙하 특성분석**
남현우[1], 박경필[2], 조성민[1] ([1]한국과학기술원, [2]연세대학교)

PS4-14 **Parameter Optimization of DenseCRF for Fire Semantic Segmentation: A Comparative Analysis of Preprocessing and Postprocessing Strategies**
Jeonghwan Kim[1], Jeong Kyu Kim[2], Tae-Eung Sung[2], Jongseok Kang[1]
([1]Korea Institute of Science and Technology Information, [2]Yonsei University)

PS4-15 **난접근성 화재진압용 소화가스 기반 가스하이드레이트 소화약제의 개발 및 화재 진압 실험**
조상규[1,2], 홍소희[1,3], 서성덕[1], Burla Sai Kiran[1], Subhash Kumar Sharma[1], 전창수[1], 이주동[1]
([1]한국생산기술연구원, [2]동아대학교, [3]부경대학교)

포스터발표 II: 특별세션(V): 가스하이드레이트 응용 및 청정기술

■ **일시** **2025년 9월 25일(목) 13:00~15:00**
■ **장소** **휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비**
■ **Organizer** **이주동 박사(한국생산기술연구원)**

PS5-1 **Scalable Continuous Hydrate System for Natural Gas Storage and Transportation**
Chan Hyoung Lee[1], Kan Jeenmuang[1], Sai Kiran Burla[2], Sang-Gyu Cho[2], Ju Dong Lee[2], Praveen Linga[1] ([1]National University of Singapore, [2]Korea Institute of Industrial Technology)

PS5-2 **Exploring Phase Behavior of CO_2 Hydrates under Simulated Deep-Sea Conditions with Steel Slag Additives for Marine Sequestration**
Jiseong Lee, Siyoon Jeong, Jeonghoon Sa (Dong-A University)

PS5-3 **Magnetic and thermo-responsive imidazolium-based ionic liquids as kinetic promoters for gas hydrate formation**
Jonghwan Lee, Yeonsu Cho, Hyo Kang, Jeong-Hoon Sa (Dong-A University)

PS5-4 **Synergistic Effects of Silica Nanoparticles and Span 80 on Hydrate Dispersion in Multiphase Flow Systems**
Suhyeon Son, Jeong-Hoon Sa (Dong-A University)

PS5-5 **Synthesis of Clathrate-Silica gel Composite for Enhanced Formation Kinetics and Storage Capacity**
Siyoon Jeong, Jiseong Lee, Jeong-Hoon Sa (Dong-A University)

PS5-6 **NaCl-governed guest selectivity in CH_4 + CO_2 hydrates: Thermodynamic and kinetic insights for hydrate-based CO_2 sequestration**
Sungwoo Kim[1], Minseo Park[1], Junghoon Mok[2], Yongwon Seo[1]
([1]Ulsan National Institute of Science and Technology, [2]Kyonggi University)

PS5-7 **Crystallographic and Thermodynamic Analysis of Krypton (Kr) – Tetra-n-butylammonium Chloride (TBAC) Semi-Clathrate Systems**
Junkyu Lim[1], Joonseop Lee[2], Yongwon Seo[1,3] ([1]Ulsan National Institute of Science and Technology, [2]HD Korea Shipbuilding & Offshore Engineering, [3]Ulsan National Institute of Science and Technology)

PS5-8 **가스하이드레이트 결정법을 이용한 연속식 수처리 공정 설계 및 구현**
조상규[1,2], 홍소희[1,3], 서성덕[1], Burla Sai Kiran[1], Subhash Kumar Sharma[1], 전창수[1], 이주동[1]
([1]한국생산기술연구원, [2]동아대학교, [3]부경대학교)

PS5-9 **Desalination Process System Using Hydrate Crystallization Method**
Sohee Hong[1,2], Sang-Gyu Cho[1,3], Seong Deok Seo[1], Changsu Jeon[1], Ju Dong Lee[1]
([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Pukyong National University, [3]Dong-A University)

PS5-10 **Crystallization Dynamics in Hydrogen-Bonded Systems: A Comparative Study of Ice and Gas Hydrates under Isotopic Substitution**
Subhash Kumar Sharma, Seong Deok Seo, Sai Kiran Burla, Sang-Gyu Cho, Sohee Hong, Changsu Jeon, Ju Dong Lee (Korea Institute of Industrial Technology)

PS5-11 **A Study on the Thermodynamic Properties of Gas Hydrates Considering Flow Assurance**
Jiyu Park[1,2], Seungmin Lee[1] ([1]Korea Institute of Industrial Technology, [2]Changwon National University)

PS5-12 **Feasibility of Hydrate-Based Desalination and Mineral Carbonation for Produced Water and Groundwater Treatment in Uzbekistan**
Kyung Chan Kang (Korea Institute of Industrial Technology)

PS5-13 **Supervised Feature Extraction and Unsupervised Visualization of X-ray CT Images for Gas Hydrate Analysis in the Ulleung Basin**
Sungil Kim[1], Youngjun Hong[2], Minhui Lee[3], Jaehyoung Lee[1], Taewoong Ahn[1], Kyungbook Lee[4] ([1]Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, [2]GM Factory, [3]GEOLAB, [4]Kongju National University)

2025년도 인송(仁松)상 수상자

인송(仁松) 학술상



서울시립대학교
박영권 교수

학력 및 경력	1999 KAIST, 화학공학 박사 1999~2002 현대중공업 산업기술연구소 선임연구원 2002~현 재 서울시립대학교 환경공학부 교수
주요 연구분야	- 유기성 폐기물 에너지화 촉매 공정 - 대기오염저감 촉매공정
수상배경	청정기술 분야에서 뛰어난 학술 업적을 성취하시고 본 한국청정기술학회 발전에 기여함.

인송(仁松) 기술상



한국화학연구원
채호정 박사

학력 및 경력	2001 포항공과대학교, 화학공학 박사 2001~2006 삼성정밀화학 책임연구원 2006~2007 LG화학연구원 차장 2013~2014 RICE Univ. 방문연구원 2007~현 재 한국화학연구원 책임연구원/센터장
주요 연구분야	- 암모니아 수소 촉매 및 반응공정 - 화학산업 탄소중립 촉매 및 반응공정 - 환경촉매 및 반응공정
수상배경	청정기술 분야에서 우수기술개발 촉진 및 산업화에 뛰어난 업적을 성취하시고 본 한국청정기술학회 발전에 기여함.

인송(仁松) 신진학술상



건국대학교
주지봉 교수

학력 및 경력	2002 건국대학교 화학공학과 학사 2004 서울대학교 응용화학부 석사 2009 서울대학교 화학생물공학부 박사 2009 서울대학교 에너지변환및저장연구센터 연구원 2009~2013 University of California Riverside 박사후 연구원 2014~2016 한국에너지기술연구원 선임연구원 2016~현재 건국대학교 조교수, 부교수
주요 연구분야	- 촉매반응공정 - 수소생산 및 이산화탄소 전환 - 흡착/흡수공정
수상배경	청정기술 분야에서 뛰어난 학술 업적을 성취하시고 본 한국청정기술학회 발전에 기여함.

홍보전시회 참여 업체

영인크로매스(주)	**홈페이지**	https://kor.youngincm.com
	전 화	031-428-8700
	업체 소개 및 전시품목	- 업체 소개: 영인크로매스는 국내 최초 HPLC 개발을 시작으로 GC, 질량분석기, 초순수 제조 장치 등 정밀 분석 기기를 연구·개발·생산하는 기업입니다. 연구실 맞춤형 크로마토그래프 전용 분석 시스템을 제공하며, 제품 신뢰성을 인정받아 R-Mark와 국제 숙련도 시험 인증을 획득했습니다. 축적된 기술력을 바탕으로 국내 분석 기기 국산화를 선도하고, 50여 개국에 수출하며 해외 조달 및 수출 유망 기업으로 인증받았습니다. - 전시품목: HPLC, GC, 초순수제조장치(WPS)
(주)켐리시스	**홈페이지**	http://www.chemresys.com/
	전 화	031-8069-5511
	업체 소개 및 전시품목	- 업체 소개: (주)켐리시스는 급변하는 화학·에너지 산업 환경 속에서, 친환경적이고 지속 가능한 공정 개발을 지원할 수 있는 다양한 화학 반응 장치(고온·고압 반응기, 유리 반응기, 촉매 반응기, 초임계 추출 장치, 다목적 반응기, 공정 제어 소프트웨어)를 개발·제작하고 있습니다. 25년간 축적된 경험과 기술력, 그리고 젊은 인재들의 창의적인 열정을 더하여, 청정 기술 연구와 환경 친화적 소재 개발을 위한 최적의 실험 장치를 고객 여러분께 제공하고 있습니다. - 전시품목: 고압반응기, 고온고압반응기, 유리반응기, 촉매반응기, 초임계추출장치
한국폴리텍대학 석유화학공정 기술교육원 (XR 기반 체험형 산업안전센터)	**홈페이지**	www.kopo.ac.kr/pptc/index.do
	전 화	052-290-9680
	업체 소개 및 전시품목	- 업체 소개: 산업현장에서 발생할 수 있는 누출, 폭발, 화재 등 주요 사고 상황에 효과적으로 대응할 수 있는 역량 강화를 위해, 석유화학산업 및 관련 산업군의 신규인력과 재직자 대상으로 이론교육으로는 체득하기 어려운 고위험 작업 환경을 실제와 유사하게 체험할 수 있는 가상현실(VR) 및 확장현실(XR) 기반의 산업안전 체험 교육센터를 설립하였습니다. 이를 통해 기계 및 전기, 가스, 화공 등 다양한 위험상황을 가상현실에서 직접 경험함으로써, 산업재해 발생 시 현장 대응능력을 실질적으로 높이고자 합니다. - 전시품목: 기계 및 전기, 가스, 화공 가상현실 체험 설비 및 관련 홍보자료

본 사업은 기획재정부의 복권기금 및 과학기술정보통신부의 과학기술진흥 기금으로
추진되어 사회적 가치 실현과 국가 과학기술 발전에 기여합니다.

초청강연

2025년 9월 25일(목) 11:30~12:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸A

초청강연

청정기술의 발전은 에너지 믹스와 환경 규제의 함수

양성광

한국기초과학지원연구원

2018년 '기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)'가 2050년 온실가스 배출 Net Zero 목표를 수립한 후 한국, 미국, EU 등 주요국들은 탄소중립 목표를 설정하고 청정에너지로의 전환과 청정기술에 대한 투자를 확대해 왔다. 그러나, 미국은 2025년 1월 트럼프 대통령 취임 즉시 파리협약에서 탈퇴했으며, 이어 차량 연비 기준과 전기차 세제 혜택 등을 대폭 철회해 청정에너지로의 전환과 청정기술 발전에 도전 요소가 되고 있다. 이와 함께 최근 AI 활용의 확산으로 관련 에너지 수요가 급증하여 전력망, 에너지 믹스, 환경 등 경제 전반에 심각한 영향을 주고 있다.

청정기술 개발이 실질적인 성과로 이어지려면 IPCC와 각국의 온실가스 감축목표 관련 규제 내용과 그에 따른 미래 에너지원의 변화 방향을 잘 파악하는 것이 중요하다. 여기에서는 주요 에너지원별로 가격 및 온실가스 배출 관점에서의 특성과 기후변화 대응에 따른 미래 에너지원의 변화 전망, 그리고 이와 연계된 청정기술의 발전과 전개 전망에 대해 조망해 보려고 한다.

에너지는 한 나라의 경제와 직결된다. IPCC는 2024년 말 기준, 각국이 제출한 자발적 감축목표(NDC)를 합산하면 제어 목표인 1.5℃보다 높은 2.4~2.6℃ 상승이 예상되어 추가적인 감축 노력이 필요하다고 분석했다. 경제 발전에 따라 에너지 사용이 늘어나므로 경제 발전과 함께 기후변화를 막으려면 청정에너지로의 전환이 중요한데, 이는 주요국들의 Net Zero 목표 이행 수준뿐만 아니라 중국, 인도 등 신흥국의 탈산소 정책에도 크게 영향을 받는다. 잘 키울 수 있는 나무만 심기보다는 숲의 생태계 변화에 맞는 수종을 찾아 심고, 가꿔서 건강한 숲을 만들어 가는 지혜가 청정기술의 개발에도 필요하다.

특별세션(I):

이차전지 순환이용성 향상 기술 개발 Workshop (비공개)

Workshop on the Development of Technologies for Enhancingthe Circular Utilization of Secondary Batteries

2025년 9월 24일(수) 14:00~16:15
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀A

CT-S1-1

폐배터리 화재 예방 및 초기 진압을 위한 보관 선반 시스템 개발

최경섭[1], 최헌식[1], 김용석[1], 김지윤[1], 최재형[1], 김정우[1*]
[1]고려아연(주)

Development of a Storage System for Waste Battery Fire Prevention and Initial Suppression

Gyeongseop Choi[1], Heon Sik Choi[1], Yong Seok Kim[1], Ji Yoon Kim[1], Jung Woo Kim[1*]
[1]Korea Zinc Company Ltd.

전기자동차의 보급 속도가 증가함에 따라 전기자동차에서 나오는 폐배터리 발생량이 증가하고 있으며, 한국환경공단은 2030년에 연간 국내 전기차 폐배터리 발생량이 10만 8천 개에 이를 것으로 예측한다. 전기차 폐배터리에는 리튬, 니켈, 망간 등의 유가금속이 함유되어 있어, 이를 재활용하기 위한 연구가 지속적으로 증가하고 있다. 그러나, 대량 발생하는 폐배터리를 안전하게 재활용하기 위해서는 적절한 방법으로 보관하는 것이 필수임에도 불구하고, 이에 대한 관심은 현저히 낮은 실정이다.

폐배터리는 단순한 폐기물이 아니라 잔존 에너지를 포함하고 있어, 전해액과 다양한 화합물에 의한 화학반응으로 자체 발열이 발생할 수 있으며, 외부의 물리적인 충격이 가해질 경우 내부 단락이 발생하여 화재 및 폭발 등이 발생할 수 있다. 따라서, 폐배터리의 부적절한 보관 및 처리로 인해 인명 및 재산 피해가 계속 증가할 위험이 있다.

폐배터리의 안전한 보관을 위해서는 화재 예방 및 진압 설비를 갖춘 폐배터리 전용 보관 시스템이 필요하다. 현재 국내에는 이차전지 화재안전기준 관련 지침이 존재하지만, 폐배터리 보관 시스템에 대한 구체적인 지침은 아직 미비한 상황이다. 국외의 경우에는 리튬이온 배터리 에너지저장장치의 진압 및 안전 지침(NPFA-855)에 리튬이온 배터리의 특성 및 특징에 대한 정보, 최소한의 안전 요구사항 구현 지침, 화재 예방 설비의 작동, 유지보수 및 리튬이온 장비의 안전 등 구체적인 사항이 명시되어 있다. 따라서, 본 연구에서는 국내외 배터리 안전 지침을 참조하여 폐배터리 전용 보관 시스템 설계 방향에 대해 논의하였으며, 보관 선반의 물리적 안전성뿐만 아니라 화재 예방, 화재 감지 및 화재 진압 시스템과 같은 보관 시스템이 갖춰야 할 전반적인 조건 및 구성 요소에 관해 제시하였다.

CT-S1-3

건식방전 및 화학방전용 친환경 충방전시스템 개발 현황

정승효, 홍진우, 김준성, 김정한, 도경민, 김월영, 김종재*
㈜솔라라이트 기술연구소

Recent Development Status of Eco-friendly Dry-discharge System and Charge System for Chemically Discharging Process

S. H. Jeong, J. W. Hong, J. S. Kim, J. H. Kim, K. M. Do, W. Y. Kim, and J. J. Kim*
R&D Center, Solar Light Korea Co., Ltd.

(Abstract)

본 발표에서는 '이차전지 순환이용성 향상 기술 개발사업 과제 (RS-2024-00339705)'의 수행을 위해 ㈜솔라라이트가 담당하고 있는 다종 폐이차전지의 안전한 해체·분리 공정을 위한 친환경 건식방전시스템과 선 리튬 추출 공정을 위한 효율적인 충전시스템 개발의 진행 현황을 보고한다.

(1) 친환경 건식 다중방전시스템 개발

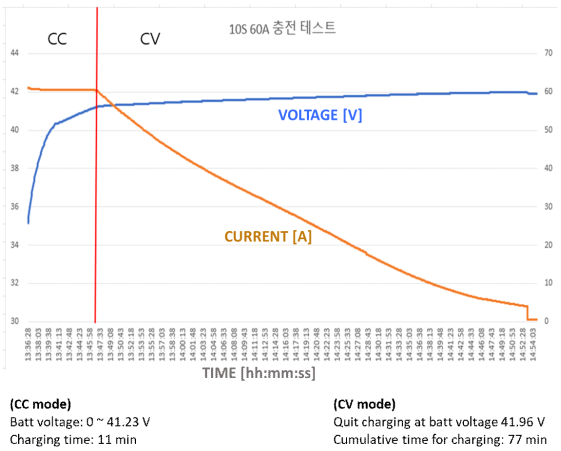
전기적 특성이 각기 다른 폐이차전지 팩/모듈 N개를 한 대의 건식방전기에서 동시에 방전할 수 있게 하는 다중방전 제어 기술이 도입된 건식 완전방전시스템을 개발하고 시험 제작함. 특히, 다중방전제어를 위한 Optimizer를 적용하여 2직렬/3병렬로 연결된 이종 폐배터리 팩/모듈 방전용 시제품의 성능을 테스트함. 아울러, 폐배터리의 잔여 에너지 회수를 위해 전력변환장치를 통해 전력계통 또는 ESS용 전력으로 재회수하는 가상발전형 전력회생 방전(Regenerative Discharge) 시스템을 설계하고 시제품을 제작, 테스트함.

(2) 선리튬 추출을 위한 화학방전용 다중 충전시스템 개발

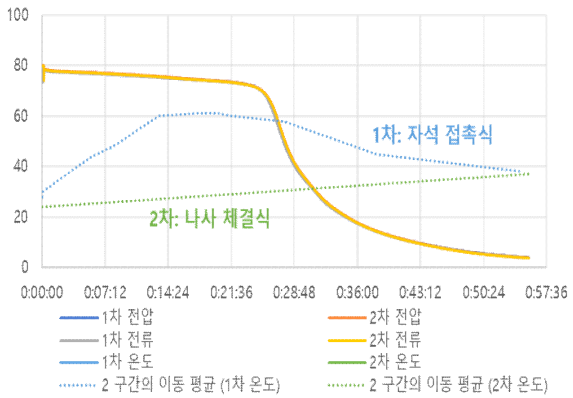
방전된 다수의 폐배터리를 균등하게 충전하기 위해 릴레이와 Bypass 회로를 적용한 다중충전 제어회로를 개발하고, 0.5C-rate 이상의 고전류로 원하는 SoC까지 신속하고 안전하게 충전할 수 있는 다중충전시스템을 시험 제작하고 테스트함 ([그림 1 참조]). 또한, 다양한 배터리 종류에 대응 가능한 충전용 셀 트레이와 지그를 개발하여, 대량의 이종 단위 셀들을 다중 충전함으로써 충전 시의 안전성과 생산성을 동시에 확보함.

(3) 사용후 전기차 배터리의 충/방전 시험 결과

다양한 사용후 EV 팩 또는 ESS 모듈에 대해 배터리의 해체/분리 및 충전과정에서의 안전성을 확보하기 위해, 폐배터리 셀/모듈의 충방전 특성과 함께 과충전이나 과방전에 의한 스웰링 현상과 케이스 변형, 그리고 화재/폭발의 위험 기준 탐색과 예측 방법 등을 조사함 ([그림 2] 참조).



[그림 1] 사용 후 EV 모듈(RAY 10S1P)의 충전 특성



[그림 2] 전극 체결 방식에 따른 방전 특성 비교:
(1차) 나사체결 방식, (2차) 자석접촉 방식

---

* 본 발표는 환경부에서 시행한 '이차전지 순환이용성 향상 기술 개발사업: 친환경 선 리튬추출 기반 다종 폐이차전지 해체·분리 자동화 및 자원 회수 실증 기술 개발 과제 (RS-2024-00339705)'의 지원에 의한 것임.

CT-S1-4

리튬 이온 배터리 열폭주 전이 메커니즘 분석을 위한 수치해석 기반 CFD 모델링에 대한 연구

서효민, 김승우, 배재영, 박경렬, 김현종*
고등기술연구원

A CFD-Based Numerical Study on the Mechanism of Thermal Runaway Propagation in Lithium-Ion Batteries

Hyomin Seo, Seungwoo Kim, Jaeyeong Bae, Kyeongryeol Park, Hyunjong Kim*
Institute for Advanced Engineering

리튬 이온 배터리의 열폭주(thermal runaway) 전이 현상은 전기화학적 발열 반응, 전해액 분해로 인한 가스 방출, 전극 및 분리막 손상에 따른 구조적 불안정성 등 복합적인 열·물리 메커니즘이 상호작용하여 발생하는 고위험 현상이다. 이러한 복합 거동을 정량적으로 규명하는 것은 대형 모듈 및 팩 수준에서의 열 안전성 확보를 위한 주요 사안이다. 그러나 실 규모 화재 실험은 고비용과 고위험성을 수반하며 반복 수행이 제한적이므로, 시간과 비용을 절감할 수 있는 신뢰도 높은 수치해석 모델 구축이 필수적이다. 특히 모델의 기하 구조와 물리 구현이 비교적 단순하면서도 핵심 열전달 메커니즘을 정확히 재현할 수 있는 수치해석적 접근법은 계산 효율성이 높고 적용이 용이하여 다양한 설계 변수 평가 및 확장 시뮬레이션에 유리하다.

본 연구에서는 파우치형 NCM 리튬 이온 배터리 4개의 셀로 구성된 모듈을 대상으로, 선행 실험 데이터를 참조하여 3차원 전산유체역학(CFD) 기반의 수치해석 모델을 구축하였다. 해석 모델에서는 열폭주 거동을 시간 및 온도에 종속하는 비정상 발열항으로 정의하였으며, 열폭주 과정에서 발생하는 전해액 증발 및 내부 구조 손상에 따른 질량 손실 특성을 상관식으로 반영하여 밀도 변화와 그에 따른 온도 변화 등을 반영하였다.

시뮬레이션 결과, 열폭주 전이 속도 및 시간에 따른 셀의 온도 상승 곡선이 선행 실험 데이터와 정량적으로 높은 부합성을 보였다. 이는 제안된 CFD 모델이 열폭주 전이 현상을 신뢰성있게 재현할 수 있음을 나타낸다. 구축된 해석 모델은 향후 대형 모듈 및 팩 수준으로의 확장이 가능하며, 이를 통해 고위험 화재 실험을 대체하거나 최소화하고, 설계 초기 단계에서의 안전성 평가 및 최적화된 열 관리 전략 수립에 활용될 수 있을 것이다.

본 연구는 2024년도 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행한 연구임(No. RS-2024-00339705, 이차전지 순환이용성 향상 기술 개발사업)

참고문헌

1. Zhu et al., "Experimental and analytical investigation on the thermal runaway propagation characteristics of lithium-ion battery module with NCM pouch cells under various state of charge and spacing." Journal of Energy Storage 72 (2023): 108380.

CT-S1-5

이차전지 순환이용성 향상 기술개발을 위한 UNIST 연구내용 및 목표 달성 현황 공유

김하은[1], 김영식[1*]
[1]울산과학기술원

본 특별세션에서는 울산과학기술원의 2차년도 연구의 목표와 현재까지의 진행 현황을 공유하고, 수행된 주요 실험 및 분석 결과를 소개한다. 특히 사용 후 배터리 재활용 공정에서 회수된 소재의 회수율에 대한 입회평가 결과와, 회수 소재의 품질을 검증하기 위한 순도 시험성적서 분석 결과를 중점적으로 발표한다. 이를 통해 재활용 소재의 상용화 가능성과 공정 신뢰성을 검토하며, 공정 최적화 및 성능 향상을 위한 주요 인사이트를 제공한다. 아울러, 도출된 연구 결과를 바탕으로 향후 연구 방향과 세부 계획을 제시하여, 최종 목표 달성을 위한 로드맵을 공유하고자 한다.

특별세션(II):

동남권 학연협력플랫폼 (탄소중립선도 수소산업 전주기 밸류체인 구축) 성과공유회

Performance Sharing Conference of the Southeast Region UNI-CORE (Innovative Hydrogen Industry Platform for Carbon Neutrality)

2025년 9월 24일(수) 15:00~17:10
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀B

CT-S2-1

Electricity-Driven Joule-Heating Reactors for Energy-Efficient and Durable Hydrogen Production

Jichan Kim[1], Jungho Jae[1,*]
[1]Pusan National University
*E-mail: jh.jae@pusan.ac.kr

Abstract

Hydrogen production through conventional methane steam reforming remains constrained by high energy demand and limited catalyst durability, even when integrated with carbon capture and storage technologies. Traditional furnace heating suffers from significant heat-transfer limitations due to indirect external heating, leading to high energy losses and poor thermal uniformity.

To address these challenges, this study employs a Joule-heating reactor system, where electrical current directly generates heat within the catalytic structure. This approach enables rapid and localized temperature control, minimizes external heat loss, and provides highly uniform heating across the reaction zone. These features substantially reduce the energy penalty compared with conventional electric furnaces, while also improving catalyst stability under harsh reaction conditions. Methane decomposition is investigated as a model reaction, with a focus on selective hydrogen production. Through bimetallic catalyst screening and advanced characterization techniques, the reaction mechanism is analyzed to optimize performance and durability. The findings highlight the unique advantages of Joule heating over conventional thermal and induction heating, underscoring its potential as a scalable and energy-efficient platform for sustainable hydrogen production.

CT-S2-2

액화수소 저장탱크용 저온용 강재의 기계적 특성 관련 연구 결과 소개

박정열*[1], 지창욱[1], 박재한[1]
한국생산기술연구원 울산기술실용화본부[1]

수소 전주기 중 저장/이송 부분에서는 크게 3가지의 수소 저장 방법(고압기체, 액화, 화학적 저장)을 제안하고 있다. 대표적으로 고압기체 저장 기술은 ~900 bar의 고압 조건에서 기체상태로 수소를 저장하는 방식으로 현재 가장 보편화된 기술이며 현재, 수소차 및 버스에 적용하고 있다. 하지만, 고압 저장 시 대량 에너지가 필요하고 대용량의 저장 방식에는 적합하지 않는 단점을 가지고 있다. 따라서, 최근에는 액화 저장 방식에 대한 연구가 다양하게 이뤄지고 있다. 수소는 액화 시 기체 대비 부피가 1/800으로 감소하여 저장 효율이 최대 8배 증가하는 특징을 가지고 있다 [1]. 또한, 액화 저장 방식은 상압(3 bar)에서 저장할 수 있으므로 안전성 측면에서도 고압 기체 저장 방식 대비 뛰어난 것으로 알려져 있다.

액화수소 저장탱크에 사용되는 소재는 수소 액화 온도인 초저온(-253 ℃)에서 뛰어난 기계적 특성을 가져야하며, 수소 취성에 대한 저항성도 높아야 한다. 따라서 ISO/TR 15916 및 CGA, KGS 에서는 수소 취성 저항성에 따른 사용 가능한 소재를 제안하였으며, 평가 방법도 제시하고 있다 [2-4]. 이러한 규격에 따라 액화수소 저장탱크를 제작하기전 소재 선정 시 기계적 특성 평가는 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 액화수소 저장탱크에 사용되는 후보 소재에 대해 기계적 특성을 평가하고 그 결과를 비교하였다. 또한, 용접 공정에 따른 용접부의 특성 변화도 확인하여 사용 적합한 공정을 선정하였다.

참고문헌

참고문헌의 인용 및 작성요령은 학회지, 'Clean Technology' 투고요령에 준한다.

1. HESC, "Liquefaction of Hydrogen Gas", In website, https://www.hydrogenenergysupplychain.com
2. International Organization for Standaradization, "Basic considerations for the safety of hydrogen systems," ISO/TR 15916 (2015).
3. Compressed Gas Association, "Cryogenic Hydrogen Storage," CGA H-3 (2006)
4. Korea Gas Safety Code., "고압가스용 저장탱크 및 압력용기 제조의 시설·기술·검사 기준," KGS AC111 (2020)

CT-S2-3

고체산화물 연료전지(SOFC)의 열관리를 위한 4분할 채널 설계

이준학, 염은섭*
부산대학교 기계공학부

Thermal management in Solid Oxide Fuel Cell with quarter channel

*Junhak Lee, Eunseop Yeom**
School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Republic of Korea

Abstract

고체산화물연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)는 600~1000°C의 고온에서 장시간 운전되며, 이로 인해 셀 모서리 부근에 열응력이 집중되어 손상 위험이 증가하는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 완화하기 위해서는 유로 설계를 최적화하여 온도 분포의 균일성을 확보하고, 모서리 위치에서 냉각 성능을 향상하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 기존의 Cross-flow 모델과 새로운 4분할 유로 설계(Quarter L-pin, Quarter X, Quarter X-pin)를 적용한 모델 간의 열 및 유동 특성을 비교하기 위해 전산유체역학(CFD) 해석을 수행하였다. Cross-flow 모델은 우수한 유량 균일성과 높은 출력 밀도를 나타냈으나, 온도 분포가 비대칭적이고 온도 편차가 커 셀 열화가 가속화될 수 있는 한계가 확인되었다. 반면, 핀 구조를 포함한 분할 유로 모델은 유동 방향의 유연성과 반응 면적 증가로 인해 유량 균일성과 출력 밀도가 개선되었고, 특히 Quarter L-pin 모델은 온도 편차가 가장 작은 것을 확인할 수 있었다. 삼각형 형태로 4분할을 진행한 Quarter X 및 Quarter X-pin 모델은 모서리 냉각 성능이 가장 우수하였다. 이 중 Quarter X-pin 모델은 모든 설계 중 모서리 온도가 가장 낮게 유지되는 결과를 보였다. 극한 운전 조건에서 작동하는 SOFC의 특성을 고려할 때, 본 연구는 전지의 출력 저하를 방지하고 내구성을 확보하기 위한 유로 설계 전략을 제시한다는 점에서 의미가 있다.

Keywords : Solid Oxide Fuel Cell, CFD, Channel, Temperature distribution

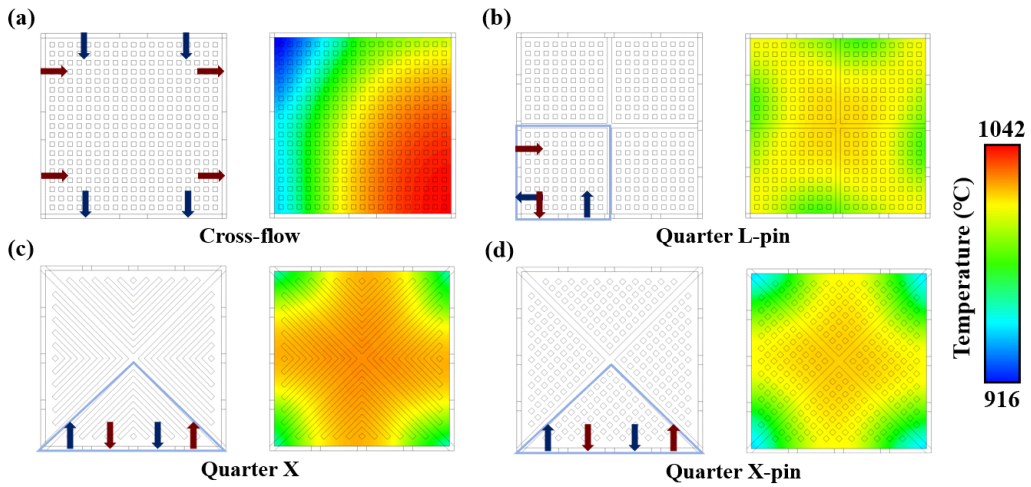


Figure 1. Flow direction and electrolyte temperature distribution of (a) Cross-flow; (b) Quarter L-pin model; (c) Quarter X model; (d) Quarter X-pin model

Acknowledgements

This work was supported by the Commercialization Promotion of Agency for R&D Outcomes(COMPA) grant funded by the Korean Government(Ministery of Science and ICT). (RS-2023-00304764)

CT-S2-4

Enhancing Startup and Scale-Up Toward Green Hydrogen Production in Single-Chamber Microbial Electrolysis Cells

Minsoo Kim[1], Jiin Yoo[1], and Jung Rae Kim[1 *]

School of Chemical Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Republic of Korea[1]

Green hydrogen production through single-chamber microbial electrolysis cells (S-MEC) provides various benefits over two-chamber MECs, such as lower internal resistance, a smaller pH gradient, and higher current density. However, producing high-purity hydrogen requires suppressing side reactions like methane and acetate production. A major challenge for scaling up is the prolonged stabilization period, which can take several months to cultivate exoelectrogens that break down organic matter. In this study, the hydrogen production startup time was greatly reduced by cultivating electrochemically active microbial communities for biogas production without applying any voltage and then applying voltage to selectively enrich electroactive microorganisms on the anode. This approach shortened the hydrogen production startup time to less than 5 days compared to conventional methods. To further enhance hydrogen production, homoacetogenesis, a key competing reaction, was suppressed by minimizing the hydrogen retention time in the reactor through rapid extraction of the produced hydrogen. This resulted in the complete prevention of homoacetogenesis and a 95% substrate utilization rate for acetate. This strategy was implemented in both lab-scale (250 mL) and bench-scale (4 L) systems, achieving maximum hydrogen production rates of 0.77 ± 0.05 L/L/d and 0.22 ± 0.01 L/L/d, respectively, demonstrating the scalability from lab to bench scale. This study addresses a significant limitation in the rapid startup of S-MEC systems. It introduces an effective method for mitigating competitive reactions, marking a substantial advancement in bioelectrochemical hydrogen production.

References

1. Hu, H., Fan, Y., & Liu, H. (2008). Hydrogen production using single-chamber membrane-free microbial electrolysis cells. Water research, 42(15), 4172-4178.

CT-S2-5

리브 설치에 따른 차량용 액체수소 탱크 내 슬로싱 거동 및 기화율 저감 효과 분석

이영준[1], 석시협[1], 정용진[1], 정현서[1], 이창용[1], 황진율*[1]
부산대학교 기계공학과1

차량용 액체수소(LH2) 탱크에서 슬로싱 현상과 증발률은 탱크 설계 시 중요한 요소이다. 주행 조건에 의한 슬로싱을 억제하는 방법 중 하나는 탱크 내부에 리브(rib)를 설치하는 것이며, 다양한 리브 설계가 슬로싱에 의한 압력을 저감하기 위해 개발되어 왔다. 액체수소는 대기압에서 20.4 K의 끓는점을 갖는 유체로, 안정적으로 저장 및 운송되기 위해서는 극저온 환경이 필수적이다. 따라서 저장 용기 내부의 액체수소 증발률을 최소화하는 것은 차량용 연료탱크의 실용화를 위한 핵심 기술 과제 중 하나이다. 하지만 극저온 환경에서 액체수소 탱크 내 리브 구조가 증발률에 미치는 영향에 대한 분석은 부족하다. 본 연구에서는 수치해석을 통해 슬로싱이 증발률에 미치는 영향을 분석하고, 리브 구조에 의한 증발률 저감 효과를 규명한다. 해석은 탱크 벽면에 일정한 열유속을 부과한 조건에서 수행하였다. 액체수소와 기체수소는 모두 Newtonian, incompressible, immiscible, non-isothermal 유체로 가정하였다. 초기 조건으로 탱크의 50%를 액체수소로 채웠으며, 탱크는 60 km/h에서 4초 동안 정지하는 감속 조건(0.425 g)에 놓였다. 해석 결과, 슬로싱에 의해 액체수소가 탱크 측벽을 타고 오르며 얇은 film 형태로 형성되었고, 이로 인해 열전달 면적이 증가하게 되어 강한 강제대류가 유발되었다. 특히, 형성된 LH2 film에서 순간 증발량의 67.2% 가 발생하였다. 이러한 LH2 film 형성을 억제하기 위해 탱크 측벽에 리브 구조를 설치하였으며, 그 결과 LH2 film의 벽면 유동 길이가 31.8% 감소하였고, 최대 증발률은 30.9% 저감되었다. 뿐만 아니라, 최대 증발률 발생 이후 리브 구조가 좌우로 진동하는 슬로싱 현상을 억제하여 주기적인 증발률 peak 생성이 감소하였으며, 이는 해석시간 동안의 누적 증발량을 10.3% 감소시켰다. 본 연구 결과는 차량용 액체수소 탱크에 LH2 film 형성을 억제하는 리브 구조를 적용하는 것이 슬로싱에 기인한 증발을 효과적으로 감소시킴을 보여주며, 향후 수소 모빌리티 분야에서의 저장 효율 향상 및 상용화 기술 개발에 기여할 것으로 기대된다.

Acknowledgments

This work was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government (MOTIE) (no. 20214000000140 and no. 20223030040120) and the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes(COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT) (no. RS-2023-00304764).

CT-S2-6

Surrogate Modeling Approach to the Design Optimization of Launch Vehicle Propellant Tanks

Bongseok Kim[1], Heesung Lee[2], and Kyunghoon Lee[2*]

Purdue University[1], Pusan National University[2]

We present a surrogate-based optimization for the structural design of launch vehicle propellant tanks. Our goal is to reduce tank weight while satisfying volume and stress constraints. Conventional finite element analysis (FEA) offers accuracy, but is too computationally expensive for iterative optimization. To address this obstacle, we build ordinary Kriging models trained on FEA data to rapidly predict maximum von Mises stresses, and we apply sequential quadratic programming (SQP) to identify optimal designs. We verify the optimization approach on a spherical fuel tank and a cylindrical oxidizer tank with torispherical heads. The Kriging models achieve prediction errors below 0.1% compared to the corresponding FEA and reduce computation time by more than three orders of magnitude. As a result, we obtain weight reductions of 39.02% for the fuel tank and 8.61% for the oxidizer tank. These findings demonstrate that Kriging-based surrogate modeling provides an efficient and accurate pathway to structural lightweighting in launch vehicle subsystems.

Acknowledgement

This research is partially supported by RS-2023-00304764.

CT-S2-7

Development of a Technological Roadmap and Commercialization Platform for Water Electrolysis based Green Hydrogen Production

Hee Soo Kim, Seong Ji Kim, Seongmin Park, Jeongha Kim, and Dong-Ha Lim*
Low-carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan, Korea,

Green hydrogen has been proposed as a key energy carrier for achieving carbon neutrality, with water electrolysis positioned as a central technology for sustainable hydrogen production. Despite recent progress in scaling up electrolysis stacks and systems, the commercialization of green hydrogen production continues to face challenges related to system efficiency, durability, and cost reduction. To bridge the gap between research and industrial application, this study aims to establish a commercialization platform for scalable green hydrogen production through systematic technology development and the design of operational protocols.

The research emphasizes the development and optimization of core stack materials, components, and operational strategies within electrolysis systems. Particular attention is given to advancements in high-performance electrode and membrane materials, flow channel design through flow visualization, reliable assembly technologies etc., all of which are critical to determining stack efficiency and durability. In parallel, stack operation protocols are investigated, focusing on dynamic load response, degradation mitigation, and long-term stability under fluctuating renewable energy conditions. These efforts are further supported by a platform-based approach that integrates multi-scale modeling, accelerated stress testing, and digital monitoring systems to validate performance under realistic operating environments.

The results of this work suggest that innovation in both material and component design, combined with optimized stack operation strategies, can significantly accelerate the commercialization of electrolysis-based green hydrogen production. By aligning these efforts within a comprehensive technology development roadmap, this study provides a systematic framework for advancing electrolysis technologies from early-stage research toward large-scale industrial deployment, thereby contributing to the realization of a sustainable hydrogen economy.

Acknowledgement

This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes(COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT). (RS-2023-00304763) and also supported by KITECH (PUR25191)

CT-S2-8

Role of microstructure on the electrochemical performance of mixed ionic electronic conducting oxygen electrodes

Hae-In Jeong, Beom-Kyeong Park[1†]

School of Materials Science and Engineering, Pusan National Univ.

The widespread commercialization of solid oxide cells (SOCs) necessitates their efficient operation at low temperatures. Mixed ionic electronic conducting (MIEC) materials, while used to expand the electrochemically active region, suffer from sluggish electrode kinetics at reduced temperatures, particularly at the oxygen electrode due to its high activation energy. To address this, highly active electrode materials and complex micro/nano-structures have been developed. However, the crucial role of microstructure optimization – the link between material properties and electrode performance – often remains unexplored. In this study, we systematically investigate the impact of MIEC electrode microstructure on electrochemical performance using the well-characterized $SrTi_{0.3}Fe_{0.7}O_{3-\delta}$ (STF) material. The electrode microstructure is systematically varied through a well-established ultrasonic spray process. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) studies, coupled with a suitable equivalent circuit model, are conducted on the resulting electrodes. Additionally, 3D reconstruction using focused ion beam-scanning electron microscopy (FIB-SEM) data allows us to quantify key structural factors: porosity, electrode surface area, and tortuosity. The Adler-Lane-Steele (ALS) model is employed to analyze how these microstructural factors influence electrode performance. Our findings demonstrate that microstructural optimization significantly enhances electrode performance. Notably, we achieve a low STF polarization resistance (R_P) of ~0.3 Ω cm^{-2} at 600 °C, a two-fold improvement compared to previously reported one produced using similar powder processing methods.

CT-S2-9

Hybrid Bimetallic Sulfide (FeCoS)-doped Conductive Polymer as Efficient Oxygen Evolution Reaction Electrocatalyst for Direct Seawater Electrolysis

Aye Myint Myat Kyaw[1] and Oi Lun Li[1*]

[1]Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Republic of Korea

The global energy demand is growing rapidly to fulfill the energy requirement due to industrialization and population development. Hydrogen is a promising alternative energy source among the existing resources and a key factor to enable net-zero carbon emissions by 2050. Seawater electrolysis is critical for sustainable hydrogen production, especially in regions facing freshwater scarcity. However, chloride ions compete through parasitic reactions, such as chlorine evolution reaction, creating a serious challenge that reduces catalytic activity and durability [1-2]. By integrating transition metal sulfides (Fe and Co-based) with a conductive polyaniline matrix, the catalyst achieved enhanced electrical conductivity, increased electrochemically active surface area, and improved stability in chloride-rich environments. Structural characterizations confirmed the uniform embedding of FeCoS nanoparticles within the PANI framework, while XPS analysis revealed the presence of active Fe^{2+}/Fe^{3+} and Co^{2+}/Co^{3+} species, as well as nitrogen and sulfur coordination sites that contributed to favorable catalytic properties. Electrochemical evaluations demonstrated that the FCS-PANI catalyst achieved low overpotentials, high current densities, favorable reaction kinetics, and excellent operational stability. Specifically, in a single-cell anion exchange membrane water electrolyzer (AEMWE) operating at 50 °C, the catalyst delivered a cell voltage of 2.25 V at a current density of 500 mA cm^{-2} and maintained stable performance over 100 hours with a minimal voltage degradation rate of 1.07 mV h^{-1}. The system also produced hydrogen with a high purity of 99.97%, underscoring its practical potential for clean energy applications. These results highlight the synergistic effect of combining FeCoS with PANI, which contributes to improved catalytic efficiency, structural robustness, and long-term durability under realistic seawater electrolysis conditions. The FCS-PANI composite represents a promising electrocatalyst for scalable green hydrogen production, offering a viable and sustainable solution for energy generation in freshwater-constrained regions.

References

1. Evro S, Oni BA, Tomomewo OS. Carbon neutrality and hydrogen energy systems. Int J Hydrog Energy. 2024;78:1449-67.
2. Kim S, Kim S, Han Y, Kim Y, Lee S, Yang J, et al. Plasma-engineered 2D Ni nanoplates as advanced oxygen evolution reaction electrocatalysts for direct seawater electrolysis. ACS Appl Energy Mater. 2025;8(2):1101-11.

특별세션(III):

[원광대학교 RISE 사업단] 미래형모빌리티 융합기술개발 세미나

[Wonkwang University RISE Center] Seminar on Convergent Technology Development for Next-Generation Mobility

2025년 9월 24일(수) 15:00~17:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀C

CT-S3-1

CoMo 촉매를 이용한 Oleic acid의 탈산소 반응 및 차량 적용 가능성 평가

윤은수[1], 전이정[1], 김창현[1], 임재학[1], 윤채민[1], 전경원[2], 심재오[1*]
[1]원광대학교
[2]국립군산대학교

Deoxygenation of oleic acid using CoMo catalyst and an evaluation of vehicle applicability

Eun-Su Yoon[1], I-Jeong Jeon[1], Chang-Hyeon Kim[1], Jae-Hak Lim[1], Chae-Min Yoon[1], Kyung-Won Jeon[2], Jae-Oh Shim[1*]
[1]Wonkwang University
[2]Kunsan National University

초록

현재 운송 연료로 사용하는 화석 연료는 환경오염과 온실가스 배출의 주요 원인이다. 전 세계적으로 이산화탄소 저감 및 탄소 중립을 실천하기 위해 운송 연료 사용을 금지하거나 일정 비율 이상의 바이오연료를 혼유하는 등의 다양한 연료 정책이 시행되고 있으며, 이에 따라 탄소 중립적이고 지속가능한 바이오연료 생산 연구의 필요성이 극대화되고 있다. 본 연구는 oleic acid를 반응물로 사용하고 졸-겔(sol-gel)법으로 제조한 CoMo 촉매를 적용하여 탈산소 반응을 수행하였다. 반응 온도와 반응 시간을 매개변수로 설정하여 최적의 조건을 도출하였으며, 그 결과 350 ℃에서 7시간의 반응 조건이 가장 우수한 전환율과 선택도를 보였다. 최종 생성물은 연료 특성 분석을 통해 차량 적용 가능성을 검토하였으며, 기존 화석 연료를 대체 가능한 바이오연료로서의 활용 가능성을 확인하였다.

CT-S3-2

Green Hydrogen Production from Ammonia Decomposition: Performance and Characterization of DC Thermal Plasma Technology

Han Jun Lee, Seong-Pyo Kang, Se Jin Oh and Tae-Hee Kim*
Department of Chemical Engineering, Wonkwang University

Ammonia (NH3) stands out as a promising hydrogen carrier for the green hydrogen supply chain due to its high hydrogen content, facile liquefaction and carbon-free nature [1]. Direct current (DC) thermal plasma offers an effective pathway for efficient green hydrogen production by enabling rapid, large-scale ammonia decomposition within its high-temperature, high-enthalpy environment [2].

We investigated the decomposition process by varying input power (5.70-9.0 kW) and ammonia flow rate (5-30 L/min) with a constant nitrogen flow of 30 L/min as a plasma forming gas. A clear trade-off between conversion and energy efficiency was identified: a near-complete conversion of 99.99% was achieved at 9.0 kW and 5 L/min, whereas the peak hydrogen production efficiency of 30.77 gH2/kWh was observed at 5.70 kW and 30 L/min. High power improved conversion by increasing the effective reaction volume, whereas low power enhanced energy efficiency by extending residence time.

In addition, a computational fluid dynamics (CFD) analysis coupled with a magnetohydrodynamic (MHD) torch modeling was carried out to understand the detailed process. It was confirmed that the performance is governed by the balance between the effective reaction volume and the residence time within the optimal temperature window for hydrogen formation. A comparison with other plasma-based processes indicated that the DC thermal plasma process shows high potential for scalability and competitiveness in large-scale, sustainable ammonia to hydrogen conversion.

References

1. Lan, R. et al., “Ammonia and related chemicals as potential indirect hydrogen storage materials,” Int. J. Hydrog. Energy, 37(2), 1482-1494 (2012).
2. Heberlein, J., and Murphy, A. B., “Thermal plasma waste treatment,” J. Phys. D: Appl. Phys., 41(5), 053001 (2008).

CT-S3-3

역수성가스전이 반응을 위한 Cu-$Ce_{(x)}Zr_{(1-x)}O_2$ 촉매의 $Ce_{(x)}Zr_{(1-x)}O_2$ 조성 최적화

임재학[1], 전이정[1], 김창현[1], 윤은수[1], 윤채민[1], 심재오[1*]
원광대학교[1]

Optimization of $Ce_{(x)}Zr_{(1-x)}O_2$ composition in Cu-$Ce_{(x)}Zr_{(1-x)}O_2$ catalysts for the reverse water-gas shift reaction

Jae-Hak Lim[1], I-Jeong Jeon[1], Chang-Hyeon Kim[1], Eun-Su Yoon[1], Chae-Min Yoon[1], Jae-Oh Shim[1*]
[1]Wonkwang University

전 세계적으로 생활 수준 향상과 경제 발전에 따라 이산화탄소 배출량이 증가하고 있다. 이를 해결하기 위하여 지속 가능한 탄소 순환 경제 실현을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 여전히 화석연료에 대한 의존도가 높은 실정이다. 따라서, 화석연료 사용으로부터 발생하는 이산화탄소를 효과적으로 저감 할 수 있는 기술 개발이 요구된다. 본 연구는 다양한 $Ce_{(x)}Zr_{(1-x)}O_2$의 비율이 역수성가스전이(Reverse water-gas shift, RWGS)반응에 미치는 영향을 규명하고자 $Ce_{(x)}Zr_{(1-x)}O_2$ 비율을 조절하여 공침법을 통해 Cu-$Ce_{(x)}Zr_{(1-x)}O_x$ 촉매를 합성하였으며, 합성된 촉매의 조성에 따른 구조적 특성과 반응 활성을 비교 및 평가하였다. 연구 결과, $Ce_{0.66}Zr_{0.33}O_2$의 2:1 비율이 높은 전환율을 보였으며 높은 CO 선택성으로 메탄생성을 억제하는 것을 확인하였다.

CT-S3-4

Designing Nanofibrous Air Electrode for Interfacial Delamination Mitigation and Enhanced Performance in Reversible Solid Oxide Cells

Ji-Yeoung Choi[1], Young-Wan Ju[1,2*]

[1]*Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Wonkwang University, Iksan 54538, Republic of Korea*

[2]*ICT Fusion Green Energy Research Institute, Wonkwang University, Iksan 54538, Jeonbuk, Republic of Korea*

Conventional reversible solid oxide cell (r-SOC) air electrodes face significant challenges at low operating temperatures, including high polarization resistance and structural delamination at the air electrode/electrolyte interface due to oxygen pressure accumulation during electrolysis (EC) mode operation. Additionally, buffer layers introduced to suppress interfacial reactions often form resistive phases during high-temperature sintering, leading to performance degradation. To overcome these limitations, we designed a nanofibrous $Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO_{3-\delta}$ (SSC)–$Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{1.9}$ (SDC) composite air electrode. This architecture demonstrated enhanced electrochemical performance, excellent constant-current stability, and robust reversible cycling durability. The electrochemical properties of the electrode were systematically evaluated to validate its potential for high-performance r-SOC applications.

CT-S3-5

Strategic Engineering of Carbon Supports for Platinum-Efficient Electrocatalysts in Hydrogen Evolution

SeoJeong Yoon, In-Yup Jeon*

Department of Chemical Engineering, Wonkwang University, 460, Iksan-daero, Iksan, Jeonbuk, 54538, South Korea

Water electrolysis has emerged as a pivotal technology for achieving carbon neutrality, particularly by enabling the production of green hydrogen using renewable energy sources. However, the widespread commercialization of current electrolyzer systems is hindered by high costs and limited efficiency, primarily due to the reliance on expensive noble metal catalysts for the hydrogen evolution reaction (HER). While Pt/C remains the benchmark catalyst owing to its excellent HER activity, its high cost and poor durability pose significant limitations for large-scale applications.

Carbon-based materials, with its superior electrical conductivity and physicochemical stability, has garnered attention as a catalyst support. However, its intrinsic catalytic activity is limited. To overcome this, heteroatom doping and activation process were employed to modulate its electronic structure and enhance interactions with metal nanoparticles. The resulting catalysts demonstrated remarkable HER performance, achieving lower overpotential, smaller Tafel slopes, and improved stability, even with significantly reduced metal loading, surpassing the performance of commercial Pt/C.

These findings highlight the potential of engineered carbon-based supports to minimize noble metal usage while delivering high activity and durability, offering a promising strategy for the development of cost-effective and efficient electrocatalysts for sustainable hydrogen production.

CT-S3-6

역수성가스전이반응용 High Entropy Oxide(HEO) 촉매 개발

윤채민, 전이정, 김창현, 윤은수, 임재학, 심재오*
원광대학교

Development of High Entropy Oxide catalysts for the reverse water-gas shift reaction

Chae-Min Yoon, I-Jeong Jeon, Chang-Hyeon Kim, Eun-Su Yoon, Jae-Hak Lim, Jae-Oh Shim*
Wonkwang University

기후변화로 인한 이산화탄소 배출량이 급증하면서, 우리나라는 2050 탄소중립 목표를 달성하기 위해 노력하고 있다. 이에 따라, 이산화탄소를 포집하여 고부가가치화할 수 있는 주요 반응인 역수성가스 전이(reverse water-gas shift, RWGS)반응이 주목받고 있다. 본 연구에서는 RWGS 반응용 촉매를 개발하고자, sol-gel 법을 통해 High Entropy Oxide(HEO) 촉매를 제조하였다. Cu를 기반으로 Mg, Co, Ni, Zn 원소의 존재에 따른 촉매 특성 및 활성을 평가한 결과, CoNiCuZn 촉매에서는 HEO의 구조적 특성과 우수한 열적 안정성으로 인해 Cu의 소결이 억제되어 500°C 이상의 고온에서도 높은 CO_2 전환율을 보였으며, XRD, XPS, TPR, OSC 등의 추가적인 분석을 통해 HEO 촉매의 RWGS 반응용 촉매로서의 가능성을 평가하고자 하였다.

CT-S3-7

근사 차량모형에서 타이어 사이드월 냉각핀의 공력 및 방열성능

전수원[1], 유경미[1], 박현우[2], 이상욱[3*]
[1]원광대학교 기계공학과, [2]원광대학교 기계공학부, [3]원광대학교 기계공학부

Aerodynamic and Performance of Tire Sidewall Cooling Fins in a Realistic Vehicle Model

Su Won Jeon[1], Kyoung Mi Yu[1], Hyun Woo Park[2], Sang Wook Lee[3*]
[1]Div. Mechanical Engineering, Graduate School of Wonkwang University, [2]Div. Mechanical Engineering (Undergraduate Program), Wonkwang University, [3]Div. Mechanical Engineering, Wonkwang University

고속 주행 시 발생하는 타이어의 열 축적은 구조적 손상 및 사고로 이어질 수 있어 효과적인 열 관리가 필수적이며 많은 연구가 진행되고 있다[1]. 본 연구는 타이어 측면에 냉각 핀을 적용하여 열 축적을 억제하고 공력 성능 향상시키기 위한 최적 설계 방향을 제시하였다. DrivAer 차량 모델[2]에 다양한 핀 각도를 적용하고 타이어 회전에 의한 공력 및 방열 성능을 분석하기 위해 Sliding Mesh 기법과 k-ω SST 모델을 이용해 핀 각도에 따른 열전달 및 항력 변화를 분석하였다. 차량 시스템 내에서 냉각 핀 형상은 타이어 주변 유동 구조, 와류 특성 및 열전달 계수에 큰 영향을 미쳤으며, 특히 양각 22.5도 핀은 열전달 계수를 17.49% 증가시키고 전체 항력 계수를 3.82% 감소시켜 가장 우수한 결과를 보였다. 이는 22.5도 냉각 핀이 차량 후류의 압력 회복을 강화하고 타이어의 열 관리와 공력 성능을 동시에 향상시킨다는 것을 보여준다. 본 연구는 타이어 측면 형상이 단순한 부가 요소가 아니라 차량 전체 성능에 중요한 설계 요소임을 입증하였다. 타이어 설계 초기 단계에서 사이드월 형상을 고려하는 것이 차량 성능 향상을 위한 효과적인 전략이 될 수 있다.

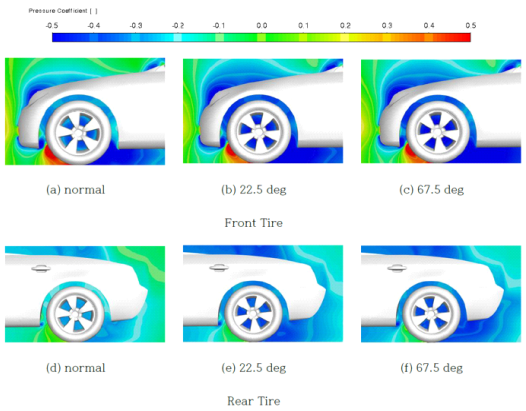


Figure 1. Pressure Coefficient Distribution of Front and Rear Tires on Tire Center Plane : (a)~(C) front tire, (d)~(f) Rear tire

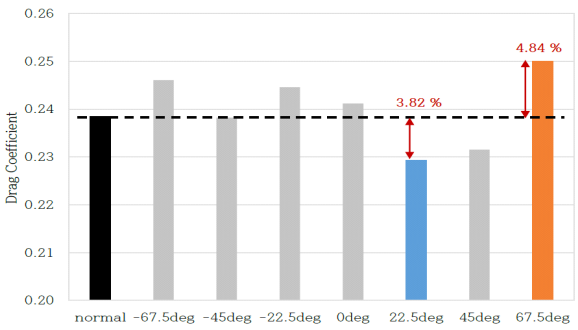


Figure 2. Comparison of Drag Coefficient in Vehicle System with Sidewall Cooling Fin Tire

참고문헌

1. Yu, K.; Lee S. Numerical Study on the Influence of Cooling-Fin Geometry on the Aero-Thermal Behavior of a Rotating Tire. *Energies* **2025,** 18, 1133
2. Heft, A.; Indinger, T.; Adams, N. Experimental and Numerical Investigation of the DrivAer Model. In Fluids Engineering Division Summer Meeting; American Society of Mechanical Engineers: New York, NY, USA, 2012; pp. 41 - 51.

후기

본 연구는 교육부 재원으로 한국연구재단의 지역혁신체계 및 교육(RISE) 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

CT-S3-8

스마트 e모빌리티 대회용 1인용 전기자작차 제작

강호선[1], 박경훈[1], 김준성[1], 이승재[1*]
[1]원광대학교 기계공학부

Fabrication of a Single-seater Electric Prototype Vehicle for the Smart e-Mobility Competition

Ho Seon Kang[1], Gyeong Hun Park[1], Jun Seong Kim[1], Seung-Jae Lee[1*]
[1]Division of Mechanical Engineering, Wonkwang University

본 차량은 스마트 e모빌리티 대회의 규정에 맞춰 제작되었으며, 대회 코스 특성에 맞춰 차량의 크기와 무게를 선정하고 운동성능을 향상시키고 안정성을 확보하도록 설계 및 제작되었다. 이전의 차량의 문제점을 분석하여 현가장치 지오메트리 및 운동특성 해석에 기반한 접근을 시도하였고, 프레임 및 마운트에 대해 지그를 제작하여 설계와 제작 간의 정확성을 확보하고자 하였다. 또한 프레임 파이프 사양을 최적화하고 배터리의 병렬 배치를 통해 차량 경량화 및 저중심 설계로 전비를 향상시켰다.

프레임 설계에서는 파이프의 외경을 줄이고 두께는 유지함으로써 구조강성 저하를 방지하고 프레임 무게를 약 10kg 감량시키고자 했다. 현가장치의 설계에서는 이전 차량과 다르게 SolidWorks CAD를 이용해 정확한 수치를 기반으로 한 설계 안정성을 확보하였다. 이를 통해 저속 코너에서의 회전력 확보를 위한 롤 유도 세팅으로 수정하였다. 구동계의 설계에서는 높은 발열저항성과 브러쉬 마모로 화재 위험성이 없는 BLDC모터를 채택하였다. 또한, 기어비를 증가시켰고, 체인 규격을 520체인에서 428체인으로 변경하여 전비를 향상시키고자 하였다.

최종적으로 배터리 및 BMS 성능검사서를 통하여 설계 및 제작에 대한 검증을 하였다.

본 연구는 교육부 재원으로 한국연구재단의 지역혁신체계 및 교육(RISE) 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

특별세션(IV):

(다부처) 화재 능동대응을 위한 소화탄 개발 및 활용 기술 심포지엄

Symposium on the Development of Advanced Fire Extinguishing Projectile for Fire Suppression

2025년 9월 25일(목) 09:00~11:30
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸C

CT-S4-1

가스하이드레이트 형성 원리를 이용한 소화약제 제조 및 화재 진압

이주동[1*], 서성덕[1], 전창수[1]
[1]한국생산기술연구원 동남기술실용화본부

Preparation of gas hydrate-based extinguishing agent and fire suppression

Ju Dong Lee[1,*], Seong Deok Seo[1], Changsu Jeon[1]
[1]Korea Institute of Industrial Technology, Dongnam Technology Application Division

기존 소화약제의 한계를 극복하고 효과적인 화재 진압 기술을 개발하는 것은 매우 중요하며 본 연구에서는 혁신적인 화재 진압 접근법으로서 5.5Å 크기의 얼음 결정 구조 내부에 할로겐족 소화 가스를 물리적으로 대량 포획하는 가스 하이드레이트 기반 소화 약제의 개발 및 잠재적 활용 방안을 심도 깊게 탐색하였다. 하이드레이트 형성 및 펠릿화의 연속 공정을 통해 70% 이상의 높은 전환율을 가진 소화 약제를 성공적으로 제조하였으며, 라만 스펙트럼 분석을 통해 HFC-125a 객체 가스가 $5^{12}6^4$ 의 대형 동공(Cavity)에 효과적으로 포획되었음을 명확히 규명하였다. 제조된 HFC-125a 하이드레이트 분말은 실험실 규모 및 모의 유류 화재 시험에서 기존 소화제인 $NH_4H_2PO_4$ 분말 대비 월등한 화재 진압 효능을 나타내었다. 특히, 해당 소화제는 화재의 재발화를 효과적으로 억제하는 뛰어난 성능을 보였다. HFC-125a 하이드레이트 소화 약제는 화염에 노출될 시 해리 반응을 통해 열을 흡수하고, 동시에 담지된 소화 가스를 방출하여 질식 소화 등의 방식으로 신속한 화재 진압 및 강력한 재점화 억제 효과를 발현하였다 (Han et al. [1]]. HFC-125a 외에 CO_2 , HFC-23, FIC-13I1 등 다른 할로겐족 소화 가스들의 수화물 형성 특성 및 소화 약제로서의 활용 가능성 또한 면밀히 조사하였다. 객체 소화 가스 종류에 따른 최소 소화 농도, 해리열, 가스 저장 능력 등을 비교 분석함으로써, 미래 소화 약제로서의 광범위한 적용 가능성을 검토하였다.

감사의 인사

본 연구는 정부(행정안전부, 과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 소방청)의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행되었습니다 (과제명: 난접근성 화재 대응을 위한 가스하이드레이트 소화탄 및 화재 진압 기술개발사업, 과제번호 : 2760000002, RS-2023-00255479).

참고문헌

1. Han, J., Lee, J., Burla, S. K., Chung, S., Lee, J. D., “Exploring the Potential of HFC-125a Hydrate for Innovative Fire Suppression: A Gas Hydrate Technology Approach”, *Energy Fuels*, **38**(7), 6238-6250 (2024).

CT-S4-2

Synthesis of Clean Gas Hydrate Fire Extinguishing Agent and Evaluation of Fire Extinguishing Performance

Jeong-Hoon Sa*

Department of Chemical Engineering (BK21 FOUR), Dong-A University, Busan, Republic of Korea

With the increasing occurrence of inaccessible fires such as forest fires and high-rise building fires that are difficult to extinguish using conventional fire extinguishing agents, gas hydrates have been proposed as a novel fire-extinguishing medium. Gas hydrates form when water molecules linked by hydrogen bonding under low-temperature and high-pressure conditions. Incorporating fire-extinguishing gases into hydrates not only enables long-range discharge due to their high solidification density but also combines extinguishing effects with both the suffocating and endothermic effects of hydrate dissociation, making them effective against inaccessible fires. In this study, CF_3I (Trifluoroiodomethane) was employed as a hydrate former to investigate the feasibility of hydrate-based fire-extinguishing agents. The phase equilibrium conditions of CF_3I hydrates were determined, and their crystal structure was identified via powder X-ray diffraction. Encapsulation characteristics of CF_3I molecules within hydrate cages were examined using in situ Raman spectroscopy. The fire extinguishing performance of synthesized hydrates was evaluated through laboratory-scale testing. In addition, the potential of HFC-125/CO_2 binary hydrates as fire extinguishing agents with enhanced gas storage capacity by filling residual empty cages was assessed. The phase equilibrium conditions of HFC-125/CO_2 hydrates were measured with various compositions, and their crystal structure was confirmed. Hydrate formation kinetics were evaluated for different HFC-125/CO_2 ratios, and the small cage occupancy was estimated through composition analysis. The potential applications of hydrate-based fire extinguishing agents will be discussed.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (RS-2023-00280519), the Korea Basic Science Institute (RS-2024-00404896), the Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology (Project Number: 2760000002), and the "Busan Regional Innovation System & Education (RISE)" Project, supported by the Ministry of Education and Busan Metropolitan City.

CT-S4-3

나노고에너지물질 기반 가스팽창제의 연소 특성 및 소화장치 응용 연구

김호성[1], 런치파[2], 바시르압둘[2], 차정근[1], 김수형[1,2,*]
부산대학교 에너지융합기술연구소[1], 부산대학교 나노융합기술학과[2]

Combustion Performance and Fire Extinguishing Applications of Nanoenergetic Material-Based Gas Expanding Agent

Ho Sung Kim[1], Qifa Ren[2], Abdul Basyir[2], Jung Keun Cha[1], Soo Hyung Kim[1,2,*]
Research Center of Energy Convergence Technology[1], Department of Nanofusion Technology[2]
at the Pusan National University

본 연구에서는 알루미늄(Al), 산화비스무트(Bi_2O_3), 아지드화나트륨(NaN_3)으로 구성된 나노고에너지물질 기반의 신개념 팽창제를 개발하였다 [1-6]. 해당 물질은 금속 연료와 금속 산화제 간의 발열 반응과 질소 발생 화합물의 열분해 반응을 결합함으로써, 짧은 반응 지연시간과 고압 가스 발생을 동시에 실현할 수 있도록 설계되었다. 이러한 특성은 비전력 환경이나 밀폐 공간과 같이 기존 소화장치의 사용이 제한되는 조건에서도 독립적으로 작동할 수 있는 자가 구동형 소화 시스템 구현에 적합하다. 본 복합체는 나노 단위 입자의 넓은 반응면적과 빠른 열 전달 특성을 바탕으로, 연소 개시 직후 급격한 온도 상승과 함께 가스 발생 효율을 극대화하였다. 실험 결과, 기존 고체 에어로졸 소화기 대비 반응 개시 속도가 크게 향상되었으며, 단시간 내에 높은 압력을 형성하여 건식 소화약제의 빠르고 균일한 확산을 가능하게 했다. 이는 화재 초기 진압에서 소화약제가 화염 전면에 효과적으로 분포될 수 있도록 하여, 진화 시간을 단축하고 확산 억제 효과를 높이는 데 기여할 수 있다. 또한, 본 팽창제물질은 연소 과정에서 불활성 가스를 다량 생성하여 화염의 온도를 낮추고 산소 농도를 희석시키는 화학적 억제 효과를 동시에 발휘한다. 나노고에너지물질 반응으로 생성된 고온 환경은 NaN_3 열분해 반응을 촉진하여 가스 생성 속도와 총 발생량을 크게 향상시켰으며, 이로 인해 보다 짧고 집중적인 에너지 전달이 가능해졌다. 종합적으로, 본 연구에서 제안한 나노고에너지물질 기반 팽창제는 빠른 반응, 높은 분사 압력, 풍부한 가스 발생이라는 세 가지 핵심 성능 지표에서 우수한 특성을 보였다. 이러한 특성은 차세대 소화 추진제의 성능 향상뿐 아니라, 경량·소형화된 휴대형 또는 특수 목적 소화 장치 개발에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Basyir, A., Kim, H. S., Cha, J. K., Kim, S. H., “Enhancing the Ignition, Combustion, and Propulsion Performances of Al/CuO-Based Energetic Materials Incorporating with Fullerene Carbon Black Particles”, *Fuel*, 390, 134688 (2025).
2. Kim, J. H., Kim, H. S., Cha, J. K., Cho, H. S., Shim, H. M., Kim, S. H., “Effect of Energetic Polymer Encapsulation for Aluminum/Potassium Periodate-Based Composites on Ignition Sensitivity and Combustion Characteristics”, *Chemical Engineering Journal*, 444, 136519 (2022).
3. Kim, H. S., Cha, J. K., Kim, J. H., Kim, S. H., “Highly Flexible and Patternable Multiwalled Carbon Nanotube/Nitrocellulose Hybrid Conducting Paper Electrodes as Heating Platform for Effective Ignition of Nanoenergetic Materials”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12, 28586-28595 (2020).
4. Kim, J. H., Cho, M. H., Shim, H. M., Kim, S. H., "Fabrication and Thermal Behavior of Al/Fe_2O_3 Energetic Composites for Effective Interfacial Bonding between Dissimilar Metallic Substrates", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 78, 84-89 (2019).
5. Cho, M. H., Kim, K. J., Kim, S. H., "Effect of Paraffine Wax on Combustion Properties and Surface Protection of Al/CuO-based Nanoenergetic Composite Pellets", *Combustion and Flame*, 198, 169-175 (2018).
6. Kim, K. J., Cho, M. H., Kim, S. H., "Effect of Aluminum Micro- and Nanoparticles on Ignition and Combustion Properties of Energetic Composites for Interfacial Bonding of Metallic Substrates", Combustion and Flame, 197, 319-327, (2018).

CT-S4-4

산불 대응 드론 활용 통신시스템 최적화 연구

김영민[1], 김혜문[1]
[1]㈜지디엘시스템

Research on Optimizing Communication Systems for Forest Fire Fighting Drone

Youngmin Kim[1], Hyemoon Kim[1]
[1]GDL SYSTEM CO. Ltd

산불은 전 세계적에서 지속적으로 발생하는 대형 자연재해 중 하나로, 넓은 산림 지역에 경제적 피해뿐만 아니라 환경적으로도 복원시 상당기간이 필요한 피해를 야기한다. 드론 기술의 발전에 따라 대형 산불의 효과적인 감시, 모니터링, 구조, 진압등에 드론을 활용하고 있으며, 저지선의 활용과 AI 딥러닝을 통한 소화탄 투하를 이용한 잔불제거 등이 제안되었다[1,2]. 다수의 드론 활용시 산악지형이라는 특수성으로 인해 통신음역지역이 존재하며 이를 극복하기 위한 효과적인 통신시스템이 반드시 필요하다[3]. 이에 드론 내부에 애드혹 기능을 가진 자체 통신 네트워크(FANET : Flying Ad-hoc Network)를 통해 하나의 자율망을 구축하여 다양한 토폴로지 구성망과 라우팅을 통해 재난 환경에서 효과적인 드론 활용 효과를 극대화 할 수 있다[4].

산불의 현장 상황에 따라 다양한 형태의 네트워크를 형성함으로 신속한 대응 시나리오 적용이 가능하다. 본 논문에서는 자체 통신 네트워크를 통해 다양한 드론 활용 방법과 라우팅 최적화에 대한 연구를 진행하였다. 저지선 방어시 클러스터을 지정후 화이트리스트를 이용하여 라우팅 오버헤드를 줄일 수 있으며 근거리 진화시 음영지역이 존재하는 경우 클러스터 헤드를 보다 높은 고도에 유지시킴으로써 환경적인 요소를 극복할 수 있다. 원거리 진화시 애드혹을 이용한 중계드론을 활용한 네트워크를 통해 접근 및 운용이 가능하다. 군집 드론 네트워크 기술을 통해 재난/안전 분야 뿐만 아니라 군사용, 상업용으로 활용가능성을 기대해 볼 수 있다.

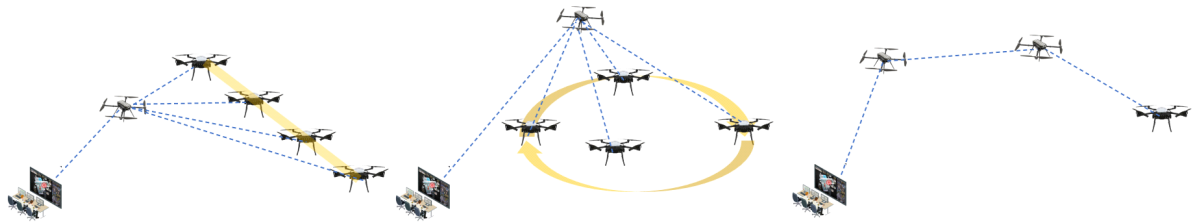


그림1. 다양한 화재 상황별 네트워크 토폴로지

참고문헌

1. 권준범, “산불재난 발생시 드론 활용방안에 관한 연구”, (사)한국재난정보학회 정기학술대회 논문집, pp 117-118(2022)
2. 하강훈, 김재호, 최재욱, “ 소방분야의 드론 활용방안 연구 경향 분석”, 한국산학기술학회논문지 vol 22, No.4 pp 321-330 (2021)
3. Dongyun. Ok, Jiwon Jeong, “Ad-Hoc Network Communication for Drones in Coverage Hole”, 항공우주시스템공학회 추계학술대회 논문집, p455-457(2023)
4. 이경민, 이미정, “산불진화용 드론을 위한 FANET 라우팅”, 한국통신학회 동계종합학술발표회, pp 1309 -1310(2022)

감사의 글:

"본 연구는 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479)의 지원을 받아 수행되었습니다."

CT-S4-5

GIS 디지털트윈 시뮬레이터 기반 드론 영상 목표지점 도출 기법

고은성, 최호진, 김원석*
부산대학교 정보컴퓨터공학부

Target Point Extraction Method Using Drone Imagery in a GIS-Based Digital Twin Simulator

Eun-Seong Ko, Ho-Jin Choi, Won-Suk Kim*
Department of Computer Engineering, Pusan National University

무인기(UAV)를 이용한 산불 진압은 인명과 장비의 위험을 낮출 수 있는 효과적인 운용 방식 중 하나이다 [1]. 다만 실제 화재 현장 적용을 위해서는 최적의 투하 지점과 시점의 결정이 매우 중요하며, 특히 산불처럼 연기와 고열로 가시성이 낮고 접근이 어려운 환경에서는 카메라 영상에만 의존해 목표 지점을 정확히 산정하기 어렵다. 이에 본 연구는 GIS 기반 디지털트윈 시뮬레이터를 제안한다. 제안 시스템은 Unity를 사용해 실제 드론 임무 지역의 지형을 디지털트윈 환경에 재현하고, 드론의 GPS 위치·고도·자세와 카메라/짐벌 각도를 동일 좌표계에서 반영한 가상 드론을 구현한다. 그 후 카메라 캘리브레이션과 기하 정합을 적용하여 실제 드론 카메라와 디지털트윈 내 구현된 가상 카메라의 파라미터를 일치하도록 하여 화면을 동기화한다. 화면이 동기화된 상태에서 사용자가 실제 드론 영상에서 소화탄 투하 지점을 지정하면, 동기화된 가상 카메라가 해당 픽셀의 시야 방향을 카메라 파라미터와 드론의 위치·자세에 따라 복원하고, 그 방향으로 선을 따라가 지형과 만나는 지점을 계산한다. 이 교차점은 WGS84 경·위도·고도로 변환되며, 드론과의 거리·방향·고도차 같은 기본 정보도 함께 산출된다. 따라서 실제 드론의 센서 데이터와 카메라 화면에서 투척 지점을 계산하면 해당 지점의 실제 위치와 투하 판단에 필요한 값을 바로 얻을 수 있다. 본 연구의 의의는 실제 드론 화면에서 계산한 소화탄 지점을 디지털트윈에서 해당 좌표와 거리·방향 정보로 즉시 연결해, 가시성이 낮은 상황에서도 투하 지점을 정량적으로 판단 가능하게 했다는 데 있다. 실제 환경과 디지털트윈의 화면-지형 동기화와 좌표화 절차를 통합함으로써 임무 계획, 수행 기록, 사후 분석을 같은 좌표계로 일관되게 다룰 수 있어 안전성과 운용 효율을 함께 높일 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

1. Shin, S. G., Kim, J. Y., Jang, S., Lee, M.-J., Han, S., Choi, C.-H., Kim, S., Cho, W.-S., Lee, J., and Kim, S. H., “A Feasibility Study on Deep Learning-based Automatic Extinguishing Bullet Dropping Point Recommendation for Wildfire Suppression,” J. Korea Inst. Inf. Technol., 19(3), 15-23 (2021).

감사의 글:

"본 연구는 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479)의 지원을 받아 수행되었습니다."

CT-S4-6

산불 확산에 따른 소화탄 활용 방안 연구

방성혁, 방창훈[1]
경남대학교 대학원, [1]경남대학교

Analysis of Wildfire Spread Mitigation Using Fire-Extinguishing Agents

Seonghyeok Bang, Changhoon Bang[1]
Kyungnam University Graduate School, [1]Kyungnam University

기후변화와 인간 활동이 복합적으로 작용하여 빈발·대형화되는 산불 대응의 효율성과 신속성을 높이기 위해, 본 연구는 산불의 형태에 따른 확산 메커니즘을 분석하고, 소화탄 기술을 활용한 단계별 산불 대응 전술을 제시하고자 한다. 본 연구에 사용된 프로그램은 BehavePlus 7(US Forest Service, 2025)이며 미국 산림청이 개발한 산불 행동 예측 시스템이다. 풍속, 습도, 연료, 지형(경사·방위각), 구조물 취약성을 포함한 입력정보를 적용해 표면(Surface)·수관(Crown)·비산(Spot)화재의 확산, 화염길이, 도달시간, 피착확률, 위험도를 정량적으로 산출한다. 표면화재는 Rothermel(1972)[1)], 수관화재는 Van Wagner(1977)[2)], 비산화재는 Albini(1979)[3)]·Andrews(2012)[4)] 공식에 근거한다. 초기 입력값은 기상 조건으로 풍속, 습도 20%(건조), 기온 20도, 지형조건은 경사 15도, 연료조건은 GR4(표면), TL8(수관)으로 계산하였다. 위험도 산정은 화염길이, 확산속도, 거리, 구조물 취약성 등 BehavePlus 7 결과를 통합하여 100점으로 환산하였다.

첫째, 표면화재, 수관화재, 비산화재 등 산불의 형태에 따라 확산 속도가 상당한 차이가 발생되며 특히 풍속은 화재위험도를 높이는 주요인 임을 확인하였으며 또한 콘크리트는 우수한 내화성을 보였으나 목재는 높은 취약성을 나타내었다.

둘째, 소화탄의 기술적 특성과 플랫폼별 운용 체계에 따라 드론 투하형, 중형 UAV 폭탄형, 곡사포 발사형, 항공 투하 대형 폭탄으로 구분하여 비교·분석하였으며 소화탄은 원거리·즉각 투하로 초동 진화에 활용 가능성 있는 소화 시스템임을 확인하였다.

셋째, 화재진화를 위한 소화탄 전술 운용 측면에서는 탐지·표적획득, 플랫폼 선택, 투하·폭발 프로파일링, 다중 재공격의 4단계 체계 구축이 가능하다. 고해상도 위성·AI 열영상 드론으로 화점 좌표와 기상변수를 실시간 수집하고, 풍속·습도·경사 정보를 바탕으로 소화탄을 투하하도록 설계하고 반복 투하 시 열화상 감시 후 미진화 구역에 즉각 후속탄을 투입하는 'Combined Arms' 기법을 적용함으로써, 진화 효율과 자원 활용도를 극대화할 수 있다.

본 연구 결과는 산불 위험 평가 시스템의 과학적 기반을 제공하며, 효과적인 산불 방재 정책 수립에 기여할 것으로 기대된다. 향후 실제 산불 사례를 통한 모델 검증과 지역별 특성을 반영한 맞춤형 위험도 평가 체계 개발이 필요하다.

참고문헌

1. Rothermel, R.C. 1972. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels. USDA Forest Service Research Paper INT-115
2. Van Wagner, C.E. 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. Canadian Journal of Forest Research, 7(1), 23-34
3. Albini, F.A. 1979. Spot fire distance from burning trees－a predictive model. USDA Forest Service INT-GTR-56
4. Andrews, P.L. 2012. Modeling wildland fire behavior with BehavePlus. USDA Forest Service General Technical Report

사사

본 연구는 행정안전부 난접근성 특수화재 진화를 위한 고기능성 소화탄 및 무인 능동진압 기술개발사업의 연구비 지원(과제번호 RS-2025-00255479)에 의해 수행되었습니다.

CT-S4-7

난접근성 화재 대응을 위한 가스하이드레이트 소화탄 탑재 고중량 무인비행장치 시스템 개발

차수현[1], 이한솔[1], 양희철*
[1](주)그리폰다이나믹스

Development of a Heavy-Lift Unmanned Aerial Vehicle System Equipped with Gas Hydrate Fire Extinguishing Units for Inaccessible Fire

Suhyun Cha[1], Hansol Lee[1,] Heechul Yang*
[1]GRYPHON DYNAMICS CO., Ltd

최근 기후변화로 인하여 장기 건조·고온·강풍 조건과 인위적 불씨 증가로 산불 발생 빈도와 확산 속도가 크게 높아지고 있다. 특히 험지, 고층건물, 도서지역과 같은 난접근성 지형에서는 초기 진화 지연이 대형 피해로 이어지는 경우가 빈번하다 [1]. 기존 헬기나 지상 장비는 접근성과 기상 제약에 한계가 있어, 장거리·고중량·고정밀 투하가 가능한 고중량 UAV의 필요성이 부각되고 있다 [3]. 이때, 가스하이드레이트 소화탄은 급속 냉각과 질식 효과를 동시에 제공하여, 기존 분말이나 액상 소화제 대비 높은 소화 효율과 화재 재발 방지 능력을 갖춘 차세대 진압 수단으로 평가된다 [2]. 따라서, 고중량 UAV 플랫폼과 가스하이드레이트 소화탄의 결합은 난접근성 화재에 대한 신속하고 정밀 대응을 가능하게 하는 핵심 솔루션이 될 수 있다.

본 연구에서는 난접근성 화재 진압 임무의 특성을 고려하여 산불 화재 진압을 위한 가스하이드레이트 소화탄 투하 드론과 고층 건물 화재 진압을 위한 파공장비 부착 및 가스하이드레이트 소화탄 투척 드론을 개발하였으며, 방법론적으로는 데이터수집, 비교연구, 피드백 설계, 테스트 등을 진행하였다. 40kg급 가스하이드레이트 소화탄을 탑재하기 위해서 고중량 드론 임무 장비용 전원공급 솔루션을 설계 및 제작을 수행하였다. 이를 통해 드론의 고전압에 대응하여 멀티채널이 동시 출력 가능하게 되어 드론의 탑재 능력 향상으로 고중량 임무 장비 운용이 가능해졌으며 이에 따라 드론의 임무 범위 및 수행 능력이 향상 되었다. 고중량 드론의 배터리 전원 제어를 위한 파워 스위치를 제작하여 비행안정성을 향상 시켰다. 이는 고전압 원격제어 대응 MOSFET-Load Switch 모듈로서 Ready-to-Flight 원격 제어 대응이 가능하다. 물리 스위치(커넥터)의 내구성 저하 원인 Arc 발생을 차단하며 대용량 배터리 온-보드 충/방전 솔루션을 제공하며 향후 기존 산업용 대형 DC 릴레이를 대체하는 소형/경량화 솔루션이 될 수 있다. 또한 고중량 가스하이드레이트 소화탄 투하 및 투척 시스템을 개발하여 탑재된 소화탄이 전자식 개패를 통해 원격 소화를 가능하게 되었다. 개발된 임무 장비들을 고중량 드론에 설치하여 테스트 비행을 수행하였다. 최종적으로는 화재 진압에 적합한 다기능성 고중량 드론 시스템을 구축하였으며 향후 난접근성 화재 진압에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 인사

본 연구는 정부(행정안전부, 과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 소방청)의 재원으로 한국산업기술기획평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행되었습니다 (과제명: 난접근성 화재 대응을 위한 가스하이드레이트 소화탄 및 화재 진압 기술개발사업, 과제번호 : RS-2023-00255479)

참고문헌

1. Kim, J., et al., “Analysis of wildfire spread patterns in inaccessible terrain,” Journal of Forest Fire Science, 2021.
2. Park, Y., Choi, H., “Suppression performance of gas hydrate-based fire extinguishing agents,” Fire Safety Journal, vol. 105, pp. 102–113, 2019.
3. Lee, S., et al., “High-payload UAV navigation using GNSS/INS sensor fusion,” Aerospace Systems Engineering Review, 2020.

CT-S4-8

Deep Learning-Based Fire Tracking Algorithm for Nighttime Adaptation and Tracking Speed Enhancement

Gyeongphjl Park[1*], Dongbin Kim[2]
[1]Yonsei University, [2]University of Hartford

Increasing frequency of large-scale wildfires at night due to climate change, the importance of real-time fire monitoring and tracking technologies has grown significantly. This study presents a method to simultaneously improve tracking reliability and speed in nighttime environments by complementarily integrating tracking algorithms (CSRT, TLD, MOSSE) with the deep learning-based fire tracker "Nona Filter." To stably track the optical characteristics of irregular flames, the system is designed in a "sandwich" structure in which the Nona Filter detects fire objects in odd-numbered frames, while a tracking algorithm operates in even-numbered frames. Experimental results show that the Nona Filter–MOSSE combination maintains a 100% tracking recall rate while increasing per-frame processing speed by 51%, enabling real-time tracking even under limited computational resources. Furthermore, to overcome operational limitations in nighttime and adverse weather conditions, existing RGB wildfire images were preprocessed into thermally enhanced frames simulating infrared (IR) characteristics for data augmentation. The model trained with this dataset demonstrated stable fire detection and tracking performance in actual nighttime experiments using an IR camera.

Acknowledgement

This work was supported by the Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology and funded by the Korean government (Ministry of Trade, Industry, and Energy, Ministry of Science and ICT, Ministry of the Interior and Safety, National Fire Agency, Project Title: Development of gas hydrate extinguishing agent and fire suppression technology for inaccessible fires, Project Number: 1761002860).

References

1. A. K. K. Wong and N.-K. Fong, "Study of pool fire heat release rate using video fire detection," (2014)
2. D. S. Bolme, J. R. Beveridge, B. A. Draper, and Y. M. Lui, "Visual object tracking using adaptive correlation filters," in 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 2544–2550 (2010).
3. Gyeongphil Park et al. "Smart Air-to-Ground Guidance System using Deep Learning for Wildfire Response", Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 254-263 (2025).

CT-S4-9

파이로테크닉을 이용한 가스 인플레이터 개발

정순용*, 이진희, 백종현
한국소방기구제작소

Development of a gas inflator using pyrotechnics

Jung Soonyong*, Lee Jinhee, Back Jonghyun
Hankook Fire Fighting Equipment CO., LTD

지구 온난화로 인해 산불 발생 건수와 면적이 급격히 증가하고 있으며, 발화 지점에 대한 접근의 어려움, 빠른 확산 속도, 넓은 화재 영역, 기상 조건, 지형과 주변 환경의 복잡성으로 인해 기존 소방 장비를 이용한 산불 진압이 어려워 공중에서 이동가능한 소화탄에 대한 연구가 진행되고 있습니다[1].

화약을 이용한 소화탄은 대량의 소화약제를 안정적으로 분산시켜 산불 진압이 가능하지만, 국내에서는 화약관련 규제로 인해 소화약제 팽창제로 화약 적용이 어렵다. 소화탄의 소화약제를 비화약 방식으로 팽창시키기 위해 CO_2 카트리지를 이용한 가스 인플레이터를 설계 및 제작하였다.

CO_2 카트리지 가스 인플레이터는 CO_2 카트리지를 고정하기 위한 하우징, 카트리지 봉인을 뚫기 위한 핀(pin)과 피스톤, 피스톤을 구동하기 위한 챔버로 구성된다. 피스톤 구동방식은 챔버의 구조에 따라 스프링, 압축 공기 또는 비화약 물질의 연소 가스를 적용할 수 있도록 설계하였다.

가스 인플레이터를 알루미늄 챔버에 결합하여 카트리지 봉인을 뚫은 후 CO_2 가스 방출에 소요되는 시간과 압력을 압력 센서와 데이터 로거로 측정하였다. 카트리지 봉인 파괴 후 80ms에 최대 압력에 도달하여 소화탄에 적용이 가능함을 확인하였다.

참고문헌

1. Li Haoyang, Zhiming Du, “Study on the development of aerial fire extinguishing munition for forest fires and fire extinguishing tests,” *Case Studies in Thermal Engineering*, 55, 104138 (2024).

30주년 기념 국제세션
특별세션(V):
가스하이드레이트 응용 및 청정기술
International Session: Gas Hydrate Application and Clean Technology

2025년 9월 25일(목) 13:00~17:30
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸C

CT-S5-1

Development of hydrate-based desalination and water treatment

Ju Dong Lee[1,*]

[1]Offshore Plant Resources R&D Center, Korea Institute of Industrial Technology, Busan 46744, Republic of Korea.

[*]Corresponding author, e-mail: julee@kitech.re.kr

Abstract: Globally, severe freshwater shortages are occurring due to rapid population growth and expanding industrial activities. Seawater desalination is a crucial method for utilizing abundant seawater, and conventional multi-stage flash (MSF) distillation and reverse osmosis (RO) processes are widely employed. However, MSF is energy-intensive, and RO faces limitations in treatable salt concentrations due to membrane fouling. Hydrate-based water treatment utilizes the property of excluding contaminants during crystal formation, and as it is not significantly affected by water quality conditions, it is suitable for treating highly concentrated seawater and various wastewaters (Han et al. [1]). In this study, a hydrate pilot plant process was applied to diverse wastewaters, including brine, livestock and food wastewater, and radioactive contaminated water. Over 80% of pollutants were removed in a single process, and the removal efficiency could be increased to 97-99% through the melting process. This technology proved effective in removing various pollutants from diverse wastewaters, confirming its potential as a promising method for sustainable water resource management.

Acknowledgements

This work was supported by the Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology (Project Numbers: 2760000002, RS-2023-00255479) and the Korea Institute of Industrial Technology (Project Number: JA250004)

References

1. Hong, S., Cho, S., Burla, S. K., Seo, S. D., Han, J., Won, Y. S., Lee, J. D., “Comparative kinetics and enhanced desalination efficiency of hydrate-based desalination using HFC-125a, HFC-134a, and HFC-152a through hydrate pelletization and induced melting”, *Desalination* **592**, 118176, (2024)

CT-S5-2

Sustainable Decarbonization through Clathrate Hydrates

Praveen Linga

Department of Chemical and Biomolecular Engineering, College of Design and Engineering, National University of Singapore, Singapore

Abstract:

Climate change is known to be dominantly caused by the increased concentration of greenhouse gases in the atmosphere, in particular carbon dioxide (CO_2). The clathrate hydrate process has been demonstrated over the years as a promising technology for innovative applications like natural gas storage, carbon dioxide capture, seawater desalination, cold energy storage etc. CO_2 hydrate, a solid compound made of molecular CO_2 enclathrated in crystalline lattices formed by water molecules, is an attractive option to capture, intermediary storage and for long-term CO_2 sequestration. Methane (CH_4) hydrates in oceanic sediments have been stable for millions of years. As a natural analog, is it possible to store CO_2 in the form of hydrates in oceanic sediments forever? In this presentation, the state of the art on clathrate hydrate technology pertaining to carbon capture and storage will be discussed in detail and its perceived path decoding decarbonization will be discussed. Furthermore, future research and development opportunities and pathways for commercialization will be discussed.

CT-S5-3

Use of Gas Hydrates in Sustainable Technological Solutions Related to NetZero CO_2

Rajnish Kumar*
Indian Institute of Technology Madras, India, Chennai 600036

Gas Hydrate are ice like crystalline solid which could form even at ambient conditions. While natural gas hydrates commonly form in oil and gas pipelines leading to pipeline blockages, and are considered nuisance, hydrate research has however become popular due to its being an alternative resource of methane. Such methane resources have been identified across the globe and thus gas hydrate research achieved global recognition. Natural gas produced from exploitation of marine hydrates (and permafrost hydrates) could be converted into blue hydrogen. Further, gas hydrates have been utilized for sustainable CO_2 capture, CO_2 sequestration, as a phase change material for cold energy storage (Data Center Cooling Application), purification of effluent, saline, isotopic water etc. Focus of this presentation would be on understanding hydrates at molecular level and using this knowledge to understand different applications of gas hydrates in industrially relevant solutions.

CT-S5-4

Understanding the Roles of Cations and Anions in Gas Hydrate Formation

Teerapat Pongpuak[1], Kan Jeenmuangand[2], Phuwadej Pornaroontham[3], Pramoch Rangsunvigit[1*]

[1]The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

[2]Department of Chemical Engineering and Biomolecular Engineering, National University of Singapore, Singapore

[3]Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

This study explores the influence of various cation–anion salt combinations on methane hydrate formation at 277.2 K and 8 MPa using 1.0 wt% methionine as a kinetic promoter. Salts—NaCl, KCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$, Na_2SO_4, Na_2CO_3, and NaOH—were evaluated at three concentrations (0.20, 0.40, and 0.60 mol%) to understand how ion-specific properties, particularly charge density and ionic radius, affect hydrate formation kinetics and gas uptake. The findings reveal that salts with higher charge densities, particularly divalent cations such as Ca^{2+} and Mg^{2+}, significantly inhibit hydrate formation. These ions form rigid hydration shells that reduce water activity, suppressing gas uptake by up to 98% and decreasing the initial formation rate by more than 95% compared to the salt-free system. In contrast, monovalent cations such as Na^+ and K^+ exhibit much milder effects, causing only a 25% reduction in methane uptake. Anion effects follow the Hofmeister series, with kosmotropic ions such as CO_3^{2-} and SO_4^{2-} demonstrating dual behaviors. Notably, at 0.60 mol%, CO_3^{2-} reduces induction time by 79%, likely due to enhanced water structuring and pseudo-cage formation. Despite accelerated nucleation, final gas storage remains limited due to growth inhibition. Morphological analysis reveals that interfacial nucleation is followed by propagation patterns that varies with the ionic environment.

References

1. Pongpuak, T., Jeenmuang, K., Pornaroontham, P., Kulprathipanja, S., Rangsunvigit, P., “Effect of Diverse Cation-Anion Salt Combinations on Methane Hydrate Formation,” Transformation towards a Sustainable Tomorrow, PPC & PETROMAT Symposium 2025, Bangkok, Thailand.

CT-S5-5

Unveiling how hydrophobic amino acid L-methionine enhances CO_2 clathrates kinetics from liquid CO_2

Zhenyuan Yin[1*]

[1]Institute for Ocean Engineering, Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China

Achieving global net-zero emissions necessitates advancements in sustainable CO_2 sequestration technologies. CO_2 sequestration in subsea sediments in the form of clathrates presents a promising option due to inherent pressure an temperature conditions, high CO_2 storage capacity and superior stability. However, the sluggish CO_2 kinetics significantly constrains its field-scale application, particularly in the process of liquid CO_2 injection and the subsequent CO_2 hydrate cap formation to prevent CO_2 leakage. Herein, we propose a biomolecular strategy by using low-dose hydrophobic amino acid L-methionine to address this challenge. Combining morphological imaging and high-pressure in situ Raman spectroscopy, L-methionine was found to disrupt the rigid CO_2 hydrate films and induces self-organized liquid CO_2 transport channels, significantly reducing CO_2 mass transfer resistance. Molecular-level analysis further reveals that the hydrophobic group of L-methionine leads to a 70% decrease in the energy barrier of CO_2 diffusion. This biocompatible promoter enables ultra-high CO_2 uptake (120.6 v/v) from liquid CO_2 with a 15-fold enhancement over pure water. CO_2 hydrate formation was further examined using the lab-on-chip technology in the etched millimeter scale pore space revealing that needle-shape CO_2 formed from dissolved CO_2 disrupts CO_2 hydrate film and results in liquid CO_2 forming new transport channels into the aqueous phase. The expanded contact area further promotes CO_2 clathrate formation. Rapid CO_2 hydrate formation for hydrate-sediment cementation was further validated using the acquired South China Sea subsea sediments. This environmentally benign strategy demonstrates an extraordinary CO_2 hydrate formation kinetics from liquid CO_2 compared to the state-of-the-art promoters, offering a promising and practical solution for long-term offshore CO_2 storage to mitigate climate change. The elucidated molecular mechanism provides an inspiration for identifying and designing amino acid-based promoters in the application of sustainable clathrate-based CO_2 capture and storage.

References

1. Liu, X.; Ren, J.; Chen, D.; Yin, Z., Comparison of SDS and L-Methionine in promoting CO2 hydrate kinetics: Implication for hydrate-based CO2 storage. *Chemical Engineering Journal* **2022,** *438*, 135504.

2. Liu, X.; Zhang, J.; Gu, Y.; Huang, H.; Li, Y.; Sun, J.; Lu, H.; Xu, C.; Ren, J.; Yin, Z., Investigation on liquid CO2 forming CO2 hydrates in sands: A kinetic study with implication on hydrate-based CO2 sequestration. *Chemical Engineering Journal* **2025,** *505*, 159179.

3. Gu, Y.; Liu, X.; Li, Y.; Lu, H.; Xu, C.; Ren, J.; Chen, G.; Linga, P.; Zhao, J.; Yin, Z., Feasibility analysis of liquid CO2 injection and sequestration as hydrates in South China Sea marine sediments over 100 years. *Applied Energy* **2025,** *380*, 125068.

CT-S5-6

Dissociation-Dissolution-Metastable State-Reformation phase transition of natural gas hydrate

Mingjun Yang

Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian University of Technology, China

*Corresponding author, e-mail: yangmj@dlut.edu.cn

Abstract: Natural gas hydrate (NGH) rarely decomposes monotonically. We delineate a Dissociation–Dissolution–Metastable–Reformation (DDMR) cycle governing production transients: (1) endothermic dissociation cools the reaction zone; (2) released gas dissolves, creating aqueous supersaturation; (3) a metastable regime persists via sub-equilibrium temperature, dissolved gas, and residual clathrate motifs (“memory”); (4) NGH reformation nucleates behind the front, rebuilding permeability barriers and throttling flow. A coupled heat–mass-transfer perspective rationalizes reformation belts, shortened induction times on cycling, and sensitivity to drawdown, salinity, and thermal buffering. The DDMR framework predicts where reformation is favored and guides operations: moderate pressure ramping, brine management, and distributed heating to suppress undesired reformation or, conversely, to harness controlled reformation for in-situ stabilization and safety.

CT-S5-7

CO_2 hydrate Crystallization in heterogeneous Porous Media

Lanlan Jiang*, Yingying Liu, Yongchen Song

Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian University of Technology, China

*Corresponding author, e-mail: lanlan@dlut.edu.cn

Abstract: Crystal growth characteristics determine the formation of CO_2 hydrate. This study experimentally realized the regulation of CO_2 hydrate growth mode from multi-dimensional to one-dimensional based on multiphase transportation theory inside porous media and succeeded visually observing the ray type growth process of many hydrate crystals at the interface between bulk gas and porous media. There are a few nucleation points in each experimental case, and from which the hydrate bud crystals of approximately 0.74 mm in diameter grow above on the porous media, reaching 26 mm long at most. Analysis of mass transfer within porous media revealed that the continuous growth of hydrate buds is driven by water self-transportation among pores. That's why that either large particle (> 0.8 mm diameter) or low water saturation (< 30%) inhibits the effective growth of hydrate buds. In particular, by dynamic tracking in continuous images, the growth rates under different water saturation and particle size conditions are quantified, and the one-dimensional growth rate of hydrate is determined as 0.04 mm/s. This study unveils the mystery growth mechanism of CO_2 hydrate for the first time and is extremely significant to future researches on the fundamental and application of various gas hydrates.

CT-S5-8

CO_2 Capture/Storage/Transportation Technologies and Clathrate Hydrates

Yongwon Seo[1,2,*]

[1]Graduate School of Carbon Neutrality, Ulsan National Institute of Science and Technology

[2]School of Civil, Urban, Earth, and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology

The growing urgency to mitigate anthropogenic CO_2 emissions has driven significant advances in carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies. Among the various approaches, clathrate hydrates—crystalline inclusion compounds in which gas molecules are trapped within hydrogen-bonded water cages—have emerged as a promising medium for CO_2 capture, storage, and transportation. This study explores the potential of clathrate hydrate-based systems across the full CO_2 management chain. Hydrate-based CO_2 capture offers high selectivity and mild operating conditions, particularly when integrated with pre-combustion capture processes. A novel approach is proposed involving reversible CO_2 capture using pre-formed semiclathrates embedded in porous silica gels (Kim et al. [1]). For CO_2 storage, naturally occurring gas hydrate-bearing sediments in deep-sea environments present a secure and long-term storage option. The CH_4 - CO_2 replacement process offers a dual benefit of CO_2 sequestration and CH_4 recovery. Here, we examine the CH_4 - CO_2 replacement behaviors and mechanisms in natural gas hydrates of various structure types (sI, sII, and sH) (Lee et al. [2]). Conversely, the formation of CO_2 hydrates during pipeline transport poses flow assurance challenges, including plugging and potential pipeline rupture. To address this, we introduce and evaluate environmentally benign hydrate inhibitors, focusing on their inhibition performance and underlying mechanisms (Go et al. [3]). This work highlights the multifaceted roles of clathrate hydrates as a transformative technology for carbon-neutral energy systems.

References

1. Kim, S.[+], Mok, J.[+], Ko, G., and Seo, Y., "Reversible CO_2 Adsorption in Preformed Solid Semiclathrates Within Porous Silica Gels", *Journal of Materials Chemistry A*, **13**, 20456-20465 (2025).
2. Lee, J., Mok, J., Choi, W., and Seo, Y., "Influence of structural transformation on guest exchange behavior in the sII hydrate – (CO_2 + N_2) replacement for energy recovery and CO_2 sequestration", *Chemical Engineering Journal*, **472**, 144680 (2023)
3. Go, W., Mun, S., and Seo, Y.*, "Experimental and computational insights into the inhibition of CO_2 hydrate formation using biodegradable oligopeptides and their significance in CO_2 transport and storage", *Applied Energy*, **368**, 123523 (2024)

CT-S5-9

Carbon Dioxide Ocean Storage in the Form of Solid Clathrate Hydrates in the East Sea of Korea

Jeong-Hoon Sa*

Department of Chemical Engineering (BK21 FOUR), Dong-A University, Busan, Republic of Korea

Carbon dioxide (CO_2) ocean storage, which offers significant advantages such as enormous storage capacity and utilization of the vast deep-sea environment, has been attracting increasing attention in the pursuit of carbon neutrality. While direct CO_2 injection into seawater has been largely dismissed due to the risk of ocean acidification, storing CO_2 in the form of solid clathrate hydrates presents a promising option for large-scale carbon sequestration, provided its long-term stability is ensured. In this study, CO_2 hydrate stability conditions were determined over a wide range of temperatures (270.6–283.6 K) and pressures (10–93 bar). Seawater samples collected at depths of 2000–2200 m in the East Sea of Korea were analyzed for their ionic composition. The CO_2 hydrate phase equilibrium temperature in seawater was found to be lower than that in pure water due to the presence of ions, which reduce water activity through electrostatic interactions. Based on the phase equilibrium data and seasonal seawater temperature variations, the minimum stable depth for CO_2 hydrates is estimated to be 300 m; however, depths of at least 800–1000 m would be preferable for rapid CO_2 hydrate formation. Furthermore, the potential of environmentally benign additives, including steel slag, starfish bone, and mesoporous silica, was evaluated. Among the tested materials, steel slag exhibited the most pronounced effect as a kinetic hydrate promoter, accelerating both nucleation and growth of CO_2 hydrates while having a negligible impact on phase equilibrium conditions. This promotional effect is attributed to its hydrophilic surface, which facilitates heterogeneous nucleation, and the presence of calcium oxide. Considering the geological characteristics and environmental suitability, the East Sea of Korea demonstrates strong potential for large-scale CO_2 sequestration. The use of steel slag, an industrial byproduct, offers an effective and sustainable option for hydrate-based CO_2 ocean storage.

Reference

Seo, J., Jeong, S., Han, H., Jeon S., Sa, J.-H., “Stability conditions of clathrate hydrates formed with liquid or gas CO_2 using deep seawater collected from the East Sea of Korea toward ocean storage,” *J. Environ. Chem. Eng.*, 13(2), 115807 (2025).

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (RS-2023-00280519), the Korea Basic Science Institute (RS-2024-00404896), the Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology (Project Number: 2760000002), and the "Busan Regional Innovation System & Education (RISE)" Project, supported by the Ministry of Education and Busan Metropolitan City.

CT-S5-10

Development of Combined Approaches for Gas Hydrate Production

Young-ju Seo*

Petroleum & Future Energy Research Center, Resource Exploration & Development Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Recent advances in the production of natural gas hydrates (NGHs) have concentrated on developing more efficient recovery methods. Traditional techniques such as depressurization, thermal stimulation, inhibitor injection, and gas replacement each present advantages and limitations. Depressurization stands out for its energy efficiency and successful field applications but struggles with declining productivity, sediment instability, and issues like hydrate reformation. To overcome these challenges, combined approaches are being pursued. Therefore, understanding the mechanisms and extent of GH dissociation in hydrate-bearing sediments is crucial for optimizing these combined techniques.

The Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) has conducted extensive research on various GH production methods, primarily focusing on depressurization and replacement techniques (Seo et al. [1], [2]). In recent years, research has increasingly focused on combined methods utilizing depressurization as a core strategy. In this study, we applied a combined approach of cyclic depressurization and thermal stimulation to improve GH production efficiency and sediment stability under Ulleung Basin conditions (Seo et al. [3]). Real-time X-ray CT analysis revealed that the addition of thermal stimulation to cyclic depressurization significantly increased gas output while maintaining sediment stability. This combined method addresses both productivity decline and geomechanical concerns, offering practical guidance for long-term GH exploitation. These results can provide quantitative insights into hydrate dissociation patterns and inform the practical application of cyclic depressurization-based strategies for efficient and safe NGH recovery.

References

1. Seo, Y. J., Kim, D., Koh, D. Y., Lee, J. Y., Ahn, T., Kim, S. J., Lee, J., Lee, H. “Soaking Process for the Enhanced Methane Recovery of Gas Hydrates via CO2/N2 Gas Injection.”, *Energy & Fuels*, **29**, 8143-8150 (2015).
2. Seo, Y. J., Park, S., Kang, H., Ahn, Y. H., Lim, D., Kim, S. J., Lee, J., Lee, J. Y., Ahn, T., Seo, Y.*, Lee, H.* “Isostructural and cage specific replacement occurring in sII hydrate with external CO_2/N_2 gas and its implications for natural gas production and CO_2 storage.”, *Applied Energy*, **178**, 579−586 (2016).
3. Seo, Y.J.*, Kim, J., Lee, J., Ahn, T. “Inclusion Effect of Thermal Stimulation on the Cyclic Depressurization Process for Gas Hydrate Production Using X-ray Computed Tomography Image Analysis.”, *Energy & Fuels*, **38**, 11733-11745 (2024).

CT-S5-11

Economic Implications of Hydrate-Based Cold Energy Systems

Abhishek Bhadani[1], Omkar Singh Kushwaha[1,2,3], Santosh Kumar Sahu[2,3,4], Rajnish Kumar[1,2,3]*

[1]Department of Chemical Engineering, IIT Madras, Chennai-600036, India.
[2]School of Sustainability, Indian Institute of Technology Madras, Chennai-600036, India.
[3]The Energy Consortium, Indian Institute of Technology Madras, Chennai-600036, India.
[4]Department of Humanities and Social Sciences, IIT Madras, Chennai-600036, India.
*Corresponding author e-mail: santosh@iitm.ac.in

Abstract

The rising global demand for low-emission and sustainable cooling technologies has driven strong interest in advanced thermal energy storage (TES) systems. Among these, hydrate-based cold energy storage (HBCES) has emerged as a promising solution, distinguished by its high energy density, effective heat transfer, and minimal environmental footprint. HBCES relies on semi-clathrate hydrates, commonly formed with compounds like tetrabutyl ammonium bromide (TBAB), which crystallize under near-atmospheric pressure and moderate subcooling conditions (~5–8 ℃). Thanks to its distinctive thermophysical characteristics, HBCES enables efficient storage and release of cold energy, making it a competitive choice for building cooling, district energy networks, and industrial applications.

This study provides a systematic assessment of the storage capacity and economic viability of the HBCES process across diverse operating conditions. The analysis emphasizes the techno-economic trade-offs among system efficiency, storage density, and cost, while also considering its potential role in circular energy utilization and peak load management. A comparative evaluation with conventional chilled water storage and phase change materials underscores the cost-effectiveness and scalability of HBCES for both centralized and decentralized cooling systems. The findings demonstrate the strong promise of HBCES in significantly reducing operational energy expenses, alleviating peak electricity demand, and enabling integration with renewable energy sources—thereby advancing decarbonization objectives. Furthermore, the study highlights the economic potential of HBCES as a next-generation thermal energy storage solution, capable of fostering sustainable, resilient, and climate-aligned energy systems.

Key words
Thermal Energy Storage (TES); Techno-Economic Feasibility; Hydrate-Based Cold Energy Storage (HBCES); Semi-Clathrate Hydrates; Tetrabutyl Ammonium Bromide (TBAB); Energy Density; Peak Load Management; Decarbonization

CT-S5-12

Breaking the Fire Flames: Gas Hydrates for Fire Suppression

Sai Kiran Burla[1], Seong Deok Seo[1], Sang-Gyu Cho[1], Sohee Hong[1], Changsu Jeon[1],

Subhash Kumar Sharma[1], Ju Dong Lee[1,*]

[1]*Offshore Plant Resources R&D Center, Korea Institute of Industrial Technology, Busan 46744, Republic of Korea.*

[*]Corresponding author, e-mail: julee@kitech.re.kr

Abstract: The Class B fire suppression technologies are very challenging due to the sudden blaze and high flames.(Han, Lee, Burla, Chung, & Lee, 2024) This study introduces a novel approach to Class B fire suppression using gas hydrate-based extinguishers, marking a new direction in fire safety technology. The first comparative analysis of hydrates formed from HFC-125a, HFC-23, and CO_2, evaluating their fire suppression performance, dissociation characteristics, and deployment efficiency. A key innovation in this work is the development of a continuous hydrate pelletization technique, enabling stable storage and practical application of hydrates as fire suppressants. Experiments were conducted using both powdered (0.5 mm) and cube-shaped (1–10 mm) hydrate forms, with suppression tests demonstrating that powdered hydrates provide superior fire extinguishing performance due to their larger surface area and faster gas release upon dissociation. Among the tested hydrates, HFC-125a exhibited the highest suppression efficiency, followed by HFC-23 and CO_2. Notably, hydrate powders also outperformed conventional agents such as ammonium dihydrogen phosphate and ice powders, particularly in preventing flame re-ignition—a critical metric for fire safety. Further analysis revealed that suppression efficiency is strongly influenced by the guest gas type, hydrate yield, minimum extinguishing concentration, and the enthalpy of dissociation.(Zabelin, Nagibin, Shlegel, & Strizhak, 2024) These findings establish hydrate-based materials as promising alternatives to traditional fire suppressants, offering enhanced safety, performance, and scalability. This work lays the foundation for the future development of environmentally friendly, high-efficiency hydrate-based fire extinguishing technologies.

Acknowledgements: This work was supported by the Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology (Project Numbers: 2760000002, RS-2023-00255479) and the Korea Institute of Industrial Technology (Project Number: JA250004)

References

Han, J., Lee, J., Burla, S. K., Chung, S., & Lee, J. D. (2024). Exploring the Potential of HFC-125a Hydrate for Innovative Fire Suppression: A Gas Hydrate Technology Approach. *Energy & Fuels, 38*(7), 6238-6250. doi:10.1021/acs.energyfuels.3c05056

Zabelin, I. V., Nagibin, P. S., Shlegel, N. E., & Strizhak, P. A. (2024). Fire suppression using a self-activating extinguisher based on carbon dioxide hydrate. *Gas Science and Engineering, 128*, 205369. doi:https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2024.205369

특별세션(VI):

충청권 지역혁신선도연구센터 및 학연협력플랫폼 공동 이차전지 소재 연구 개발 심포지엄

Chungcheong Regional Innovation Leading Research Center & Industry-Academia Cooperation Platform Joint Symposium on Secondary Battery Materials Research and Development

2025년 9월 25일(목) 15:30~17:30
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸B

CT-S6-1

이중층 복합 고체전해질과 탄소촉매를 통한 리튬-이산화탄소 이차전지의 전기화학적 특성 개선

김재광*, 임학범
청주대학교 에너지융합공학과

E-mail: jaekwang@cju.ac.kr

기존의 리튬이온 이차전지는 리튬금속산화물의 양극과 흑연 음극을 주로 전극 물질로 사용하였다. 하지만 더 높은 에너지 밀도를 가지는 리튬 이온 이차전지에 대한 사회적 요구를 충족시키기 위해 새로운 전극 물질들이 제안되고 있다. 양극을 가스로 음극을 금속으로 사용한 가스 이차전지는 높은 이론상 에너지 밀도로 인해 미래 에너지 저장 장치의 잠재적인 후보로 여겨지고 있다. 일반적으로 Li, Na, Mg, Al 등의 금속 음극과 O_2, N_2, CO_2, SO_2, CO 또는 이들의 혼합물과 같은 가스 양극으로 구성되어진다. 금속-가스 이차전지는 높은 에너지 밀도 외에도 다양한 장점을 가지고 있다. 예를 들어, Li-CO2 이차전지는 기후변화의 원인인 온실가스의 대부분을 차지하는 CO_2를 포집하고 활용하는데 사용할 수 있다. 그러나 금속-가스 이차전지는 높은 전지 전압 극성, 낮은 왕복 효율, 낮은 율속 특성 및 저조한 사이클 특성 등과 같은 단점을 가지고 있어 상용화에는 많은 문제점을 내포하고 있다.
본 연구에서는 이러한 Li-CO_2 이차전지의 단점을 해결하기 위해 이중층 복합 고체 전해질과 탄소극 촉매를 개발하였으며 우수한 수명 특성과 안정성을 확보하였다.

CT-S6-2

Boosting Ni-Rich Cathode Capacity and Cycle Stability via Lithium Distribution and Particle Size Engineering

Hyungsub Kim[1,2*]

[1]Neutron Science Division, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Republic of Korea,

[2]Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University, Republic of Korea

Ni-rich layered oxide cathodes are promising candidates for next-generation high-energy lithium-ion batteries, yet their long-term cycling performance is often hindered by structural degradation and parasitic surface reactions. Conventional strategies, including elemental doping (e.g., Al^{3+}, B^{3+}, Ti^{4+}, Zr^{4+}, Nb^{5+}, Ta^{5+}), protective coatings, and core–shell architectures, can enhance structural stability but frequently entail capacity trade-offs.[1] Recent studies have sought to improve the cycle life of Ni-rich layered cathodes by fundamentally enhancing Li/O insertion, with notable progress achieved through control of excess lithium content, synthesis temperature, oxygen partial pressure, and precursor grain size, often without the need for post-treatments.[2]

Here, we report $LiNi_{0.92}Co_{0.04}Mn_{0.04}O_2$ cathodes featuring both lithium concentration gradients and particle size gradation, realized through precise regulation of oxygen partial pressure during synthesis.[3] This approach offers an alternative pathway to enhancing electrochemical performance without compromising capacity. The resulting cathodes deliver a high initial capacity of 226.7 mAh g^{-1} and retain 87.23% of their capacity after 200 cycles. Structural characterization reveals a lithium-rich surface and stoichiometric core configuration that mitigates surface reconstruction while preserving bulk integrity. These findings demonstrate that oxygen-controlled synthesis is an effective strategy for producing Ni-rich cathodes with both high capacity retention and extended cycle life.

References

1. Weigel, T. et al., “Structural and Electrochemical Aspects of $LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O_2$ Cathode Materials Doped by Various Cations” *ACS Energy Lett.* 4, 508-516 (2019).
2. Song, S. H. et al., “Toward a Nanoscale-Defect-Free Ni-Rich Layered Oxide Cathode Through Regulated Pore Evolution for Long-Lifespan Li Rechargeable Batteries” *Adv. Funct. Mater.* 34, 2306654 (2024).
3. Song, S. H. et al., “Realizing Li Concentration and Particle Size Gradients in Ni-Rich Cathode for Superior Electrochemical Performance in Oxygen-Deficient Atmospheres” *Adv. Funct. Mater.* 2424823 (2025).

CT-S6-3

X-ray based characterization for structural studies of energy materials

In Hye Kwak*

Research Center for Materials Analysis, Korea Basic Science Institute,

Daejeon 305-806, Republic of Korea

X-ray based techniques such as X-ray diffraction (XRD), photoelectron spectroscopy (XPS), and absorption spectroscopy (XAS) are indispensable tools for probing the crystal and electronic structures of functional materials. These laboratory-scale methods, widely available at the Korea Basic Science Institute (KBSI), have provided valuable insights into energy materials and catalytic systems. However, they face inherent limitations in terms of resolution, tunability, and in situ applicability.

To address these challenges, synchrotron radiation offers high brightness and tunable energy, enabling precise structural and electronic characterization from the nano- to atomic-scale. Synchrotron-based methods complement and extend conventional X-ray analysis, providing powerful capabilities for time-resolved and in situ studies. This presentation introduces the fundamental principles of X-ray based analysis and highlights the unique advantages of synchrotron techniques, with illustrative examples in secondary batteries and catalytic materials.

References

1. Kwak, I. H., et al., “Electrocatalytic Activation in $ReSe_2$-VSe_2 Alloy Nanosheets to Boost Water-Splitting Hydrogen Evolution Reaction,” Advanced Materials, **36**(15), e2310769 (2024)

CT-S6-4

지속가능한 리튬이온전지를 위한 Ni/Co-free 망간 기반 고성능 차세대 양극재 개발

이은렬

충북대학교 화학공학과

에너지 변환·저장 산업의 지속적인 성장과 전기차(EV), 에너지저장장치(ESS), 산업용 드론, 휴머노이드 등으로의 응용 분야 확대는 지속가능한 고성능 차세대 이차전지 개발의 필요성을 강조한다. 이러한 수요 속에서, 에너지 밀도·안정성·원가·자원 확보 가능성에 직접적으로 영향을 미치는 양극 소재는 향후 배터리 성능 및 지속가능성 목표 달성을 위해 핵심적인 역할을 한다.

하지만, 현재 상용화된 양극 소재들은 이차전지의 발전 가능성을 제한하는 소재적 한계를 지니고 있다. 층상 구조 LiNixMnyCozO2(NMC) 소재는 높은 에너지 밀도를 제공하지만, 매장지가 제한되고 가격이 비싼 니켈과 코발트에 대한 높은 의존성, 그리고 낮은 구조적·화학적 안정성을 가진다. 반면, LiFePO4(LFP)는 철(Fe) 기반으로 가격 경쟁력과 높은 안정성을 확보하였으나, 낮은 에너지 밀도로 인해 고성능을 요구하는 분야로의 응용에는 제약이 따른다.

본 발표에서는 구조적·화학적으로 안정하며 니켈과 코발트를 전혀 사용하지 않고, 가격이 약 10~20배 저렴한 망간(Mn)을 다량 함유한 무질서 암염(disordered rock-salt, DRX) 구조 기반 차세대 양극 소재 개발 동향을 다룬다. 특히, 망간 과잉 DRX에서 발현되는 델타상(delta-phase)의 형성과 그 구조적·전기화학적 특성을 고찰하고, 이를 활용한 소재 설계 전략이 기존 상용 양극 소재의 한계를 극복할 수 있는 유망한 대안임을 제시한다.

특별세션(VII):

정유산업 탈탄소화를 위한 CCU 기반 연료 및 화학제품 전환 기술

Fuel and Chemical Conversion Technologies for Refinery Decarbonization via CCU

2025년 9월 25일(목) 13:00~17:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀B

CT-S7-1

Development of On-site CCU Technology for the Direct Utilization of Off-gas from Oil Refining Industry

Sun-Mi Hwang*, Byung Wook Hwang, Yooseop Won, Ho-Jung Ryu, Yu Jin Choi, Sun A Choi, and Soon Kwan Jeong

Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

Abstract

Oil refining sector is a significant contributor to global carbon emissions, highlighting the urgent need for effective carbon capture and utilization (CCU) solutions to lower its environmental footprint and promote long-term sustainability. Despite this necessity, no practical on-site CCU systems have yet been deployed within refinery operations. Among various processes, hydrogen manufacturing plants (HMPs) are identified as one of the largest CO_2 emission sources in refining facilities. The exhaust gas from HMPs, containing CO, CO_2, CH_4, and H_2 has significant potential as a feedstock for carbon utilization processes that produce high value-added chemicals that can replace existing refining industries. In this study, we present an on-site fluidized-bed reactor (FBR)-based CCU technology that directly utilizes the off-gas of HMP to produce olefins.

Acknowledgement

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20224C10300010).

CT-S7-2

CO_2 수소화 촉매의 현재 상태 및 전망

김재훈*
성균관대학교

Current Status and Perspectives of Themocatalytic CO_2 Hydrogenation

Jaehoon Kim*
Sungkyunkwan University

Thermochemical CO_2 hydrogenation is considered one of the most promising routes for mitigating anthropogenic CO_2 emissions while producing renewable fuels and chemicals. Due to its similarity to syngas conversion, the fundamental catalyst design for CO_2 hydrogenation has traditionally been based on Fischer–Tropsch catalysts, employing Fe and Co as the primary active sites, metal oxides as structural and electronic promoters, alkali metals as electronic promoters, and noble metals (such as Cu and Pt) to stabilize the oxidation states of the primary active sites. Although significant progress has been made over the past two decades in developing "efficient" catalysts for converting CO_2 into fuels and chemicals, a clear mechanistic understanding of the roles of the main active sites and promoters remains a major challenge. The first part of this talk will highlight the newly identified roles of various metal oxides (e.g., AlO_x [1], MgO [2,3], ZrO_2 [4]) and alkali metals (e.g., Na [5]) not only as structural and electronic promoters, but also as integrity stabilizers for Fe domains, enabling high C_5^+ hydrocarbon yields (>25%). In particular, insights derived from extended time-on-stream reactions (>500 h) of deactivated catalysts will be presented, elucidating the structural evolution of Fe domains and the synergistic roles of metal oxides and alkali promoters. The second part will discuss the in situ reconstruction of a core–shell $Co^0/CoC_x/CoO_x$ structure that enables high C_5^+ selectivity (>20%) [6,7]. Finally, the third part will introduce new catalyst designs for the direct conversion of CO_2 into aromatics [8], higher alcohols [9], and monocarboxylic acids [10].

1. Khan, M. K., Butolia B. P., Jo, H., Irshad, M., Han, D., Nam, K.-W., Nam, Kim, J., *ACS Catal.*, 2020, 10, 10325

2. Ahmed, S., Irshad, M., Yoon, W., Karanwal, N., Sugiarto, J. R., Khan, M. K., Kim, S. K., Kim, J., *Appl. Catal. B: Environ.*, 2023, 338, 123052

3. Ahmed, S., Bibi, S. S., Irshad, M., Asif, M., Khan, M. K., Kim, J., *Topics in Catal.*, 2024, 7, 363

4. Ahmed, S., Rohmat, S. J., Yoon, W., Irshad, M., Jo, H., Bibi, S. S., Kim, S. K., Khan, M. K., Kim, J., *J. Energy Chem.*, 2025, 102, 431-442

5. Yoon, W., Jo, H., Khan, M. K., Irshad, M., Lee, J., Asif, M., Kim, J., *Chem. Eng. J.*, 2024, 495, 153617

6. Jo, H., Khan, M. K., Irshad, M., Arshad, M. W., Kim, S. K., Kim, J., *Appl. Catal. B: Environ.*, 2022, 305, 121041

7. Jo, H., Chun, J., Sugiarto, J. R., Khan, M. K., Irshad, M., Yoon, W., Kim, S. K., Kim, J., *Appl. Catal. B: Environ.*, 2024, 359, 124457

8. M. G. Sibi, M. K. Khan, D. Verma, W. Yoon J. Kim, Appl. Catal. B: Environ.2022, 301, 120813

9. M. Irshad, H.-J. Chun, M. K. Khan, H. Jo, S. K. Kim, J. Kim, Appl. Catal. B: Environ.2024, 340, 123201

10. M. G. Sibi, D. Verma, H. C. Setiyadi, M. K. Khan, N. Karanwal, S. K. Kwak, K. Y. Chung, J.-H. Park, D. Han, K.-Wan Nam, J. Kim, ACS Catal. 2021, 11, 8382

CT-S7-3

이산화탄소 전환을 위한 유동층 반응기 전산 모사

김석기
아주대학교 에너지시스템학과

Computational Simulation of Fluidized Bed Reactor for Carbon Dioxide Conversion

Seok Ki Kim
Department of Energy Systems Research

본 연구는 Barracuda 소프트웨어를 사용한 전산 입자 유체 역학(CPFD) 시뮬레이션을 통해 비등온 유동층 반응기에서의 CO2 피셔-트롭쉬 합성(FTS) 특성을 조사했다. 반응기 시스템은 Fe3O4 촉매(층 높이의 30%, 입자 부피 분율 0.6)와 내장형 열교환기 튜브로 구성되었다. 최소 유동화 속도는 차압 분석을 통해 결정되었으며, 냉상 조건에서 0.029 m/s에서 전환점을 보였다. 그러나 열분포 패턴을 고려할 때, 효과적인 유동화를 위해서는 냉상 최소 유동화 속도의 두 배인 0.058 m/s가 필요했다. 촉매층 내 온도 구배는 0.058 m/s 이상의 유량에서 현저히 감소하여 혼합과 열전달이 향상됨을 나타냈다. 열교환기 온도는 하부 촉매층 영역에 대한 영향이 제한적이었지만, 중부와 상부 영역에서 발열 반응열을 효과적으로 제어했다. CO2 전환율과 생성물 분포 분석 결과, 촉매층의 온도 발산으로 인해 0.029 m/s 미만의 속도에서는 신뢰할 수 없는 전환율을 보였다. 높은 유량에서는 층 온도가 안정화되고 생성물 분포가 수렴하였으며, 열교환기 온도 변화의 영향은 미미했다. 이러한 결과는 CO2-FTS 유동층 반응기에서 효과적인 온도 제어를 유지하면서 필요 유량을 줄이기 위해서는 열교환기 접촉 면적 최적화가 중요함을 시사한다.

CT-S7-4

기후변화 대응을 위한 저탄소 산업으로의 전환과 정유산업의 역할

오진호*
GS 칼텍스

오늘날 전 세계가 직면하고 있는 기후 위기와 에너지 산업의 변화는 우리 모두에게 심각한 도전을 제기하고 있다. 세계 질서는 빠르게 변화하고 있으며, 정부는 계속해서 탄소 중립을 선언하고 있다. 이러한 어려움을 극복하려면 기술 혁신이 선행되어야 한다.

화석연료에 기반한 석유화학 및 정유산업은 산업 특성상 제품 생산과 연료 연소 과정에서 많은 탄소를 배출하며, 이에 따라 탄소 감축의 중요성이 부각되고 있으며, 이를 해결하기 위해 기존 정유사업의 운영 효율화 및 저탄소 연료 전환 등 탄소 저감 활동을 강화하여 Low Carbon Business를 실현하고자 신사업 확장에 투자를 실행하고 있다.

그 중 탄소 중립 달성을 위한 핵심기술인 CCU 기술을 석유화학산업 공정에 적용함으로써, 정유공정에서 발생하는 CO_2 및 배기가스를 활용한 정유 제품 및 석유화학 원료 생산 기술을 추진할 수 있다. 현재 추진 중인 CO_2 전환 기술을 소개하고 기후변화 대응 전략에 대한 구체적인 방향에 대해 논의하고자 한다.

CT-S7-5

정유산업 CCUS 기술개발과 기업의 탄소중립 전략

정민서, 최문석, 김학성
㈜지에스건설

CCUS Technology Development for Refining Decarbonization and EPC Companies' Carbon Neutrality Strategy

Minseo Jeong, Moonsuk Choi, Haksung Kim
GS Engineering & Construction

초록

전 세계적으로 탄소중립(Net-Zero) 및 기후위기 대응이 가속화됨에 따라, 고탄소 산업인 정유·석유화학 부문에서도 이산화탄소 포집·활용·저장(CCUS) 기술의 중요성이 높아지고 있다. 본 발표에서는 GS건설이 참여 중인 국내 CCU 기반 연료 및 화학제품 전환 기술개발 과제의 주요 내용과 중간 성과를 공유하고자 한다. 특히, 정유공정에서 배출되는 CO_2 를 포집하여 합성연료 또는 고부가 화학제품으로 전환하는 공정개발, 규모 격상 방향 등을 중심으로 설명한다. 더불어, EPC기업의 탄소중립 대응 전략, 기술개발 연계 로드맵, CCUS 기술의 엔지니어링 적용 사례와 향후 사업화 가능성 등을 함께 소개한다. 본 발표를 통해 정유산업 탈탄소화를 위한 CCUS 기술의 개발 방향 및 상용화 방안에 대한 산업계의 적용 가능성과 방향성을 제시하고자 한다.

Abstract

As the global push toward carbon neutrality (Net-Zero) and climate crisis mitigation accelerates, the importance of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies is growing in high-emission industries such as refining and petrochemicals. This presentation introduces the key progress and interim outcomes of a national R&D project in which GS E&C is participating, focused on the development of CCU-based fuel and chemical conversion technologies. In particular, the presentation will highlight process development efforts to convert CO_2 emissions from refinery operations into synthetic fuels or high-value chemicals, along with strategies for scale-up. Furthermore, the presentation will outline GS E&C's carbon neutrality strategy as an EPC company, its technology development roadmap, engineering application cases of CCUS technologies, and future commercialization prospects. Through this, the presentation aims to provide insights into the industrial applicability and future direction of CCUS technology for decarbonizing the refining sector.

CT-S7-6

정유공정 포집 CO_2 활용 e-SAF 액체연료 생산 공정 핵심기술 개발

김학주*
한국에너지기술연구원 CCS연구단

Development of e-SAF liquid fuel production process using captured CO_2 from petroleum refining process

(10 point double spacing)

HakJoo Kim*
CCS Research Department, Korea Institute of Energy Research

탄소중립 실현을 위한 항공부문 온실가스 감축이 시급한 가운데, 본 발표에서는 정유공정에서 포집된 CO_2를 활용한 지속가능항공유(e-SAF) 생산 통합공정 개발 연구결과를 소개한다.
핵심기술로는 공전해(co-electrolysis)를 통한 합성가스 직접 생산과 Fischer-Tropsch(FT) 합성을 결합한 원스텝 공정을 적용하였다. Cathode-free 전극 기술 도입으로 에너지 소비를 50% 절감하였으며, 100 kgCO2/일 규모 파일럿 플랜트에서 C5-C20 선택도 80% 이상을 달성하였다. 특히 양기능성 촉매(FT+Zeolite) 적용으로 항공유 수율을 극대화하였다. 정유공정 배출 CO2(연간 약 300만톤)를 활용한 온실가스 감축량은 연간 11.8만톤CO2eq로 예상되며, 2030년까지 일일 500톤 규모 상용화를 목표로 한다. 본 기술은 기존 정유 인프라를 활용한 점진적 전환이 가능하며, 정유업계의 탄소중립 달성에 실질적 대안을 제시한다. 경제성 분석 결과 정유공정 kerosene 배출제수 0.47 tonCO2eq/ton으로 기존 대비 약 70% 감축이 가능하며, SK이노베이션과 협력하여 2040년 이후 본격적인 e-fuel 생산체제 전환을 추진할 계획이다. 이는 국내 항공산업의 지속가능성 확보와 글로벌 SAF 의무화 대응에 핵심적 역할을 할 것으로 기대된다.

CT-S7-7

CCU 기반 합성연료의 지속가능항공유 적용 방안 연구

이미은, 민영제, 김신*
한국석유관리원 미래기술연구소

Study on the Application of CCU-based Synthetic Fuels to Sustainable Aviation Fuels(SAF)

Mi-eun Lee, Youngje Min, Shin Kim*
Research Institute of Future Technology, K-Petro

우리나라는 2050년까지 탄소중립을 목표로 하여 탄소중립 사회로 이행하고, 환경과 경제의 조화로운 발전을 도모하기 위해 2020년 12월에 '2050 탄소중립 추진전략'을 수립하였다. 이를 위해 2030년까지 온실가스 배출량을 2018년 대비 40% 감축하는 것을 목표로 하는 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)를 설정하였고, 그 중 CCUS 부문의 온실가스 감축목표는 기존 10.3 백만톤CO_2eq('21.10)에서 11.2 백만톤CO_2eq('23.3)로 상향되었다. 따라서 CCUS 산업 활성화와 제도 기반 마련을 위해 2024년 2월에 '이산화탄소 포집·수송·저장 및 활용(CCUS)에 관한 법률'이 제정되었고, '석유 및 석유대체연료 사업법'이 개정되어 재생 합성연료가 석유대체연료에 포함되면서 기존 석유제품과 동일한 유통·판매 체계 안에서 보급이 가능해졌다.

포집한 이산화탄소를 촉매 및 공정 기술을 통해 고부가가치 자원으로 전환하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 본 연구에서는 CCU 기반 합성연료를 지속가능항공유(Sustainable Aviation Fuel, SAF)에 적용하기 위한 품질 기준 수립과 평가를 수행하였다. 국제민간항공기구(ICAO)에서는 미국재료시험협회(ASTM)에서 규정한 11가지 생산 프로세스를 SAF로 승인하고 있으며, 기존 항공유에 최대 5 ~ 50 %까지 혼합할 수 있다. 해당 연구에서는 가장 널리 쓰이고 있는 HEFA-SAF와 석유계 항공유(Jet A-1)의 품질을 비교하고 혼합연료를 제조하여 물성 및 저장안정성 등을 평가하였으며, 정유공정 CCU 기반 합성연료의 SAF 적용 방안을 검토하였다.

사사
본 연구는 산업통상자원부와 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 [RS-2022-KP002685].

특별세션(VIII):

암모니아 기반 수소 저장 및 생산 기술 개발 연구 심포지엄

Symposium on the Development of Ammonia-Based Hydrogen Storage and Production Technologies

2025년 9월 25일(목) 15:00~17:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀A

CT-S8-1

고려아연의 그린수소 및 그린암모니아 사업 전략 및 현황

최재형, 최헌식, 류재길, 김정우
고려아연(주)

Korea Zinc's Strategy and Progress in Green Hydrogen and Green Ammonia Businesses

Jae Hyung Choi*, Heon Sik Choi, Jaekil Ryu, Jung Woo Kim
Korea Zinc Company Ltd.

2050년까지 탄소중립 사회 실현을 위한 글로벌 에너지 전환 정책에 부응하여 고려아연은 국내 금속 업계 최초로 RE100에 가입하였으며, 트로이카 드라이브(Troika Drive) 비전을 제시하여 신재생에너지 및 그린수소 사업을 적극 추진하고 있다. 특히 호주에서 재생에너지로 생산된 그린수소를 그린암모니아 형태로 국내에 도입하여 청정 에너지 공급 체계 구축을 목표하고 있다.

고려아연은 이미 2018년 자회사인 SMC 제련소 부지내에 당시 호주 최대 규모인 125MW급 태양광 발전소를 준공하면서 신재생에너지 사업을 본격 시작하였고, 매년 SMC 제련소가 필요로 하는 전력수요의 25%를 태양광 발전을 통해 공급되고 있으며, RE25를 달성하였다. 또한 한국-호주 수소(Han-Ho H2) 컨소시엄을 출범하고, 2030년까지 연간 100만 톤 이상의 그린암모니아를 호주에서 한국으로 수출하는 공급망 구축에 나서고 있다. 이를 위해 호주 퀸즐랜드 재생에너지구역에 최대 발전용량 3,000MW를 갖춘 콜린스빌 그린에너지 허브(Collinsville Green Energy Hub)를 조성할 계획이다. 아울러, 국내 산업단지 최초로 온산제련소 내 수소지게차 시범사업을 운영하며, 중장비 수소 모빌리티 도입도 추진 중에 있다. 향후 암모니아 터미널, 암모니아 크래킹 플랜트, 수소 연료전지 및 수소 전소 터빈 발전소 등을 추진하며 국내 그린 수소 인프라 개발에도 앞장서고 있다.

현재 고려아연은 아연, 연 등 비철금속 분야에서 글로벌 시장 점유율 1위를 유지하고 있으며, 온산제련소는 단일 제련소 기준 세계 최대 규모이자 최다 생산 능력을 갖춘 제련소로 평가받고 있다. 고려아연은 이러한 경쟁력을 바탕으로, 호주 현지 대규모 신재생에너지 인프라와 연계한 그린수소 및 그린암모니아 생산·저장·운송 밸류체인을 구축하고 있으며, 2050년 RE100 완성과 탄소중립 달성을 목표로 전사적인 에너지 전환과 지속 가능한 성장 전략을 실현하고자 한다.

CT-S8-2

비귀금속계 촉매 기반 그린 암모니아 합성 기술 현황

강기혁, 박선영, 김영민, 이수언, 김태완, 채호정
한국화학연구원

오늘날 암모니아는 탄소 배출이 없는 연료이자 수소 운반체로 주목받고 있다. 현재 상업적 암모니아는 Haber-Bosch 공정에 기반해 생산되며, 에너지 효율을 위해 대규모 중앙집중식 설비를 활용하므로 막대한 이산화탄소가 배출되는 문제가 있다. 이에 대한 대안으로, 수전해를 통해 생산된 그린 수소를 활용한 그린 암모니아 생산 기술이 제시되고 있다. 그러나 이 기술은 수전해 시스템과의 연계를 위해 상대적으로 저압의 반응 조건이 요구되며, 기존 상용 촉매는 낮은 활성과 간헐적인 에너지 공급에 따른 열 충격으로 인해 안정성이 저하되는 한계를 가진다. 따라서 저압 조건에서도 높은 활성을 유지하고 내구성이 뛰어난 새로운 촉매의 개발이 요구된다. 고활성의 Ru 촉매는 현재 가장 유력한 대안으로 간주되지만, 귀금속의 한정된 매장량과 자원 제약을 감안할 때 비귀금속계 촉매에 대한 연구가 필수적이다. 이에 본 발표에서는 비귀금속계 촉매의 개발 현황과 향후 방향성, 특히 질화물계 촉매에 대해 중점적으로 논의하고자 한다.

CT-S8-3

한국화학연구원에서 수소추출용 암모니아 분해 기술 개발 및 성과

임영환[1], Le Thien An[1], 권성민[1], 김영민[1], 채호정[*1]
수소C1가스연구센터, 한국화학연구원

암모니아(NH_3)는 높은 수소 함량(17.6 wt.%)과 상온·상압에서의 액화 용이성, 그리고 기존 인프라를 활용할 수 있는 장점을 바탕으로 차세대 수소 수송체로 주목받고 있다. 특히, 액체 암모니아는 부피 대비 수소 저장 밀도가 높아 장거리 수소 운송 및 저장에 유리하며, 연료전지 및 산업용 수소 공급망에서 활용 가능성이 크다. 그러나 암모니아를 수소로 전환하기 위해서는 분해 과정 ($2NH_3 \rightarrow 3H_2 + N_2$)이 필수적이며, 이는 반응 온도, 촉매 성능, 수소 분리 기술 등에 의해 크게 좌우되며 암모니아 기반 수소 운송 체인의 비용에 상당한 부분을 차지하여, 보다 효율적인 시스템을 위해서는 효율적인 암모니아 분해 기술을 개발해야 한다.
현재 한국화학연구원에서는 암모니아 기반의 수소 운반 밸류체인에서 비용절감에 핵심인 저비용 고효율의 암모니아 합성 및 암모니아 분해에 관한 기술을 연구개발을 수행하고 있으며, 이번 발표에서는 한국화학연구원에서 개발 중인 다양한 목적을 기반으로 개발한 암모니아 분해 기술의 연구현황과 성과를 발표할 예정이다.

참고문헌

S. Sun, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* ***2022****,* 169, *112918*.

CT-S8-4

Nitrogen-doped CeO_2 with Defect-rich Sites Enhances Ru-Catalyzed Ammonia Decomposition for High-Efficiency Hydrogen Production

Thien An Le[1], Youngmin Kim[1], Seung Ju Han[1], Younghwan Im[1],
Min Sik Kim[1], You-Jin Lee[1], Ho-Jeong Chae[1*]
[1]Chemical Process Research Division, Korea Research Institute of Chemical Technology, 141 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34114, South Korea
*E-mail: hjchae@krict.re.kr

The growing attention toward using ammonia (NH_3) as an energy carrier to produce CO_x-free H_2 at low temperatures, supplying it on demand at sites, has renewed research interests – *Elvira S. et al.* [1]. Ceria (CeO_2) has gained prominence as a well-known support material to Ru, offering unique advantages such as high oxygen mobility, robust thermal stability, and stabilization of metal nanoparticles that enhance catalytic performance through improved metal dispersion, resistance to sintering, and electronic effects - *Ling Y.Y. et al.* [2]. The modifications engineered the defect engineering in CeO_2, particularly by creating oxygen vacancies (O_v), which have shown remarkable potential in enhancing catalytic properties by facilitating charge transfer and modifying electronic structures - *Likang L.V. et al.* [3]. In this study, the innovative application and modification of a commercial CeO_2 product with nitrogen (N) to enhance the catalytic activity of Ru is presented for the first time. This approach demonstrates significantly improved catalytic performance compared to existing Ru-based catalyst systems, thereby increasing its potential for industrial applications. Advanced analysis techniques combined with the density functional theory (DFT) calculations are employed to elucidate the beneficial properties of catalysts for the NH_3 decomposition. Ru/2N-CeO_2 exhibited superior catalytic activity (97.3% of NH_3 conversion at 450 ºC and WHSV = 6,000 $mL_{NH3}/g_{cat.}/h$) with excellent stability. Moreover, the synergistic integration of N-doped CeO_2 as a support and cesium (Cs) as a promoter in Cs-Ru/2N-CeO_2 catalyst showcases a promising approach to improve catalytic performance significantly. The combination of abundant O_v amount and the effective electronic modulation of Ru sites, which dominate the enhancement of recombinative N_2 desorption, establishes the fundamental to develop Ru-based catalysts for NH_3 decomposition.

References

1. Elvira S., Laura A.P., Alberto R.A., Simone C., Ernesto R., "Ammonia as a Carbon-Free Energy Carrier: NH_3 Cracking to H_2", *Ind. Eng. Chem. Res.*, **62**, 10813-10827 (2023).
2. Ling Y.Y., Xin P.F., Wei W.W., Chun J.J., "Atmosphere-induced Ru-O_v-CeO_2 interface for alleviating hydrogen inhibitory effect toward ammonia decomposition", *Appl. Catal. B*, **378**, 125538 (2025).
3. Likang L.V., Peiqi C., Tong H., Yunpeng J., Zhiwei W., Yuxi L., Hongxing D., Lu W., Jiguang D., "Carbon and Oxygen Double Defects-Enhanced Ru-Based Catalyst for Ammonia Decomposition", *Angew. Chem. Int. Ed.*, **64**(23), e202501898 (2025).

30주년 기념 국제세션
특별세션(IX):

International Online Session :
Advance Clean Technology

2025년 9월 25일(목) 13:00~16:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸A

CT-S9-1

Enhancing Biohydrogen Production in Microalgae through External H^+ Ion Supplementation in a Dual Photobioreactor System

Wonjun Lee[1] and Jae-Hoon Hwang[1*]

Department of Building, Civil, Environmental Engineering, Concordia University, Montreal, Quebec, H3G 1M8, Canada[1]

Abstract

The potential of microalgae for direct biohydrogen production has gained considerable attention as a promising alternative to conventional bioenergy sources, mainly because it generates zero CO_2 emissions. During photolysis, microalgae have the ability to produce hydrogen (H_2) gas in place of oxygen (O_2) under conditions enriched with acetate, driven by the fermentative metabolic processes of algae [1]. Acetate acts as an efficient oxygen regulator in photosystem II (PSII), but the hydrogen production in algae remains relatively low due to a limited availability of H^+ ions in the photobioreactor (PBR) [2]. While acetate-derived hydrogen ions contribute to H_2 production, it remains uncertain whether supplementing the system with external H^+ ions can further boost hydrogen production.

This study explores a novel approach for enhancing algal H_2 production by utilizing a dual PBR system. In this configuration, H^+ ions produced during photolysis are continuously transferred to the algal H_2 PBR via a proton exchange membrane (PEM), thereby improving the overall hydrogen output. In experiments with *Chlamydomonas reinhardtii*, a maximum hydrogen production of 108 μmol L^{-1} was observed in a single PBR over 15 days under a light intensity of 100 μmol m^{-2} s^{-1} [3]. However, when external H^+ ions were supplied in the dual PBR setup, hydrogen production increased to 760 μmol L^{-1} over the same duration, which is a sevenfold improvement compared to the single-chamber configuration. This suggests that the external supply of H^+ ions plays a crucial role in enhancing biohydrogen production. Our results provide valuable insights for advancing high-efficiency algal H_2 production and optimizing H^+ ion supply for improved hydrogen generation.

References

1. Clemens, K.L., Force, D.A., and Britt, R.D., "Acetate binding at the photosystem II oxygen evolving complex: an S2-state multiline signal ESEEM study," *J. Am. Chem. Soc.*, **124**(36):10921-10933 (2002).
2. Hwang, J.-H., Church, J., Lim, J., and Lee, W.H., "Photosynthetic biohydrogen production in a wastewater environment and its potential as renewable energy," *Energy*, **149**, 222-229 (2018).
3. Hwang, J.-H., and Lee, W.H., "Continuous photosynthetic biohydrogen production from acetate-rich wastewater: Influence of light intensity," *Int. J. Hydrogen Energy*, **46**(42), 21812-21821 (2021).

CT-S9-2

Recovering phosphorus from water via engineered (nano)biochar and repurposing it as a slow-release fertilizer

Rahul Kumar Dhaka*[1], and Anuj Rana[2]

[1]Department of Chemistry, College of Basic Sciences and Humanities, Chaudhary Charan Singh Haryana Agricultural University, Hisar, Haryana-125004, India.

[2]Department of Microbiology, College of Basic Sciences and Humanities, Chaudhary Charan Singh Haryana Agricultural University, Hisar, Haryana-125004, India.

Abstract

Excessive use of conventional inorganic fertilizers results a major nutrient loss via leaching, volatilization, denitrification, and runoff, driving environmental degradation and economic inefficiency. Phosphorus (P) fertilizers are particularly problematic because only a small fraction is retained by crops, resulting in low nutrient use efficiency and off-site impacts. Engineered (nano)biochar offers a pathway to recover P from waters, enable slow nutrient release, improve nutrient use efficiency and soil health, and enhance yields with environmental benefits.

In this work, engineered (nano)biochars were produced from diverse feedstocks (agricultural residues, fruit waste, woody biomass), characterized for surface chemistry, morphology, mineralogy, and elemental composition, and transformed to nanobiochar via mechanochemical processing to tailor sorption–release behavior. Phosphorus adsorption on modified biochars was optimized, potential adsorption mechanisms and slow-release kinetics were quantified with P-loaded (nano)biochars functioning as slow-release fertilizers that sustain available P and reduce reliance on conventional agri-inputs. Biocompatibility assays showed compatibility of beneficial soil bacteria (Gram-positive *Bacillus subtilis*; Gram-negative *Providencia*) with developed engineered biochars. Pot/soil assays indicated increased seed germination and elevated soil enzymatic activity under biochar treatments, consistent with biochar-mediated improvements in soil function and microbial activity. In nutshell, valorizing agricultural residues into P-loaded (nano)biochar presents a carbon-negative, circular agri-input that augments P use efficiency, mitigates nutrient losses, and lessens environmental externalities relative to soluble P fertilizers

Key Words: Agricultural residue, Biochar, (Nano)Biochar, Slow releasing fertilizer, Circular bioeconomy, Microbial activity.

CT-S9-3

Enhancing ammonia recovery from anaerobic digestate by modifying activated carbon membrane electrodes

Kyoung-Yeol Kim[1,*], Hyun-Jo Ahn[1,2]

[1]Department of Environmental and Sustainable Engineering, University at Albany, State University of New York, 1400 Washington Avenue, Albany, NY 12222, USA

[2]Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

Electrochemical NH_3 recovery from anaerobic digestate is promising since it does not require a large amount of chemical and energy inputs and usually demonstrates high NH_3 recovery fluxes with high selectivity (> 90%). Using activated carbon-based membrane electrodes (functionalized with nickel catalysts and combined with a hydrophobic polyvinylidene fluoride layer, Ni/AC-PVDF), aqueous NH_4^+ can be converted to the gaseous NH_3 in the cathode chamber due to increased pH driven by cathodic reactions (OH^- production). The gaseous NH_3 diffused across a gas-diffusion membrane can be captured in the recovery chamber using acidic solutions. In our previous study, the NH_3-N recovery flux of 50.3±0.4 $gNH_3\text{-}N/m^2/d$ was produced at 17.1 A/m^2 with a recovery solution at pH 7 using Ni/AC-PVDF electrodes. Also, NH_3-N recovery fluxes and energy consumptions were improved as the recovery solution became acidic (62.2±2.1 $gNH_3\text{-}N/m^2/d$ with 16.0±1.6 $kWh/kgNH_3\text{-}N$ at pH 2). In this study, we have further improved NH_3-N recovery fluxes by modifying Ni/AC-PVDF electrodes. The NH_3-N fluxes were greatly improved (~95%) as a thinner AC membrane electrode (with less AC loadings) was used, likely due to the lower ohmic resistance of the thinner electrode rather than improved NH_3 diffusion across the electrode. Acid treatment and blending of conductive materials (such as carbon black) have improved the NH_3-N recovery fluxes as well. However, the NH_3-N recovery fluxes were enhanced with those modification methods at the higher current density conditions only (i.e., >20 A/m^2) even with the lower ohmic resistance of the electrodes after those modifications. Our results suggest that electrochemical conversion of NH_4^+ into NH_3 is a more crucial factor than the diffusion of gaseous NH_3 across the AC membrane electrode.

CT-S9-4

Physiological Stress Responses in Freshwater Microalgae for the Sustainable Bioremediation of Emerging Contaminants

Hyun-Jo Ahn[1,2], Kyoung-Yeol Kim[2], Byong-Hun Jeon[1*]

[1]Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

[2]Department of Environmental and Sustainable Engineering, University at Albany, State University of New York, 1400 Washington Avenue, Albany, NY 12222, USA

Contamination of natural reservoirs by industrial processes and other human activities restricts access to clean water utilization. The occurrence of emerging contaminants (such as pharmaceuticals, endocrine disrupters, and nanoparticles) in water poses potential environmental threats, necessitating the exploration of sustainable technologies for effectively removing emerging contaminants. Freshwater microalgae, as integral components of aquatic ecosystems, exhibit adaptive responses to abiotic oxidative stressors, positioning them as promising candidates for mitigating environmental pollutants. In this study, we investigated freshwater microalgae (*Scenedesmus obliquus* and *Chlorella vulgaris*) as potential candidates for bioremediation of sulfacetamide (SA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS). *S. obliquus* maintained stable SA biodegradation capacity under aluminum oxide nanoparticle co-exposure, with a slight enhancement in removal efficiency, which was attributed to oxidative stress response mechanisms and the attenuation of SA toxicity in *S. obliquus*. In the other study, *C. vulgaris* exhibited significantly enhanced growth and biochemical properties under oxidative stress induced by microcurrent electrostimulation, which was linked to sustainable PFOS remediation. Alongside toxicity assessment, emphasis was placed on elucidating the biological response mechanisms underlying xenobiotic oxidative stress, providing a deeper understanding of bioremediation from a physiological perspective in microalgae. Overall, this study highlights microalgae as effective candidates for the sustainable remediation of emerging contaminants while providing mechanistic insights that support the integration of pollutant removal with value-added biomass applications.

CT-S9-5

Antibiotic resistome in Indian *Labeo rohita*

Shouvik Saha[1,2,*]

[1]Department of Biotechnology, Brainware University, Barasat, Kolkata 700125, West Bengal, India

[2]Center for Multidisciplinary Research & Innovations, Brainware University, Barasat, Kolkata 700125, West Bengal, India

*Corresponding author: dsus.bt@brainwareuniversity.ac.in

Freshwater fish and fish products are widely consumed globally, and quality and safety are the critical determinants of consumers' preferences [1, 2]. To retain them as a source of high-quality proteins, it is important to assess the microbial niche of these foods. The aquatic environment influences the gut microbiota of fish produced in them. However, extensive use of broad-spectrum antibiotics to treat humans, animals, and fish ends up in wastewater, freshwater streams, and wetlands, raising concerns about the aquatic environment [3, 4]. This study investigated the microbial dynamics of locally produced (West Bengal, India) and imported (Andhra Pradesh, India) rohu (*Labeo rohita*) to assess the prevalence of antibiotic-resistance genes (ARGs) in them. The gut microbiota of *Labeo rohita* was predominantly composed of Proteobacteria (79.9% in local fish and 71.6% in imported fish). Species-level analysis indicated that the gut of rohu was dominated by several *Aeromonas* spp., followed by *Plesiomonas shigelloides* and a commensal microflora, *Cetobacterium somerae*. A widespread presence of several ARGs, including *tetA*, *tetG*, and *tetD* in local and *tetA*, *tetD*, and *cmlA* in imported fishes, indicates region-dependent selective antibiotic pressure in pisciculture. Thus, the prevalence of pathogenic species and the occurrence of ARGs in them raise serious concerns about the consumption of these fish, which might pose significant human health risks.

References

1. Banovic, M., et al. "A cross-cultural perspective on impact of health and nutrition claims, country-of-origin and eco-label on consumer choice of new aquaculture products," *Food Res. Int.*, **123**, 36-47 (2019).
2. Cantillo, J., Martín, J.C., and Román, C., "Determinants of fishery and aquaculture products consumption at home in the EU28," *Food Qual. Preference*, **88**, 104085 (2021).
3. Ghosh, S., Majumder, S., and Roychowdhury, T., "Impact of microbial multi-metal and broad spectrum antibiotic tolerance in urban SW (Adi Ganga, Kolkata) on adjacent groundwater: A future threat," *Groundwater Sustainable Dev.*, **14**, 100608 (2021).
4. Lu, T., et al. "Enhancement of methane production and antibiotic resistance genes reduction by ferrous chloride during anaerobic digestion of swine manure," *Bioresour. Technol.*, **298**, 122519 (2020).

CT-S9-6

Real-time monitoring of analytes using conjugated functional chromophores

Jayant Sindhu*

Department of Chemistry, College of Basic Sciences and Humanities, Chaudhary Charan Singh Haryana Agricultural University, Hisar-125004

Abstract

Conjugated chromophores are increasingly recognized as valuable elements for monitoring analytes in real time, owing to their high sensitivity, selectivity, and adaptable optical behavior. These systems, defined by extended π-electron frameworks, display measurable absorption and emission properties that can be tailored through structural modification. Incorporation of specific functional groups enables interaction with targeted chemical or biological species, producing immediate optical responses suitable for detection. [1]

The conjugated backbone promotes efficient charge transfer and energy migration, enhancing responsiveness to local environmental changes when an analyte is bound. Such properties have encouraged their integration into diverse sensing formats, including optical fibers and microfluidic devices, which expand their applicability beyond laboratory settings. As a result, conjugated chromophores have found wide use in environmental monitoring, diagnostic assays, and biochemical sensing platforms.[2,3] Their ability to provide continuous, real-time feedback is particularly important in dynamic systems, where even minor fluctuations in analyte concentration must be captured with high temporal precision.

References

1. Ranolia, A., Kiran, Sindhu, J., Kumar, P. & Kumar, S. Divulging indolium inspired cyanide sensors: Did it win the throne? *Coord. Chem. Rev*. **498,** 215463 (2024).

2. Ranolia, A., Kiran, Priyanka, Kumar Dhaka, R. & Sindhu, J. Real time monitoring of nerve agent mimics: Novel solid state emitter for enhanced precision and reliability. *J. Hazard. Mater*. **478,** 135508 (2024).

3. Kiran et al. Rationally designed dual channel reversible probe for cyanide recognition in aqueous medium with solid-state sensing abilities. *J. Photochem. Photobiol. A Chem*. **453**, 115650 (2024).

CT-S9-7

Multi-Feedstock to Multi-Product Integrated Lignocellulosic Biorefinery : A Comparative Techno-Economic Assessment

Georgeio Semaan, Gopalakrishnan Kumar

Faculty of Science and Technology, University of Stavanger, 4036 Stavanger, Norway

Abstract

This study evaluates the techno-economic viability of a multi-feedstock biorefinery designed to valorize various Norwegian local lignocellulosic waste streams into multiple value-added products, operating over a 20-year lifetime and 345 days per year. Six process configurations, representing three scenario designs, were analyzed at two production scales (25 and 250 kt/year) each. The biorefinery employed a two-stage pretreatment comprising dilute oxalic acid hydrolysis, followed insome scenarios by oxalic acid-assisted ethanol-organosolv delignification. Depending on the configuration, the process yielded furfural, 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF), ethanol, lactic acid,ethanol-organosolv lignin (EOL), and electric power. Mass and energy balances were simulated, and a discounted cash flow analysis was performed to evaluate operational profitability across key financial metrics. At 25 kt/yr, all scenarios resulted in a loss, with some permanently losing all the equity invested. Increasing the size to 250 kt/yr improved the profitability for two of the three scenarios, resulting in 11.5-12.6% internal rate of return (IRR), US$ 183.7-185MM net present value (NPV), 7-7.6% return on equity (ROE), and 12.9-13.8 years of payback. The organosolv delignification pretreatment diminishes overall economic returns due to its high capital and operating costs. Moreover, the integrated approach led to negative net unit production costs, indicating internal cost cross-subsidization among co-products. Sensitivity analysis shows that revenues and operatingcosts are primary drivers of increasing NPV and IRR. Monte Carlo simulation yields a minimum sales price of 1189 US$/t for lactic acid and profitability in 93.7% of cases. Finally, this study highlights the strategic considerations in biorefinery design and commercialization.

Keywords

Lignocellulosic biomass; biorefinery; biochemicals; pretreatment; process simulation; techno-economic assessment; economic feasibility

특별세션(X):

미세조류를 이용한 지속가능한 항공유

Sustainable Aviation Fuel Using Microalgae

2025년 9월 25일(목) 09:00~10:50
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸A

CT-S10-1

지속가능 항공유 전환을 위한 엔지니어링 기반 미세조류 바이오매스 연속생산 기술개발

홍수열, 박상용, 송지호, 김소원, 김용희, 사영호, 정지훈, 손주동

(주)씨엔에스아이엔티

본 연구는 지속가능 항공유(SAF, Sustainable Aviation Fuel) 생산의 핵심 원료인 미세조류 바이오매스를 고효율·저탄소 방식으로 연속 생산하기 위한 엔지니어링 기반 미세조류 광배양기 시스템을 개발하고, 그 성능을 정량적으로 평가하였다.

대상 미세조류는 담수종 *Chlorella vulgaris*를 선정하였으며, 고농도 바이오매스 생산을 위해 튜블러 직립형 광배양기(vertical tubular photobioreactor)를 적용하였다. 해당 장치는 개방형 레이스웨이(open raceway pond) 대비 외부 오염원의 유입 가능성을 90% 이상 저감하며, 청정 환경 유지에 따른 세포 생존율을 평균 98% 수준으로 유지하였다. 또한 폐가스 재순환 구조를 채택하여 CO_2 배출량을 대폭 감소시켰다.

배양 배지는 개량형 BG-11을 기반으로 하되, 질소원($NaNO_3$)과 인(P), 칼륨(K)의 공급 비율을 세포 생리와 대사 경로에 맞추어 최적화하였다. 이러한 N-P-K 비율 조정은 배양 속도를 증진시키는 동시에, 질소 제한 전환 시 지질 함량을 선택적으로 증가시켜 SAF 생산에 적합한 고지질 바이오매스 확보를 가능하게 하였다.

CO_2 용해 효율 향상을 위해 나노버블링 기술과 탄산무수화효소(Carbonic Anhydrase)를 병행 적용하였다. 나노버블 주입 시 평균 기포 직경은 1㎛ 이하로 유지되어 물-가스 접촉 면적을 극대화하였고, 탄산무수화효소 촉매 반응에 의해 $CO_2 \rightarrow HCO_3^-$ 전환율이 크게 향상되어 배양액 내 용존 CO_2 농도는 1,000 ppm 이상 범위에서 안정적으로 유지되었다.
생육 환경은 온도(20 ~ 30 °C)와 pH(6.0 ~ 9.0)를 자동 모니터링·제어하는 IoT 기반 시스템을 통해 24시간/일, 7일/주 연속 운전하였다. 더블링 타임(doubling time)은 18 ~ 24시간으로 유지되었으며, 건조 중량 기준 바이오매스 생산성은 2.0 g/L/day로 달성되었다.

지질 함량 분석 결과, 배양 종료 시 건조 중량 대비 평균 30-35%의 지질 함유량을 확보하였으며, 이를 통해 추출된 바이오오일은 HEFA(Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) 공정을 거쳐 SAF 원료(feedstock)로 활용 가능함을 확인하였다.

환경적 효과 분석에서, 기본 모듈(유효 배양용량 1.5톤 = 1,500 L)을 연 365일 가동 시 단일 모듈의 연간 생물학적 CO_2 고정량은 약 2 ton CO_2 /year로 산출되었다.

결론적으로, 본 연구에서 개발한 엔지니어링 기반 미세조류 연속생산 미세조류 광배양기 시스템은 △청정 관리 용이성 △CO_2 활용 효율 극대화 △연속 운전 안정성 △고지질 함량 확보 측면에서 기존 개방형 레이스웨이 공정을 대체할 수 있는 경쟁력을 입증하였다.
향후 모듈 확장을 통한 산업 규모 적용으로 SAF 상용화와 탄소중립(Net-Zero) 목표 달성에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

CT-S10-2

Application of Machine Learning for Prediction and Optimization of Lipid Enriched Microalgal Biomass Production

Deok-Won Kim, Aliya Alvi, Ghulam Mustafa, Liao Ziqiao, Nikita Yadav, Swabhiman Mohanty, Rahul Tanpure and Byong-Hun Jeon*

Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763.

***Corresponding author**

E-mail: bhjeon@hanyang.ac.kr

Abstract

Although microalgae are recommended as a potential feedstock for bio-jet fuels, their lipid content varies substantially with cultivation conditions, with reported values ranging from 1.83% to 65.86% [1, 2]. This study applies machine learning to optimize the cultivation of *Chlorella vulgaris* for enhanced biomass and lipid content. A dataset of 28 input features was preprocessed, and a CatBoost regression model was trained with recursive feature elimination and Optuna-based hyperparameter tuning using an 8:2 holdout and R^2 as the criterion. The features included CO_2 aeration, trophic mode, and bioreactor type, light intensity, salinity, temperature, pH, nutrient concentrations, culture time, photoperiod, and initial inoculum level. The model achieved strong predictive performance, with R^2 values of 0.988 (training) and 0.920 (test) for biomass, and 0.965 (training) and 0.927 (test) for lipids. These results indicate good generalization, with prediction errors close to experimental variability. SHAP-based feature importance showed that glucose concentration, culture time, and inoculum level were key factors for biomass, while lipid accumulation was mainly influenced by culture time, bioreactor type, and nitrate concentration. Overall, the findings demonstrate the potential of machine learning to predict biomass yield and improve lipid production strategies in *Chlorella vulgaris* cultivation.

Keywords: Machine learning, Biomass production, lipid content, Biofuel, microalgae

References

[1] Kumari, K., Samantaray, S., Sahoo, D., and Tripathy, B. C., "Nitrogen, Phosphorus and High CO_2 Modulate Photosynthesis, Biomass and Lipid Production in the Green Alga Chlorella vulgaris," *Photosynth. Res.*, 148(1), 17-32 (2021).

[2] Aguirre, A. M., and Bassi, A., "Investigation of Biomass Concentration, Lipid Production, and Cellulose Content in Chlorella vulgaris Cultures Using Response Surface Methodology," *Biotechnol. Bioeng.*, 110(8), 2114-2122 (2013).

Acknowledgment

This work was funded by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) of the Republic of Korea (RS-2023-00255939).

CT-S10-3

수열액화를 활용한 미세조류의 지속 가능한 항공유용 원유 생산 연구

정우진[1], 장순웅[1], 이건호[2]
[1]경기대학교 사회에너지시스템공학과, [2]경기대학교 환경에너지공학전공

Sustainable Aviation Fuel (SAF) Feedstock Production from Microalgae Using Hydrothermal Liquefaction

WooJin Chung[1], SoonWoong Chang[1], GeonHo Lee[2]
[1]Department of Civil and Energy System Engineering, Kyonggi University
[2]Department Enviromental Energy Enginnering, Kyonggi University

미세조류는 3차 바이오매스로 비식량자원이며, 생산효율과 생장률이 높은 바이오매스로 주목받고 있다. 최근에는 바이오연료 생산을 위한 원료 가능성 연구가 보고되고 있으며, 특히 지속 가능한 항공유생산을 위한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 현재 지속 가능한 항공유로 인증된 방법 중 대부분 고순도의 Triglyceride, FAME(Fatty Acid Methyl Esters), Fatty acid 등이 사용되고 있다. 하지만 미세조류는 지질 뿐만 아니라 탄수화물, 단백질도 풍부하여 인증된 방법의 원료 생산에 큰 어려움을 가지고 있으며, 수분 함량이 높아 건조 공정이 없이 생산할 수 있는 전환 기술이 필요하다.

수열액화 공정은 고온과 고압의 조건에서 가수분해, 탈수, 분해, 재중합을 통해 바이오원유를 생산할 수 있는 원료 전환 기술로 온도, 압력, 반응 시간에 따라 전환되는 바이오원유의 성상을 조절할 수 있다.

본 연구에서는 랩 규모 HTL(Hydrothermal Liquefaction) 반응기를 이용하여 온도(200~300 ℃), 압력(50~200 bar), 반응 시간(15~45 min) 조건에서 바이오 원유를 생산하여, 수율, 원소분석, 발열량, GC/MS 분석을 통해 지속 가능한 항공유용 원유 생산 조건을 도출하였다. 도출된 결과는 높은 수율, 높은 발열량, 낮은 질소화합물을 기준으로 기존 석유 원유의 대체 가능성이 높은 조건이다. 이와 같은 결과는 미세조류를 이용한 지속 가능한 항공유용 원유 생산의 기초자료로 사용하고자 한다.

참고문헌

1. Cronin, D. J. et al. “Sustainable Aviation Fuel from Hydrothermal Liquefaction of Wet Wastes.”Energies 15, 4 (2022)

2. Zahid, I. et al. “Current outlook on sustainable feedstocks and processes for sustainable aviation fuel production”Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry 49 (2024)

CT-S10-4

수열 액화 공정을 이용한 미세조류 유래 바이오오일 생산 시스템 개발

박명수[1], 구슬기[1], 남궁현민[1]
[1] *엔텍스(주)*

Development of Bio-oil production system derived from microalgae using a hydrothermal liquefaction process

Myoung Soo Park[1], Seul Ki Koo[1], Hyun Min Namkung[1]
[1]*Entecs Co., Ltd. Republic of Korea*

전 세계적으로 화석연료 과다사용에 따른 자원 고갈과 환경오염에 대한 우려, 그리고 탄소 중립은 그 중요도가 점차 높아지고 있으며 이에 따라 재생 가능하며 지속적이고 환경오염도가 낮은 재생에너지 개발의 중요성이 높아지고 있다. 각국 정부에서는 바이오 연료 보급 활성화를 위해 재생에너지 연료 혼합 의무화 제도(RFS)를 시행하고 있으며 항공유 연료(SAF)에 대한 재생 에너지 연료(바이오 디젤)의 혼합의무 비율을 점차 늘려갈 계획이다. 이러한 세계 에너지 사용 흐름에 맞춰 본 연구에서는 Hybrid 수열 액화(HTL : CSTR + PFR) 공정을 이용하여 제 3세대 바이오매스인 미세조류 유래 바이오오일 생산시스템을 개발하고 있으며 시스템의 최적화를 위한 Pilot 실험을 수행하고 있다. HTL의 연속 실험 테스트 전 Batch test를 선행으로 진행하였으며 공정순서는 원료탱크 → 호모게나이저(교반기) → CSTR 반응기 → 정제/추출 순으로 수행되었고 300℃, 125 bar, 15min 조건에서 운전하였다. 반응 후 전처리 및 정제 과정을 거쳐 바이오원유를 추출하였는데, 정제 후 바이오원유의 수율은 17~41%[(kg/kg daf)*100]로 나타났다. 향후 연속 실험의 경우 Only CSTR(300~350℃), Only PFR(300~350℃), 그리고 Hybrid 공정인 CSTR1(160~200℃)+PFR(300~350℃), CSTR2(300~350℃)+PFR(300~350℃) 등과 같은 구조 및 조건별 운전 분석을 통하여 목표치인 바이오원유 수율 40%의 지속적 달성을 위한 최적의 운전 조건 및 인자를 도출하고자 한다.

사사
본 연구는 산업통상자원부 미세조류를 이용한 탄소저감형 바이오항공유 업그레이드용 바이오오일 생산 통합시스템 개발사업의 연구비 지원(과제번호 RS-2023-00255939)에 의해 수행되었습니다.

[1)]교신저자(E-mail: entecs@hanmail.net)

CT-S10-5

미세조류의 수열액화 바이오오일 생산을 위한 PFR 반응기에 대한 수치해석

최상규[1,2*], 정연우[1], 한소영[1]
[1]한국기계연구원, [2]과학기술연합대학원대학교

Numerical Analysis on the PFR reactor for Bio-oil Production by Hydrothermal Liquefaction of Microalgae

Sangkyu Choi[1,2*], Yeonwoo Jeong[1], Soyoung Han[1]
[1]Korea Institute of Machinery & Materials, [2]University of Science and Technology

최근 기후변화에 대비한 탄소중립 실현을 위하여, 기존의 화석연료를 대체하기 위한 다양한 신재생에너지 생산에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 바이오매스는 성장 과정에서 대기로부터 고정되는 이산화탄소의 양과 활용 과정에서 배출되는 이산화탄소의 양이 균형을 이루는 탄소중립적인 에너지원으로 알려져 있다. 다양한 바이오매스 원료물질 중에서, 미세조류는 단위면적당 오일 생산량이 높아 차세대 바이오 연료로서의 가능성이 매우 크다고 할 수 있다. 미세조류로부터 바이오연료 생산을 위한 방법으로는 당화, 추출, 에스테르교환, 열분해, 수열액화 등의 방법이 있는데 이 중에서 수열액화(Hydrothermal Liquefaction, HTL)는 미세조류와 같이 높은 수분함량을 가지는 바이오매스에 대해서 가장 경제적인 방법으로 알려져 있다. 본 연구에서는 미세조류로부터 바이오오일 생산을 위한 연속 흐름 관형 반응기(Plug Flow Reactor, PFR)에서 수열액화반응에 대한 수치해석을 수행하였다. 미세조류의 구성 성분은 protein, carbohydrate, lipid로 설정하고, 수열액화 반응 생성물은 biocrude, aqueous phase, gas로 구분하였으며 미세조류 슬러리와 생성물의 다양한 성상을 모사하기 위하여 Eulerian multiphase model을 적용하였다. 수열액화 반응에 대해서는 선행 연구에서 제시된 1차 반응속도 상수를 이용하였다. 다양한 수열액화 온도에서 정상상태 해석을 수행하였으며, PFR 반응기 내부의 유동 특성, 반응물 및 생성물의 분포를 비교 분석하였다. 추후 다양한 미세조류의 구성 성분 및 운전 조건에서 추가적인 해석을 수행하고, 바이오오일 수율 극대화를 위한 최적 운전 조건을 도출할 예정이다.

사사
본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다. (RS-2023-00255939, 미세조류를 이용한 탄소저감형 바이오항공유 업그레이드용 바이오오일 생산 통합시스템 개발)

특별세션(XI):

친환경 이차전지 산업을 위한 고순도 탄산리튬 실증기술 및 ESG 대응전략

ESG-Responsive Demonstration Technologies for High-Purity Lithium Carbonate in the Sustainable Battery Industry

2025년 9월 24일(수) 13:00~15:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀A

CT-S11-1

Experimental investigations of maximum lithium extraction from its synthetic solution as high-purity lithium carbonate using precipitation and adsorption processes

Eun-Ji Lee[1], Soon-Ho Cho[1], Kung-Won Choi[1], Ramesh Kumar[1], Chejarla Venkatesh Reddy[1] and Byong-Hun Jeon[1*]

[1]Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

The global lithium-ion battery market, and consequently the demand for solid lithium carbonate (Li_2CO_3), the most widely used lithium compound, is growing rapidly. As a result, technologies for selectively separating lithium from brine sources (e.g., salt lakes, oil-field water, and geothermal water) and extracting it as high-purity Li_2CO_3 have received considerable attention [1]. In the present work, lithium precipitation was performed using a synthetic solution of 4.3 M lithium chloride solution (LiCl) and 1.8 M sodium carbonate solution (Na_2CO_3) by maintaining a LiCl:Na_2CO_3 volume ratio of 1:1, stirring at 600 rpm and 90℃ for 1 h, yielding Li_2CO_3 precipitate contaminated with sodium ions. To remove sodium impurities, the precipitates were washed up to seven times using different solutions (boiling DI water, ethanol, and 0.18 M saturated Li_2CO_3 solution) at a solid-to-liquid ratio of 1:3. The highest purity of Li_2CO_3 (99.15 wt%) was achieved after three washes with saturated Li_2CO_3 solution. Our second objective was to recover the residual lithium ions (~2,703 mg/L) remaining in the raffinate after precipitation by implementing a subsequent adsorption step using a commercial Na^+-type weakly acidic cation-exchange resin (LSM-501). Isothermal adsorption studies indicated that lithium uptake on LSM-501 follows the Langmuir adsorption isotherm, with a calculated maximum adsorption capacity of 15.64 mg/g. These findings highlight the feasibility of achieving near-complete lithium recovery as high-purity Li_2CO_3 through a combined precipitation–adsorption approach.

Acknowledgement

This work was supported by the Energy Efficiency & Resources (No. 202500000001153, Development of technology for demonstrating the manufacture of high-quality lithium carbonate for ESG-compliant cathode materials) of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Knowledge Economy. This work was supported by the Technology Innovation Program (202500000001307, Development of Environment friendly recycling process and manufacturing of high quality material using spent lithium iron phosphate battery) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

References

1. Jiewei et al., “Synthesis and optimization mechanism of functionalized adsorption materials for lithium-ion extraction from salt water: A review”, Separation and Purification Technology, 339, 126237 (2024)

CT-S11-2

Li_3PO_4에서 Li_2CO_3로의 전환 공정에 대한 실험 연구

이석희[1]
[1]㈜엔에이치리사이텍컴퍼니 기술연구소

Experimental Investigation of Li_3PO_4 to Li_2CO_3 Conversion Process

Seok-Hee Lee[1]
[1]NHRECYTECH Institute of Technology

초록

전자기기, 전기차 시장의 급격한 성장과 기술 발전으로 인한 배터리 수요가 증가하면서 리튬 수요 또한 증가하고 있다[1]. 이에 대응하여 염호 개발이 진행되고 있으나, 저품위 염호는 낮은 리튬 농도와 높은 불순물 함량으로 인해 전통적인 증발 농축법으로는 경제성과 효율성 확보에 한계가 있으며, 이를 극복하기 위한 다양한 공정이 검토되고 있다[2].

그 중 침전·전환 공정을 실험적으로 연구한 문헌에 따르면 60℃ 염화리튬 수용액에 탄산나트륨을 첨가하여 탄산리튬을 약 91.9% 회수하였다[3]. 또한, 탄산리튬, 잔류 염 용해도와 온도에 대한 상관관계가 보고되었다[4].

본 연구는 저품위 염호 활용을 위한 기초연구로, 모사재료 리튬인산염을 탄산리튬으로 전환하는 공정을 수행하였다. 먼저, 리튬인산염을 염산으로 용해한 후, 탄산나트륨을 첨가하여 탄산리튬으로 회수하였다. 실험은 반응 온도를 변수로 40℃, 50℃, 60℃, 70℃로 설정하였다. 회수된 탄산리튬의 침전량, 반응 속도, 생성 효율, 순도 및 잔류 리튬 농도를 ICP-OES로 분석하였다. 또한, X-선 회절분석기와 주사전자현미경을 활용하여 결정상, 표면 형상 및 미세구조를 관찰하였다.

Acknowledgment

본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(RS-2024-00431554)

참고문헌

1. Basudev Swain., “Recovery and recycling of lithium: A review”, Separation and Purification Technology, 172, 388-403, (2017).
2. Ping Xu, Jun Hong, Xiaoming Qian, Zhiwei Xu, Hong Xia, Xuchen Tao, Zhenzhen Xu, and Qing-Qing Ni., “Materials for lithium recovery from salt lake brine”, Journal of Materials Science, 56, 16-63, (2021)
3. Junho Shin, Jae-Min Jeong, Jin Bae Lee, Nam Su Heo, Hanjung Kwon, Young Ho Kim, and Taegong Ryu., “ Recovery of lithium from LiAlO2 in waste box sagger through sulfation to produce Li2SO4 and sequential wet conversion to Li3PO4, LiCl and Li2CO3 ”, Hydrometallurgy, 215, 105988, (2023).
4. Yingwei Lv, Baozhong Ma, Yubo Liu, Chengyan Wang, and Yongqiang Chen., “A sustainable method for lithium recovery from waste liquids: Thermodynamic analysis and application”, Journal of Environmental Chemical Engineering, 12, 111814, (2024).

CT-S11-3

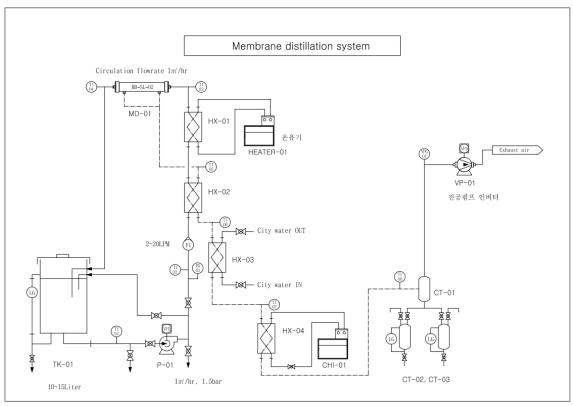
막증류공정을 활용한 리튬 수용액 농축 기술개발

김백암, 석진국
앵스트롬스(주)

Development of lithium aqueous solution concentration technology using membrane distillation process

Baekahm Kim, Jingook Seok
Angstroms Co., Ltd

리튬은 특히 리튬 이온 전지에서 핵심 자원으로서 에너지 저장 시스템에 대한 관심이 증가하고 있다. 그러나 기존의 분리 및 정제 공정에는 한계가 있어 리튬 함유 수용액의 효과적인 농축은 여전히 중요한 과제로 남아 있다. 본 연구에서는 막증류(membrane distillation, MD) 공정을 기반으로 한 리튬 수용액 농축 기술을 개발하였다. MD 공정은 소수성 미세다공성 막을 활용하여 수증기만 투과시키고 용존된 리튬 염은 차단함으로써, 비교적 온화한 조건에서 선택적인 분리가 가능하다. 실험을 통해 공급수의 온도, 유속, 막 특성과 같은 운전 인자가 리튬 농축 성능에 미치는 영향을 평가하였다. 그 결과, MD 공정 기반 접근법은 기존의 열 기반 또는 압력 기반 공정 대비 에너지 소비를 최소화하면서 리튬 농축 효율을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 저품위 염호로부터 기반한 리튬 용액을 탄산리튬 생산을 위한 지속 가능하고 확장 가능한 리튬 회수 및 농축 기술로서 막증류 공정의 가능성을 제시한다.



참고문헌

1. Jian Zuo, Chin Ann Chow, Ludovic F.Dumee and Antony K. Prince "A Zero-Brine Discharge Seawater Desalination Using a Pilot-Scale Membrane Distillation System Integrated with Crystallizer" Membranes **2022**, 12,799

* 이 성과는 산업통상자원부(한국에너지기술평가원)에서 시행한 산업기술혁신사업(RS-2024-00431554)의 지원을 받아 수행되었음

CT-S11-4

탄산리튬 제조공정 대상 ESG 부합성 검토를 위한 평가지표 도출 및 탄소발자국 산정 연구

박지형[1], 이한솔[1], 권도은[1], 김혜현[1]
[1](주)엔디렉션

A Study on Deriving Evaluation Indicators and Calculating Carbon Footprints for ESG Compliance Review of Lithium Carbonate Manufacturing Processes

JiHyoung Park[1], HanSol Lee[1], DoEun Kwon[1], HyeHyeon Kim[1]
[1]Endirection Co., Ltd.

탄산리튬은 전기차 및 에너지 저장장치 등 친환경 산업의 핵심 소재로 주목받고 있으며, 이에 따른 수요 증가가 지속되고 있다. 탄산리튬의 채굴 및 생산과정에서 발생하는 환경적 영향과 사회적 책임 이슈는 ESG 관점에서 보다 정밀한 검토가 요구된다. 특히, 제조 단계에서의 자원 소비, 온실가스 배출, 폐기물 처리 등은 환경성과에 직접적인 영향을 미치므로, ESG 부합성을 평가하기 위한 체계적인 지표 개발이 필요하다.
우선적으로 EU 배터리 규정 및 K-ESG 가이드라인을 검토하여 탄산리튬 제조공정의 주요 항목별(원료 수급, 에너지 사용, 폐기물 발생 등) ESG 요소를 도출하고 이를 핵심 지표로 선정하였다. 탄소발자국 산정은 원료 채굴부터 제품 생산에 이르는 전 과정을 대상으로 하였다. 탄산리튬 제조공정 탄소발자국 산정 및 기준선(Baseline) 설정을 위하여 Ecoinvent, GREET, 문헌 등 2차데이터로 조사 및 분석을 수행하였다.
ESG 항목별 부합성 검토 결과와 탄소발자국 산정결과를 종합하여, 탄산리튬 제조공정의 환경적 지속가능성을 정량적으로 평가할 수 있는 기반을 마련하고자 하며, 향후 관련 산업의 ESG 전략 수립 및 정책 결정에 실질적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

특별세션(XII):

조선해양 청정기술의 융합과 미래전략: 기후변화 대응 중심으로!!

Convergence of Clean Technologies and Future Strategies in Shipbuilding and Offshore Engineering: Focusing on Climate Change Response

2025년 9월 24일(수) 13:00~17:40
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀B

CT-S12-1

해운부문의 녹색연료 도입 필요성과 과제: 암모니아를 중심으로

문건필*, 임동국, 김상훈, 강수민
한국선급 친환경연구소 대체연료기술연구팀

The necessity and challenges of green fuel adoption in shipping sector: Focusing on ammonia fuel

Gunfeel Moon*, Dongguk IM, Sanghoon Kim and Soomin Kang
Decarbonization·Ship R&D center, Korean Register

국제해사기구(IMO)는 제80차 해양환경보호위원회(MEPC) 회의를 통해 2050년경까지 탄소중립(Net Zero) 달성을 위한 온실가스(GHG) 감축 전략을 수립하였으며, 이어 열린 제83차 MEPC 회의에서는 그 전략을 이행하기 위한 중기조치를 승인하였다. 기존의 에너지효율설계지수(EEDI), 현존선에너지효율지수(EEXI), 탄소집약도지수(CII)와 같은 운항효율 중심의 규제와 달리, 이번 중기조치는 선박 연료의 전환을 통한 'Well-to-Wake' 전주기적 관점에서의 GHG 배출량 감축을 주요 골자로 한다. 이와 같은 국제적 움직임과 더불어, 유럽연합(EU)은 'FuelEU Maritime' 규제를 통해 EU 항만을 기항하는 선박에 대해 친환경 연료 사용을 실질적으로 강제하고 있으며, 탄소 배출량에 비례하여 벌금이나 부담금을 부과하는 등 경제적 압박을 강화하고 있다. 이에 따라 화석연료 사용을 지속하는 선사는 막대한 비용 부담을 피할 수 없게 되었으며, 해운업계는 이러한 리스크를 줄이기 위한 대응으로 블루 연료 및 그린수소 기반의 친환경 연료 도입이 불가피한 상황이다. 그러나 이러한 대체연료들은 공급량, 가격, 안전성, 국제 규제 등의 측면에서 다양한 불확실성을 내포하고 있으며, 특정 연료 하나가 주도하는 구조보다는 다종의 연료가 병행되는 'Fuel Mix' 시대가 도래할 것으로 전망된다. 이에 따라 각 연료의 특성과 제약 요인에 대한 정확한 이해가 요구된다. 우선, 바이오연료는 폐식용유, 동물성 지방 등 바이오매스를 원료로 하여 생산되나, 원료 확보의 한계로 인해 생산량이 제한적이며, 타 산업과의 경쟁이 불가피하다. 메탄올 연료의 경우, 온실가스 저감 효과를 인정받기 위해서는 바이오매스 기반의 바이오메탄올 또는 그린수소 기반의 그린 메탄올이어야 하나, 현재 생산량이 극히 적으며, 제조비용 또한 높아 연료 확보 자체가 쉽지 않은 실정이다. LNG 연료는 현재 가장 보편적으로 적용되고 있으나, 향후에는 바이오 LNG 및 e-LNG 등으로의 전환이 전망된다. 다만, 근본적인 문제인 '메탄슬립(Methane Slip)'에 대한 기술적 해결이 선결 과제로 남아 있다. 한편, 앞서 언급한 연료들이 연료 자체에 탄소 성분을 포함하고 있는 것과 달리, 암모니아(NH_3)는 탄소를 포함하지 않는 무탄소연료로 분류된다. 그러나 IMO의 전주기 평가 기준에 따르면, 천연가스를 개질하여 제조된 그레이 암모니아는 오히려 높은 탄소 집약도로 인해 사용이 제한되며, 이에 따라 CO_2 포집·저장 기술(CCS)이 적용된 블루 암모니아가 단기적으로 도입될 것으로 예상된다. 장기적으로는 그린수소와 바이오 유래 또는 대기중 직접 포집한 이산화탄소로 제조한 그린 암모니아의 사용이 필수적이다. 다행히 블루 및 그린 암모니아는 타 대체연료에 비해 상대적으로 저렴한 생산단가가 기대되고 있다. 또한, 수소는 극저온 상태에서 운송이 어려워 기술적 제약이 크기 때문에, 대륙 간 수소 운송 수단으로서 암모니아가 가장 유망한 매체로 평가받고 있다. 이러한 특성에 따라, 여러 국제 기관들은 암모니아를 해운 분야의 주요 대체연료로 주목하고 있으며, 실제로 암모니아 추진선박(Ammonia-fuelled ships)및 암모니아 연료 대응 준비선(Ammonia-ready ships)의 발주가 지속적으로 증가하고 있다. 하지만 암모니아는 독성과 부식성이라는 고유의 위험성을 지니고 있어, 선박에 적용하기 위한 안전성 확보가 필수적이다. IMO 및 각국 해사안전기구에서는 암모니아 추진선의 안전 기준 마련을 위한 논의를 본격화하고 있으며, 첫 상업 운항이 예상되는 2026년까지 엔진 성능, 연료 저장 및 공급 시스템, 비상 대응 매뉴얼 등 다방면의 기술개선이 요구되고 있다. 이러한 도전과제에도 불구하고, 암모니아는 해운업계의 온실가스 감축 목표 달성을 위한 핵심 솔루션 중 하나로 부상하고 있으며, 향후 해양 탈탄소화를 견인할 중요한 축이 될 것이다.

Acknowledgement

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00281590).

CT-S12-2

선박용 암모니아 혼소 중속엔진 개발

노희환, 서민우, 손성우, 설동일, 김병윤
STX엔진, 기술본부

Development of marine ammonia dual-fuel medium-speed engine

국제해사기구(IMO)의 온실가스 배출규제가 강화됨에 따라 선박 추진 시스템의 탈탄소화를 위한 다양한 대체연료 연구가 진행되고 있다. 암모니아는 이산화탄소를 직접 배출하지 않는 무탄소 연료로 높은 저장 안전성과 글로벌 생산 인프라를 바탕으로 해양 연료로의 적용 가능성이 주목 받고 있다. 암모니아는 연소특성(발화점, 최소점화 에너지, 화염속도)이 좋지 않아 순수 100% 암모니아를 연료로 사용하기는 어려워 기존 화석연료나 수소와의 혼소 방식이 있으며 이를 통해 이산화탄소 배출량을 획기적으로 줄일 수 있다.

본 연구에서는 암모니아 연료의 연소특성에 기인한 문제점을 개선하고 이를 기반으로 한 저압 예혼합 방식의 디젤-암모니아 이중연료 엔진과 암모니아 연소에 기인한 질소산화물 및 미연소 암모니아 가스 배출을 저감할 수 있는 배기가스 후처리 장치를 통합 개발하여 육상 실증을 완료하고 선박 실증을 수행 중에 있으며 더불어, 이산화탄소 완전 저감을 위한 수소-암모니아 이중연료 단기통 엔진을 개발하고 있다.

CT-S12-3

고압 분사식 단기통 엔진을 이용한 암모니아-디젤 혼소 엔진 연소 특성 연구

장진영[1*], 유동규[1,2], 이강산[1,3], 표영덕[1], 우영민[1], 고아현[1], 황선미[1], 임옥택[2], 박성욱[3]
[1]한국에너지기술연구원, [2]울산대학교, [3]한양대학교

A Study on the Combustion Characteristics of an Ammonia-Diesel Dual-Fuel Engine Using a High-Pressure Injection Single-Cylinder Engine

Jinyoug Jang[1*], Donggu Yu[1,2], Kangsan Lee[1,3] Youngdug Pyo[1], Youngmin Woo[1], Ahyun Ko[1], Sunmi Hwang[1], Octeck Lim[2], Sungwook Park[3]
[1]Korea Institute of Energy Research, [2]Ulsan University, [3]Hanyang University

화석연료의 고갈과 화석연료 사용으로 인해 발생하는 온실가스(주로 이산화탄소)에 대한 관심이 높아지고 있으며, 더 이상의 지구온난화를 막기위해 이산화탄소 발생을 억제하려는 국제적인 노력이 이루어지고 있아. 이에 조선해양분야에서도 IMP(국제해사기구)에서는 2050년 탄소중립을 모든 해운사들에게 강제하고 있다 [1]. 이로 인해 조선 분야에서는 수소와 암모니아와 같은 무탄소 연료 사용에 대하여 관심이 높아지고 있다. 암모니아는 독성물질이면서 연소가 잘 되지 않는다는 문제점에도 불구하고 보관 및 운송이 용이하여 선박용 연료로서의 장점을 가지고 있다 [2].

본 연구에서는 다른 연료와 비교하여 암모니아가 가지는 단점을 보완하고 장점인 이산화탄소 발생 저감을 적극활용하기 위하여 디젤 연료와의 혼소를 적용하였으며, 이를 위해 암모니아와 디젤을 동시에 사용할 수 있도록 엔진 및 연료시스템을 개조하였다. 연구에 사용된 엔진은 1.86L의 부피를 가지는 단기통 엔진이며, 실린더 내부에 연료를 직접 분사할 수 있도록 인젝터를 설치하였으며, 두 연료 모두 분사시기를 변경하며 연소 특성에 대한 실험을 수행했다. 다만, 암모니아의 경우에는 기계식 연료분사시스템을 사용하였기 때문에 분사시기 변경을 위해서는 밸트 타이밍을 바꿔줘야 했으며, 분사압력은 사전에 셋팅한 개변압 조정을 통해 정해졌으며 160 bar 정도이다. 디젤 연료는 커먼레일 시스템을 이용하였으며, 전자제어 방식을 통해 분사시기, 분사압력을 제어했다. 암모니아 분사사기는 -44 ~ 18.6 CAD ATDC 사이에서 변화시켰으며, 디젤 분사시기는 -25 ~ 5 CAD ATDC 사이에서 변화시켰다. 그 결과 암모니아가 디젤 보다 늦게 분사되는 것이 더 좋은 성능을 보였으며, 질소산화물(NOx)과 N2O 그리고 암모니아 슬립 사이에는 반대의 경향이 보였다. 질소산화물이 많이 배출되는 조건에서는 N2O와 암모니아 슬립이 많았다. 디젤 분사시기가 느려질 수 록 NOx 배출량은 감소하고, N_2O와 암모니아 슬립은 증가했다.

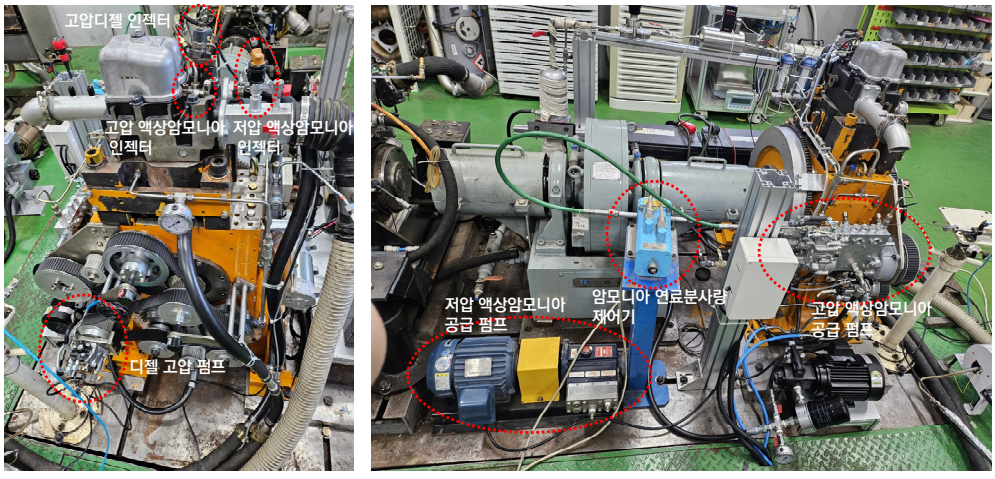


그림 1 실험 엔진 및 연료 시스템 셋업

Acknowledgments
이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20024387)

참고문헌

1. IMO (International Maritime Organization), (www.imo.ogr).
2. Forecasting the Alternative Marine Fuel: Ammonia, KR (2019)

CT-S12-4

Development of Emission Reduction Technologies for Alternative Fuel Ships under IMO Regulations and AI-Integrated Catalytic Process Systems

Hee Soo Kim and Dong-Ha Lim*
Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan, Korea

The International Maritime Organization (IMO) has strengthened environmental regulations, requiring the maritime sector to accelerate decarbonization and adopt advanced emission-control technologies. To address these challenges, this study develops an integrated solution that combines multifunctional catalytic systems with artificial intelligence (AI)-driven process optimization for ships powered by low- and zero-carbon alternative fuels, including methane (CH_4), ammonia (NH_3), and methanol (CH_3OH). A catalyst system was designed and synthesized to simultaneously mitigate methane slip, ammonia slip, nitrous oxide (N_2O), and nitrogen oxides (NOx), by implementing a multi-stage reaction mechanism through the combination of metal oxide-based selective catalytic reduction (SCR) and oxidation catalysts. In particular, for ammonia-fueled engines, novel catalyst formulations demonstrated effective removal of ammonia slip, N_2O, and NOx even under low-temperature exhaust conditions. Moreover, an AI-assisted optimization framework was established to dynamically predict emission characteristics under varying operating conditions (e.g., load, speed, and fuel blending) and to automatically adjust catalytic efficiency in real time. The machine learning model, coupled with sensor data, analyzes thermodynamic pathways and suggests optimal operation strategies to maximize overall emission reduction. The results provide a technological foundation to meet IMO Tier III and EEDI Phase 3 standards and offer a strategic pathway toward carbon-neutral shipping.

References

1. The Future of Marine Emission Control Catalysts and Their Role in Global Maritime Sustainability, ” Future Market Insights (2025).

Acknowledgment

This research was supported by the Korea Institute of Industrial Technology as "Development of super clean modular platform technology based on AI for eco-friendly ship to respond to IMO 2020/2050 regulations″ (KITECH EH-25-0005).

CT-S12-5

지속 가능한 해양 기술 동향 및 전망

김희경[1], 강종대[1], 이승필[1*]
HD한국조선해양 미래기술연구원[1]

Sustainable Marine Technologies: Trends and Prospects

Heekyung Kim[1], Jongdae Kang[1], Seungpil Lee[1*]
Advanced Research Center, HD Korea Shipbuilding Offshore Engineering[1]

최근 급격한 기후변화로 인해 온실가스 저감 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 조선/해양 분야에서는 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)의 2023년 제80차 해양환경보호위원회(MEPC)를 통해 2050년까지 해운 분야의 Net-zero 달성 목표를 선언한 바 있다. 이와 같은 탄소중립 가속화 움직임에 따라 조선/해양 분야에서 고효율 친환경 선박 기술 개발에 박차를 가하고 있다. 저탄소/무탄소 연료를 사용한 친환경 엔진 개발은 친환경 선박에 필수적이다. 대표적인 저탄소 연료인 메탄올은 이미 다수의 선박에 탑재되어 무탄소 연료로의 브릿지 역할을 하고 있다. 무탄소 연료인 암모니아 및 수소는 선박용 내연기관 기술 뿐 아니라 연료전지 기술도 개발 중이다. 선박 자체의 에너지 효율을 높이는 기술인 풍력 보조 추진 기술, 공기 윤활 기술, 하이브리드 전력 시스템 등은 연료 소모율과 배기배출물을 저감할 수 있는 기술이다. 육상전력공급 기술은 항만 대기오염 감소에 효과적일 것으로 기대된다. 디지털 트윈 기술은 선박 운항 상태, 엔진 구동 상태를 가상환경에서 실시간으로 모니터링하고 예측하여 목적지까지의 최적 운항 조건을 설정하는 기술이다. AI 기반 빅데이터 분석을 통해 항로/기상 상태/엔진 구동 등을 학습해 선박 운항을 최적화 할 수 있다. 자율운항 기술과 결합 시 운항 안전성 향상을 통해 선원의 안전 확보 및 효율화를 기대할 수 있다.

* 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00281590).

CT-S12-6

Net Zero 선박 달성을 위한 차세대 연료용 촉매 기술 개발 동향

김대건, 김용술, 박한별, 박건면, 이강현, 한재욱, 송진우*
희성촉매(주)

Development Trends of Catalyst Technologies for Next-Generation Fuels toward Net Zero Ships

Daekun Kim, Yong-Sul Kim, Han-Byul Park, Geon-Myeon Bak, Kanghyun Lee, Jaeuk Han, Jinwoo Song*
Heesung Catalysts Corp.

인류 활동에 따른 온실가스 배출 증가는 지구 온난화, 해수면 상승, 극지방 빙하 손실, 이상기온 등 심각한 기후 변화를 초래하고 있다. 이를 해결하기 위해 2016년 파리협정과 국제해사기구(IMO)의 강화된 Net Zero 목표가 시행되고 있으며, IMO는 2023년 온실가스(GHG) 감축 전략을 통해 2050년까지 해운 분야 Net Zero 달성을 목표로 하고, 2008년 대비 2030년 20% 이상, 2040년 70% 이상 GHG 감축이라는 중간 목표를 설정하였다. 그리고 2030년까지 해운 에너지 소비 최소 5%를 탄소 무배출 연료를 사용하도록 권고하고 있다. EU를 비롯한 주요국에서는 탄소세(Carbon Tax)와 탄소배출권거래제(ETS)를 통해 CO_2, CH_4, N_2O 등 온실가스 배출에 직접적인 비용을 부과하고 있어, 선사와 조선·엔진 제조사에게 연료 전환과 고효율 후처리 시스템 도입은 필수적인 경쟁 요건이 되고 있다.

이러한 정책 기조에 따라 해운, 발전, 반도체 부문 등을 포함한 다양한 산업분야에서는 저탄소(MeOH, LNG, LPG) 또는 무탄소(NH_3, H_2) 연료 활용과 직접적인 온실가스 배출 저감을 통해서 글로벌 탈탄소화를 위한 해결책을 적극적으로 모색하고 있다. 전환기 연료 LNG와 재생 가능한 바이오매스 기반으로 제조되는 바이오선박유는 기존 디젤 엔진에 혼합 사용이 가능하고 탄소중립 효과로 탄소발자국 감축에 기여할 것으로 기대된다. 최근 주목받고 있는 무탄소 연료인 암모니아(NH_3)는 CO_2 무배출 연소가 가능하며, -33°C 대기압 조건에서의 액화·저장 용이성과 이미 구축된 대규모 글로벌 유통망 덕분에 가장 유망한 무탄소 선박 연료로 평가된다. 특히 MAN Energy Solutions, Wärtsilä, WinGD 등 주요 엔진 제조사들이 2026년 전후로 상용 암모니아 연료 및 이중연료 엔진 출시를 예고함에 따라 향후 10년 내 해운 분야의 핵심 에너지원으로 자리매김할 전망이다. 또한 암모니아 크래킹을 통해 생산된 수소를 이용한 연료전지로 발전용 엔진을 대체하는 연구와 실증 또한 활발하게 진행되고 있다.

저탄소·무탄소 연료 기반의 차세대 친환경 엔진은 기후변화 대응의 핵심 기술이지만, 전주기(Life Cycle Assessment, LCA) 관점에서 생산·저장·운송·연소 전 과정에서 발생되는 오염물질과 온실가스들이 제거되어야 그 목적을 달성할 수 있다. 촉매 기술은 차세대 연료를 사용함에 있어 필수적인 역할을 수행한다.

희성촉매(주)는 지난 수십 년간 축적한 노하우와 자동차·화학공정·선박·고정원용 기후촉매와 환경촉매 기술을 기반으로, 다양한 차세대 연료용 선박 엔진 배출가스 특성에 최적화된 촉매 기술과 수소 생산 촉매 기술을 개발하고, 상용화에 앞장서고 있다. 이번 연구에서는 Net Zero 선박 달성에 필수적으로 필요로 하는 메탄산화촉매(MOC), 아산화질소(N_2O) 분해 촉매, SCR 촉매, NH_3 산화 촉매(AOC), 그리고 암모니아에서 수소를 생산하는 암모니아 크래킹 촉매 기술 등의 개발 동향과 극복해야할 도전 과제 등을 소개하고자 한다.

CT-S12-7

개인 사정으로 인해 발표가 취소되었습니다.

CT-S12-8

수소선박 및 기자재 개발의 국내외 동향

김정현[1], 김태욱[1], 이동하[1], 장민정[1], 박한솔[1], 이경훈[2], 김부희[1], 김태빈[1], 이제명[1,2]
[1]부산대학교 수소선박기술센터, [2]부산대학교 조선해양공학과

Global Trends and Domestic Projects on Hydrogen Ships and Equipment Development

Jeong-Hyeon Kim[1], Tae-Wook Kim[1], Dong-Ha Lee[1], Min-Jeong Jang[1], Han-sol Park[1], Gyung-Hun Lee[2], Bu-Hee Kim[1], Tae-Been Kim[1], and Jae-Myung Lee[1,2]
Hydrogen Ship Technology Center, Pusan National University[1],
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering[2]

본 논문에서는 수소선박 및 기자재 개발과 관련하여 국내에서 추진되고 있는 주요 프로젝트와 연구 동향을 소개한다. 현재 국내에서는 액체수소 운반선 및 기자재 국산화와 관련된 핵심 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이를 통해 수소운송·저장 기술의 경쟁력 강화를 도모하고 있다. 부산시는 항만을 중심으로 수소 인수기지 구축을 추진하며, 향후 대규모 해외 청정수소 도입과 해상 수소 물류 허브로의 도약을 준비하고 있다. 해외에서는 일본의 HySTRA 프로젝트, 유럽의 GH2(Global Hydrogen Hubs) 구상, 미국의 DOE·NASA 기반 극저온 저장 및 안전 기술 개발 등 다양한 국가 차원의 노력이 진행 중이다. 이러한 흐름은 글로벌 차원의 수소 해양운송·저장 인프라 확산을 가속화하고 있으며, 국내 기술개발과 인프라 구축에도 중요한 시사점을 제공한다. 따라서 본 논문은 국내외 수소선박 및 기자재 개발 프로젝트와 수소 도입·저장 인프라 기획 동향을 종합적으로 분석함으로써 한국형 수소 해양운송·저장 체계 구축을 위한 전략적 방향을 제시하고자 한다.

사사
이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00437088). 이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00508368).

CT-S12-9

LNG 엔진 선상 이산화탄소 포집용 열교환기 성능 및 열성능 저하 원인에 관한 연구

김규덕, 장재환*
중소조선연구원

A Study on the Performance and Thermal Degradation Factors of a Heat Exchanger for Onboard CO_2 Capture from LNG Engines

Gyudeok Kim, Jaehwan Jang*
Research Institute of Medium&Small Shipbuilding

전 세계적으로 탄소중립은 선택이 아닌 필수가 되었으며, IMO는 2023년부터 EEXI 및 CII 지표를 통해 선박의 설계 효율성과 온실가스 배출량을 평가하고 있다. 저등급 선박은 SEEMP Part III 개선을 의무적으로 이행해야 하며, 2028년 부터는 국제 탄소 가격제 도입이 예정되어 있어 기술적 대응이 요구된다. 이에 따라 기술적 대응으로 대체연료 및 기자재로서는 LNG, 암모니아, 메탄올 등 저탄소 연료 및 선박용 CO_2 포집기술(CCS)이 주목받고 있다.

본 연구는 '선상 CO_2 포집 및 처리기술 개발'의 일환으로, LNG 엔진에서 배출되는 배기가스에서 초음속 노즐 이용하여 CO_2 동결·분리, 고체 CO_2로 저장하는 공정을 목표로 한다. 이를 위해 1차 배기가스 냉각 및 수분 제거 후, 압축 2차 열교환 후 과냉각된 배기가스를 초음속 노즐로 통과시켜 CO_2를 동결·분리하는 공정을 구성하였으며, 성능 평가 및 검증을 위한 대상 엔진은 HD현대중공업 HIMSEN 8H22DCF DF 적용하여 진행하였다.

1차 배기가스 냉각에 사용된 열교환기는 로우 핀 튜브를 적용한 쉘-앤-튜브를 사용하였으며 배기가스 500kg/h(400℃→45℃), 냉각수 17,500kg/h(36℃→38.52℃), 열교환량은 43,988 kcal/h이다. 실험 결과, 배기가스 온도가 약 190℃ 이상일 때는 열교환기의 출구 온도가 45℃를 초과하였으며, 배기가스 초기온도가 100℃를 초과하는 시험 조건에서 계산된 실제 열교환량은 12,256kcal/h에서 33,233kcal/h(냉각수 열교환량 기준) 범위로, 설계 목표에 도달하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 다음과 같이 성능 저하의 원인을 판단하였다.

1. 배기가스 온도 부족: 설계된 열전달량에 도달하기 위해서는 충분한 유입 온도가 요구되나, 시험에서는 배기가스의 유입 온도가 이에 미치지 못함. 이로 인하여 전체 열교환량이 저하된 것으로 판단됨.
2. 핀 간 수분 응축: 로우 핀 튜브의 핀과 핀 사이에 형성된 응축수는 열교환 면적을 일부 차단하고, 열전달 저항을 증가시켜 실제 열전달 성능 저하 요인으로 작용한 것으로 분석됨.
3. LNG 엔진 배기가스에는 약 6%(v/v)의 수분이 포함되어 있으며, 계산된 이슬점은 약 45.9℃로 추정되며, 이는 냉각수 파이프 표면 온도보다 높은 값으로, 실제 운전 중 수분 응축이 발생했을 가능성이 높음. 이 과정에서 응축수 형성에 따른 잠열 소모가 발생하였고, 이에 따라 배기가스 온도가 설계 대비 낮게 유입되었음에도 불구하고 열에너지의 일부가 응축과정에 사용됨으로써 목표 출구 온도에 도달하지 못한 것으로 판단됨.

이와 같은 분석을 토대로 열교환기 내부를 점검한 결과, 수분 응축에 따른 부식이 일부 확인되었으며, 응축수 배출 측정을 통해 실제 응축이 발생하고 있음을 실증적으로 확인하였다.

위 결과를 바탕으로, 열교환기 설계 시 응축 현상과 열교환기 내 냉각수 파이프 표면 온도를 충분히 고려한 설계가 필요함을 확인하였다. 이에 따라 냉각수 파이프 표면 온도 예측, 응축수 발생 가능성 반영, 로우 핀 튜브 제거(Plain type 적용) 등을 포함한 열교환기 개선 설계를 수행하였다.

사사

본 연구는 산업통상자원부 조선해양산업핵심기술개발사업(과제번호: 20025114)의 연구비 지원으로 수행하였습니다.

참고문헌

1. Incropera, Dewitt et al., Fundamentals of Heat and Mass transfer, WILEY, 6th edition, p711-834 (2007).
2. Shin, D. H., et al., "Thermal Performance Test of Copper-Copper Pin Type Heat Pipe Heat Exchanger," KSME, pp. 125 (2023).

CT-S12-10

저농도 이산화탄소 포집/저장을 위한 극저온 탄소 포집 개발 현황 및 실증 결과 고찰

박성호*, 최광순, 이창형, 정소명, 임종웅, 박준석, 윤상희
고등기술연구원 에너지저장 및 전환 연구그룹

Current Progress and Demonstration Results of Cryogenic Carbon Capture for Low-Concentration CO_2 Capture and Storage

Sungho Park*, Kwangsoon Choi, Changhyeong Lee, Sohmyung Chung, Jongwoong Lim, Junseok Park, Sanghee Yoon
Energy Storage and Conversion Research Group, Institute for Advanced Engineering

전 세계적으로 탄소중립실현과 온실가스 저감을 위한 노력의 방안으로 이산화탄소 포집 및 저장에 대한 필요성과 기여도는 점차적으로 증가하고 있다. 이산화탄소 포집 및 저장 기술을 통한 탄소중립실현은 수소 및 암모니아와 같은 친환경 연료 활용 기술에 비해서 생산-운송-공급-활용에 전주기적인 인프라 구축 없이도 배출원 후단에 설치하여 운용이 가능하기 때문에 경제적인 탄소중립으로 각광받고 있다. 지금까지 이산화탄소 포집 기술은 대부분 공정에서 이산화탄소를 분리한 후 다시 재활용하는 형태인 CCU(Carbon Capture Utilization)가 대부분이었다. 하지만 궁극적인 탄소중립을 실현하기 위해서는 포집된 이산화탄소를 저장하여야 하며, 이를 위해서는 액화/운송 저장 기술도 반드시 필요하다. 극저온 탄소 포집(Cryogenic Carbon Capture)는 그러한 목적하에서 아민습식, 분리막, 흡착 기술에 의한 이산화탄소 포집에 비해서 매우 효율적이고, 경제적이다. 극저온 탄소 포집은 배기가스 내의 이산화탄소를 냉각하여 이산화탄소를 액화하거나 고상화(Desublimation)하여 이산화탄소를 분리와 동시에 액화/저장이 가능하기 때문에 여러단계의 공정을 거치며 발생하는 비가역적인 손실을 줄이고 소형화된 공정으로 경제성도 확보할 수 있다. Air liquid는 CRYOCAP이라는 기술을 바탕으로 세계 첫 극저온 탄소 포집 및 수소 정제 공정을 상업화 하였다. PSA의 테일가스를 액화 정제하여 고순도 수소 생산과 이산화탄소 액화/포집이 동시에 가능한 연간 10만톤 상업 설비 운영을 성공하였다. 국내에서는 CARYCAP의 액화기술과 달리 Desublimation 기술을 기반으로한 블루수소 정제와 같은 고농도 이산화탄소 정제 포집을 위한 공정과 선박용 및 배기가스와 같은 저농도 이산화탄소 포집/저장을 위해서 실증 및 개발이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 배기가스 내의 4.5 bar 이하로 압축하고 배기가스의 운동에너지를 이용하여 이산화탄소를 고상화하여 드라이아이스로 직접 전환하는 극저온 탄소포집 공정을 구축하고 이들에 대한 성능 평가를 수행하였다. 배기가스 농도가 3.7 mole % 이하 조건에서 배기가스 내 이산화탄소를 평균적으로 85~90%, 최대 94.5%까지 포집하는 것을 확인하였으며, 이를 통해 배기가스 내 3.7 mole % 농도의 이산화탄소를 포집/액화하기 위해서 소요되는 에너지가 약 530 kWh/ton-CO2 (1.91GJ/ton-CO2) 임을 실험적으로 확인하였다.

사사

본 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)의 지원으로 수행되었습니다.(No.20025114)

CT-S12-11

Energy Flow Optimization in a Hybrid ORC Powertrain for Emission Reduction in Marine Applications

Dong Wook Kim[1], and Gyu Deok Kim[2]
Research Institute of Medium & Small Shipbuilding[1,2]

<Instructions for abstract>

This paper presents the design, development, and control strategy of a power generation and management system that utilizes waste heat recovery through an Organic Rankine Cycle (ORC). The proposed system efficiently converts low-grade waste heat into electrical energy, outputting it as 48 VDC, which is prioritized for charging a 100 kWh battery module to ensure reliable energy storage. The stored energy can subsequently be utilized for AC loads, such as resistive heaters, via dedicated inverters, or exported to the electrical grid through multiple high-capacity parallel-connected inverters to handle higher output demands. To manage the power flow intelligently, a control algorithm incorporating hysteresis-based State of Charge (SoC) thresholds is implemented: when the SoC exceeds 90%, surplus power is exported to the grid, whereas when the SoC drops below 80%, charging is given priority. This approach minimizes unnecessary mode switching and enhances operational efficiency. Furthermore, the algorithm integrates maximum and minimum charging power limits, as well as safety constraints for battery voltage and temperature, thereby ensuring system stability, battery health, and long-term operational reliability. Comprehensive simulation and system-level analysis demonstrate that the proposed method achieves an effective balance between battery charging and grid export, significantly improving waste heat utilization efficiency while maintaining safe and dependable operation under varying load and generation conditions.

References

1. O. Yüksel *et al.*, “Optimising the design of a hybrid fuel cell/battery and waste heat recovery system for retrofitting ship power generation, ” Energies, vol. 18, no. 2, art. 288 (2025).
2. MHI Marine Machinery & Equipment Co. Ltd., “Development of a state-of-the-art binary power generation system (WHR-ORC) for marine waste heat recovery,” Mitsubishi Heavy Industries (2022).

Acknowledgement

This work was supported by the Technology Innovation Program (R&D Project for the Shipbuilding & Offshore Industry Technology Development Program) (02413126, Development of an Exhaust Gas Combined After-treatment System for MW-Scale Ammonia Engines) funded By the Ministry of Trade Industry & Energy(MOTIE, Korea).

CT-S12-12

온실가스 저감을 위한 전기 하이브리드 추진 선박 개발 전략

김현준[1], 강정호[1*]
[1]한국자동차연구원

Development Strategy of Electric Hybrid Propulsion Ships for Greenhouse Gas Reduction

Hyunjun Kim[1], Jeongho Kang[1*],
Korea Automotive Technology Institute[1]

국제해사기구(IMO)의 온실가스 규제가 강화됨에 따라 선박의 친환경 추진 기술 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 전기 하이브리드 추진 선박의 개발 전략을 제안하고, 실제 예인선을 대상으로 한 사례 분석을 통해 온실가스 저감 효과를 검토하였다. 연구 방법은 ① 운항 환경 데이터 취득, ② 하이브리드 추진 시스템 물리 모델 수립, ③ 최적 제어 적용 및 성능 평가, ④ 구조 및 사양 설계 최적화, ⑤ 실시간 제어 알고리즘 도출의 단계로 구성된다. 특히 등가 연료소모량 최소화 전략(ECMS)을 적용하여 연료 사용량과 배터리 에너지 소모량을 통합적으로 고려하였다. 분석 결과, 병렬형 하이브리드 구조와 엔진 정격 출력의 약 30% 용량을 갖는 모터를 적용할 경우 연료 소모량과 이산화탄소 배출량을 약 21% 저감할 수 있음을 확인하였다. 이는 엔진 공회전 최소화와 부하 조정(load leveling)에 따른 효율적 운전이 주요 요인으로 작용하였다. 본 연구에서 제시한 개발 전략은 향후 다양한 선종에 적용 가능한 친환경 선박 설계 및 정책 수립의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 김현준 외, “온실가스 저감을 위한 전기 하이브리드 기술 개발 및 현황”, 22년도 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 (2022).

2. 김현준, 김병윤, 오세두, 강정호, “등가 연료소모량 최소화 전략을 적용한 1,920 kW 급 병렬형 전기 하이브리드 예인선 연료소모율 평가”, 22년도 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 (2022).

3. Paganelli, Gino, et al, "Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains." Proc. of IEEE 55th vehicular technology conference, pp. 2076-2081, (2002).

4. H Kim and D Kum, “Comprehensive design methodology of input- and output-split hybrid electric vehicles: In search of optimal configuration,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 21, No. 6, pp. 2912-23, (2016).

CT-S12-13

중·대형 선박 하이브리드 추진시스템 성능평가용 육상 실증 인프라 개발 및 활용 연구

강무경[1*], 최주형[1], 배징도[1], 김종립[1], 이원의[1], 채일주[1], 이나영[1],
[1](재)한국조선해양기자재연구원

Research on the Development and Utilization of Land-Based Demonstration Infrastructure for Performance Evaluation of Hybrid Propulsion Systems for Medium- and Large-Sized Ships

Mukyeong Kang[1*], Joohyoung Choi[1], Jingdo Bae[1], Jonglib Kim[1], Woneui Lee[1], Iljoo Chae[1], Nayoung Lee[1]
[1]Korea Marine Equipment Research Institute

선박의 온실가스 배출 규제 강화와 2050 탄소중립 이행 요구에 따라, 다양한 친환경 선박 기술 개발이 진행되고 있다[1]. 주요 기술로는 선박 선형 최적 설계, 대체 연료 적용 기술, 전기 및 하이브리드 추진 시스템 및 에너지 재활용 기술 등이 있다. 이 중 선박 하이브리드 추진 기술은 에너지 효율 향상과 배출가스 저감을 위한 주요 기술로 평가된다[2].

하이브리드 추진시스템은 기존의 전통적인 내연기관 추진과 전기추진 시스템을 결합한 형태로, 상황에 따라 전기와 기계 동력을 선택적으로 운용할 수 있다. 특히 축 발전기는 선박 엔진의 추진축에서 발생하는 기계적 에너지를 전기에너지로 전환하여 전력 공급을 지원하므로, 발전에 소모되는 연료 절감 효과가 발생하여 현재 중·대형 선박에서는 하이브리드 추진시스템의 적용이 증가하고 있다.

일반적으로 하이브리드 시스템은 선박 탑재 전 단품 성능 검증 후, 해상 시운전을 통해 시스템 단위 검사를 수행한다. 해상 통합 운용 단계에서 제어 상호작용, 동적 부하전환 등의 문제로 시운전 지연과 비용 증가가 발생할 수 있다. 따라서 이를 방지하기 위해 하이브리드시스템 육상 실증 시험 인프라가 필요하다.

본 연구에서 제안하는 육상 실증 설비는 축 발전기 모터, 전력변환장치, 변압기, 제어 및 계측 시스템 등으로 구성되며, 국제 규격과 산업표준에 기반한 선박 하이브리드 추진시스템용 제품의 신뢰성 평가를 진행하는 것을 목적으로 한다. 해당 설비는 주요 구성품의 단품 기능 검증뿐만 아니라 시스템 통합 성능 검증까지 수행하여 해상 시운전 시 발생할 수 있는 시스템 오류를 사전 제거함으로써 시간과 비용을 절감할 수 있다.

이러한 하이브리드 추진시스템 육상실증 설비는 국내 조선기자재 산업의 기술경쟁력과 신뢰성을 확보하는 핵심 인프라로, 본 논문에서는 중대형 선박용 하이브리드 추진시스템의 성능평가를 위한 육상 실증 설비에 대한 기본 요구 조건, 시험평가 항목 및 방법 등의 연구 내용을 소개하고자 한다.

후 기

본 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원(KIAT)의 연구비 지원을 받아 수행된 연구결과임. (과제번호 : P0022204, 친환경 선박 하이브리드 동력 시스템 육상실증 기반조성 사업)

참고문헌

1. IMO. Resolution MEPC.377(80). 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. (2023)
2. Ballini, F., and Bozzo, R., "Hybrid power and propulsion systems for ships − Current status and future challenges," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 409-418 (2016).

특별세션(XIII):

한국생산기술연구원 저탄소 수소 통합시스템기술 성과 발표

Low-Carbon Hydrogen Integrated Systems: Achievements and Applications from KITECH

2025년 9월 24일(수) 14:00~17:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸C

CT-S13-1

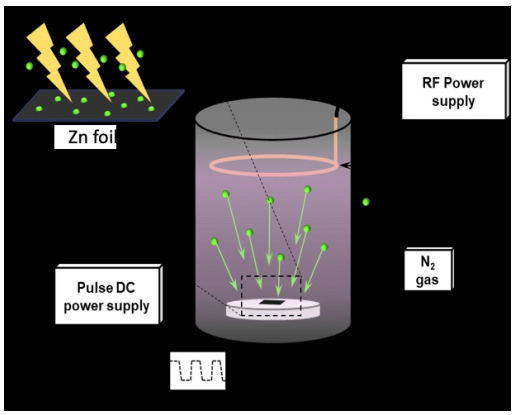
고안정성 수계아연전지 활용을 위한 아연 음극 안정화 기술 개발

김대욱*, 김영국, 김신, 이인식, 차병철
한국생산기술연구원 저탄소에너지그룹

기존 리튬 이온 배터리(LIBs)의 안정성 문제와 환경 문제 해결을 위해 차세대 에너지 저장 장치(ESS) 개발이 활발히 진행되고 있다. ESS의 경우는 공간 제약이 상대적으로 적고 대용량 시스템으로 인해 화재의 위험성이 크기 때문에 안전성이 높은 전지로의 대체가 필요하다. 이 중 수계 기반 아연 이온 배터리(ZIBs)는 발 및 인화성이 높은 유기전해질 대신 물을 기반으로 하는 전해질 사용하여 저렴한 비용, 높은 안전성 및 대용량 특성으로 인해 대규모 에너지 저장 시스템 및 웨어러블 장치에 적합한 유망한 기술이다. 그러나 ZIBs는 아연 음극의 덴드라이트(수지상 결정) 형성, 부식 및 부반응으로 인한 사이클 안정성 저하라는 심각한 문제에 직면해 있다. 특히 덴드라이트 성장은 불균일한 아연 증착으로 인해 발생하며, 이는 배터리 성능 저하와 내부 단락을 유발한다.

현재의 음극개발 동향은 음극 표면의 보호 코팅과 합금화의 방식으로 연구되고 있다. 기존의 절연 또는 전도성 코팅 방식은 덴드라이트 성장을 완전히 억제하기 어렵고, 코팅층 손상 및 덴드라이트 형성을 초래하는 한계가 있다. 또한 복잡한 공정을 대체하고 친환경적인 해결 방식이 요구된다. 본 연구에서는 아연 음극의 성능을 개선하기 위해 아연 금속을 음극으로 적용하고 플라즈마, 레이저를 활용하여 기존의 코팅 방식이 아닌 아연 금속 표면의 기능화와 입체 구조화를 통해 음극의 안정성을 개선 하고자 한다. 플라즈마 이온 주입을 통해 음극 표면의 음이온을 도입하여 표면에너지 제어와 아연 친화성 향상으로 균일한 표면 핵성장 사이트를 제공한다.

본 기술은 추가적인 코팅층 없이 아연 음극 자체의 표면 특성을 근본적으로 변화시켜 덴드라이트 문제를 해결할 수 있는 효율적인 전략이며, 향후 ZIBs의 상용화를 앞당기는 데 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.



<그림 1. 플라즈마 이온주입을 활용한 음극표면 이온주입>

Acknowledgement
This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) grant funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT, Korea) (RS-2023-00304763).

CT-S13-2

Sodium Silicate-Based 바인더를 활용한 냉간 브리켓 제조 공정 최적화

배민아, Tran Thi Ten, 백재호
한국생산기술연구원 저탄소에너지그룹

Optimization of Cold Briquetting Conditions Using Sodium Silicate-Based Binders

Min A Bae, Tran Thi Yen, Jae Ho Baek
Low Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology

철강산업은 전 세계 CO_2 배출의 약 7~9%를 차지하는 탄소 집약적(Carbon-intensive) 산업으로 특히 철광석 환원에 석탄(코크스)을 사용하는 고로 기반의 제철 방식에서 발생되는 CO_2 배출량은 철강산업 전체의 약 86%를 자치하고 있다[1]. 고로에서 사용되는 철광석 원료로는 소결광과 펠렛이 전체 사용량의 80% 이상을 차지하고 있는데 소결광이나 펠렛화를 위해서는 1200~1300 ℃ 이상의 고온처리가 필요하기에 이때 사용되는 에너지와 CO_2 발생량 또한 저감 대상에 포함되어 있다. 이에 원료 제조 공정에서 발생하는 CO_2를 저감하기 위해 저온 소결 공정을 통한 소결 공정 내 무연탄과 코크스 사용량 감소 및 냉간 브리켓 제조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[2-3]. 무엇보다 CO_2 저감을 위해서는 소결 배합 내 결합재 비율을 줄이는 것이 핵심이나 결합재 비율 감소에 의한 소결 온도 저하, 소결광 내 bonding phase의 감소로 인한 품질 하락의 문제가 발생되고 있다. Bonding phase 감소는 고로내 연소 중 브리켓의 강도 저하를 발생시켜 통기성 확보에 악영향을 미치기에 브리켓의 열간 강도는 고품질 철강을 생산하기 위한 필수 조건이라 할 수 있다. 본 연구에서는 철강산업의 친환경화를 위해 내열성이 우수한 Sodium silicate를 바인더의 주성분으로 냉간 브리켓용 무기바인더를 개발하였으며, 철광석 원료 특성에 따른 바인더와의 결합력을 분석하고, 열간강도 확보를 위한 브리켓 제조 조건을 최적화하여 상용화 가능성을 검토하였다.

참고문헌

1. Grand View Research. Steel Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Flat Steel, Long Steel), By Application (Building & Construction, Automotive & Transportation, Heavy Industries), By Region, And Segment Forecasts, 2025-2030; Grand View Research: San Francisco, CA, USA. https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/steel-market (accessed August 6, 2025).

2. Smil, V. Still the Iron Age: Iron and Steel in the Modern World; Elsevier: Amsterdam, Netherlands (2016)

3. Evans, S. Steel Industry Makes Pivotal Shift towards Lower-Carbon Production. Carbon Brief. Available https://www.carbonbrief.org/steel-industry-makes-pivotal-shift-towards-lower-carbon-production/?utm_source=chatgpt.com (accessed August 6, 2025).

CT-S13-3

막접촉기를 이용한 컴팩트형 CO_2 포집기술 개발

박현식[1,*], 김희준[1,2], 황선엽[1], 강조훙[1,2], 송호준[1]
한국생산기술연구원[1], 연세대학교[2]

막접촉기를 이용한 CO_2 포집 기술은 기존 화학 흡수(높은 CO_2 선택성)의 장점과 분리막(소형화)의 장점을 결합한 하이브리드 방식이다. 기존의 충진탑과 비교했을 때, 막접촉기는 기체와 액체 사이의 비표면적을 획기적으로 증가시켜 부피를 최대 1/10까지 줄일 수 있다. 또한, 고분자 소재로 제작된 중공사막을 사용하기 때문에 공정 부피가 작고 가볍다. 막접촉기의 모듈식 특성은 확장성이 용이하여 제한된 공간에서 CO_2 포집이 필요한 경우 기존 충진탑 기술을 대체할 수 있는 적절한 대안이다. 이러한 많은 장점에도 불구하고 상용화의 주요 장애요인은 막젖음(wetting) 현상이다. 막접촉기에서 CO_2는 흡수제와의 반응성을 통해 흡수/분리가 되는데, 막젖음이 발생하면 기공 내에 존재하는 흡수제로 인해 물질 전달 저항이 크게 증가하여 CO_2 흡수 성능이 저하된다. 이 문제를 해결하기 위해 가장 효과적인 방법은 흡수제의 표면 장력을 높이거나 멤브레인 자체의 소수성을 향상시키는 것이다.

본 연구에서는 소수성이 우수한 불소계 고분자인 폴리비닐리덴플루오라이드(PVDF)를 이용하여 중공사막을 제조하고 이를 활용하여 막접촉기를 제작, CO_2 흡수 실험을 수행하였다. 최적화된 레시피로 제조된 중공사막을 모듈화할 때, 중공사막 개수에 따른 충진 밀도와 비표면적을 계산하였다. 계산된 값을 실험 결과와 비교하여 다양한 조건에서 이산화탄소 흡수 성능을 확인하였다. 향후, 제어된 방사 조건 및 모듈화 과정에서 중공사막 패키징 설계를 포함한 성능 최적화 방안을 논의하여 스케일업 가능성을 확인하고자 한다.

참고문헌

1. Ahmad et al., "Hollow fiber (HF) membrane fabrication: A review on the effects of solution spinning conditions on morphology and performance." *J. Ind. Eng. Chem.*, 70, 35-50 (2019).

2. Kianfar, E., Pirouzfar, V., & Sakhaeinia, H. "An experimental study on absorption/stripping CO_2 using Mono-ethanol amine hollow fiber membrane contactor." *J. Taiwan. Inst. Chem. E.*, 80, 954-962 (2017).

3. Yeow et al., "Morphological study of poly (vinylidene fluoride) asymmetric membranes: effects of the solvent, additive, and dope temperature." *J. Appl. Polym. Sci.*, 92(3), 1782-1789 (2004).

4. Pang et al., "Effect of non-solvent additive concentration on CO_2 absorption performance of polyvinylidenefluoride hollow fiber membrane contactor." *Sep. Purif. Techno.l*, 191, 38-47 (2018).

5. Choiet al., "Effect of the preparation conditions on the formation of asymmetric poly (vinylidene fluoride) hollow fibre membranes with a dense skin." *Eur. Polym. .J*, 46(8), 1713-1725 (2010).

6. Fan Cao, et al., "Theoretical modeling of the mass transfer performance of CO_2 absorption into DEAB solution in hollow fiber membrane contactor," *J. Membr. Sci.*, 593, 117439 (2020).

CT-S13-4

고속·고품질 적층을 위한 이중 열원 WAAM 공정 및 품질 모니터링 연구

천주용[1], 김재훈[1], 신현준[1], 지창욱[1]*
한국생산기술연구원[1]

High-Speed, High-Quality Deposition Using a Dual Heat Source WAAM Process with Integrated Quality Monitoring

Jooyong Cheon[1], Jaehun Kim[1], Hyunjun Shin[1], Changwook Ji[1]*
Korea Institute of Industrial Technology[1]

대형 금속 구조물의 경량화와 생산성 향상 요구가 커짐에 따라, WAAM(Wire Arc Additive Manufacturing) 공정의 고속 적층 및 품질 향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. WAAM은 금속 와이어를 직접 용융·적층하는 방식으로, 절삭가공 대비 원재료 사용량을 크게 절감하고 칩·절삭유 등 유해 폐기물 발생을 최소화하여 자원효율과 환경성을 동시에 향상시킬 수 있는 청정 제조기술로 주목받고 있다. 특히 다양한 산업 분야에서의 실질적 적용을 위해서는 대형 부품 제조에서 요구되는 크기·속도 향상, 자동화·지능화, 납기 단축 등의 조건을 만족하는 고효율 적층 기술 개발이 필수적이며, 이를 지원하는 적층 자동화와 품질 모니터링을 포함한 지능형 WAAM 시스템의 구축이 가속화되고 있다.

본 연구에서는 WAAM 공정의 고효율(고속) 적층 구현과 품질 모니터링 기술 개발을 위한 기초 연구를 수행하였다. 이를 위해 이중 열원(Twin torch) 시스템을 적용하여 선·후행 아크 모드 조합(CMT, Pulse, Standard)과 입열 비율 변화가 비드 형상(폭, 높이, 용입 깊이) 및 적층성에 미치는 영향을 BOP(Bead on Plate) 실험을 통해 분석하였다. 또한 CAD/CAM SW 연동을 통해 interlayer distance를 고려한 경로 설계 방안을 마련하였으며, WAAM 공정 중 CTWD(Contact Tip to Work Distance) 변화에 따른 전류·전압 변동을 실시간 모니터링하고, 이러한 변화를 보상할 수 있는 제어 전략을 제시하였다. 이러한 접근은 공정 불안정으로 인한 재가공과 불량률을 낮추고, 재료 이용률 향상·폐기물 저감·에너지 절감 등 청정 제조 측면의 이점을 극대화한다. 본 연구는 이중 열원 기반 WAAM 공정의 기초 특성 규명뿐 아니라, 향후 고속·고품질·친환경 적층을 실현할 수 있는 공정 설계 및 지능형 제어 지침 마련에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

CT-S13-5

산업용 X-ray CT를 활용한 내부 결함 시각화 및 정량화 기술

이규흔, 강호정, 장호성, 윤필환, 신선미, 박진영*
한국생산기술연구원

Visualization and Quantification of Internal Defects Using Industrial X-ray CT

Gyu-heun Lee, Ho-jung Kang, Ho-sung Jang, Pil-hwan Yoon, Sun-mi Sin, Jin-young Park*

Korea Institute of Industrial Technology

첨단 제조 산업에서는 부품의 복합화와 고강도화가 빠르게 진행됨에 따라, 소재 내부의 미세 결함을 정밀하게 평가할 수 있는 비파괴 분석 기술의 중요성이 커지고 있다[1]. 항공우주, 자동차, 반도체, 에너지 산업과 같이 안전성과 신뢰성이 핵심인 분야에서는 내부 기공(porosity)과 수축(shrinkage) 등의 결함을 조기에 확인하고 정량화하는 것이 제품 성능과 수명 확보에 필수적이다[2]. 산업용 X-ray CT는 기존 파괴검사와 달리 시편을 손상시키지 않고 내부 구조를 3차원 영상으로 재현하여 결함의 위치, 크기, 분포를 정량 분석할 수 있다는 점에서 주목받고 있다.

본 연구에서는 산업용 X-ray CT 기반 결함 분석 체계를 구축하고, 주조·용접·3D프린팅·반도체·복합재료 등 다양한 산업군에 적용하였다. 주조품에서는 기공과 수축공 분포를 정량화하여 금형 설계 및 공정 최적화에 활용하였고, 용접 및 적층 제조에서는 내부 공극과 불완전융합을 조기 검출해 접합부 건전성과 기계적 특성 간 상관성을 확인하였다. 반도체 패키지에서는 와이어 본딩부 및 솔더 접합부의 미세 크랙을 검출하여 조기 고장 진단 가능성을 입증하였으며, 복합재료에서는 섬유 배열 불균일성과 기공률 분석을 통해 물성 예측과 공정 개선에 기여하였다. 또한 CT 데이터 기반 STL 추출을 통한 역설계 지원, 문화재 내부 분석을 통한 비파괴 보존 연구 등 비산업 분야로의 확장 가능성도 확인되었다.

결론적으로, 산업용 X-ray CT 기반 결함 정량화 기술은 단순한 비파괴 검사를 넘어 기계적 특성 평가와 연계 가능한 핵심 플랫폼으로 진화하고 있다 [3]. 나아가 AI 기반 자동 분석과 디지털 트윈 융합을 통해 제조업의 설계 - 생산 - 검사 전 주기를 아우르는 지능형 품질 관리 인프라로 확장될 수 있으며, 이는 스마트 제조 시스템의 기반 기술로서 학술적·산업적 가치가 크다.

참고문헌

1. Maire, E., and Withers, P. J., Quantitative X-ray tomography, *International Materials Reviews*, 59(1), 1-43 (2014).
2. Requena, G., et al., 3D imaging of metallic foams using synchrotron radiation microtomography, *Acta Materialia*, 57(14), 4298-4308 (2009).
3. Silva, L. C., et al., Artificial intelligence integration with X-ray CT for defect detection in advanced manufacturing, *Materials Characterization*, 185, 111741 (2022).

CT-S13-6

적층 제조 공정 특성화 및 기상계측 시스템 개발에 관한 연구

김정섭*
한국생산기술연구원

적층 제조(Additive Manufacturing, AM)는 3차원 디지털 디자인 데이터(Computer Aided Design, CAD)를 기반으로, 재료를 제거하는 절삭 제조(Subtractive Manufacturing, SM)와 달리, Layer-by-layer로 금속, 플라스틱, 세라믹 등 다양한 재료를 이용하여 원하는 형태를 쌓아 올려 제품을 생산하는 공정이다. 따라서, 적층 제조는 재료 낭비를 최소화하여 복잡한 형상의 제품을 생산함으로써 시제품 제작 및 항공우주, 의료 등 고부가가치 산업(High Value Industry)에 적극적으로 적용되고 있다. 하지만, 적층 제조에 직간접적으로 영향을 미치는 다양한 공정 변수에 의해 생산성, 반복성, 신뢰성 등의 문제를 가지므로 이를 극복하기 위해 다양한 연구가 수행되고 있다. 본 연구에서는 적층 제조의 파라미터 분석을 통한 공정 변수에 대한 공정 특성화와 제품의 특성을 계측하는 적층 제조 공정 맞춤형 기상계측시스템 개발에 관한 연구를 수행하였다.

CT-S13-7

극저온 환경용 고기능성 고강도 단열소재 개발

이영철*
한국생산기술연구원

Characterization of High-Performance, High-Strength Insulation Materials for Cryogenic Environments

Young Cheol Lee*
Korea Institute of Industrial Technology

현재 액화수소(LH) 환경에서 사용되는 단열 시스템의 대부분은 다층 단열재(MLI, Multi-Layer Insulation)와 진공 단열 방식을 결합하여 적용하고 있다. MLI는 중진공 이상의 조건에서 우수한 단열 성능을 발휘하지만, 구조적 강도가 전혀 없으며 진공도가 중진공 이하로 떨어질 경우 단열 성능이 급격히 저하되는 한계를 가지고 있다. 이러한 특성은 구조적 안정성과 일정 수준 이상의 단열 성능을 동시에 요구하는 환경에서 적용에 제약을 초래한다.

이러한 한계를 극복하기 위해, 본 연구에서는 중공 유리 마이크로스피어(Glass Bubble)를 고분자 또는 복합재 매트릭스에 적용한 고강도 단열재를 개발하고 있다. 개발된 단열재는 극저온 및 고진공 환경에서도 높은 기계적 강도를 유지하며 안정적인 단열 성능을 제공한다. 기존 MLI와 달리 구조 하중을 지탱할 수 있는 능력을 갖추고 있어, 액화수소 저장·운송·이송 시스템 등 단열과 기계적 안정성이 모두 필요한 분야에서 활용 가능하다. 개발중인 Glass Bubble 기반 단열재는 우수한 압축강도와 극저온에서의 낮은 열전도율을 보였으며, 고진공 환경에서도 지속적인 성능을 유지하였다. 본 연구에서는 단열재 소재 설계 개념, 제작 방법, 기계적·열적 특성 평가 결과, 그리고 진공환경에서의 단열 성능 특성을 제시한다. 제안하는 기술은 차세대 극저온 수소 응용 분야에서 보다 견고하고 신뢰성 높은 단열 솔루션으로의 발전 가능성을 제공한다

수소 및 재생에너지

(일반 구두발표)

2025년 9월 25일(목) 13:00~13:40
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀A

CT-A1

HDPE 열분해 기반 수소 생산시스템에서 바이오차의 촉매 및 고체탄소 흡착제로서의 역할에 대한 실험적 연구

조경일[1], 이영재[1], 이용운[1*]
한국생산기술연구원 지속가능기술연구소[1]

Experimental Study on the Role of Biochar as a Catalyst and Solid Carbon Adsorbent in an HDPE Pyrolysis-Based Hydrogen Production

Kyungil Cho[1], Youngjae Lee[1], Yongwoong Lee[1*]
Research Institute of Sustainable Development Technology, Korea Institute of Industrial Technology[1]

전 세계적인 산업 활동 확대와 화석연료 소비 증가는 대기 중 CO_2농도를 급격히 상승시켜 기후변화의 주요 원인이 되고 있다. 이에 따라 각국은 탄소중립 달성을 목표로 에너지 전환 정책을 가속화하고 있으며, 무탄소 연료로서 수소(H_2)가 핵심 대안으로 부상하고 있다. 수소는 연소 시 CO_2를 배출하지 않을 뿐 아니라, 재생에너지 기반 수전해뿐만 아니라 탄화수소 열분해를 통한 청록수소(turquoise hydrogen) 생산도 가능하다. 청록수소는 메탄이나 플라스틱을 고온에서 분해해 CO_2 대신 고체 탄소를 생성하므로, 온실가스 저감과 에너지 저장 매개체로서 잠재력을 동시에 지닌다. 특히 폐플라스틱은 재활용률이 낮고 환경오염 우려가 커 처리 문제가 심각하며, 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)과 같은 열가소성 플라스틱은 물리적 재활용이 어려워 잔존 폐기물로 축적되는 경우가 많다. 이를 해결하기 위한 방안으로 화학적 재활용, 특히 열분해를 통한 수소 생산이 주목받고 있다.

HDPE 열분해 과정에서 생성되는 기상 탄화수소를 재개질하면 고부가가치 연료인 수소를 회수함과 동시에 자원순환과 에너지 회수를 실현할 수 있다. 그러나 열분해·개질 과정에서는 타르, 휘발성 유기화합물(VOCs), 고체 탄소(coke) 등이 생성되며, 특히 고체 탄소는 촉매 표면과 반응기 벽면에 축적되어 촉매 비활성화와 반응 효율 저하를 초래한다. 기존 연구에서는 Ni, Fe 등 금속계 촉매를 적용해 수소 수율을 높였으나, 고체 탄소 축적 문제의 근본적 해결에는 한계가 있었다. 이에 바이오매스를 무산소 또는 저산소 조건에서 열분해해 얻는 고탄소 고체물질인 바이오차(biochar)의 활용 가능성이 주목받고 있다. 바이오차는 넓은 비표면적, 발달된 다공성 구조, 우수한 열적 안정성을 갖추어 흡착제와 촉매 지지체로 활용 가능하며, 금속 촉매 없이도 타르 분해와 수소 전환을 촉진하는 활성을 보인다. 또한 재생 가능한 자원을 원료로 하기 때문에 지속가능성과 환경성을 동시에 확보할 수 있고, 사용 후에도 탄소 포집·저장(CCS) 소재로 재활용 가능해 탄소 네거티브(carbon-negative) 효과를 기대할 수 있다.

본 연구는 이러한 장점을 활용하여 HDPE 열분해 기반 수소 생산 공정에 바이오차를 촉매 및 고체 탄소 흡착제로 적용하였다. 다단 열분해 반응기를 이용해 HDPE의 열분해 및 가스화, 촉매/무촉매 크래킹을 수행하였으며, 응축성 오일(Tar)과 비응축성 가스를 각각 정성·정량 분석하여 조건별 수소 수율과 전환율을 평가하였다. 또한 바이오차의 비표면적(BET)과 공극 분포 변화를 측정하고, 원소 분석을 통해 흡착 전·후 특성을 비교하여 흡착 성능을 평가하였다. 실험 결과, 무촉매 조건(Blank 및 축열제(Al_2O_3)) 대비 700, 800, 900℃에서 제조한 바이오차를 적용한 경우 Tar 수율이 감소하고 비응축성 가스 수율이 90% 이상으로 증가하였다. 특히 열분해 온도가 상승할수록 수소 분율이 크게 향상되어, 바이오차가 HDPE 열분해 기반 수소 생산에서 고체 탄소 저감과 수소 수율 증대에 모두 기여함을 확인하였다.

CT-A2

블루수소 생산을 위한 이산화탄소 셔틀 기술 개발

박성수, 김인재, 김경덕*
대전광역시 유성구 대덕대로 1227, 한국가스기술공사 신에너지연구원

Development of Carbon Dioxide Shuttle Technology for Blue Hydrogen Production

Seongsu Park, Injae Kim, Kyungduk Kim*
Energy Research Center, 1227, Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 34007, Korea

요약

IEA에서 발간한 World Energy Outlook에 따르면 탄소중립 시나리오 상 전세계 탄소감축량 비중은 태양광, 풍력 등 재생에너지 비중은 71.2%를 차지하고 CCUS 비중은 5.5%로 예상하고 있다. 그러나 재생에너지 자원이 부족한 국내 여건 상, 우리나라는 재생에너지를 대신하여 원자력발전, CCUS를 적용한 화석연료 사용, 수소 수입을 통한 재생에너지 수입 등의 비중이 타 국에 비해 많은 비중을 차지할 것으로 예상된다.

한국가스기술공사는 평택, 완주, 부산에 천연가스 개질을 통한 수소생산기지를 운영 중에 있으며, 이산화탄소 셔틀 기술을 개발하여 그레이수소를 블루수소로 전환하고자 한다. 이산화탄소 셔틀 기술은 외부 열에너지의 투입 없이 배기가스 중 이산화탄소를 포집하여 경질탄산칼슘을 생산하고 포집 과정에서 필요한 약품(수산화나트륨)을 공정 내에서 재생하여 약품 사용량을 절감할 수 있는 기술이다. 최소한의 전력을 사용하기 때문에 전력 비용이 저렴하고, 소석회를 투입하여 고부가가치를 가진 경질탄산칼슘을 생산하기 때문에 경제성과 탄소 저감을 동시 실현 가능하다.

본 기술을 공사 완주 수소생산기지 300Nm^3/hr를 대상으로 실증 완료하였으며, 완주 수소생산기지 내 개질기 3대에 추가적용하고 평택, 부산 수소생산기지에 추가 적용하는 것을 검토하고 있다. 또한 시장 수요에 따라 선택적으로 저품질 탄산칼슘을 생산하고 인근 폐탄광에 매립하여 탄소배출권을 확보할 수 있도록 후속 연구과제를 기획하고 있다.

에너지저장

(일반 구두발표)

2025년 9월 25일(목) 13:00~14:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸B

CT-B1

전이 금속 규화물 및 이중 탄소 쉘 복합화 전략을 이용한 고성능 Si 음극용 다공성 마이크로스피어 제조

이재섭[1], 조중상[2,*]
[1]고려대학교 신소재공학부, [2]충북대학교 공업화학과

기존 상용 리튬 이온 배터리(LIBs)의 흑연 음극재는 안정적인 수명 특성을 나타내지만, 낮은 이론 용량(372 mAh/g)으로 인해 고에너지밀도 배터리 구현에 한계가 있다. 실리콘(Si)은 흑연보다 약 10배 높은 이론 용량(3579 mAh/g) 덕분에 적은 활물질 양으로도 양극의 리튬을 모두 수용 가능하여 동일 부피 내 더 많은 셀 충진과 이를 통한 고에너지밀도 전지 구현을 가능케하기 때문에 차세대 음극재로 주목받고 있다. 그러나 충·방전 시 발생하는 Si의 막대한 부피 팽창(~360%)은 활물질 분쇄와 뒤이은 전극 구조의 파괴, 비효율적인 이온/전자 전달, 불안정한 고체 전해질 계면(SEI) 형성을 초래하며, 낮은 전기 전도도(~10^{-3} S/cm)는 수명 및 율속 특성 등의 전체 전지 성능을 크게 저하시킨다. 본 연구에서는 이러한 Si 기반 음극재의 한계를 극복하기 위해, 분무 열분해 및 후속 열처리 공정을 통한 전이 금속 규화물 및 이중 탄소 쉘 복합화 전략이 적용된 Si 복합 다공성 마이크로스피어를 제조하였다. 마이크로스피어 내 전기 전도도가 낮은 Si을 감싼 전이 금속 규화물은 본질적인 낮은 저항(resistivity)과 높은 화학적 안정성으로 Si의 전기적 상호 연결성을 강화하고 기계적 안정성을 높이는 역할을 한다. 또한 이들을 둘러싼 전이 금속 나노입자가 삽입된 질소 도핑 흑연질 탄소와 폴리도파민 유래 탄소로 구성된 전도성 이중 탄소 쉘은 각각 높은 전도성을 바탕으로 빠른 전자 수송 경로를 제공하여 전극의 율속 성능을 향상시키며, 동시에 Si의 부피 팽창을 부분적으로 억제하여 구조적 분쇄를 방지한다. 두 번째 탄소 쉘은 추가적으로 입자 간 2차 전자 수송 경로를 제공하고 Si의 부피 응력을 더욱 완화하여 활물질의 분쇄나 집전체로부터의 박리를 효과적으로 억제한다. 이러한 설계 덕분에, 전이 금속 규화물/이중 탄소 쉘 복합 Si 음극은 높은 율속 특성(10 A/g에서 428 mAh/g의 방전 용량)을 나타냈으며, 우수한 장기 수명 특성(1.0 A/g에서 600 사이클 후 88%의 용량 유지율)을 기록하였다. 뿐만 아니라, $Li(Ni_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1})O_2$ 양극과의 완전 셀 테스트에서도 안정적인 구동을 확인하여, 본 연구에서 제안된 나노구조가 실제 배터리 환경에서 충분한 실용성을 가짐을 입증하였다.

CT-B2

공융염 기반 준액상 공정을 통한 폐배터리 양극재 업사이클링

박진성[1,2]
[1]아주대학교 첨단신소재공학과, [2]아주대학교 에너지시스템학과

리튬이온 배터리 기술의 급격한 성장은 배터리 폐기물로 인한 환경적·경제적 문제를 해결하기 위한 지속 가능한 재활용의 시급한 필요성을 부각시키고 있다. 본 연구에서는 사용 후 미드니켈 양극재를 고성능 단결정 하이니켈 양극재로 전환하는 액화염 기반 업사이클링 방법을 제시한다. $LiOH$–$LiNO_3$–$Ni(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ 공융염을 활용한 이 방법은 행성형 (planetary) 원심 혼합을 통해 액체와 유사한 환경을 조성하여 원소 확산과 미세구조 정제를 가속한다. 이러한 염의 in situ 액화는 전구체의 매끄러운 결합을 가능하게 하여 조성 균일성을 확보하고 불순물 생성을 최소화한다. 기존의 고상법과 비교할 때, 본 방법은 rock-salt 상 형성을 현저히 억제하고, 우수한 사이클 안정성과 속도 특성을 갖춘 전기화학적 성능 향상을 달성하였다. 또한, 이 접근법은 온실가스 배출과 에너지 소비를 줄일 수 있는 환경적·경제적 장점을 지니며, 배터리 폐기물 관리에 새로운 해결책을 제공하고 차세대 양극재의 지속 가능한 생산 가능케 할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Yoon, M., Park, J. S., Chen, W., Huang, Y., Dai, T., Lee, Y., Shin, J., Lee, S., Kim, Y., Lee, D., Shin, D., Cho, J., Dong, Y., Li, J. Upcycling spent medium-Ni cathodes via novel liquified salt sourcing, Energy & Environmental Science, 18(12), 5902-5912 (2025).

CT-B3

전기화학적 보조를 활용한 DBD 공기 플라즈마 질소 고정을 통한 암모니아 생성

황건덕[1,2], 장 민[1,2*]

[1]광운대학교 공과대학 환경공학과, [2]플라즈마바이오연구 센터

Electrochemical assisted DBD air plasma nitrogen fixation for ammonia generation

Kien Tiek Wong[1,2], Min Jang[1,2*]

[1]Kwangwoon University Environmental Engineering, [2]Plasma Bioscience Research Center

Abstract

The Haber-Bosch (H-B) process is a mature technology for synthesizing ammonia that has been used for over a century.[1] However, this process has significant drawbacks, as it requires high temperatures (>400°C) and pressures (>200 atm) and relies on pure N_2 and H_2. The use of hydrocarbon reforming to produce the necessary hydrogen contributes to a substantial environmental impact, releasing over 450 million metric tons of CO_2 annually. A fundamental challenge in nitrogen fixation is the enormous cleavage energy of the dinitrogen triple bond (N≡N), which is 410 kJ mol^{-1}. Plasma technology has emerged as a promising alternative for clean ammonia synthesis, as plasmas are highly effective at rupturing the strong nitrogen bond at low temperatures. In our study, we investigated a combined approach of air plasma with electrochemical reduction as a novel nitrogen fixation method. We demonstrate that rupturing the N≡N bond with air plasma significantly assists the reduction of nitrogen to NH_3 with high selectivity, using a copper nanowire mesh as the catalyst. The mechanism involves plasma discharge activating N_2 into an ionized state, which then oxidizes into nitrite (NO_2^-) and nitrate (NO_3^-) at the gas-liquid interface. The reduction of these nitrogen oxides has a more positive potential than direct N_2 reduction, making them favorable cathodic reactions for NH_3 formation. While plasma discharge alone suffers from low selectivity for NH_3 and a reverse reaction where NH_3 is oxidized to NO_2^-/NO_3^-, the combination of plasma and electrolysis was proven to be highly effective. This combined method achieved a high concentration of NH_3 with a Faradaic efficiency exceeding 90%.

References

1. W. Liu, M. Xia, C. Zhao, B. Chong, J. Chen, H. Li, H. Ou and G. Yang, *Nature Communications*, 2024, **15**, 3524.

에너지전환

(일반 구두발표)

2025년 9월 25일(목) 15:10~15:50
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀C

CT-C1

유동층 반응기에서의 Polylactic acid(PLA)와 Polyhydroxybutyrate(PHB)의 열화학적 전환 특성 연구

이태원[1], 정의명[1], 안태휘[1], 이찬영[1], 심지빈[1], 오예은[1], 박영권[1], 서명원[1*]
[1]서울시립대학교 환경공학과

Study on the characteristics of thermochemical conversion of Polylactic acid(PLA) and Polyhydroxybutyrate(PHB) in fluidized bed

Tae Won Lee[1], Ui Myung Chung[1], Tae Hwi An[1], Chan Young Lee[1], Ji Bin Sim[1], Ye Eun Oh[1], Young Kwon Park[1], Myung Won Seo[1*]
[1]*School of Environmental Engineering, University of Seoul*

전 세계적으로 폐플라스틱 발생량이 증가하면서, 이로 인해 발생하는 온실가스를 감축하기 위한 하나의 방법으로 바이오플라스틱이 제시되었다. 따라서 전 세계적으로 바이오플라스틱의 생산량은 꾸준히 증가하고 있으며, 2050 탄소중립 시나리오의 폐기물 부문 탄소 배출량 감축 수단 중 하나로 플라스틱의 47%를 바이오플라스틱으로 대체하는 방법이 제시되기도 하였다. 하지만 실제로 바이오플라스틱의 생분해는 잘 이루어지지 않으며, 따라서 바이오플라스틱의 열화학적 전환을 통한 화학적 재활용에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 Polylactic acid(PLA)와 Polyhydroxybutyrate(PHB)를 대상으로 유동층 반응기에서 열분해와 수증기 가스화를 통해 열화학적 전환 특성에 대해 분석하였다. 유동층 반응기에서는 600-900℃에서 연속식으로 열분해와 수증기 가스화를 수행하였다. 연구 결과 PLA는 주로 가스상 물질로 CO를 주로 생성하였고, PHB는 CO_2를 주로 생성하였다. 전체 가스 수율은 최대 수율 기준 PLA가 열분해와 가스화에서 각각 49.44mmol/g_{fuel}, 45.87mmol/g_{fuel}로, 각각 25.31mmol/g_{fuel}, 30.29mmol/g_{fuel}인 PHB보다 더 높았다. H_2 수율은 PHB가 더 높았으며, 900℃에서 최대 7.27mmol/g_{fuel}의 수율을 보였다. 타르 농도는 PLA의 경우 온도에 따라 감소하였으며, 900℃에서 열분해와 수증기 가스화 각각 4174.71, 1132.17mg/Nm^3으로 최솟값을 보였다. PHB의 경우 600℃에서 최대 타르수율을 보였으며, 700℃에서 열분해와 가스화에서 각각 7722.82, 3276.19mg/Nm^3으로 최소가 되고, 900℃로 증가할수록 타르 농도가 증가하였다. PLA는 Acrylic acid, Propionic acid, Lactide가 타르의 주요 물질이었으며, 온도가 증가할수록 고리 수가 많은 방향족 탄화수소가 증가하였다. PHB는 Crotonic acid가 타르의 주요 물질이며, 600℃, 그리고 900℃에서 고리 수가 많은 방향족 탄화수소가 크게 증가하였다. 본 연구는 바이오플라스틱의 화학적 재활용을 위한 기초 자료로 사용될 수 있을 것이다.

CT-C2

Coupled Electrosynthesis of Formate via Formaldehyde Oxidation and CO_2 Reduction

Jin Ho Lee, Hee Soo Kim, Dong-Ha Lim*

Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Ulsan 44413, Republic of Korea

The electrochemical conversion of CO_2 into value-added products such as formic acid offers a compelling route toward carbon-neutral energy systems [1]. Despite recent progress, the overall energy efficiency of CO_2 electrolysis remains a major hurdle, largely due to the high overpotential associated with the anodic oxygen evolution reaction (OER). To address this limitation, we present a paired electrolysis system that replaces OER with the formaldehyde oxidation reaction (FOR), enabling a significant reduction in the energy input required for continuous operation.

By coupling FOR at the anode with CO_2 reduction at the cathode, this system facilitates formate generation at both electrodes, effectively doubling product output while operating at substantially lower cell voltages. The strategy leverages the inherent thermodynamic favorability of organic oxidation reactions and broadens the design space for electrochemical systems by moving beyond the conventional reliance on water oxidation.

This work demonstrates the potential of alternative anodic chemistries to unlock new efficiencies in electrochemical processes. Furthermore, it offers a versatile platform that can be extended to various cathodic transformations, laying the groundwork for the development of integrated, low-energy electrosynthetic technologies aimed at sustainable fuel and chemical production.

Acknowlegement

This work was supported by the Commercializations Promotion Agency for R&D Outcomes(COMPA) grant funded by the Korean Government(Ministry of Science and ICT) (RS-2023-00304763)

References

1. Birdja, Y. Y.; Pérez-Gallent, E.; Figueiredo, M. C.; Göttle, A. J.; Calle-Vallejo, F.; Koper, M. T. M. Advances and Challenges in Understanding the Electrocatalytic Conversion of Carbon Dioxide to Fuels. *Nat. Energy* **2019**, *4* (9), 732–745.

청정융합

(일반 구두발표)

2025년 9월 25일(목) 09:00~11:15
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀C

CT-D1

Eco-friendly Textile Dyes Remediation Using the Ciliated Protist *Dexiostoma* sp.

Muhammad Tariq Zahid, Ghulam Mustafa, Ju-Hyeok Kwon, Nikita Yadav, and Byong-hun Jeon*

Department of Earth Resources & Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, South Korea

Free-living protozoans are an integral component of microbial communities in aquatic environments. They have been reported in industrial wastewater, highlighting their potential in the bioremediation of aquatic pollutants in association with other microbiota. However, their role in textile effluents remains largely unexplored. The present study investigates the potential of a ciliated protist, *Dexiostoma* sp., for the bioremediation of four textile dyes, namely Direct Blue 284, Direct Red 80, Reactive Blue 5, and Reactive Blue 19. Under optimal conditions (pH 7, 27±1 ºC, and 100mg/L initial dye concentration), decolorization efficiencies determined via spectrophotometer were 32%, 18%, 32%, and 29%, respectively. The degradation process was further investigated using UV-Vis spectroscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). FTIR analysis revealed shifts in characteristic peaks associated with C-N, C-H, C=C, and N-H functional groups of dyes, along with the appearance of new peaks indicating the formation of metabolites after degradation. GC-MS analysis identified key degradation intermediates, including N-hydroxyaniline, bis(2-ethylhexyl) phthalate, and 2,4-di-tert-butylphenol. These findings highlight the potential of *Dexiostoma* sp. for the eco-friendly remediation of textile dyes in industrial wastewater.

Keywords: *Dexiostoma* sp., textile dyes, industrial wastewater, decolorization, bioremediation

Acknowledgment

This study was supported by the Basic Research Laboratory (No. RS-2023-00219983) through the National Research Foundation (NRF), Ministry of Education, Science, and Technology (MEST) of the South Korean government.

CT-D2

오픈소스 데이터를 활용한 분리막 성능 예측

손문[1,2,*]
[1]한국과학기술연구원, [2]과학기술연합대학원대학교

Machine Learning Models utilizing Open-Source Data for Predicting Membrane Separation Performances

Moon Son[1,2,*]
[1]Korea Institute of Science and Technology, [2]University of Science and Technology

분리막(Membrane) 기술은 물리적 상분리를 가능하게 하므로, 환경 및 화학 공정에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 특히 해수담수화 공정에서는 역삼투(Reverse Omsosis) 기반의 분리막 기술이 널리 상용화되고 있다. 해수담수화용 RO 공정의 분리막 성능은 크게 물투과도(A, Water Permeability) 및 염투과도(B, Salt Permeability)로 성능을 표현할 수 있는데, 이상적인 분리막은 물투과도가 높으면서 염투과도는 낮은 분리막이다. 이러한 분리막 성능을 예측하기 위한 많은 이론적 시도들이 보고되었지만, 분리막의 구조적, 화학적 복잡성이 높아 성능을 정확히 예측할 수 있는 모델은 보고되지 않았다.
본 발표에서는 분리막의 분리 성능을 예측하기 위해 과학자들의 자발적 오픈소스 데이터 저장소에 기록된 데이터를 활용하였다(Open Membrane Database)(Chae et al. [1]). 해당 저장소는 미국, 유럽, 아시아 등 전세계 주요 대학 및 연구소의 분리막 관련 연구자들이 자발적으로 데이터를 올려두기 때문에 이를 통해 학습된 인공지능 모델은 높은 범용성을 가질 수 있다. 다수의 기계학습 모델이 테스트되었고, 입력 인자로는 실험조건과 같은 연속적 숫자데이터 뿐만 아니라 분리막 구조정보와 같은 텍스트 정보도 변환되어 활용되었다. 예측정확도가 가장 높은 2가지 모델에 대해 추가적인 연구가 수행되었으며(CatBoost 및 Extremely Randomized Trees), 민감도 분석 및 최소한의 변수를 활용한 모델 재학습을 통해 높은 정확도로 분리막 분리 성능을 예측할 수 있었다(R^2>0.92). 따라서, 본 연구는 노동집약적이고 오랜 시간이 걸리는 분리막 성능 예측실험을, 분리막 물성등을 통해 간접적으로 손쉽게 예측할 수 있는 인공지능 모델을 개발했다는 점에서 의의를 가진다.

참고문헌

1. Chae, SH., Hong, SW., Son, M., and Cho, KH., "Determining water and solute permeability of reverse osmosis membrane using a data-driven machine learning pipeline," *Journal of Water Process Engineering*, **64**, (2024).

CT-D3

Boosting Methane Recovery in Microbial Electrochemical System by Using Food Waste-Fed Anolyte

Bikram Basak*, Chanyeong Lee[1], Byong-Hun Jeon[1,*]
Center for Creative Convergence Education and Resource Development Research Institute, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea, Email- bikrambasak@hanyang.ac.kr
[1]Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea, Email- bhjeon@hanyang.ac.kr

Microbial electrosynthesis (MES) is a promising technology for methane production via electromethanogenesis, offering a sustainable approach for converting carbon dioxide into biofuels. However, improving electron transfer efficiency remains a critical challenge [1]. In this study, we developed a modified MES (MMES) system by incorporating organic waste and heat-treated anaerobic digestion sludge (ADS) into the anode chamber, aiming to enhance electron availability and boost methane recovery. Unlike conventional MES, where electrons are primarily derived from the electrolysis of the electrolyte [2], the MMES system benefits from additional electron supply through the decomposition of organic waste. As a result, MMES achieved a methane yield of 43.55 mL, approximately 1.52 times higher than conventional MES (28.74 mL). Cyclic voltammetry (CV) analysis further confirmed more active redox reactions in MMES. Electrode biofilms were characterized via field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and confocal laser scanning microscopy (CLSM). Microbial community analysis based on 16S rRNA gene sequencing revealed that the predominant methanogens in the cathode chamber suspension and electrode biofilm were *Methanosaeta*, *Methanobacterium*, and *Methanolinea*, with *Methanosaeta* dominance suggesting acetoclastic methanogenesis as the primary pathway. Homoacetogenic bacteria (*Acetobacterium*, *Clostridium*) contributed to CO_2 and H_2 conversion into acetate, providing substrates for methanogenesis. The presence of *Smithella* and Candidatus *Cloacimonas* in the cathode biofilm indicated organic matter conversion to acetate. Additionally, a small proportion of electroactive bacteria (*Geobacter*, *Pseudomonas*, etc.) suggested that direct interspecies electron transfer (DIET) from the electrode may have played a crucial role. This study highlights the effectiveness of enhanced electron transfer in MES for improved methane recovery, offering insights into optimizing bioelectrochemical systems for sustainable energy production.

References

1. Song, Y. E., Mohamed, A., Kim, C., Kim, M., Li, S., Sundstrom, E., Beyenal, H., Kim, J. R., "Biofilm matrix and artificial mediator for efficient electron transport in CO2 microbial electrosynthesis," Chem. Eng. J., **427**, 131885 (2022).
2. Liua, C., Suna, D., Zhaoc, Z., Danga, Y., Holmes, D. E., "*Methanothrix* enhances biogas upgrading in microbial electrolysis cell via direct electron transfer", Bioresour. Technol., **291**, 121877 (2019)

Acknowledgment

This study was supported by the National Research Foundation (NRF) of the Republic of Korea through the Basic Research Laboratory Support Program (Grant No. RS-2023-00255939) and Midcareer Research Program (Grant No. RS-2025-00520940) of the Ministry of Education and Government of Republic of Korea.

CT-D4

Plugging into Fermentation — External Electrons as a New Metabolic Axis for Sustainable and Redox-Limited Bioprocesses

Changman Kim[1,*], Da Seul Kong[2], and Jung Rae Kim[2]

[1]Department of Biotechnology and Bioengineering, Chonnam National University, Gwangju, 61188, Republic of Korea

[2]School of Chemical and Biomolecular Engineering, Institute for Environment and Energy, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

Recent advances in fermentation technology have improved strain engineering, process control, and reactor design, yet a fundamental limitation remains unresolved: the thermodynamic constraints imposed by intracellular redox balance. Microbial production of reduced compounds is often restricted by insufficient reducing equivalents, leading to inefficient carbon utilization and increased resource demand. We propose a sustainable approach that employs external electrons as programmable metabolic inputs, enabling direct modulation of intracellular redox state without altering core reactor configurations. This concept is demonstrated through two complementary strategies: electro-fermentation, which applies controlled electrical input to regulate redox balance, and a metallic-electron donation system (MDS) utilizing zero-valent iron to supply electrons via microbiologically influenced corrosion. Both systems achieved substantial redirection of metabolic fluxes and improved yields of reduced products, thereby increasing substrate-to-product conversion efficiency. Importantly, MDS provides a low-cost, hardware-light platform that can be seamlessly integrated into conventional fermentation workflows, reducing energy requirements and process complexity. This approach does not propose a replacement for existing fermentation systems, but rather introduces a missing axis of control that improves current processes. Yield, too often seen as the outcome of strain or upstream design, can be unlocked by rethinking how we engineer the process itself, offering new opportunities for greener and more resource-efficient biomanufacturing.

References

1. Kim, C., Kim, M.Y., Michie, I., Jeon, B.-H., Premier, G.C., Park, S., Kim, J.R., “Anodic electro-fermentation of 3-hydroxypropionic acid from glycerol by recombinant Klebsiella pneumoniae L17 in a bioelectrochemical system,” Biotechnology for Biofuels, 10, 211 (2017).
2. Kim, C., Lee, J.H., Baek, J., Kong, D.S., Na, J.G., Lee, J., Sundstrom, E., Park, S., Kim, J.R., “Small current but highly productive synthesis of 1,3-propanediol from glycerol by an electrode-driven metabolic shift in Klebsiella pneumoniae L17,” ChemSusChem, 13(3), 564-573 (2020).
3. Kong, D.S., Kim, M., Li, S., Mutyala, S., Jang, M., Kim, C., Kim, J.R., “Bioconversion of glycerol to 1,3-propanediol using Klebsiella pneumoniae L17 with the microbially influenced corrosion of zero-valent iron,” Fermentation, 9(3), 233 (2023).

CT-D5

Enhanced Adsorptive Removal of Genotoxic Dyes Using Zinc-Activated Rice Straw Cellulose: A Parametric Study

Ramesh Kumar[1], Sankha Chakrabortty[2], Kilhong Seol[1], Kung-Won Choi[1], Muhammad Tariq Zahid[1], Byong-Hun Jeon[1]

[1]Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

[2]School of Chemical Technology, Kalinga Institute of Industrial Technology, Bhubaneswar, Odisha, India-751024

E-mails: rameshibt@hanyang.ac.kr (R. Kumar); bhjeon@hanyang.ac.kr (B-H. Jeon)

Cellulose extraction from agricultural biomass presents a viable strategy for solid waste management and offers significant potential in adsorption-based separation processes. However, the effective removal of certain persistent dyes, such as malachite green, remains challenging when using unmodified cellulose, thereby limiting its practical applicability. To address this issue, this study explores the use of zinc oxide-modified cellulose to enhance adsorption performance through improved surface area, porosity, and chemical reactivity. The structural and chemical characteristics of the zinc oxide-treated cellulose were analyzed to assess its suitability as an adsorbent. Adsorption performance was evaluated through equilibrium and kinetic studies for malachite green removal, with further optimization techniques, such as response surface methodology. Optimal conditions of zinc oxide-treated cellulose dose of 0.4 g/L, malachite green concentration of 30 mg/L, solution pH of 7, operating temperature of 30 °C, and agitation speed of 100 rpm, achieved a high removal efficiency of 98%. The integration of green material development using zinc oxide and biomass-derived cellulose, along with optimization techniques, reinforces the pathway toward sustainable dye-containing wastewater treatment technologies.

Keywords: Agro-waste biomass; Extracted cellulose fibre; Biopolymers; Malachite green adsorption; Optimization process; Circular economy

Acknowledgment

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government (MSIT)(RS-2025-00520940).

References

[1] P. Chakraborty, R. Kumar, S. Chakrabortty, S. Saha, S. Chattaraj, S. Roy, A. Banerjee, S.K. Tripathy, A. Kumar Ghosh, B.-H. Jeon, "Technological advancements in the pretreatment of lignocellulosic biomass for effective valorization: a review of challenges and prospects," *J. Ind. Eng. Chem*. 137, 29-60, 2024.

[2] G. Mustafa, A. Younas, M.T. Zahid, D.-W. Kim, I. Jamil, N. Yadav, M.B. Kurade, S. Saha, K.K. Yadav, B.-H. Jeon, "Bioremediation of reactive blue 19 dye by laccase-producing *Serratia marcescens* AY4 strain," *J. Environ. Chem. Eng.* 13(2) 115605, 2025.

CT-D6

태양광 기반 H_2O_2 생성 성능 향상을 위한 $SnS_2/g\text{-}C_3N_4$ 이종접합 광촉매 개발

종초은[1,2], 장 민[1,2*]
[1]광운대학교 공과대학 환경공학과, [2]플라즈마바이오과학연구센터

SnS_2/gC_3N_4 heterojunction photocatalysts development for improving solar driven H_2O_2 production

Choe Earn Choong[1,2], Min Jang[1,2*]
[1]Kwangwoon University, Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Republic of Korea, [2]Plasma Bioscience Research Center/Department of Electrical and Biological Physics, Kwangwoon University, Seoul 01897, Republic of Korea.

본 연구에서는 이황화주석(SnS_2) 내에 고가의 주석($Sn^{\delta+}$)을 형성하는 새로운 합성 전략을 제안하였으며, 이를 $g\text{-}C_3N_4$와 결합하여 $g\text{-}C_3N_4/SnS_2$ 이종접합 광촉매를 제작하였다. In-situ XPS 분석을 통해 전하가 $g\text{-}C_3N_4$에서 SnS_2로 이동하는 방향으로 전자 전달이 이루어짐을 확인하였다. 또한, 밀도 범함수 이론(DFT) 계산을 통해 SnS_2와 $g\text{-}C_3N_4$ 간의 계면에서 강한 전자 궤도 혼성화에 의해 밴드 간(interband) 전이 상태가 생성되었으며, 광여기된 전자는 $g\text{-}C_3N_4$의 탄소 원자 로부터 SnS_2의 황로 이동하여 Z-스킴 이종접합 구조가 형성됨을 확인하였다. 최적의 광촉매 $g\text{-}C_3N_4/SnS_2\text{-}2$ (SnS_2 2% 도핑)는 405 nm 파장에서 IPA를 희생 시약으로 사용한 조건 하에 7.186 mmol g^{-1} h^{-1}의 높은 H_2O_2 생성 활성을 나타냈다. $g\text{-}C_3N_4/SnS_2$ 이종 접합체는 전하 전달 저항을 감소시키고 전자 비-방사성 전자 소멸 시간을 증가시켜 전하 분리 성능을 향상 시켰다. SnS_2 도핑은 $g\text{-}C_3N_4$ 내 반결합 궤도함수의 점유를 감소시키고, O_2 및 하이드로퍼옥시 라디칼(OOH*)의 흡착에 필요한 에너지 장벽을 효과적으로 저감시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 $g\text{-}C_3N_4$에 SnS_2를 도핑함으로써 $Sn^{\delta+}$ 상태가 유도되고 Sn 5s–O 2p 상호작용이 강화되어, O_2 및 OOH*의 흡착에 따른 에너지 장벽이 저감된 데 기인한다. *In-situ* 표면 증강 라만 분광(SERS) 분석을 통해, 광조사 조건 하에서 $g\text{-}C_3N_4/SnS_2$ 표면에서 OOH* 라디칼이 생성됨이 실험적으로 확인되었다. 기술경제성 분석(TEA)을 통해, 분리 공정의 제약으로 인해 광촉매 기반 H_2O_2 생산은 경제적으로 타당하지 않음이 입증되었다.

참고문헌

1.Choe Earn Choong, Kwangpyu Hong, Kien Tiek Wong, Zong Yang Kong, Ao Yang, Farahin Mohd Jais, Yeomin Yoon, Eun Ha Choi, Min Jang, 'Overlooked roles of high-valence Sn in SnS_2 loaded on gC_3N_4 for enhanced photocatalytic H_2O_2 production: Mechanism, DFT, and techno-economic analysis study', *Journal of Energy Chemistry*, 108,154-164, 2025.

CT-D7

Bioremediation of emerging contaminants using aquatic macrophytes

Nikita Yadav, Sanjay P. Govindwar, Byong-Hun Jeon*

Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea (Republic of)

**Corresponding author. Tel: +82 2 2220 2242, E-mail: bhjeon@hanyang.ac.kr*

Emerging contaminants (ECs) are affecting the environment and living beings even in trace amounts present in waterbodies [1]. Bioremediation offers an alternative to conventional tertiary treatment of wastewater through efficient removal of ECs in cost effective manner [2,3]. *Iris pseudacorus* and the attached periphyton for synergistic biodegradation of three frequently found ECs was assessed in the current study. *I. pseudacorus* showed removal of 100%, 83%, and 78% for sulfamethoxazole (SMX), sulfamethazine (SMZ), and doxylamine (DOX), respectively, at the concentration of 0.05 mg L^{-1}, and the respective values at the higher concentration were 50%, 42%, and 59%, in 10 days. The mass balance according to individual studies showed that the major removal mechanism for SMX and SMZ was biodegradation, while it was bioadsorption for DOX. Furthermore, plants followed first-order kinetics for the removal of SMX and SMZ, while pseudo-first order (0-1 day) and first order (1-10 days) kinetics were followed for DOX. The removal rate of SMX increased by 26% on the first day with *I. pseudacorus* and a periphytic biofilm consortium, compared with the values corresponding to their individual performances. The identified metabolites of SMX were less toxic than the parent compound. A phytoreactor (30 L) planted with *I. pseudacorus* and the periphytic biofilm consortium facilitated improved removal of these ECs and reduction of organic/inorganic compounds in secondary wastewater effluent.

Keywords: Phytoremediation; Emerging Contaminants; Aquatic macrophytes;Toxicity.

References

1 Quiñones, D.H., *et al.* Removal of emerging contaminants from municipal WWTP secondary effluents by solar photocatalytic ozonation. A pilot-scale study. *Sep Purif Technol* **149**, 132-139, doi:10.1016/j.seppur.2015.05.033 (2015).

2 Santos, F., *et al.* Removal of veterinary antibiotics in constructed wetland microcosms - Response of bacterial communities. *Ecotoxicol Environ Saf* **169**, 894-901, doi:10.1016/j.ecoenv.2018.11.078 (2019).

3 Guittonny-Philippe, A., *et al.* Selection of wild macrophytes for use in constructed wetlands for phytoremediation of contaminant mixtures. *J Environ Manage* **147**, 108-23, doi:10.1016/j.jenvman.2014.09.009 (2015).

CT-D8

Sustainable Photocatalytic Approaches for Addressing Emerging Contaminant Challenges through Advanced Oxidative Pathways

Hyoung-il Kim[1,2]*

[1]*Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea*

[2]*Future City Open Innovation Center, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang 37673, Republic of Korea*

E-mail: hi.kim@yonsei.ac.kr

<Instructions for abstract>

Abstract**:** *Sustainable photocatalysis has emerged as a powerful platform for mitigating the risks posed by emerging contaminants, which are often resistant to conventional treatment processes. By harnessing solar energy to activate advanced oxidative pathways, photocatalytic systems enable the in-situ generation of reactive oxygen species (ROS) capable of mineralizing a wide spectrum of recalcitrant organic pollutants. Recent advances in catalyst design, including the development of metal-free systems, heterojunction architectures, and surface-engineered semiconductors, have significantly enhanced light absorption, charge separation, and ROS production efficiency. These innovations not only improve degradation kinetics but also align with environmentally sustainable principles by utilizing abundant resources such as water and oxygen as reactants. In this paper, we highlight sustainable photocatalytic approaches for addressing emerging contaminant challenges, with a focus on the underlying oxidative mechanisms, material design strategies, and potential applications in water purification and environmental remediation.*

References

[1] Applied Catalyst B: Environment and Energy, 2024, 124847

[2] Applied Catalyst B: Environment and Energy, 2024, 124264

[3] Advanced Energy Materials, 2023, 2301166

대기환경

(일반 구두발표)

2025년 9월 25일(목) 09:00~11:10
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀A

CT-E1

철강산업의 탄소중립을 위한 저에너지형 CO_2 포집기술 개발

김광휘[1,*], 최예지[1], 김경택[1], 최정호[1], 안치규[1]
[1]포스코홀딩스 미래기술연구원 수소저탄소연구소

Development of Low-Energy CO_2 Capture Technology for Carbon Neutrality in the Steel Industry

Kwanghwi Kim[1,*], Yeji Choi[1], Gyeong Taek Kim[1], Jeongho Choi[1], Chikyu Ahn[1]
Hydrogen and Low-Carbon R&D Lab., POSCO N.EX.T Hub, 67, Cheongam-ro, Nam-gu, Pohang, 37673, South Korea

국내 철강산업은 유럽연합(EU)의 탄소국경조정제도(CBAM), 미국의 청정 경쟁법(CCA) 등 글로벌 탄소 규제 강화로 인해 이전에 경험하지 못한 위기 상황에 직면하고 있다. 특히, 국내 철강산업은 연간 약 1억 1,700만 톤의 온실가스를 배출하며, 이는 국내 전체 배출량의 약 16.7%를 차지하는 대표적 탄소집약적 산업으로 분류된다. 따라서, 국내 철강업계는 이와 같은 위기상황을 극복하고 새로운 경쟁력을 확보하기 위해 탄소중립 목표를 설정하고, 저탄소 철강 생산 기술개발을 활발히 추진하고 있다. 대표적인 기술적 접근법으로는 기존의 코크스를 대체하여 수소를 활용한 철강 생산 기술인 HyREX 기술과 고로 공정을 대체할 수 있는 전기로 공정 도입 등이 있으며, 이를 통해 철강 생산 공정의 탄소집약도(Carbon intensity, tCO_2/tCS)를 저감하기 위한 노력을 기울이고 있다.

그러나, 이러한 기술 개발 및 도입 노력에도 불구하고 높은 수소 원료비와 전력 가격, 초기 투자비 부담, 기술적 난제 등으로 인해 상용화에 여전히 어려움을 겪고 있다. 이에 따라 이산화탄소 포집 및 활용·저장 기술 (Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS)이 탄소중립으로의 전환 과정에서 필수적인 브릿지(bridge) 기술로 주목받고 있다.

본 발표에서는 철강산업의 탄소중립 달성을 위한 저에너지형 CO_2 포집기술 개발 및 현황에 대해 소개하고자 한다.

참고문헌

1. Han et al., "Current status and challenges of the ammonia-based CO_2 capture technologies toward commercialization", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 14, 270-281 (2013).

2. Han et al., "Performance of an ammonia-based CO_2 capture Pilot facility in iron and steel industry", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 27, 239-246 (2014).

3. Pang et al., "The Low-Carbon Production of Iron and Steel Industry Transition Process in China", *Steel research international*, 95(3), 2300500 (2024).

CT-E2

플라즈마 처리를 통한 결함 제어 MOF의 메탄 흡착 성능 향상

이희정*, 최재령
한국재료연구원

메탄(CH_4)은 이산화탄소(CO_2)보다 약 28배(GWP20 기준) 높은 지구온난화잠재력(GWP)을 가지는 강력한 온실가스로, 대기 중 농도가 빠르게 증가하며 지구 온난화에 크게 기여하고 있다. 그러나 메탄은 비극성이며 분자량이 작아 대부분의 고체 흡착제에서 흡착 효율이 제한적이다. 본 연구에서는 우수한 구조 안정성과 정밀한 기공 제어 특성을 갖춘 지르코늄(Zr) 기반 금속-유기 골격체(MOF)인 MOF-801을 활용하였다. 메탄 흡착 성능 향상을 위해 상압 조건에서 N_2/O_2 혼합 플라즈마 처리를 적용하여 MOF 표면에 국소적인 결함(defect)을 형성하였으며, 이를 통해 메탄과 MOF 표면 간 상호작용을 강화하였다. 플라즈마 처리는 결정 구조를 유지하면서 표면 결함만을 선택적으로 생성할 수 있어, 기존 용액 기반 후합성(post-synthetic) 처리에 비해 친환경적이며 재현성과 공정 유연성이 뛰어나다. 본 연구 결과는 표면 결함 제어를 통한 MOF 기반 고체 흡착제의 메탄 흡착 성능 향상 가능성을 입증하였으며, 메탄 저감을 위한 새로운 공정적 접근 방안을 제시한다.

참고문헌

1. Xiang, W. et al., "The metal–organic framework UiO-66 with missing-linker defects: A highly active catalyst for carbon dioxide cycloaddition," *Applied Energy*, **277**, 115560 (2020).

2. Bae, J. et al., "Oxygen plasma treatment of HKUST-1 for porosity retention upon exposure to moisture," *Chem. Commun.*, **53**, 12100-12103 (2017).

CT-E3

탄소중립 달성을 위한 DAC 기술개발 현황

최정호, 김광휘, 최예지, 이가영, 안치규, 이만수*
포스코홀딩스 미래기술연구원 수소저탄소연구소

Current status of Direct Air Capture (DAC) technology development for achieving Net-Zero emissions

Jeongho Choi, Kwanghwi Kim, Yeji Choi, Chikyu Ahn, Gayoung Lee, Man Su Lee*
Hydrogen and Low-carbon R&D Laboratories, POSCO N.EX.T Hub, 67 Cheongam-ro, Nam-gu, Pohang 37673, South Korea

전 세계적으로 2050년 탄소중립 달성을 위해 대규모의 CO_2 제거가 필요한 실정이며, 단기적인 기후변화 온도의 overshoot을 고려할 때, 2100년까지 최대 4,000 억 톤 (2060년 이후 연간 100 억 톤)의 CO_2 감축이 필요한 실정이다.

직접 공기 포집 (Direct Air Capture, DAC)는 대기 중 CO_2를 직접 제거할 수 있는 주요 기술 중 하나로, 기후변화 완화의 핵심 수단으로 주목받고 있다.[1] DAC 기술은 크게 고체흡착식 (solid sorbent)와 액상 흡수식 (liqiud solvent)으로 구분된다.[2-3] 고체 흡착식은 Climeworks (스위스), Global Thermostat (미국) 등이 대표적이며, 80~120℃의 저온 재생과 모듈화가 가능하나, 대규모 CO_2 저감을 위한 흡착제 비용과 수분 민감성이 과제로 지적된다. 액상 흡수식은 Carbon Engineering (캐나다)이 대표적이며, KOH 용액을 이용해 대기 중 CO_2를 포집한 후 $CaCO_3$로 전환·소성 하는 방식으로 대규모 처리에 유리하나 900℃ 이상의 고온 재생이 필요한 단점을 지닌다. 최근, 재생에너지의 부하 변동에 대응성이 우수한 전기화학적 재생방법 (electrochemical regeneration) 기술이 주목받고 있으며, 이는 상온·상압 조건에서 CO_2를 분리할 수 있는 하나의 대안 기술로써 연구/개발되고 있다.

본 발표에서는 글로벌 DAC 기술의 기술별 원리, 주요기업·프로젝트 현황, 성능·비용 비교와 DAC 적용 가능성을 종합적으로 논의하고자 한다.

참고문헌

1. Li et al., “Direct Air Capture (DAC) for Achieving Net-Zero CO_2 Emissions“, *Advances, Applications, and Challenges. Eng.*, 5(3), 1298-1336 (2024).

2. Zeman et al., “Energy and Material Balance of CO_2 Capture from Ambient Air”, *Environ. Sci. Technol*, 41, 7558-7563 (2007).

3. Sodiq et al., “A review on progress made in direct air capture of CO_2”, *Environmental Technology & Innovation*, 29, (2023)

CT-E4

Atomically Dispersed Silver on Nanosheet-Stacked Amorphous Alumina for Enhanced NOx Reduction

Jungseob So[1], Jeong-un Jang[2], Ji Hoon Park[1], Young Woo You[1], Young Jin Kim[3], and Dong-Yeun Koh[2*]

[1]CO_2 & Energy Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT), Daejeon 34141, Republic of Korea

[2]Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34141, Republic of Korea

[3]Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Daegu 41566, Republic of Korea

Designing single-atom catalysts with strong metal–support interactions (MSI) critically depends on tailoring the anchoring sites of Al_2O_3, yet achieving such control remains challenging. In this study, we report an innovative strategy for synthesizing amorphous MOF-derived Al_2O_3 (mAl_2O_3) by collapsing the 1D micropore channels of Al-based MOF, MIL-53(Al), through an atmosphere-controlled thermal decomposition process to create abundant and structurally distinct anchoring sites. This approach generated a unique distribution of terminal hydroxyl sites—both OH-μ_1-Al^4 and OH-μ_1-Al^6—unlike conventional Al_2O_3, which predominantly exhibits OH-μ_1-Al^6. Deposition of 1 wt.% Ag onto mAl_2O_3 resulted in atomically dispersed Ag species, stabilized through strong MSI with the unique structure of these terminal hydroxyl groups.

In hydrocarbon-selective catalytic reduction (HC-SCR) of NOx, Ag(1)/mAl_2O_3 displayed significantly higher deNOx activity, outstanding water tolerance, unaffected activity upon changing reducing agents, and long-term stability, compared with conventional supports (**Figure 1**). In-depth surface characterization revealed that Ag(1)/mAl_2O_3 promoted the generation of reactive enolic intermediates and surface nitrates (NO_3^-), thereby accelerating the formation of isocyanate (–NCO), the pivotal intermediate in NOx reduction.

This work presents a novel synthetic strategy for engineering Al_2O_3 with tunable surface hydroxyl configurations, enabling the development of highly active and water-resistant single-atom catalysts for environmental catalysis.

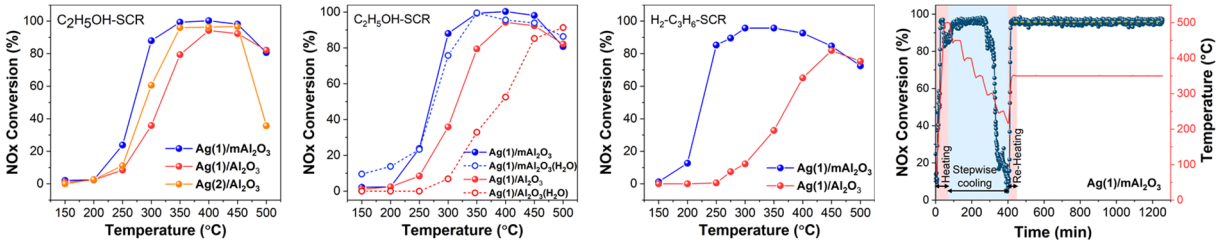


Figure 1. NOx conversion for (a) C_2H_5OH-SCR, (b) C_2H_5OH-SCR with water, and (c) H_2-C_3H_6-SCR NO over Ag/mAl_2O_3 and Ag/Al_2O_3 catalysts. (d) Stability test for C_2H_5OH-SCR over Ag(1)/mAl_2O_3 catalysts at 350 °C. Feed composition: 500 ppm NO, 2000 ppm C_2H_5OH, 10% O_2, 5% H_2O (when used), and a N_2 balance for C_2H_5OH-SCR and NO, 1333 ppm C_3H_6, 1% H_2, 10% O_2, and a N_2 balance for H_2-C_3H_6-SCR. GHSV 200,000 ml $g^{-1}h^{-1}$.

CT-E5

블루수소와 합성가스 동시 생산을 위한 흡착 소재 및 공정 기술 개발

윤형진, 강신욱, 박지찬, 박종호
한국에너지기술연구원

Development of Adsorptive Material and Process Technology for Simultaneous Production of Blue Hydrogen and Synthesis Gas

Hyung Jin Yoon, Shin Wook Kang, Ji-Chan Park, Jong-Ho Park
Korea Institute of Energy Research

탄소 중립에 대한 국가적 요구가 증가함에 따라 산업 각 부문에서 청정 수소를 적극 활용하고자 하는 의지 역시 커지고 있다. 완전한 의미의 탄소 중립을 위하여 궁극적으로는 재생에너지를 활용한 그린 수소를 활용하여야 하지만, 아직은 높은 그린 수소 생산 단가가 보급/확대에 걸림돌로 작용하고 있다. 블루 수소는 그린 수소 대비 생산 단가가 매우 저렴하면서도 이산화탄소의 배출이 없는 수소 생산 방식으로서, 그린 수소 사회로의 완전한 전환을 위한 가교 기술 (bridging technology) 역할을 수행할 것으로 예상되고 있다. 기존의 블루 수소 생산 공정은 메탄으로부터 수소를 추출하는 개질 기술에 CCS 기술을 연계한 공정이 대부분이다 (그레이 수소+CCS). 이는 두 개의 독립적인 공정 기술을 직렬로 연계한 것에 지나지 않기에, 공정 효율이 좋지 않고 이산화탄소 포집 비용에 따라 수소 생산 단가가 올라간다는 점이 지적받고 있다. 또한 포집된 이산화탄소의 활용 방안에 대한 논의 역시 필요한 상황이다. 청정 수소의 원활한 보급과 탄소 중립 달성을 위하여 경제성 있는 블루 수소 생산 기술의 개발이 필요하며, 이산화탄소를 포집하여 고부가제품으로 전환하여주는 기술 개발이 시급하다.
본 연구에서는 흡착부과반응을 통해 고순도의 수소를 생산하는 동시에, 부산물인 이산화탄소를 포집하고, 포집된 이산화탄소는 메탄 건식 개질 반응을 이용하여 합성가스가 병산되는 새로운 공정 개념을 제시한다. 본 반응 공정의 효율은 이산화탄소 흡착제의 흡착과 탈착 성능에 전적으로 기인한다. 흡/탈착 속도 개선을 위해 소재의 기공 및 표면 특성을 최적화하는 한 편, 장기 안정성 (long-term stability)을 증진하기 위하여 열적으로 안정한 물질인 Al_2O_3를 표면에 집중시키는 합성 기술을 개발하였다. 개발 흡착제는 상용 흡착제 대비 월등히 높은 흡착 성능을 보였으며, 30 회의 연속적인 흡/탈착 사이클동안 초기 흡착 성능이 전혀 감소하지 않아 내구성 측면에서도 우수성을 입증하였다. 개발된 흡착제 및 촉매를 1 L/min 규모 수소 생산 반응 시스템에 적용하였으며, 최적화를 통해 50 시간동안 고순도 수소와 합성가스가 안정적으로 생산됨을 실험적으로 증명하였다.

CT-E6

DFT-TST/CVT 기반 예측 방법론을 통한 반도체 공정가스의 GWP 산출 연구

최희철*, 박영춘, 장현우, 박준형
한국핵융합에너지연구원 플라즈마기술연구소

Estimation of GWP for Semiconductor Process Gases Using a DFT-TST/CVT based Predictive Methodology

Heechol Choi*, Youngchoon Park, Hyonu Chang, Jun-Hyoung Park
Korea Institute of Fusion Energy (KFE), Institute of Plasma Technology

요약문

본 연구는 반도체 산업에서 사용되는 공정 가스에 대한 지구온난화지수(GWP) 예측 방법론 개발을 목적으로 하였다. 이를 위해 밀도범함수이론(DFT)과 전이상태이론(TST), 정준 변분 전이 상태 이론(CVT)을 기반으로 PolyRate/GaussRate 프로그램을 활용하여 계산 방법론을 구축하였다.

먼저 DFT 계산으로 분자 구조 및 진동 스펙트럼을 최적화하여 복사 효율(RE)을 산출하였다. 이어 PolyRate/GaussRate 연계 계산을 통해 주요 대기 반응(OH 라디칼 등)에 대한 반응속도상수(k)를 CVT 기반으로 산출하고, 이를 이용해 대기 수명(τ)을 예측하였다.

예측된 복사 효율(RE)과 대기 수명(τ)을 IPCC 권고 GWP 산출식에 적용하여 100년 기준 GWP 값을 도출하였으며 기존 공정 가스(CF_4 , NF_3 , SF_6)에 대한 문헌값과 비교하여 제시된 예측 방법론의 신뢰성과 재현성을 확인하였다.

본 연구는 DFT-TST/CVT-PolyRate/GaussRate를 연계한 계산 접근법이 신규 공정 가스의 GWP를 사전 예측하는 유효한 방법론이 될 수 있음을 보여주며, 저-GWP 대체물질 개발 및 환경영향 평가의 기초 자료로 활용 가능하다.

참고문헌

1. Kohn and Sham, “Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects,” *Phys. Rev.*, 140, A1133-A1138 (1965).

2. Eyring, “The Activated Complex in Chemical Reactions,” *J. Chem. Phys.*, 3, 107-115 (1935)

3. Chai and Head-Gordon, “Long-range corrected hybrid density functionals with damped atom–atom dispersion corrections,” *J. Chem. Phys.*, 128, 084106 (2008).

4. Bao and Truhlar, “Variational Transition State Theory: Theoretical Framework and Recent Developments,” *Chem. Soc. Rev.*, 46, 7548-7596 (2017).

5. Zheng et al., “Polyrate 17: A Program for the Calculation of Chemical Reaction Rates of Polyatomic Species,” Univ. Minnesota (2017).

6. Zheng et al., “Gaussrate 17-B: A General Interface between the Gaussian Electronic Structure Program and the Polyrate Dynamics Program,” Univ. Minnesota (2017).

7. “IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Global Warming Potentials - Annex 7. In Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” (2021, values updated 2024).

CT-E7

Engineering Polymeric Architectures for CO_2 Separation: Molecular Design via Thermal Cross-Linking

Jong Suk Lee*

[1]Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Sogang University

Polymeric membranes offer a promising platform for CO_2 separation due to their law cost, high processability, and ease of integration. However, intrinsic limitations—such as the well-known permeability-selectivity trade-off, aging-induced permeability loss, plasticization under high CO_2 pressures—pose significant challenges for long-term and high-performance operation. Thermal cross-linking has emerged as a powerful strategy to address these limitations by inducing permanent microporosity and enhancing membrane stability. In this presentation, I will introduce a series of thermally cross-linked polymeric membranes with tunable microporous architectures, achieved via simple post-synthetic thermal treatment [1-3]. These membranes demonstrate improved gas permeability, resistance to plasticization, and long-term durability.

References

1. An, H., Lee, A. S., Kammakakam, I., Hwang, S. S., Kim J.-H., Lee, J.-H., Lee, J. S., "Bromination/debromination-induced thermal crosslinking of 6FDA-Durene for aggressive gas separations," *J. Membr. Sci.*, 545, 358366 (2018).
2. Yu, H. J., Chan, C.-H., Nam, S. Y., Kim, S.-J., Yoo, J. S., Lee, J. S., "Thermally cross-linked ultra-robust membranes for plasticization resistance and permeation enhancement—A combined theoretical and experimental study," *J. Membr. Sci.*, 646, 120250 (2022)
3. Shin, J. H., Yu, H. J., Jung, J., An, H., Park, J. H., Lee, A. S., Lee, J. S., "Extrinsically microporous polymer membranes derived from thermally cross-linked perfluorinated aryl-ether-free polymers for gas separation," *Nat. Commun.*, 16, 7143 (2025)

CT-E8

Catalyst design and reaction characterization for high-concentration NOx reduction in ammonia co-combustion exhaust

Jong-Hoon Lee, Hee Soo Kim* and Dong-Ha Lim*

Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan, Korea

Ammonia (NH_3) is emerging as a promising zero-carbon fuel for power generation and marine engines, due to its carbon-free combustion and high energy density. However, NH_3 co-combustion with conventional fuels produces significant concentrations of nitrogen oxides (NO_x), with the potential to affect emissions regulations and air quality. This presentation outlines the development of a high-concentration deNOx catalyst tailored for exhausts from ammonia co-combustion processes.

First, the combustion characteristics of pure NH_3 and co-firing in gas turbines and internal engines, highlighting typical exhaust compositions—particularly NO exceeding 1000 ppm. Next, we review recent demonstrations of ammonia-co-fired power plants and prototype ammonia-powered ships, where stringent IMO Tier III and future carbon-neutral regulations.

To meet these requirements, we have developed a monolithic selective catalytic reduction (SCR) catalyst based on transition metal oxide, exhibited catalytic activity for NO_x conversion at high inlet concentrations (500–2000 ppm NO), temperatures between 250–400 °C, and gas hourly space velocities (GHSV) of 10,000–20,000 h^{-1}. This discussion includes an insight for applications of these high-performance SCR catalysts in ammonia-fueled systems. The results indicate that tailored SCR catalysts can enable both ammonia co-combustion and ammonia-only propulsion to meet next-generation emission standards, supporting the transition to carbon-neutral energy.

References

1. Konsolaki, M., “Recent Advances on Nitrous Oxide (N_2O) Decomposition over Non-Noble-Metal Oxide Catalysts: Catalytic Performance, Mechanistic Considerations, and Surface Chemistry Aspects”, *ACS Catal.*, **5**(11), 6397–6421 (2015).

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Institute of Industrial Technology as "Development of the super clean modular platform technology based on AI for eco-friendly ship to respond to IMO 2020/2050 regulations” (KITECH EH-22-0014). This research was supported also by the Korea Electric Power Research Institute as “Development and bench-scale evaluation of high concentration NOx/NH3 reduction catalytic coating technologies”

자원순환

(일반 구두발표)

2025년 9월 25일(목) 09:00~11:20
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀B

CT-F1

The Recycling of Used Lithium-ion Battery Cathode Active Material with Electrochemical system

Minjoon Park*[1]

Department of Nanoenergy Engineering, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Republic of Korea[1]

As renewable energy plays a vital role in the energy industry, redox flow batteries (RFBs) are in the spotlight as energy storage systems (ESSs) that can increase efficiency by storing generated electricity. Among various aqueous electrolytes, zinc-manganese redox flow batteries (ZMRFB) using the alkaline anolyte and the acidic catholyte separated by two membranes independently have higher voltage (2.442 V vs. SHE) compared to other RFBs. Also, battery demand continues to surge dramatically, research into the recycling of battery materials is being explored extensively. Although numerous studies have been conducted, there is a lack of research on recycling strategies utilizing RFBs.

In this study, we reported that used LMO cathode active material can be recycled to the RFB cathode electrolyte. We flowed LMO powder containing sulfuric acid solution through a carbon felt (CF) electrode, enabling the electrochemical reaction for Mn reduction to occur. CF acted as a filter to trap LMO powder. Compared to conventional ZMRFB, recycled LMO RFB (RLRFB) showed higher energy efficiency due to conductive material in the powder. In addition, we precipitated manganese ions to Mn_3O_4 through pH control so that Li and Mn could be reused.

In summary, the RLRFB showed the high open-circuit voltage of 2.65 V with a cycling performance for 200 cycles, which was comparable to those of other aqueous RFBs. We proposed a new strategy for recycling lithium-ion battery cathode materials and expect it to be applied to other materials using the RFB recycling method.

References

1. D. Han, H. Jang, J. Choi, J. Park, S. Kim, S. Han, W. Lee, J. H. Lee, P. Oh*, Y. Han*, M. Park*, Direct Integration of Spent LiMn2O4 with High Voltage Aqueous Zinc-Manganese Redox Flow Batteries as a Practical Upcycling Process. Small 2025, 21, 2500787.

CT-F2

Sustainable Synthesis of Porous Materials from Industrial Waste for Environmental Applications

Sang Jeong Park[1,2], A Ra Cho[2,3], Hyungseok Nam[4], Yu-Ri Lee[2,5]*

[1]Department of Chemical and Biochemical Engineering, Korea University, Republic of Korea

[2]CCS Research Department, Korea Institute of Energy Research, Republic of Korea

[3]Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University, Republic of Korea

[4]School of Mechanical Engineering&IEDT, Kyungpook National University, Republic of Korea

[5]Department of Chemical Engineering, Kunsan National University, Republic of Korea

Recycling industrial wastes and recovering valuable metals is both environmentally and economically significant. This presentation summarizes research on recycling plastic waste as a precursor for metal–organic frameworks (MOFs), as well as reusing carbon residues and recovering valuable metals by leaching from spent lithium-ion batteries for industrial applications. In addition, the recovery of rare earth elements (REEs) using functionalized MOFs and mesoporous silicas will be introduced.

For the synthesis of MOFs using plastic wastes, three types of industrial plastics containing terephthalate such as polyethylene terephthalate (PET), polybutylene terephthalate (PBT), and polycyclohexylenedimethylene terephthalate (PCT), were depolymerized, and the reaction conditions were optimized to obtain a high yield of terephthalic acid for use as an organic linker of MOFs. The prepared MOFs derived from plastic wastes was applied as adsorbents for the removal of volatile organic compounds.

The waste carbon residue, referred to as battery powder (BP), was obtained from spent lithium-ion batteries through physical-pyrolysis and sieving. BP impregnated with K_2CO_3 was tested as an adsorbent for indoor CO_2 capture with its performance assessed using adsorption isotherms, thermogravimetric analysis (TGA), and 0.1 m^3 chamber test at low CO_2 level (1000–2000 ppm). Through XRD and FT-IR analyses, the adsorption mechanism between K_2CO_3 and CO_2 under moisture-containing indoor air conditions was confirmed. As part of further research, binder-free shaping spherical porous carbon beads impregnated with K_2CO_3 were synthesized as CO_2 adsorbent to reduce low pressure drop.

For REEs recovery, a highly stable MOFs (UiO-66 and MIL-101) with different organic functional groups and mesoporous silicas were synthesized and explored their effectiveness in separation and recovery of REEs in aqueous solutions.

References

1. Lee, Y.R., Cho, A.R., Kim, S.M., Kim, R.N., Wang, S., Han*, Y.S., Nam*,H.S., and Lee*, D.Y. *Chem. Eng. J.*, 470, 144232 (2023).
2. Lee, Y.R., Yu, K.S., Ravi, S.N., and Ahn, W.S*, Selective Adsorption of Rare Earth Elements over Functionalized Cr-MIL-101, *ACS Appl. Mat. Int.*, 10, 2391 (2018).
3. Lee, Y.R., Zhang, S., Yu, K.S., Choi, J.S., and Ahn, W.S*, Poly(amidoamine) dendrimer immobilized on mesoporous silica foam (MSF) and fibrous nano-silica KCC-1 for Gd3+ adsorption in water, Chem. Eng. J., 378, 122133 (2019).

CT-F3

함리튬 공정 부산물과 소각재를 활용한 청정 자원 순환 기술

김영재[1], 한요셉[2]
인하대학교[1], 한국지질자원연구원[2]

The roasting process for lithium extraction from Li-bearing wastes

Youngjae Kim[1], Yosep Han[2]
Inha University[1] Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources(KIGAM)[2]

본 연구에서는 재활용이 어려운 함리튬 폐기물로부터 친환경적이고 경제적인 리튬 회수 공정을 개발하였다. 기존 리튬이온배터리(LIBs) 재활용 공정에서 고온 건식 방식은 리튬이 슬래그에 농축되어 회수가 어려운 단점이 있었으며, 습식 공정의 경우 산을 사용해 환경 비용을 상승시키는 문제가 있었다. 이러한 문제를 해결하고자 본 연구는 도시 생활폐기물 소각재를 건식 배소 공정의 첨가제로 활용해 비교적 낮은 온도의 열처리로 리튬 함유 폐기물로부터 리튬을 회수하는 새로운 열화학적 공정을 제안하였다. 특히, 이 공정은 물을 사용하는 수침출 방식을 채택하여 친환경적이며, 침출 부산물은 자원화와 소각재내 유해 성분 제거라는 두 가지 목표를 동시에 달성하였다.

리튬이온배터리(LIBs)의 건식 재활용 공정에서 발생하는 함리튬 슬래그와 방화 유리 및 쿡탑 유리로 널리 이용되는 LAS(Lithium Aluminosilicate)계 유리 세라믹은 산화물 내 리튬이 안정적인 상태로 단단히 결합되어 있어 단순한 수침출로는 회수가 어려운 문제가 있다. 본 연구는 도시 생활폐기물 소각재에 풍부하게 함유된 알칼리(Na, K) 및 알칼리토금속(Ca, Mg) 산화물과 염화물(Cl) 성분을 활용하여, 고온 배소 과정에서 함리튬 폐기물의 구조를 효과적으로 분해하고 리튬을 용해성 화합물로 전환시키는 첨가제로 활용하였다. 이러한 접근법은 고순도의 시약급 첨가제를 사용함에 따라 발생하는 경제적, 환경적 문제를 해결할 수 있다.

연구 결과, 도시 생활 폐기물 소각재를 첨가하는 경우 배소 공정 후 물을 이용한 간단한 침출만으로도 리튬을 효율적으로 회수할 수 있음을 확인하였다. 이 공정은 리튬 회수뿐만 아니라, 도시 생활 폐기물 소각재 내 염화물과 중금속을 휘발시켜 유해성을 저감시키는 추가적인 효과를 제공한다. 즉, 본 연구에서 제안하는 공정은 산업 폐기물과 도시 폐기물을 연계하여 폐기물 처리와 핵심 물질 회수를 진행함으로써 청정 자원 순환 기술로써 의미가 크다고 할 수 있다.

CT-F4

Manufacturing high purify gallium for compound semiconductors using a recycling process

Jaesik Yoon[1]

[1]Korea Basic Science Institute

Gallium metal is raw material for compound semiconductors, and the definition of impurity elements in gallium is very important. For quantitative analysis of impurity elements in gallium metal, the aluminum standard materials was used because of the absence of standard materials of gallium metal. RSF is essential for quantitative analysis using GD-MS, was obtained by analyzing the aluminum standard materials containing elemental gallium.

As a result, it was confirmed that RSF was almost constant with the concentration of each element. In addition, the quantitative concentration calculated by the IBR for Fe matrix CRM and the RSF obtained by the Al matrix CRM were compared with the standard concentration of the Fe matrix CRM in order to confirm the error of quantified concentration with the different matrix. It was confirmed that quantification was possible with a relative deviation of under 30%. Finally, a quantitative analysis of the impurity elements in the gallium metals was carried out using the established RSF. The total concentration for impurities in gallium metal were 7.66 mg.kg-1, respectively.

References

[1] J. ALEGRE, B. BOUDOT. Gallium analysis:Problem of impurity distribution in the analytical sample. *J. Cryst. Growth*. 1990; 106(1): 139-142

[2] David W. Koppenaal. Atomic mass spectrometry. *Anal. Chem*. 1992; 64(12):320-327

[3] Wojciech Vieth, John C. Huneke. Analysis of high-purity gallium by high resolution glow discharge mass spectrometry. *Anal. Chem*. 1992;64(23):2958-2964

[4] Gerhard Kudermann, Karl-Heinz Blaufub. Characterization of high purity gallium. *MikroChim. Acta.* 1987;91(1):269-274

[5] Annemie Bogaerts, Renaat Gijbels. Modeling of glow discharge sources with flat and pin cathodes and implications for mass spectrometric analysis. *J. Am. Soc. Mass Spectrom.* 1997;8(9):1021-1029

CT-F5

Development of circulated fluidized bed reactor for integrated biomass gasification and CO_2 capture technology

Jaeeon Ha[1], Se-Eun Jeong[1], Moonyoung Kim[1], Eunho Jang[1], Ho Jin Chae[1], Sushil Adhikari[2], Sergio Capareda[3], Hyungseok Nam[1,*]

[1]School of Mechanical Engineering&IEDT, Kyungpook National University, Daegu, South Korea

[2]Biosystem Engineering, Auburn University, Alabama, USA

[3]Biological&Agricultural Engineering, Texas A&M University, Collge Station, USA

*The corresponding author's e-mail. namhs219@knu.ac.kr

Abstract

This study presents the preliminary development of a circulated fluidized bed (CFB) system for the integration of biomass gasification and CO_2 capture, aiming at low-carbon hydrogen production. Instead of direct gasification experiments, initial work focused on hydrodynamic analysis using an acrylic cold model to optimize reactor configuration prior to high-temperature operation. The cold-flow tests confirmed stable particle circulation, proper loop seal function, and solid holdup behavior under various air flow rates, providing essential design data for the hot CFB system. In parallel, dual functional materials (DFMs) combining Ni-based catalysts and CaO sorbents were synthesized and evaluated through thermogravimetric analysis (TGA). The TGA results demonstrated that the developed DFMs exhibit both sufficient catalytic activity and CO_2 uptake capacity across multiple carbonation–calcination cycles. Repeated cycling tests revealed minimal decay in CO_2 capture performance, indicating promising regenerability. The integration of CFB hydrodynamics and DFM performance is expected to significantly improve hydrogen yield and carbon efficiency in biomass thermochemical conversion systems.

CT-F6

Reduction of Carbon Emissions through Incorporating Carbon Dioxide to the Pyrolysis of Biomass

Taewoo Lee and Eilhann E. Kwon*

Department of Earth Resources & Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Republic of Korea

Abstract

Lignocellulosic biomass has gained attention as a renewable alternative to petroleum-derived carbon resources. Current biorefinery system, largely commercialized through biological process, faces limitations in efficient carbon use due to unavoidable carbon loss from microbial metabolisms. To address this, pyrolysis offers a promising solution by converting all carbons in biomass into syngas, biocrude, and biochar. Nevertheless, the inherent energy-intensity of pyrolysis reduces environmental benefits. To enhance a sustainability of pyrolysis, this study proposes the incorporation of CO_2 as a partial oxidizing agent. Given that CO_2 is thermodynamically activated above 700 °C, its role in the pyrolysis system remains insufficiently understood. Nevertheless, the use of CO_2 offers favorable conditions for enhancing carbon availability within the pyrolysis system, while mitigating process-related carbon emissions. To elucidate the mechanistic role of CO2, its influence on three pyrogenic products was investigated. CO_2 participated in the homogeneous reactivity with pyrolytic volatiles derived from biomass, shifting product distribution from biocrude into syngas enriched with CO. In addition, biochar produced in the presence of CO_2 exhibited improved surface properties, enabling environmental applications such as CO_2 adsorption. To accelerate the CO_2 reactivity, the pyrolysis setup was modified with configurating an additional heat supply under the presence of transition metal-based catalysts. Key process parameters, including reaction temperature and CO_2 concentration, were tailored to maximize performance related to CO_2. To estimate the carbon footprint, energy requirements and net CO_2 emissions were evaluated, revealing the carbon-negative potential of proposed pyrolysis system. Therefore, integrating CO_2 into pyrolysis opens up opportunities for the reduction of carbon emissions across diverse industrial sectors.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MIST) (Grant No. RS-2024-00342766).

CT-F7

물-물 계면 형성 및 안정화 메커니즘 분석을 통한 미세 플라스틱 비중 선별 기술로의 응용

김규한
서울과학기술대학교 화공생명공학과

본 연구에서는 서로 다른 수상 간의 상분리를 이용한 Aqueous Two-Phase System(ATPS)에서의 계면 형성 및 안정화 메커니즘을 규명하고, 이를 플라스틱 비중 선별에 응용하는 가능성을 제시한다. ATPS는 고분자-고분자 또는 고분자-염 조합에 의해 형성되며, 전적으로 물 기반이므로 환경적 · 생체적 안전성이 뛰어나다. 본 연구에서는 먼저 ATPS 계면에서의 입자 흡착 거동과 안정화 조건을 실험적으로 관찰 및 분석하여 물-물 계면의 안정화 원리를 도출하였다. 이를 바탕으로, 기존 2상 구조를 확장하여 3상 이상의 다상 시스템을 구현하고, 다중 계면의 밀도 차를 이용한 플라스틱 비중 선별 방법을 고안하였다. 본 접근법은 환경 친화적 조건에서의 미세플라스틱 분리 · 재활용 기술 개발에 기여할 수 있으며, 향후 폐기물 처리 및 자원 회수 분야에서의 응용 가능성을 제공한다

청정생산

(일반 구두발표)

2025년 9월 25일(목) 09:00~11:15
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸B

CT-G1

Low-carbon Propylene Production by Circulating Fluidized-Bed Propane Dehydrogenation

Dae Sung Park
Korea Research Institute of Chemical Technology

Propylene is a key feedstock for the synthesis of a wide range of downstream petrochemical products and has traditionally been produced via fluid catalytic cracking (FCC), steam cracking (SC), and methanol-to-olefins (MTO) processes. Propane dehydrogenation (PDH) is regarded as one of the most promising processes for on-purpose propylene production due to its high selectivity and superior single-pass productivity. The emergence of the shale gas revolution has secured an abundant, cost-competitive propane feedstock, while hydrogen—a valuable byproduct of PDH—offers additional contributions to the energy sector. The PDH reaction is a highly endothermic and thermodynamically limited process, requiring high reaction temperatures exceeding 550 °C. Consequently, efficient heat supply and frequent catalyst regeneration are essential due to rapid deactivation. Commercial PDH technologies such as Oleflex and Catofin employ Pt-based catalysts in moving-bed and Cr-based catalysts in fixed-bed reactors, respectively, with reaction–regeneration cycles ranging from several minutes to several hours. In this study, we discuss high-velocity circulating fluidized-bed PDH reactor technology aimed at maximizing heat supply efficiency and propylene productivity. The circulating fluidized-bed configuration utilizes direct heat transfer from regenerated catalyst circulation, enabling optimal thermal efficiency, continuous reaction–regeneration cycles within seconds to minutes, and high propylene yields. Notably, Dow (FCDh, 2016) and KBR (K-PRO, 2018) announced the development of fluidized-bed PDH technologies, reporting significant reductions in CO_2 and NO_x emissions with OPEX savings of over 20%. However, commercialization has not yet been achieved, primarily due to the challenge of developing catalysts capable of sustaining high activity and selectivity under the extremely short contact times (on the order of seconds) characteristic of fluidized-bed reactors. Herein, we define the key parameters required for catalyst design in fluidized-bed PDH systems and present the current state of catalyst development strategies to overcome short-contact-time limitations. Furthermore, we report bench-scale validation results of the developed catalysts in fluidized-bed PDH operation, along with a techno-economic assessment to evaluate their commercial feasibility.

Acknowledgment

This work was supported by the National Research Council of Science & Technology (NST), grant funded by the Korean government (MSIT) (No. CRC22043-300), and the Next-generation CCU technology advancement project through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (RS-2025-02219162).

References

1. Weckhuysen et al., "Propane to Olefins Tandem Catalysis: A Selective Route Towards Light Olefins Production," *Chem. Soc. Rev.*, **50**, 11503-11529 (2021).
2. Yang et al., "A state-of-the-art review of propane dehydrogenation over well-defined non-noble metal cobalt catalysts," *Appl. Catal. B: Environ.*, **372**, 125233 (2025).
3. Park et al., "Initial Catalytic Behavior of Chromium Oxide During Induction Period of Fluidized Dehydrogenation of Propane," *Chem. Eng. J.*, **440**, 135860 (2022).

CT-G2

저데이터 상황의 재료 최적화 가속을 위한 능동기계학습 연구

하민영[1,*]
[1]경희대학교 화학공학과, 경기도 용인시 덕영대로 1732

초록
학습 데이터가 부족한 재료과학 연구 초기 단계에서는 전통적인 기계학습 알고리즘의 훈련이 어렵기에 시행착오 실험설계 및 고속·대량 계산 스크리닝이 주로 활용되고 있으나 실험·계산에 소요되는 비용·자원·시간을 단축할 필요가 최근 제기되고 있다. 본 발표에서는 베이지안 능동학습(Bayesian active learning)을 활용하여 데이터기반 방법론을 저데이터 영역으로 확장 적용하는 연구를 소개한다. 능동기계학습은 수십 개 수준의 초기 학습 데이터에서 출발하여 추가 데이터 수집과 모델 재훈련 과정을 반복적으로 수행함으로써 데이터베이스 구축과 모델 성능 개선을 병행하는 기법으로, 목적함수의 구조를 직관적으로 파악하기 어려운 고차원 설계 공간에서 높은 효율을 보인다. 본 발표에서는 고엔트로피합금 조성 설계, 유한 분자 후보 공간에서의 최적 분자 발굴, 소재 시뮬레이션 파라미터 최적화 등의 연구 사례를 소개하는 한편 학습 모델의 데이터 효율을 제고하기 위한 표현 학습 방법론을 논의한다. 이러한 성과를 바탕으로, 본 연구의 접근법은 고기능성 유·무기 소재 개발 가속화를 위한 일반 방법론으로 확장 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌
1. Kim et al., “Searching for an optimal multi-metallic alloy catalyst by active learning combined with experiments”, *Adv. Mater.* **34**(19), 2108900 (2022).
2. Kim et al., “Exploring Optimal Water Splitting Bifunctional Alloy Catalyst by Pareto Active Learning”, *Adv. Mater.* **35**(17), 2211497 (2023).

CT-G3

Thermally stable Ni-CeO_2 nanoparticles-encapsulated with SiO_2(-Al_2O_3) shells for dry reforming of CH_4 with CO_2

Jong Wook Bae*, **Jae Hyeon Kwon**

School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University (SKKU), 2066 Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi-do 16419, Republic of Korea (*finejw@skku.edu)

For utilizing greenhouse gases such as CH_4 and CO_2, dry reforming of methane with carbon dioxide ($CH_4 + CO_2 \rightleftarrows 2H_2 + 2CO$, DRM) has been largely investigated to produce synthesis gas (syngas), which can be recycled with subsequent conversions to value-added liquid fuels and petrochemicals. Generally, Ni-based catalysts having a comparable activity as novel metals can be easily deactivated due to sintering to form less active and larger aggregates with more facile coke deposition natures for DRM reaction. Ni nanoparticle-based catalysts such as core-shell [**1**], or structure-derived catalysts [**2**] are effective for preserving small nanoparticle sizes and controlling metal support interactions to enhance catalytic activity and stability. In the present study, the strategies for stabilizing the Ni-CeO_2 nanoparticles with less coke depositions are explained by introducing metal oxide promoters (Co_3O_4 or CeO_2) and overlayer coating metal oxides (SiO_2 or SiO_2-Al_2O_3 (SA)) in terms of their enhanced thermal resistances for cokes formations and aggregations of active metal oxides.

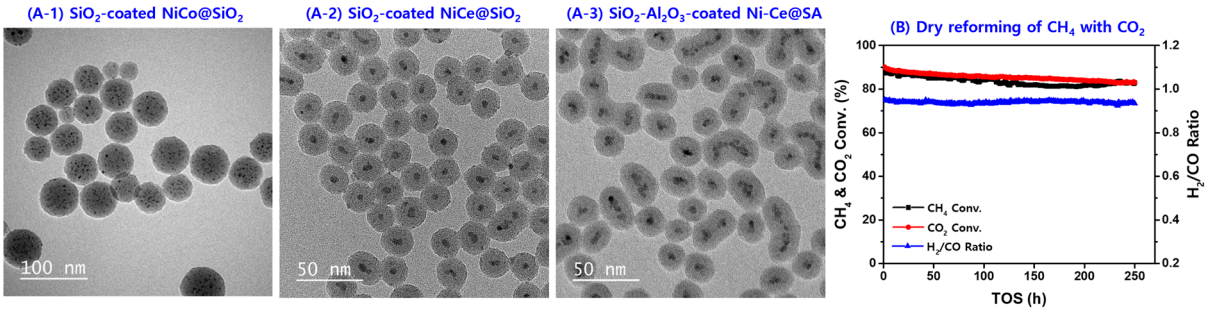


Figure 1. (A) TEM images of the fresh (1) Ni-Co@SiO_2, (2) Ni-Ce@SiO_2, and (3) Ni-Ce@SA and (B) Long-term stability of the Ni-Ce@SA.

References

[1] Park, K. S., Kwon, J. H., Yu, J. S., Jeong, S. Y., Jo, D. H., Chung, C. H., and Bae, J. W., "Catalytically stable monodispersed multi-core Ni-Co nanoparticles encapsulated with SiO_2 shells for dry reforming of CH_4 with CO_2," *Fuel Process. Technol.*, **250**, 107895 (2023).

[2] Park, J. M., Yu, J. S., Kwon, J. H., Chung, C. H., Roh, H. S., Gao, X., and Bae, J. W., "Roles of metal oxide overlayers on hydrotalcite-structured Ni-MgAlOx for dry reforming of CH_4 with CO_2," *Fuel Process. Technol.*, **250**, 107895 (2023).

CT-G4

Carbon dioxide fixation into single-walled carbon nanotubes

Jungpil Kim*, Junghoon Yang, Eunchae Oh, and Jaewon Jang
Carbon & Light Materials Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH),
Jeonju 54853, Republic of Korea

Converting carbon dioxide (CO_2) into carbon nanotubes (CNTs) is economically attractive due to the high market value of CNTs [1, 2]. However, direct one-step CO_2-to-CNT conversion often compromises CNT quality because of the strong oxidizing nature of CO_2. To overcome this limitation, we developed a two-step tandem process that sequentially integrates CO_2 methanation (Step 1) and CH_4 decomposition (Step 2) for the synthesis of single-walled carbon nanotubes (SWCNTs). In Step 1, CO_2 was converted to CH_4 over Ni/SiO_2 catalysts with various Ni loadings, achieving CH_4 selectivity above 96.0 % at 300 °C using 30 wt.% Ni/SiO_2. Systematic variation of the Step 1 reaction temperature (300–400 °C) and H_2/CO_2 ratio (4–8) revealed their critical influence on CNT growth in Step 2. At low Step 1 temperatures (≤300 °C), CO_2 conversion was limited, resulting in no CNT formation. At elevated temperatures, the CO_2 methanation pathway shifted from the formate route to the CO route, increasing CH_4 and CO formation. The resulting mixed gas (12.1 % CH_4, 4.2 % CO_2, 5.8 % CO, 36.2 % H_2, balance carrier gas) was introduced into Step 2, where CNTs were grown over Fe–Mo/MgO catalysts at 700–900 °C. Higher Step 1 temperatures enhanced CNT yield (up to 79.1 wt.%) but decreased crystallinity and wall selectivity due to excessive carbon feedstock. Increasing the H_2/CO_2 ratio led to residual H_2, which disrupted CH_4 decomposition equilibrium in Step 2, further reducing CNT crystallinity and yield. Three distinct CNT growth regimes were identified: no CNT zone ($T < 300$ °C), double-walled CNT (DWCNT) zone ($T > 360$ °C and $H_2/CO_2 > 6$), and SWCNT zone ($T \leq 360$ °C and $H_2/CO_2 \leq 6$). Raising the Step 2 temperature improved CNT crystallinity, reduced their diameter and number of walls, and, at 900 °C, promoted a higher proportion of SWCNTs. Finally, a life cycle assessment indicated that the tandem process offers a global warming potential 10.58 kg CO_2-eq lower than conventional CNT synthesis methods, with further reductions possible under renewable electricity input. These results demonstrate a sustainable and scalable route for producing high-value carbon nanomaterials directly from CO_2.

References

1. Oh, E., Kim, JA., Jang, J., Lee, N., Sah, J., Jeong, H., Lee, SW., Kim, DY., Jeon, S-Y., Kim, B-J., Yang., J., Kim, J., "Tandem thermocatalytic reaction for CO2 fixation into single-walled carbon nanotubes" Energy Fuels, 38(23), 22974–22985 (2024).
2. Jang, J., Oh, E., Kim, B-J., Kim, Y-H., Yang, J., and Kim, J., "Direct Greenhouse Gases Conversion to Few-Walled Carbon Nanotubes: Optimization of Dual-Step Process Overcoming Single-Step Limitations" Energy. Environ. Mater., 0, e70108 (2025).

CT-G5

Strategic Pathway from C6 Sugars to Adipic Acid: Mechanism-Driven Catalyst Engineering

Yesub Keum, Tae Yong Kim[1], Geonwoo Kim, Hayoung Jeong[2], Anh Vy Tran, Jeong Woo Han[2]*, Yong Jin Kim*, and Jayeon Baek*

Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), [1]Korea University of Technology and Education, [2]Seoul National University

<abstract>

The catalytic conversion of lignocellulosic biomass into sustainable plastics requires efficient transformation pathways that convert C6 carbohydrates into diverse platform monomers. In this study, we present a catalytic strategy encompassing the direct dehydration of glucose and fructose into 5-hydroxymethylfurfural (HMF), followed by the selective hydrogenation of 2,5-furandicarboxylic acid (FDCA) toward bio-based adipic acid. HMF, which can be produced from biomass-derived C6 sugars, serves as a precursor for the production of FDCA, which itself is a key building block for thermoplastic bioplastics such as polyethylene furandicarboxylate (PEF). Therefore, a mechanistic understanding of these catalytic transformations from biomass to bioplastics is of critical importance.

To produce HMF from fructose, we employed a mesoporous Al-MCM-41-SO_4 functionalized with sulfate groups as a catalyst. The water generated during the dehydration reaction dynamically interacts with adjacent sulfate groups to regenerate Brønsted acid sites, enabling stable HMF production with a yield of 83% over 72 h of continuous reaction.[1] In the case of glucose, we applied indium(III) nitrate hydrate [$In(NO_3)_3 \cdot 14.4H_2O$], a phase-reversible catalyst, which facilitates a direct dehydration pathway without glucose–fructose isomerization. This reaction proceeds via 2,5-anhydromannose (AHM) as an intermediate and operates through a water-mediated proton exchange mechanism that lowers the activation energy barrier, achieving high selectivity (84.6%).[2]

Our results reveal that the hydrogenation pathway of FDCA is strongly influenced by the type of noble metal-based catalyst (Pt, Pd, Rh, Ru), as well as by the degree of surface hydrogen coverage. DFT calculations and kinetic modeling indicate that Pt, which tends to maintain low hydrogen coverage due to weak H-metal bonding, favors ring-opening reactions. In contrast, Pd, Rh, and Ru exhibit stronger hydrogen binding and higher surface hydrogen coverage, leading to dominant ring-saturation pathways. This shift in selectivity is closely linked to the metal-carbon interaction strength and the adsorption geometry, providing mechanistic insights into how coverage-dependent factors govern hydrogenation selectivity.

Altogether, this work presents an integrated catalytic roadmap from C6 sugars to renewable monomers, combining water-induced regeneration of acid sites and hydrogen coverage–dependent selectivity control as two complementary strategies. These findings lay a theoretical foundation for the scalable and environmentally benign production of bio-based plastics.

References

1. G. Kim, A. V. Tran, Y. Keum, T. Y. Kim, C. K. Song, H. J. Lee, J. M. Kim, Y. J. Kim, J. Baek, “Water-induced regeneration of active acid sites in Al-MCM-41-SO_4 during continuous fructose dehydration” Chem. Eng. J., 507, 160472 (2025).
2. Y. Keum, H. Jeong, T. Y. Kim, J. W. Han, Y. J. Kim, J. Baek, “Chloride-free indium (III)-catalyzed glucose-to-HMF conversion: Overcoming kinetic barriers via water-mediated direct dehydration” Appl. Catal. B. Environ., 378, 125561 (2025).

CT-G6

In-Situ Water Removal for Enhanced Se-Catalyzed Oxidative Carbonylation in a Recirculating Pervaporation-Assisted Membrane Reactors

Min-Zy Kim, Hye Jin Lee, Chul Ho Lee, Woo-Yong Jung, Yu-Jin Lee, Yong Jin Kim* and Jayeon Baek*

Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)

<Abstract>

The oxidative carbonylation of alcohols, a representative C_1 chemical transformation, has been widely investigated for the synthesis of dialkyl carbonates (DACs). Among these, bis(2-methoxyethyl) carbonate (BMEC) is an organic carbonate employed as a lithium-ion battery electrolyte solvent and an intermediate for polymer synthesis, and it can be synthesized from 2-methoxyethnaol (MEG) using selenium-based catalysts. [1,2] However, the generation of water as a by-product disrupts the reaction equilibrium, thereby reducing overall efficiency and leading to catalyst deactivation. Moreover, under continuous flow conditions, selenium species are susceptible to leaching and carried away with the product stream, presenting a critical challenge for process scalability.

Membrane reactor (MR) systems can significantly enhance reaction performance by shifting the reaction equilibrium shift through the *in-situ* removal of by-products during the reaction. In this study, a recirculating pervaporation-assisted membrane reactor system was employed to remove water generated during the reaction and to recirculate the leached selenium within the reactor, thereby enhancing the overall reaction yield. A packed-bed membrane reactor (PBMR), packed with Se/Al_2O_3 catalyst prepared on an LTA zeolite membrane, achieved an increase in MEG conversion from 63.5% to 76.6% at 90°C and 30 bar, while maintaining a BMEC selectivity of approximately 70. Further performance improvements are anticipated through the development of Se@LTA catalytic membrane reactor (CMR), combined with the optimization of reaction parameters such as temperature, driving pressure, flow rate, and feed composition. These findings are expected to contribute to the advancement of oxidative carbonylation, CO_2 carboxylation, and other water-producing catalytic transformations.

References

1. H. Lee, T. Nguyen, A. Tran, H. Kim, Y. Suh, J. Back and Y. Kim, "Engineering pK_a value of 3° amine for enhanced production of dialkyl carbonate via Se-catalyzed oxidative carbonylation", J. *Ind. Eng. Chem*., **123**(25), 140-149 (2023).
2. J. Lee, A. Jeon, H. Lee, U. Shin, Y. Yoo, H. Lim, C. Han, H. Lee, Y. Kim, J. Baek, D. Seo, M. Lee, "Molecularly engineered linear organic carbonates as practically viable nonflammable electrolytes for safe Li-ion batteries", Energy Environ. Sci., **16**, 2924-2933 (2023).

CT-G7

Enhanced Cellulose Hydrolysis Using a Heterogeneous Catalyst under Supercritical CO_2 Conditions

Han-Ung Kim[1], Dong-Ha Lim[1]*
Korea Institute of Industrial Technology

Cellulose, the major component of lignocellulosic biomass (~50%), is an abundant and carbon-neutral renewable resource with high potential as an intermediate for the production of value-added chemicals such as glucose, sorbitol, and furan derivatives [1]. However, extensive intra- and intermolecular hydrogen bonding between hydroxyl groups results in high crystallinity and low solubility, thereby limiting hydrolysis efficiency. Conventional pretreatment methods, including concentrated sulfuric acid (>50 wt% H_2SO_4, up to 97%) and mechanical ball milling (300–600 rpm), have been employed to disrupt the hydrogen-bond network, but these approaches suffer from high cost, long processing time, and operational challenges [2].

In this study, we propose a catalytic hydrolysis method utilizing supercritical CO_2 to generate in-situ carbonic acid (pH ≈ 3 at 150 °C, 300 bar) as a homogeneous acid catalyst for cellulose depolymerization. The induced carbonation effect provides an acidic reaction environment that facilitates cellulose conversion and exhibits a strong synergistic effect when combined with sulfonated carbon catalysts [1]. The acid functional group density and pore structure of the sulfonated carbon catalysts were systematically tuned to maximize glucose yield.

The combination of supercritical CO_2-derived carbonic acid and solid acid catalysis significantly enhanced cellulose hydrolysis under milder conditions compared to conventional methods, demonstrating a promising, cost-effective, and sustainable approach for biomass valorization.

References

1. Huang, Y., and Fu, Y., "Hydrolysis of Cellulose to Glucose by Solid Acid Catalysts," *Green Chem.*, **15**, 1095 (2013).

2. Yabushita, M., Kobayashi, H., Hara, K., and Fukuoka, A., "Quantitative Evaluation of Ball-Milling Effects on the Hydrolysis of Cellulose Catalysed by Activated Carbon," *Catal. Sci. Technol.*, **4**, 2312-2317 (2014).

Acknowledgment

This study has been conducted with the support of the KITECH as "Development of eco-friendly production system technology for total periodic resource cycle (KITECH EO-250002)".

공정시스템

(일반 구두발표)

2025년 9월 25일(목) 13:00~14:20
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀B

CT-H1

Is Acidic Environment Favored for Electrochemical CO_2 reduction? – A process-wise perspective

Kyeongsu Kim[1*], Hyerim Kim[1], Youngrok Lee[1], and Woong Hee Lee[1]

Clean Energy Research Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Hwarang-ro 14-gil 5, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Republic of Korea[1]

<Abstract>

Acidic operation in electrochemical CO_2 reduction (CO_2RR) can suppress CO_2 crossover, enabling higher single-pass conversion and potentially improving process economics. However, it also introduces drawbacks: higher ohmic resistance demands greater electricity input, and the acidic environment accelerates catalyst leaching, increasing maintenance and replacement costs. In this work, we compare acidic and neutral/alkaline systems from a process-analysis perspective, evaluating energy consumption, conversion efficiency, and durability implications. Our results indicate that, despite the high conversion achievable in acidic media, the increased electrical energy demand from higher operating potentials is likely to outweigh its economic benefits, suggesting critical challenges for its industrial adoption

CT-H2

가스 하이드레이트를 활용한 청정 탄소 포집 공정 설계 및 평가

오태훈*
탄소중립대학원, 울산과학기술원

Process Design of Clean Carbon Capture Process Using Gas Hydrates

*Tae Hoon Oh**
Graduate School of Carbon Neutrality, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST).

탄소중립 사회로의 전환을 위해서는 이산화탄소의 직접적이고 효율적인 저감 기술이 필수적이며, 그 중에서도 포집 공정의 성능 향상이 중요한 과제로 부각되고 있다. 기존의 화학 흡수 기반 공정은 상용화 경험이 풍부하다는 장점이 있으나, 높은 에너지 소비와 흡수제의 부식성, 환경 문제 등으로 인해 새로운 대안 기술의 필요성이 제기되고 있다. 본 연구에서는 저에너지 소비와 친환경성이 특징인 가스 하이드레이트 기반 탄소 포집 공정을 설계하고, 대표적인 상용 흡수제인 DEPG (디에틸렌글라이콜) 흡수탑 공정과의 비교 평가를 수행하였다.

가스 하이드레이트 기술은 고압·저온 조건에서 CO_2 를 선택적으로 포집할 수 있는 상변화 기반 공정으로, 별도의 화학 반응 없이 고순도의 CO_2 를 분리할 수 있다는 장점이 있다. 이를 위해 공정 모사 시뮬레이터를 활용한 공정 시뮬레이션을 통해 각 공정의 에너지 소비량, CO_2 회수율, 운전 조건에 따른 민감도 등을 정량적으로 분석하였다. 또한, 하이드레이트 형성의 열역학적 특성, 촉진제 사용 가능성, 공정 통합 시의 기술적 과제 등도 함께 검토하였다. 시뮬레이션 결과, 하이드레이트 기반 공정은 특정 운전 조건 하에서 DEPG 흡수탑 대비 에너지 효율이 우수하며, 운전 안전성과 환경 부담 측면에서도 긍정적인 가능성을 보였다. 이러한 결과는 향후 하이드레이트 기반 탄소 포집 기술이 기존의 화학 흡수 공정을 보완하거나 대체할 수 있는 유망한 대안이 될 수 있음을 시사한다.

CT-H3

화학공학 청정기술 분야에서 전산유체역학 연구사례

김신혁*
국립한밭대학교 화학생명공학과

Computational Fluid Dynamics Applications in Clean Technology for Chemical Engineering

Shin Hyuk Kim*
Hanbat National University, Department of Chemical and Biological Engineering

본 발표에서는 청정기술 개발을 위한 전산유체역학(CFD)의 최신 적용 사례를 소개한다. 각 연구는 기술 개발 목적에 부합하도록 CFD 모델링 기법을 보완하거나 개선한 접근을 중심으로 구성되며, 시뮬레이션 기반의 공학적 분석을 통해 장치의 성능 향상과 효율 극대화를 도출하는 데 초점을 둔다. 사례연구들은 1) 미세먼지 저감을 위한 필터 흐름해석, 2) 고체산화물 연료전지(SOFC) 후단 버너 설계 [1], 3) 황화수소(H2S)의 전기분해 반응 해석 4) 멤브레인 기반 개질기 내 반응 유동 분석[2]을 다루며, 장치 내부의 복합 물리·화학적 현상을 CFD로 정량 평가하고, 이를 바탕으로 공정 분석 및 최적화 전략으로 확장한다. 특히, 다중 규모(multiscale)의 물리·화학 반응이 결합된 CFD 모델은 모델링 적합성, 수치해석의 강건성, 그리고 계산 시간의 절감 문제 등 다양한 기술적 과제를 동반한다. 본 발표는 이러한 과제를 이론적·기술적으로 극복한 사례들을 중심으로 연구 결과를 공유하고, 청정기술 설계에서 CFD의 역할과 확장 가능성에 대해 논의하고자 한다.

참고문헌

1. Park and Kim, “Investigation of Economical Design Strategies for the Solid Oxide Fuel Cell Afterburner Based on Computational Fluid Dynamics Simulation”, *Ind. Eng. Chem. Res*., 62(16), 6448-6459 (2023).

2. Choi et al., “CFD analysis and scale up of a baffled membrane reactor for hydrogen production by steam methane reforming”, Comput. Chem. Eng., 165, 107912 (2022).

CT-H4

Deep Learning-Based PPE Monitoring System Integrated with Digital Twin for Biomass Plant Safety Management

Chae-Young Lim, Chae-Eun Yeo, Myung-Ok Lee, Ho-Jin Sung*
Energy Environment IT Convergence Group, Institute for Advanced Engineering

With the acceleration of the Fourth Industrial Revolution, the implementation of smart plants and smart factories based on digital twin technology has emerged as a critical task across various industrial sectors. A digital twin is an intelligent platform that replicates real-world physical environments in a virtual space in real time, enabling continuous monitoring, analysis, and simulation. This capability significantly enhances operational efficiency and safety in industrial sites. In this study, we developed an intelligent video analysis system tailored for digital twin environments, focusing on the automatic detection of Personal Protective Equipment (PPE) usage through deep learning-based object recognition algorithms.

The proposed system utilizes YOLO v5, a real-time object detection model, to analyze live video streams from surveillance cameras installed in industrial sites. It identifies critical PPE elements such as helmets, safety vests, and protective eyewear worn by personnel. Detected objects are further processed using AWS Rekognition for post-processing and classification enhancement. The system determines PPE compliance on a per-person basis and triggers real-time alerts, including visual warnings, automated notifications to site managers, and risk level visualization within the digital twin platform in case of non-compliance.

To ensure robust performance, the system integrates several computer vision techniques such as image pre-processing, tracking-by-detection, and region-of-interest (ROI) masking to enhance both accuracy and real-time responsiveness. Experiments were conducted in a simulated plant testbed, which replicated real-world conditions such as variable lighting, camera angles, and diverse PPE appearances. Results demonstrated that the proposed model achieved an average PPE detection accuracy of 94.2% and maintained a real-time processing rate exceeding 25 frames per second, indicating its practical feasibility for industrial deployment.

Furthermore, the system was successfully integrated into a digital twin simulation environment, allowing real-time synchronization of safety data with virtual plant models. This integration supports advanced safety monitoring features, including predictive risk assessment and automated scenario-based simulations. In future work, we plan to incorporate Transformer-based vision models to further improve detection precision and explore the fusion of multi-modal sensor data, including thermal imaging and acoustic sensors, to build a more comprehensive and intelligent safety recognition system.

This research contributes to the digital transformation (DX) of industrial environments by providing a scalable and intelligent solution for occupational safety, thus paving the way for safer and more efficient smart plant operations.

Acknowledgment

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)의 미활용 자원 기반 바이오매스 플랜트 실증 기술 개발 사업(21DPRB-C161883-01)의 지원으로 수행되었습니다.

수소 및 재생에너지

(학생 구두발표 I)

2025년 9월 25일(목) 09:00~10:30
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀A

CT-SO1

Defect engineered Co/CeO_2 catalysts for high temperature water gas shift reaction using waste-derived syngas

Su-jin Ryu[1], Beom-Jun Kim[1], Ho-Ryong Park[1] and Hyun-Seog Roh[1*]

[1]Yonsei University

The growing challenges of waste management and the rising demand for clean hydrogen have driven interest in waste-to-energy (WtE) technologies. Among the sequential steps in hydrogen production from waste gasification, water-gas shift (WGS) reaction plays a pivotal role by generating additional hydrogen. In particular, the high-temperature WGS (HTS) is well-suited for treating waste-derived syngas due to its compatibility with post-gasification conditions and reduced susceptibility to carbon deposition. However, the potential environmental concerns caused by Cr^{6+} and the high CO concentration (~40%) in waste syngas posed challenges for conventional Fe–Cr catalysts, necessitating the development of more active and environmentally friendly alternatives [1].

Oxygen storage capacity (OSC) enhancing redox mechanism is key property in HTS reaction. Our previous study revealed that controlling morphology and calcination condition of CeO_2 could affect their crystallinity and oxygen vacancies [2, 3]. Based on this premise, this study aims to develop HTS-tailored catalysts for WtE by systematically controlling these variables. The Co/CeO_2 catalysts containing 15 wt.% Co were synthesized using CeO_2 supports prepared by precipitation and spray pyrolysis under different calcination atmospheres (air or N_2). This approach was used to promote oxygen storage capacity (OSC) through variations in support morphology, calcination conditions, and defect structure, and to investigate their influence on the redox properties and catalytic performance of Co/CeO_2 in the HTS reaction. The findings are expected to provide insight into the rational design of defect-engineered CeO_2-based catalysts for efficient hydrogen production from waste-derived syngas.

References

1. Jeong, D.-W., Jha, A., Jang, W.-J., Han, W.-B., and Roh H.-S, “Performance of spinel ferrite catalysts integrated with mesoporous Al_2O_3 in the high temperature water–gas shift reaction”, Chem. Eng. J., 265. 100-109 (2015)
2. Kim, b.-J., Seo, J.-C., Kim, D.-H., Lee, Y.-L., Lee, K-B., and Roh H.-S, “Oxygen defective bimodal porous Ni-CeO_{2-x}-MgO-Al_2O_3 catalyst with multi-void spherical structure for CO_2 reforming of CH_4”, J. CO2 Util., 58. 101917 (2022)
3. Lee, Y.-L., Kim, B.-J., Park, H.-R., Ahn, S.-Y., Kim, K.-J., and Roh H.-S, “Improving the catalytic activity in dry reforming reaction by enhancing the oxygen storage capacity of $Ce_{0.8}Zr_{0.2}O_2$ support through hydrogen heat-treatment”, J. CO2 Util., 57. 101903 (2022)

CT-SO2

Boosting Stability and Photoelectrochemical Performance of Cu_2O-Based Photoelectrodes for Solar Water Splitting

Milana Rudak, Yiseul Park*

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

Cuprous oxide (Cu_2O) is a promising p-type semiconductor material for solar energy conversion due to its earth-abundant nature and suitable 2.0 eV bandgap, corresponding to a theoretical photocurrent density of 14.7 mA cm^{-2} upon integration of AM 1.5 illumination. However, the reported photocurrent generation is significantly lower, primarily due to the limited photostability of Cu_2O in aqueous environments, attributed to its redox potentials lying between the bandgap and inefficient charge transfer to reactants and cocatalysts. Various strategies have been investigated to protect Cu_2O, but an optimal solution has not been found yet. In this work, we present a simple activation process combining applied bias and solar irradiation to form a Cu_2O/CuO heterojunction (a-Cu_2O), which exhibits anodic photocurrent response under light irradiation and shifts the hydrogen evolution reaction onset potential anodically by 200 mV. Leveraging the anodic photoresponse of the a-Cu_2O, an iron oxyhydroxide (FeOOH) overlayer was sequentially deposited via a photodeposition technique, yielding the a-Cu_2O/FeOOH photoelectrode. FeOOH serves both as a cocatalyst and a protective barrier, suppressing self-reduction and self-oxidation of Cu^+ species. Structural, surface, and optical analyses confirm the formation of the Cu_2O/CuO heterojunction and the subsequent successful FeOOH deposition. Electrochemical analyses demonstrate significant improvements in stability and performance of the a-Cu_2O/FeOOH photoelectrode, delivering nearly double the current of bare Cu_2O at +0.5 V vs. RHE. This study demonstrates an effective strategy combining in situ activation and protective overlayer photodeposition to enhance the performance and durability of Cu_2O-based photocathodes for solar-driven water splitting and other PEC applications.

CT-SO3

빠르게 성장하는 바이오매스를 활용한 열화학적 공정 기반 바이오디젤 생산

박경남[1], 권일한[1*]
[1]한양대학교 자원환경공학과

Biodiesel Production through Thermochemical Process Utilizing Fast-growing Biomass

Gyeongnam Park[1], Eilhann E.Kwon[1*]
[1]Department of Earth Resource and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

상업용 바이오디젤은 작물로부터 지질을 추출하여 생산되고 있다. 하지만, 식량 자원으로부터 바이오디젤을 생산하면 식량 안보 위협과 식품 시장과의 경쟁으로 인한 가격 인상의 문제가 발생한다. 동에등애 유충은 짧은 성장 주기로 인해 단위 면적당 지질 생산량이 기존 작물 원료에 비해 높다. 따라서, 바이오디젤 원료로써의 유망한 가치를 지니고 있다. 그러나 유충의 호흡과 대사작용에서 발생하는 CO_2는 바이오디젤의 탄소중립성을 침해한다. 왜냐하면 유충은 작물 원료와 달리 CO_2를 흡수하는 광합성 능력이 없기 때문이다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 미세조류를 동에등애 유충의 먹이로 제공하여 미세조류의 탄소고정 능력을 통해 유충 유래 CO_2 발생량을 완화하고자 한다. 미세조류도 동에등애 유충만큼 충분한 지질을 함유하고 있다는 점에서 바이오디젤 원료로써 가치를 지닌다. 따라서, 미세조류에서 지질을 추출하여 바이오디젤 생산 공정에 적용하고 추출 잔여물을 유충 먹이로 공급하였다. 동에등애 유충 유래 지질과 달리 미세조류 지질로부터 바이오디젤을 생산하는 것은 높은 유리 지방산 함량으로 인해 어려움이 있다. 보편적인 바이오디젤 생산 공정에서 사용되는 염기 촉매는 유리 지방산과 반응하여 비누를 형성하는데, 이는 바이오디젤 수율을 감소시키고 유화로 인해 바이오디젤과 글리세롤의 분리를 복잡하게 만든다. 따라서, 본 연구에서는 촉매를 사용하지 않는 열화학적 공정을 통해 바이오디젤을 생산하고자 한다. BSFL은 먹이에 지질 영양분이 없음에도 불구하고 20.9%의 지질을 합성하였다. 이는 유충 뿐만 아니라 미세조류도 지질을 바이오디젤 원료로 제공할 수 있어 전체적인 지질 생산성을 향상시킬 수 있음을 의미한다. 미세조류에서 추출한 지질에는 디테르펜, 모노테르펜, 단당류, 유리지방산 등 다양한 불순물이 포함되어 있었다. 이러한 미세조류 지질의 염기 촉매 반응은 6.8중량%의 바이오디젤만 생산한 반면, 열화학적 반응은 55.1중량%의 수율을 달성하였다. 또한, 동에등애 유충 지질에서 바이오디젤을 생산한 결과 수율이 87.5중량%로 촉매 공정보다 반응 선택성이 더 높았다. 이를 통해 열화학적 공정 기반 바이오디젤 생산이 저품질 지질 원료에 안정적이며, 바이오디젤 산업에 적용 가능한 원료의 스펙트럼을 넓혀줄 수 있음을 의미한다. BSFL 유래 바이오디젤의 높은 라우르산 메틸 에스테르 함량은 연료의 산화 안정성을 향상시키는 것으로 보인다. 이는 BSFL 바이오디젤을 장쇄 지방산 메틸 에스테르가 풍부한 바이오디젤과 혼합하면 연료의 산화 분해 위험을 완화할 수 있음을 시사한다.

사사: 본 연구성과는 2023년도 정부(교육기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2023-00219667)

CT-SO4

고온에서의 메탄 및 천연가스 열분해를 통한 수소, 탄화수소 및 탄소 생성에 관한 실험 연구

이승현[1,2], 임성균[1], 이은도[2], 김성일[2], 이영재[2,*]
[1]고려대학교 기계공학과, [2]한국생산기술연구원

Experimental study on the production of hydrogen, hydrocarbons and solid carbon through pyrolysis of methane and natural gas at high temperature

Seunghyeon Lee[1,2], Seongkyun Im[1], Uendo Lee[2], Seongil Kim[2], Youngjae Lee[2,*]
[1]*Department of Mechanical Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Korea*
[2]*Korea Institute of Industrial Technology, 89 Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan 31056, Korea*

현재 온실가스 배출 및 지구온난화에 따른 기후 변화에 대한 인식이 증가함에 따라 전 세계적으로 탄소 중립 전략에 대한 가속화가 진행되고 있다. 특히 신재생에너지 확대, 바이오에너지 보급, 무탄소계 연료로의 전환 등은 온실가스 배출 저감에 중요한 역할을 한다. 그중 무탄소계 연료의 전환으로 수소 연료가 주목받고 있으나, 기존의 수소 생성 공정을 통해 생산된 수소만으로는 수소 수요를 충족하는 것이 어렵기 때문에 대용량 수소 생산이 가능한 실용적인 대안이 필요하다. 열분해 기반의 청록 수소는 메탄의 열화학적 전환을 통해 이론적으로 메탄이 수소와 고체 탄소로 분해($CH_4 \rightarrow H_2 + C(s)$)되며, 수소와 고체 탄소를 지속 가능하게 생산할 수 있는 유망한 기술로 평가된다[1]. 또한, C2H6, C3H8 등의 탄화수소계 화학종을 포함한 천연가스로부터 수소 생산[2]을 가능하게 하기에 대용량 수소 생산 효과를 기대할 수 있다. 하지만, 천연가스에 포함되어 있는 일부 탄화수소는 메탄 열분해와 차별적인 특성을 가지게 하는 요인이 된다. 따라서, 열분해 기반의 청록 수소는 메탄과 천연가스 원료에 대한 열분해 특성 비교, 분석 연구가 필요하다.

본 연구에서는 반응 온도 900℃ 이상의 고온에서 실험실 규모의 열분해 반응기를 활용하여 메탄 및 천연가스의 열분해에 따른 수소, 탄화수소 그리고 탄소 생성에 대한 특성을 분석하는데 목적이 있다. 이를 위해 열분해 운전 인자 중 영향성이 높은 반응물, 반응 온도, 그리고 투입 유량에 따라 반응물의 전환율을 분석하고 주요 생성물의 수율을 비교하였다. 메탄에 비해 천연가스에서 반응물의 전환율이 높았으며, 생성물 중 수소 함량이 높았다. 이는 천연가스에 포함되어 있는 탄화수소가 메탄에 비해 수소로의 전환이 높기 때문으로 판단된다. 반응 온도가 증가함에 따라 메탄과 천연가스 모두에서 높은 전환율과 수소 수율을 보였으며, 투입 유량에 따른 전환율이 차이가 감소하는 결과를 보였다. 이를 통해, 투입 유량에 비해 반응 온도와 반응물 내 탄화수소 함량이 수소 생성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 향후 본 연구 결과를 활용하여 천연가스 열분해 반응을 모사하여 다양한 운영 조건에 따른 수소 생산 특성에 관한 수치해석 연구를 수행하고 이를 바탕으로 열분해 기반 수소 생산 시스템에 대한 규모 증대 연구를 수행할 계획이다.

참고문헌

1. Fulcheri L., Rohani V-J., Wyse E., Hardman N., and Dames E., "An energy-efficient plasma methane pyrolysis process for high yields of carbon black and hydrogen," Int. J. Hydro. Energy, 48(8), 2920-2928 (2023)

2. Çelik A., Othman I. B., Müller H., Deutschmann O., and Lott P., "CO_2-free production of hydrogen via pyrolysis of natural gas: influence of non-methane hydrocarbons on product composition, methane conversion, hydrogen yield, and carbon capture," Discov. Chem, Eng., 4(29), 1-16 (2024)

Acknowledgement
본 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(No. CAP22022-000)의 지원을 받아 수행되었습니다.

CT-SO5

Analysis of Current Density and Flow Variations under Overpotential via Bubble Behavior Observation in a Visualization PEMWE Cell

Seongmin Park[1,2], Hae In Lee[1], Hee Soo Kim[1], Mino Woo[3], Joon-Young Choi[2], and Dong-Ha Lim[1*]

[1]Low-carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan, Korea,

[2]Department of Electronics Engineering, Pusan National University, Korea,

[3]Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Korea

With increasing emphasis on carbon neutrality, green hydrogen production via renewable energy has gained attention. PEMWE is notable for high-current operation and rapid response to fluctuating loads. Key PEMEC parameters, especially flow rate, influence water distribution and bubble removal, affecting resistance, charge transfer, and mass transport, thereby impacting overall electrolysis efficiency [1].

In this study, a visualization cell was designed and fabricated to analyze the effects of bubble behavior on electrolysis efficiency and overpotential under PEMEC operating conditions. The formation and transport of bubbles within the flow channels were observed under various flow rates, and bubble release performance was evaluated to quantify the influence of flow rate on bubble dynamics. Polarization distribution analysis was further conducted to assess the effects of operating flow rates on ohmic overpotential, charge transfer overpotential, and mass transport overpotential. Based on the experimental results, the optimal flow rate for parallel flow channels was determined. The findings provide guidelines for flow rate optimization in PEMEC operation under fluctuating renewable energy loads, contributing to improved efficiency and stable performance.

The investigation of bubble behavior and overpotential in PEMEC flow channels using a visualization cell provides valuable insights for optimizing operating conditions in PEMWE systems integrated with renewable energy sources.

References

Ikeda, H., et al., “A dual bubble layer model for reactant transfer resistance in alkaline water electrolysis,” *Electrochim. Acta*, 430, 141053 (2022).

Acknowledgement

This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes(COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT). (RS-2023-00304763) and also supported by KITECH (PUR25191)

CT-SO6

Additive-Assisted Surface Modification of Porous Nickel Foam for Optimized Zero-Gap Alkaline Water Electrolysis Anodes

Jeongha Kim[1,2], Hae In Lee[1], Hee Soo Kim[1], Se Hun Kwon[2] and Dong-Ha Lim[1*]

[1]Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan, Korea

[2]School of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Korea

Greenhouse gas emissions from fossil fuels are a major driver of global warming and ecosystem disruption. Hydrogen is a promising sustainable energy carrier to mitigate these emissions. Among production methods, alkaline water electrolysis (ALKWE) is particularly attractive due to its technological maturity, scalability, and potential use of low-cost catalysts. [1].

Zero-gap stack configurations require complex electrode architectures to reduce resistance, enhance current density, and suppress gas crossover in water electrolysis. Porous nickel foam was employed as a scalable catalyst support, and anodes were fabricated via a simple dip-coating method using a slurry of polyethylene glycol (PEG), aluminum (Al), and alumina (Al_2O_3). During heat treatment, residual carbon from PEG decomposition was controlled by low thermal conductivity Al_2O_3, which provided thermal buffering, prevented local overheating, and enhanced structural stability. SEM-EDS analysis revealed that carbon formed clustered structures via carbon trapping, contributing to increased surface area. Under alkaline conditions, the electrodes exhibited low overpotential, low resistance, and high electrochemically active surface area (ECSA) for the hydrogen evolution reaction (HER). Accelerated stress testing (AST) confirmed the durability of the enhanced surface structure. Overall, the modified electrodes demonstrated improved electrochemical performance and long-term stability, highlighting their potential for large-scale alkaline water electrolysis applications.

The additive-assisted surface modification of porous nickel foam developed in this study enables the fabrication of anodes through a simple and scalable process, which is expected to accelerate the commercialization and industrial implementation of alkaline water electrolysis electrodes.

Reference

Wu, Yutong, et al. "Research progress of the porous membranes in alkaline water electrolysis for green hydrogen production." Chemical Engineering Journal (2025): 159291.

Acknowledgement

This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes(COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT). (RS-2023-00304763)

CT-SO7

Fe-Cr 촉매를 이용한 폐기물 가스화 합성가스의 고온 수성가스전환 반응 조건 최적화

공지현[1], 김민주[1], 권재민[1], 장원준[1,2,3*]
[1]아주대학교 환경공학과, [2]아주대학교 환경안전공학과, [3]아주대학교 에너지시스템학과

Optimization of High-Temperature Shift Reaction Conditions for Waste-Derived Syngas with Fe-Cr Catalyst

Ji-Hyeon Gong[1], Min-Ju Kim[1], Jae-Min Kwon[1], Won-Jun Jang[1,2,3*]
[1]Department of Environmental Engineering, Ajou University,
[2]Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University,
[3]Department of energy Systems Research, Ajou University

본 연구에서는 상용 HTS 촉매인 Fe-Cr 촉매를 사용하여 폐기물 가스화로부터 생산된 합성가스를 수소로 전환하였다. 2% H_2/N_2, 5% H_2/N_2, 반응 가스를 환원 가스로 선택한 후 400, 500, 600 ℃에서 촉매를 환원하여 Fe_2O_3가 과환원 없이 Fe_3O_4로 전환되는 최적 환원 조건을 도출하였다. 또한, 350 ~ 550 ℃ 범위에서 50 ℃ 간격으로 온도를 상승시키며 적합한 H_2O/CO 비 조건을 선정하였다. 열역학적 평형 계산과 HTS 반응 결과를 통해 최적 H_2O/CO 비는 2.5로 판단되었다. 환원 조건 평가 결과, 낮은 환원 온도에서 상대적으로 높은 CO 전환율이 관찰되었으나 환원 가스 조성은 촉매 활성에 큰 영향을 미치지 않았다. 이를 바탕으로 반응 가스를 환원 가스로 사용할 수 있는지 검증하기 위해 다양한 온도 조건에서 안정성 테스트를 수행한 결과, 모든 환원 온도에서 50시간 동안 비활성화 없이 안정성을 유지하였다. 따라서, Fe-Cr 촉매를 사용한 HTS 반응에서 H_2O/CO 비 2.5 및 환원 온도 400 ℃가 최적 조건으로 도출되었으며, 별도의 환원 가스를 공급하지 않고도 반응 가스를 이용한 환원이 충분히 가능함을 확인하였다.

CT-SO8

Enhanced CO_2-to-CH_4 Conversion Using a Modified Microbial Electrosynthesis System

Swabhiman Mohanty, Bikram Basak, Soon-Ho Cho, Kil-Hong Seol and Byong-Hun Jeon*

Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763,

Republic of Korea, E-mails: bhjeon@hanyang.ac.kr

Abstract

Microbial electromethanogenesis (MEM) converts CO_2 to methane (CH_4) using microbes and electricity but faces low efficiency and scalability issues [1]. This study focused in modifying the environment of anode chamber (MEMES) to enhance CO_2 reduction by supplying cathodic electrons from organic matter decomposition. Over 85 days, MEMES produced ~30 mL CH_4/day versus ~5 mL/day for conventional MES, yielding ~ 4.7–5.9× higher methane output (2,550 mL vs. 425 mL). Cyclic voltammetry showed more active redox reactions in MEMES, and FE-SEM/CLSM revealed distinct electrode biofilms. Shotgun metagenomics indicated enrichment of electroactive (*Pseudomonas*, *Clostridium*), hydrolytic–syntrophic (*Chryseobacterium*), and methanogenic (*Methanothrix*) microbes at cathode, along with higher levels of fermenters (*Bifidobacterium thermophilum*, *Clostridium perfringens*) at the MEMES anode [2]. Both systems were dominated by biosynthetic pathways (nucleotide, amino acid, carbohydrate), reflecting specialized metabolic activity during methanogenesis.

Keyword: Microbial electrosynthesis (MES), Methane (CH4), Carbon dioxide (CO2), Anaerobic digestion sludge, Electron transfer

References

1. Aryal, N., Zhang, Y., Bajracharya, S., Pant, D., Chen, X., “Microbial electrochemical approaches of carbon dioxide utilization for biogas upgrading,” *Chemosphere* 291, 132843 (2022).

2. H., Yao, M., Romans-Casas, I., Vassilev, J. M., Rinta-Kanto, S., Puig, A. J., Rissanen, M., Kokko, “Selective butyrate production from CO2 and methanol in microbial electrosynthesis-influence of pH.” *Bioelectrochemistry*, 109000 (2025).

Acknowledgment

This study was supported by the Basic Research Laboratory (No. RS-2023-00219983) through the National Research Foundation (NRF), Ministry of Education, Science, and Technology (MEST) of the South Korean government

공정시스템
(학생 구두발표 II)

2025년 9월 25일(목) 09:00~10:30
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀B

CT-SO9

CO_2 첨가 프로판 산화 탈수소 반응기의 다중스케일 통합 설계·최적화 및 CFD 기반 성능 검증

정재민[a,b], 도윤정[a,b], Gbadago Dela Quarme[c], 정지민[a,b], 황성원[a,b,d*]
[a]에너지공정혁신융합전공, 인하대학교
[b]화학·화학공학융합학과, 인하대학교
[c]3D나노융합소자연구센터, 인하대학교
[d]스마트에너지소재및공정교육연구단, 인하대학교
*교신 저자: sungwon.hwang@inha.ac.kr

프로필렌은 폴리프로필렌과 아크릴로니트릴 생산에 사용되는 핵심 석유화학 원료이다. 전통적으로 FCC와 나프타 스팀 크래킹의 부산물로 생산되지만, 이러한 방법은 선택도가 낮고 화석연료 고갈 문제를 안고 있다. 이를 해결하기 위해 직접 프로판 탈수소(DDP) 공정이 개발되었지만, 반응의 흡열성으로 인해 높은 에너지 요구량과 촉매 비활성화 문제가 여전히 남아 있다. 이에 대한 대안으로 CO_2 를 산화제로 사용하는 프로판의 산화 탈수소(ODP)가 부상하고 있다. 이 방법은 H_2 제거를 통해 평형을 프로필렌 방향으로 이동시키고, 탄소 배출을 줄이는 장점이 있다. 또한 더 낮은 온도에서 높은 프로필렌 수율을 달성하고 코크 생성을 억제한다. 그러나 CO_2 -ODP는 건식 개질 및 부반응과 같은 문제에 직면해 있으며, 선택성과 반응성을 개선하기 위해서는 촉매 설계와 반응기 최적화가 여전히 필수적이다.

본 연구에서는 반응 키네틱 파라미터 추정부터 반응기 모델 개발, 운전 조건 최적화, 형상 최적화에 이르는 통합 반응기 설계 프레임워크를 구축하였다. $CrOx/SiO_2$ 촉매를 이용한 실험 데이터를 기반으로, 반응 모델의 예측 정확도를 극대화하기 위해 총 16개의 속도론적 파라미터를 도출하였다. 파라미터 추정의 효율성과 정확성을 향상시키기 위해 Genetic Algorithm, Simulated Annealing, lsqnonlin 알고리즘을 순차적으로 결합한 3단계 하이브리드 기법을 적용하였으며, 평균 제곱근 편차(RMSD) 1.89, 평균 절대오차 약 1%의 높은 예측 정확도를 확보하였다. 비등온 조건과 압력 강하를 고려하여 실제 공정 조건을 반영한 1차원 multitubular packed bed 반응기 수학적 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 기반으로 CO_2 전환율과 프로필렌 수율의 상관관계를 반영한 목적함수를 생성하고 최적화 알고리즘을 적용한 결과, 두 지표 모두를 높은 수준으로 유지할 수 있는 최적 운전 조건을 도출하였다. 비등온 및 반응기 벽과의 열교환이 존재하는 조건에서 축분산 효과를 반영하기 위해, CFD를 이용하여 1차원 반응기 모델과 동일한 조건의 모델을 구축하고 axial dispersion coefficient 값을 도출하였다. 이를 통해 충전층 유동 특성이 반영된 보다 정밀한 반응기 모델을 완성하였다. 도출된 최적 운전 조건은 3차원 CFD 반응기 모델을 통해 검증되었으며, 검증이 완료된 모델을 기반으로 반응기의 L/D 비율 및 재킷 가열 매개체 종류에 대한 최적 설계를 수행하였다.

이러한 통합 설계·검증 접근법은 CO_2 -ODP 공정의 성능 향상과 에너지 효율 극대화에 기여하며, 지속 가능한 프로필렌 생산을 위한 반응기 설계 지침을 제공한다.

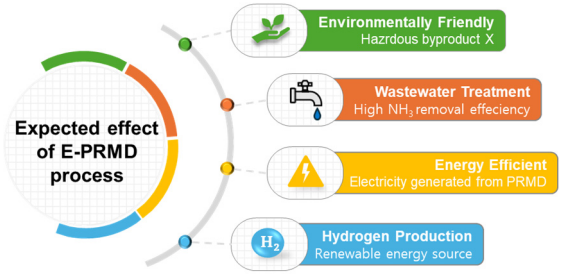
CT-SO10

Temperature-Dependent Performance Analysis of the Electrolyzer–Pressure Retarded Membrane Distillation (E-PRMD) Hybrid Process for Wastewater Treatment

Sunyoung Oh[1], Heun-Se Kim[2], Kiho Park[2**], Boram Gu[1*]

[1]School of Chemical Engineering, Chonnam National University, [2]Department of Chemical Engineering, Hanyang University

Ammonia nitrogen in wastewater can cause eutrophication, water pollution, and oxygen depletion if untreated, yet its removal is challenging as conventional biological methods require large areas and are sensitive to environmental changes. Alkaline electrolyzers offer a compact, chemical-saving alternative, but their high electricity demand limits adoption. To improve energy efficiency, we propose integrating alkaline electrolysis with pressure retarded membrane distillation (E-PRMD). In this configuration, PRMD produces fresh water and electricity (Park et al. [1]), with the generated power offsetting electrolyzer consumption. A validated model was used to analyze process flows and to incorporate the temperature-dependent energy consumption of both the electrolyzer and MD modules. Based on these characteristics, the process configuration was designed to utilize available thermal sources efficiently, and performance was evaluated across a range of operating temperatures to identify the most suitable conditions for the E-PRMD system. Under these conditions, ammonia removal efficiency was compared with that of conventional processes to assess the feasibility of the system for wastewater treatment. Furthermore, specific energy consumption for the co-produced hydrogen and freshwater was compared against existing technologies, establishing the validity of direct comparison and highlighting the potential applicability of the E-PRMD concept.



References

1. K. Park, D.Y. Kim, D.R. Yang, Theoretical Analysis of Pressure Retarded Membrane Distillation (PRMD) Process for Simultaneous Production of Water and Electricity, Ind Eng Chem Res 56 (2017).

CT-SO11

이산화탄소 저온전기분해 - Fischer Tropsch 통합 공정 모델링 및 경제성·운전조건 최적화

도윤정[1], 정경호[1], 홍혜림[2], 황성원[1,2*]
[1]인하대학교 에너지 공정 혁신 융합 전공
[2]인하대학교 화학·화학공학 융합학과

화석 기반 항공유의 온실 가스 배출 저감을 통한 항공 부문 탈탄소화를 위해 Sustainable Aviation Fuel(SAF) 생산이 중요함. 특히, CO2 저온전기분해와 Fischer-Tropsch(FT) 합성 공정 연계는 탄소 저감 효과와 재생에너지와의 결합성이 높아 유망함. 본 연구에서는 재생에너지 기반 CO2 저온전기분해-FT 통합 공정을 대상으로 Aspen Custom Modeler(ACM)로 Anion Exchange Membrane(AEM) 전해조를 모델링하고, Aspen HYSYS와 연계하여 전체 시스템을 구성함. PEM 수전해와 Water-Gas Shift 기반 수소 공급 시나리오를 비교 평가하고, CCS 및 Hydrocracker를 포함한 전체 공정에서 탄소 이용 효율(Carbon Utilization Efficiency)을 분석함. 경제성은 Minimum Jet Selling Price(MJSP)를 기준으로 평가했으며, BoP(Balance of Plant)와 운전 조건 최적화를 통해 에너지 효율 향상과 SAF 단가 저감 전략을 제시함.

Acknowledgement
이 논문은 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(RS-2022-NR070869)
이 연구는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임.(RS-2023-00243974, 디지털기반 지속가능 에너지 공정혁신 융합대학원)

CT-SO12

Integrated Process Design for Electrochemical Nitrate Reduction Wastewater Treatment and Ammonia Purification

Minsuk Lim[1], Konan Alain Cedric Nzisso[1], Jungjae Oh[1], Inhye Kim[1], Sunghyun Cho[1,2]*
[1]School of Chemical Engineering, School of Semiconductor and Chemical Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Korea
[2]Clean Energy Research Center, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Korea

Conventional biological treatment of nitrate (NO_3^-) wastewater from the steel industry suffers from greenhouse gas (N_2O) emissions. To address these challenges, this study developed an economically viable and environmentally friendly process that treats NO_3^- wastewater while producing high-value ammonia through electrochemical nitrate reduction (ENR). Process simulation was conducted using Aspen Plus V.14.0 with the ELECNRTL thermodynamic model, integrating a pH swing reactor, ENR system, and downstream ammonia purification unit. Given the limited research on product separation following ENR, this work proposes a multi-stage purification strategy combining gas–liquid separation, absorption, and distillation to recover ammonia and oxygen at high purity. Economic analysis demonstrates that the optimized separation–purification configuration reduces operating costs by approximately 8.8% compared to conventional treatment routes, while enabling annual production of 859 tonne of ammonia and 3217 tonne of oxygen as valuable by-products. The ENR technology eliminates greenhouse gas emissions during nitrate treatment and, coupled with efficient purification, provides a circular economy model that transforms waste streams into marketable chemicals, contributing to carbon neutrality goals by 2050 and sustainable development of the steel industry.

CT-SO13

최적화된 아민 혼합물을 활용한 선상 CO_2 포집의 통합 공정 시뮬레이션 및 경제성 평가

Integrated Process Simulation and Economic Evaluation of Onboard CO_2 Capture Using Optimized Amine Blends

정경호[1,2], 황성원[1,2,3*]

[1]에너지공정혁신융합전공, 인하대학교

[2]화학·화학공학융합학과, 인하대학교

[3]스마트에너지소재및공정교육연구단, 인하대학교

(*Corresponding author : sungwon.hwang@inha.ac.kr)

본 연구에서는 선상 CO_2 포집(Onboard Carbon Capture, OCC)을 위해 MEA, DEA, MDEA 등 3종의 단일 아민과 4종의 혼합 용매를 포함한 다양한 아민계 용매 시스템 및 그 혼합물의 최적화를 수행하였다. 에너지 효율 평가를 위해 용매 순환량, CO_2 포집 용량, reboiler duty와 같은 주요 성능 지표를 분석하였으며, CO_2 포집량은 선박 디젤 엔진 배가스의 일반적인 농도를 반영하여 2ton/h, 목표 효율은 85%로 설정하였다. 배가스 냉각 과정에서 발생하는 열을 회수하고 공정에 필요한 스팀을 공급하기 위해 폐열 보일러(WHB)를 통합하였다. 최적화 변수로는 엔진 부하, 배가스 by-pass 비율, WHB 스팀 증기 분율, 흡수탑 공급 온도, 용매 유량, 흡수탑/재생탑 압력을 설정하여 목표 효율을 유지하면서 reboiler duty를 최소화하였다. 포집 설비의 공간 제약을 고려하여 흡수기, 재생기, 열교환기의 장치 크기를 산정하였고, 경제성 평가는 용매 비용, 에너지 수요, CO_2 저감에 따른 인센티브를 반영하여 수행하였다. 연구 결과, WHB 통합 시 에너지 소비가 약 32.5% 감소하는 것으로 확인되었으며 실험한 용매 중 20wt% MDEA와 10wt% PZ 수용액 혼합물이 L/G 비율 1.57, CO_2 loading 0.55로 가장 낮은 에너지 소비를 나타냈다. 또한 경제성 평가 결과 탄소세 시나리오 하에서 OCC 설비가 장착된 선박은 기존 선박 대비 경제적인 것으로 계산되었다.

Keyword : 탄소포집, 정적모사, 포집율, 에너지소모량, 경제성 평가

CT-SO14

조류 응집 기반 미세플라스틱 제거를 위한 초임계 수열 산화 공정 개발 및 환경·경제성 평가

김인혜[1], 오정재[1], 임민석[1], 조성현[1,2,*]
[1]전북대학교 화학공학부, 반도체·화학공학부, 54896 전북 전주시 덕진구 백제대로 567
[2]전북대학교 청정에너지연구센터, 54896 전북 전주시 덕진구 백제대로 567

Supercritical Hydrothermal Oxidation of Algae-Aggregated Microplastics: Environmental and Economic Assessment

Inhye Kim[1], Jeongjae Oh[1], Minsuk Lim[1], Sunghyun Cho[1,2,*]
[1]School of Chemical Engineering, School of Semiconductor and Chemical Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Korea
[2]Clean Energy Research Center, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Korea

미세플라스틱(Microplastics, MPs)은 수계에서 장기 잔류하며, 생태계와 인체 건강에 심각한 위해를 유발하는 대표적 신흥 오염 물질(Contaminants of Emerging Concern, CECs)임. 미세한 입자 크기와 높은 물리.화학적 안정성으로 인해 기존의 물리적 분리, 여과, 소각 등의 처리 방법으로는 완전 제거가 어렵고, 2차 오염 우려가 상존함. 본 연구에서는 조류의 표면 전하와 점착 특성을 활용해 MPs를 응집·회수한 뒤, 초임계 수열 산화(Supercritical Water Oxidation, SCWO) 공정을 적용해 CO_2와 H_2O만을 생성하는 처리 경로를 설계하였음. SCWO는 물의 임계점(374℃, 22.1 MPa) 이상에서 유기 오염 물질과 산화제의 상호 용해성을 높여 짧은 체류 시간 내 완전 산화를 유도하며, 고형 잔재 및 독성 부산물 생성을 최소화함. 산화제로는 고순도 산소(O_2), 과산화수소(H_2O_2), 압축 공기를 적용하여 각 조건에서 분해 효율, 부산물 특성 등을 비교.분석 하였으며, 전과정 평가(Life Cycle Assessment, LCA)와 기술-경제성 평가(Techno-Economic Analysis, TEA)를 통해 환경적·경제적 타당성을 검증하였음. 분석 결과, 제안된 공정은 MPs의 완전 산화를 통해 수계 오염 영향을 저감하고, 기존 처리 기술 대비 환경 부하를 줄이며 경제성을 향상시킬 수 있는 것으로 나타남. 본 연구는 SCWO 공정의 수계 CECs 처리 적용 가능성을 입증하고, 지속가능한 오염 물질 처리 및 자원순환 기술 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대됨.

CT-SO15

그린 암모니아 기반 수소 생산을 위한 촉매 비용 인덱스 개발

김선우, 가성빈[1], 김정환*
연세대학교 화공생명공학과, [1]울산대학교 화학공학부

그린 암모니아는 부피당 높은 에너지 밀도, 비교적 쉬운 액화조건, 기존 인프라 활용 가능성 등 다양한 장점으로 인해 수소 운반체로 주목받고 있다 [1]. 그린 암모니아를 활용한 수소 생산 공정에서는 암모니아 합성과 분해에 각각 촉매가 필수적으로 사용된다. 현재 실험 규모 연구에서는, 합성 촉매는 저온·저압 조건에서 성능 향상을, 분해 촉매는 저온 조건에서 성능 향상을 목표로 다양한 촉매 물질 개발이 이루어지고 있다 [2, 3]. 그러나, 실험실 규모에서 도출된 촉매 성능을 산업 규모 공정에서의 성능으로 연결하고 이를 경제적 가치로 정량화하는 데는 어려움이 존재한다. 이는 실험과 산업 규모 간 공정 운전 조건의 차이, 지역별 자원 조건의 의존성, 촉매 가격의 불확실성으로 인해 공정 경제성이 달라지기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 그린 암모니아 기반 수소 생산을 위한 촉매의 경제성을 정량적으로 평가할 수 있는 새로운 지표인 Affordable catalyst cost index (ACCI)를 제안하였다. ACCI는 수소 수입국 기준에서 자국 내 그린수소 자체 생산 비용과 수입한 그린 암모니아로부터 수소를 생산할 때의 비용 차이를 기반으로 산정되는, 촉매의 허용 가능한 최대 비용을 의미한다. ACCI를 도출하기 위해, 다양한 암모니아 촉매 실험 데이터를 수집하고, 이를 기반으로 키네틱과 전체 공정을 통합한 멀티스케일 모델을 개발하였다. 이후, 경제성 평가와 공정 최적화를 수행하여 촉매별 ACCI를 정량적으로 산출하였다. 마지막으로, 지역별 특성인 일사량 및 운송거리를 고려하여 주요 그린 암모니아 수출-수입국 조합에 대해 ACCI를 비교·분석하였다. 이를 통해, 실험 규모의 촉매 성능으로부터 산업 규모의 경제성까지 연결하여 허용 가능한 촉매 비용 산정에 대한 실질적인 가이드라인을 제공한다.

참고문헌

1. Chatterjee, Sudipta, Rajesh Kumar Parsapur, and Kuo-Wei Huang. "Limitations of ammonia as a hydrogen energy carrier for the transportation sector." ACS Energy Letters 6.12 (2021): 4390-4394.

2. Smith, Collin, Alfred K. Hill, and Laura Torrente-Murciano. "Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape." Energy & environmental science 13.2 (2020): 331-344.

3. Han, Tong, et al. "Catalyst design for ammonia decomposition: an overview." Industrial Chemistry & Materials (2025).

CT-SO16

Valorization of PVC Waste Film for Gold Recovery: Techno-Economic and Environmental Assessments

Seungho Lee , Wangyun Won*
Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University

The exponential growth of electronic waste in recent decades has posed a major environmental challenge, driving the need for sustainable strategies to recover valuable resources. Among these, urban mining has emerged as an attractive alternative for precious metal recovery, offering the dual benefits of reducing waste accumulation while alleviating reliance on conventional mining practices.

In this study, we explore the utilization of polyvinyl chloride (PVC) waste film as a precursor material for synthesizing a novel adsorbent to capture gold ions from aqueous solutions. By converting discarded plastics into functional sorbents, the proposed process simultaneously tackles two pressing environmental concerns: the accumulation of non-biodegradable plastic waste and the unsustainable nature of conventional gold extraction.

To evaluate the viability of this approach, a techno-economic analysis (TEA) was performed to estimate the minimum selling price (MSP) of the recovered gold. This assessment provides insights into process economics, identifying cost drivers, critical process parameters, and the sensitivity of overall feasibility to raw material and operational expenses. In parallel, a life cycle assessment (LCA) was conducted to quantify the environmental implications of this valorization strategy in comparison with conventional gold mining routes. Key impact categories, such as greenhouse gas emissions, energy demand, and resource depletion, were examined to determine the relative advantages of the waste-derived pathway.

The results demonstrate that integrating PVC waste valorization into urban mining not only provides an environmentally benign route for gold recovery but also offers competitive economic potential when compared to conventional methods. Overall, the study highlights how reimagining waste as a valuable feedstock can contribute to sustainable resource management, reduce environmental burdens, and support the transition toward greener industrial practices.

References

1. Eckelman, Matthew J., and Julian M. Allwood. "Circular economy and sustainability: The role of life cycle assessment." *Nature Sustainability* 4.2 (2021): 122–129.
2. Sun, Zhiguang, et al. "Closed-loop recycling of plastics enabled by dynamic covalent diketoenamine bonds." *Nature Chemistry* 13.5 (2021): 506–511.

자원순환
(학생 구두발표 III)

2025년 9월 25일(목) 11:20~11:30
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀B

CT-SO17

폐플라스틱 열분해로부터 생성된 염화수소의 용융 금속 기포 컬럼에서의 분해 특성 연구

이은지[1,2], 양원[1,2], 이은도[1,2], 이용운[1], 이영재[2,*]
[1]과학기술연합대학원대학교 청정공정에너지시스템공학, [2]한국생산기술연구원 지속가능기술연구소

A Study on HCl reduction produced from waste plastic pyrolysis in molten metal bubble column

Eunji Lee[1,2], Won Yang[1,2], Uendo Lee[1,2], Yongwoon Lee[1], Youngjae Lee[2,*]
[1]School of Convergence Manufacturing System Engineering, University of Science and Technology (UST), 89 Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungcheonagnam-do, 31045, Korea,
[2]Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), 89 Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungcheonagnam-do, 31045, Korea

플라스틱은 높은 활용성 덕분에 우리의 삶 속에 깊숙이 자리 잡았으나, 지속적으로 사용량이 급증함에 따라 심각한 환경오염 문제에 직면하게 되었다. 그러므로, 기존의 매립이나 소각과 같은 처리 방식에서 벗어나 오염 물질의 배출을 줄이면서 동시에 유용한 화합물로 재생산이 가능한 친환경 폐플라스틱 재자원화 공정이 필요하다. 특히, 탄소중립의 이슈와 맞물려 산업적 활용도를 높일 수 있는 화학적 재활용을 위한 폐플라스틱 재자원화 연구가 활발하게 수행되고 있다. 폐플라스틱 열분해는 폐플라스틱으로부터 수소를 생산함과 동시에 이산화탄소를 배출하지 않아 지속적으로 활용 가능한 기술 중 하나이나, 폐플라스틱 내에는 제조, 수거 과정에서 다양한 불순물이 존재할 수 있다. 특히, PVC(Polyvinyl chloride) 내의 염소는 열분해 시 수소와 결합하여 염화수소가 생성될 가능성이 매우 높고, 부식성이 강한 유독성 기체로 제거 공정이 필수이다.

폐플라스틱 열분해를 통해 충분한 수소 수율을 확보하기 위해서는 높은 반응 온도를 필요로 하며, 고체 촉매 반응시 생성된 탄소로 인해 촉매 효율이 저하될 가능성이 있다. 따라서, 이를 해결하기 위해 용융 금속 촉매를 적용함으로써 폐플라스틱으로부터 수소 수율을 높이기 위한 반응 온도를 낮추고, 촉매 효율의 지속성을 확보하고자 연구 개발을 수행 중이다. 이러한 연구 개발 과정에서 본 연구의 주요 목적은 폐플라스틱 열분해로부터 생성된 염화수소의 용융 금속에서의 동시 분해 특성을 분석하는데 있다. 용융 금속 촉매에서의 기체 열분해 반응은 기체 분자와 액상 촉매와 접촉에 의한 일어나며, 주로 기체-액체의 계면에서 촉매 반응이 일어난다. 기체-액체 간 접촉면적이 넓을수록, 용융 금속 촉매 내에서의 기포 체류시간이 길수록 전체 반응 효율을 높이는 데 유리하다. 그러므로, 용융 금속 촉매 내에서 기포의 다양한 동적 거동을 예측하여 제어하는 것은 용융 금속 촉매를 포함한 기포 컬럼 반응기에서의 촉매 반응성을 결정하는 주요 인자이다.

따라서, 본 연구에서는 용융 금속에서의 기포 크기와 속도를 예측하기 위해 가시화를 통한 냉간 실험과 실험실 규모의 기포 컬럼 반응기를 활용한 고온 실험을 수행하였다. 이를 통해 비가시 환경에서 용융 금속에서의 기포의 수력학적 특성을 분석하는 것이 가능하였으며, 고온의 용융 금속에서 반응 기체의 기포 노즐에 따라 기포의 크기와 속도를 예측할 수 있었다. 이를 기반으로 기포의 크기 및 속도, 그리고 다양한 합금에 따른 염화수소 분해에 대한 영향 및 성능을 분석하였다. 그 결과, 용융 금속 촉매를 적용한 시스템을 활용하여 폐플라스틱 열분해를 통한 수소 생산 뿐만 아니라 불순물 중 하나인 염화수소의 동시 분해가 가능할 것으로 분석되었다. 그러므로, 본 연구 결과는 폐플라스틱의 재자원화를 위한 기초 생산 공정 기술로써 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

청정융합 에너지전환

(학생 구두발표 IV)

2025년 9월 25일(목) 13:00~15:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀C

CT-SO18

인산리튬으로부터 리튬 회수를 위한 환원제 보조 습식공정 연구

박소현[1], 권동혁[1], 이준호[2], 민유빈[2], 안용태[2*]
[1]경기대학교 환경에너지공학과, [2]경기대학교 사회에너지시스템공학과

Hydrometallurgical Process with an Additive for Lithium Recovery from Lithium Phosphate

Sohyun Park[1], Donghyuk Kwon[1], Junho Lee[2], Yoobean Min[2], Yongtae Ahn[2*]
[1]Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, [2]Department of Civil & Energy System Engineering, Kyonggi University

리튬이온전지는 높은 에너지 밀도와 우수한 전기화학적 성능으로 인해 전기차(EV)와 재생에너지 저장시스템(ESS) 등 친환경 에너지 저장 장치의 핵심 기술로 자리잡고 있다 [1]. 세계 리튬이온전지 수요는 빠르게 증가하고 있으며 2030년에는 1,100만 톤을 초과할 것으로 전망된다. 이러한 추세 속에서 리튬의 주요 공급원인 탄산리튬(Li_2CO_3)의 중요성은 더욱 부각되고 있다 [2][3]. 그러나 대한민국은 리튬 원료를 전량 수입에 의존하고 있어 안정적 공급망 확보가 시급하다 [4]. 따라서 생산 공정 중 발생하는 폐수에서 잔존 리튬을 회수하는 기술은 자원 효율성과 공급 안정성을 동시에 향상시킬 수 있는 유망한 대안으로 평가된다. 탄산리튬 생산 공정의 여과액에는 용해도가 매우 낮은 인산리튬(Li_3PO_4)이 잔존하며 [5], 이는 효과적인 리튬 회수 대상으로 주목받고 있다. 기존의 산 침출법은 회수 효율은 높으나 에너지 소모와 화학약품 사용량이 과다하여 환경적 우려가 제기되고 있다 [6]. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 산과 환원제를 결합한 습식공정을 적용하여 화학약품 사용량과 폐수 발생을 최소화하면서 효율적인 리튬 회수를 달성하고자 하였다 [7]. 실험에는 염산(HCl), 황산(H_2SO_4), 질산(HNO_3)을 침출액으로, 과산화수소(H_2O_2), 과망간산칼륨($KMnO_4$), 과황산칼륨($K_2S_2O_8$)을 환원제로 사용하였다. 산 농도(0.5–3 M), 환원제 농도(0.01–0.5 M), 온도(25℃와 80℃) 등 다양한 조건에서 30분간 반응을 수행하였다. 반응 후 용액은 ICP-OES로 분석하여 리튬 침출 효율을 평가하였다. 실험 결과, 온도 변화에 따른 효율 차이는 크지 않았으나 산-환원제 조합에 따라 회수율은 뚜렷하게 달라졌다. 일부 조건에서는 기존 산 침출법보다 높은 효율을 나타냈으며, 동시에 시약 사용량과 폐수 발생을 줄일 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 환원제 보조 습식 제련 공정은 향후 리튬 공급망 안정화와 환경적 부담 완화에 기여할 수 있는 가능성을 보여준다.

참고문헌

1. Gruber, P. W., & Medina, P. A. (2010). Global lithium availability: A constraint for electric vehicles? University of Michigan.

2. Alekseyev, S. V., & Alekseyeva, L. P. (2008). Lithium-bearing brines in the Daldyno-Alakatsky district (Western Yakutia). Geography and Natural Resources, 29(2), 173–177.

3. Vikström, H., Davidsson, S., & Höök, M. (2013). Lithium availability and future production outlooks. Applied Energy, 110, 252–266.

4. USGS. (2022). Mineral Commodity Summaries 2022. Reston, VA, USA.

5. Zhao, S., Ding, H., Wang, Y., Li, B., & Nan, C. (2013). Improving rate performance of $LiFePO_4$ cathode materials by hybrid coating of nano Li_3PO_4 and carbon. Journal of Alloys and Compounds, 566, 206–211.

6. Flexer, V., Baspineiro, C. F., & Galli, C. I. (2018). Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. Science of the Total Environment, 639, 1188–1204.

7. Yu, J., Wang, X., Zhou, M., & Wang, Q. (2019). A redox targeting-based material recycling strategy for spent lithium-ion batteries. Energy & Environmental Science, 12, 2672–2677.

CT-SO19

유기고분자 함유 광산배수 슬러지 내 고농도 희토류 분리 공정 개발

오동윤[1], 김민지[1], 김연화[1], 종초은[1], 장 민[1*]

[1]광운대학교 공과대학 환경공학과

Development of a process for high-Concentration rare earth elements from acid mine drainage sludge containing organic polymers

Dong Yoon Oh[1], Min Ji Kim[1], Yeon Wha Kim[1], Choe Earn Choong[1] and Min Jang[1*]

[1]Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

Rare Earth Elements (REEs) are essential components in high-tech, clean energy, and national security applications due to their unique magnetic, optical, and electronic properties. However, the global REE supply is heavily concentrated in a few countries, raising concerns about long-term resource security and supply chain stability. Consequently, there is growing interest in alternative and sustainable REE sources. Acid Mine Drainage (AMD) is formed by the oxidation of sulfide minerals, resulting in low pH water with high concentrations of heavy metals such as ion (Fe), aluminum (Al), manganese (Mn), zinc (Zn), copper (Cu), nickel (Ni), and cobalt (Co). The sludge produced from AMD treatment is typically considered a high-disposal-cost waste. However, this AMD sludge also contains high concentrations of REEs, making it a potentially valuable resource.

This study presents an optimized method for recovering high concentrations of REEs from AMD sludge, which in polymeric organic matter. The total REE concentration (TREE) in the sludge was measured at 1186.1 mg/kg using ICP-OES after aqua regia digestion, confirming the high value of mine drainage sludge for REE recovery. We developed an optimal REE extraction process by testing various conditions, including different acid types, concentrations, and the presence or absence of hydrogen peroxide (H_2O_2). Adding H_2O_2 was found to increase the redox potential, which typically enhances REE dissolution while reducing the dissolution of other metal ions. However, in our process, the addition of H_2O_2 only increased the REE extraction efficiency by a negligible 2.7%. In contrast, it increased the dissolution rate of other metal ions by 11% and the total organic carbon (TOC) concentration by 30%. This indicates that H_2O_2 significantly influences both the dissolution of metal ions and the decomposition of polymeric organic matter. The optimal condition for REE extraction was found to be using 1.0 M hydrochloric acid (HCl) without H_2O_2. This process successfully recovered 1025.3 mg/kg of TREE, achieving an extraction efficiency of 86%. Our findings propose a practical and scalable method for recovering REEs from complex waste materials like AMD sludge, contributing to sustainable resource recovery and enhancing the resilience of the REE supply chain.

References

1. Lu., et al., *Recovery of rare earth elements from spent fluid catalytic cracking catalyst using hydrogen peroxide as a reductant.* Minerals Engineering, 2020. **145**: p. 106104.

CT-SO20

TiO_2에서 공기를 활용한 광촉매적 암모늄 생성에서 산소 영향 이해

김연화[1], 테스젠[1], 장 민[1,2], 종초은[1,2*]
[1]광운대학교 환경공학과, [2]플라즈마바이오연구센터

Understanding the oxygen effect on photocatalytic ammonium production using air over TiO_2

Yeonhwa Kim[1], Swe Jyan Teh[1], Min Jang[1,2], Choe Earn Choong[1,2*]
[1]Kwangwoon University Environmental Engineering, [2]Plasma Bioscience Research Center

Ammonium (NH_4^+) has emerged as a promising hydrogen carrier due to its high hydrogen content and relatively liquid fraction pressure (8 atm) [1]. Currently, NH_4^+ is produced through the Haber-Bosch process, which is an energy-intensive process. Hence, the development of an environmentally friendly and high production rate of the NH_4^+ process is highly desirable but challenging. In this study, we explored the influence of oxygen concentration on the photocatalytic production of NH_4^+ over TiO_2. The optimal yield of NH_4^+ was obtained under a gas mixture of 20% O_2 ($_{80\%}N_2/_{20\%}O_2$) and 80% N_2, reaching 242.4 mg L^{-1} - approximately 12.8 times higher than that under 100% N_2 [2]. This is due to the addition of O_2, which improved the sacrificial reagent oxidation, improving the H^+ formation and increasing NH_4^+ production. The XRD and XPS analysis revealed the promotion of oxidation of TiO_2 as the increase of O_2. Furthermore, the addition of O_2 promoted the nitrogen oxidation reaction (NOR) and resulted in the formation of nitrate and nitrite in photocatalysis. Lastly, photocatalytic flow cell experiments and an outdoor pilot experiment were conducted to investigate the scalability of photocatalytic NH_4^+ production under ambient air.

Acknowledgment

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea funded by the. by the Korean government (Grant No. RS-2023-00240726).

References

1. Lan, R., J.T. Irvine, and S. Tao, *Ammonia and related chemicals as potential indirect hydrogen storage materials.* Int. J. Hydrogen Energy, 2012. **37**(2): p. 1482-1494.
2. Kim, Y., et al., *Unveiling the Overlooked Role of Oxygen in Nitrogen Oxidation Reaction for Enhanced Photocatalytic Ammonium Production over TiO_2: Mechanism and Pilot-scale system studies.* Appl. Catal. B: Environ., 2025: p. 125743.

CT-SO21

지속가능한 바이오디젤 생산을 위한 과일 씨앗 폐기물의 열화학적 고부가가치화

김민영[1], 권일한[1*]
[1]한양대학교 자원환경공학과

Thermochemical Valorization of Fruit Seed Waste for Sustainable Biodiesel Production

Minyoung Kim[1], Eilhann E.Kwon[1*]
[1]Department of Earth Resource and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

운송 부문의 탈탄소화 목표를 달성하기 위해 바이오디젤에 대한 수요가 전 세계적으로 꾸준히 증가하고 있으나, 현재의 생산은 주로 식용 바이오매스에 의존하고 있어 식량-연료 경쟁 심화와 환경적 부담을 초래할 수 있다. 이러한 점에서 지속가능성과 자원 순환을 위해 비식용 바이오매스를 바이오디젤 원료로 활용하는 기술 개발이 필요하다. 과일 가공 산업에서는 매년 씨앗을 포함한 대량의 잔류물이 발생하며, 대부분 재활용되지 못한 채 폐기되고 있다. 특히 과일 씨앗은 다량의 오일을 함유하고 있음에도 아미그달린과 같은 독성 성분으로 인해 활용 가치가 저평가되어 왔다. 이에 본 연구에서는 비식용 과일 씨앗 중 하나인 살구씨를 모델 원료로 하여 열화학적 경로를 통한 지속가능한 바이오디젤 생산 방법을 제시하였다. 살구씨 오일을 대상으로 열유도 전이에스터화 반응을 적용한 결과, 촉매 없이 다공성 소재(실리카)만 존재하는 조건에서 단 1분 이내에 98.28 wt.%의 바이오디젤 수율을 달성하였으며, 이는 기존의 상용 촉매 전이에스터화 반응에서 60분 반응에도 불구하고 91.84 wt.%의 수율을 기록한 것과 비교해 반응 효율과 속도 면에서 크게 향상된 것이다. 기존 공정에서는 오일 함유 바이오매스의 오일 분획만을 활용하며 잔류물은 폐기되지만, 이러한 추출 잔류물 역시 활용 가능한 풍부한 탄소 자원을 포함하고 있다. 따라서 본 연구에서는 오일 추출 후 잔류물인 탈지 살구씨(DAS)를 열분해하여 바이오차(DASB)를 제조하고 이를 바이오디젤 생산의 다공성 소재로 활용하였다. 제조된 DASB는 16 nm 이하 및 50 nm 이상의 기공을 갖는 메조·마크로 기공 구조를 보유하고 있어 트리글리세리드 분자(약 2 nm)보다 큰 기공을 통해 전이에스터화 반응에 적합한 물리적 특성을 제공하였으며, DASB 내 알칼리 금속 성분은 반응을 촉진하여 330 °C에서 상업용 실리카 사용 시 43 wt.%였던 수율을 96 wt.%로 크게 향상시켰다. 본 연구는 과일 씨앗 폐기물의 오일과 추출 잔여물을 모두 활용하는 통합 열화학적 전략을 제시함으로써, 폐기물 저감과 자원 고부가가치화, 지속가능한 바이오디젤 생산을 동시에 달성할 수 있는 잠재력을 입증하였다.

사사: 본 연구성과는 2023년도 정부(교육기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2023-00219667) 본 연구성과는 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2024-00412457)

CT-SO22

이산화탄소 활용 촉매 열분해를 통한 지속가능한 폐플라스틱 처리 및 합성가스로의 전환

이상윤, 권일한*
한양대학교 자원환경공학과

Sustainable Management of Plastic Waste and Syngas production via CO_2-Utilizing Catalytic Pyrolysis

Sangyoon Lee, Eilhann E. Kwon*
Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

플라스틱은 내구성, 가공성, 그리고 저렴한 비용 덕분에 다양한 산업 분야에서 널리 사용되어 왔으며, 결과적으로 폐기물의 급증에 기여해 왔다. 매립 및 소각을 포함한 기존의 플라스틱 폐기물 관리는 미세 플라스틱과 유해 물질 생성으로 환경적 위험을 초래하며, 재활용은 기술적, 경제적 어려움으로 인해 제한적이다. 열분해는 원료 제약 없는 공정으로 플라스틱 폐기물의 가치를 높일 수 있는 유망한 대안으로 부상하고 있다. 그러나 액상 열분해물의 불균일성으로 인해 공정의 획일화가 어려우며, 후속 공정이 요구된다. 이에 실제 적용을 위해서는 더 단순한 생성물, 특히 합성가스로의 추가적인 열분해가 필요하다. 본 연구에서는 이산화탄소(CO_2)를 반응 매질로 사용하여 플라스틱 폐기물을 합성가스로 촉매 열분해하는 방법을 연구했다. CO_2는 산화제 역할을 하여 휘발성 물질의 열분해를 촉진하고 합성가스 생산을 향상시킨다. 폴리프로필렌을 주성분으로 하는 직조플라스틱백(WPB)은 그 내구성과 활용도로 여러 산업분야에서 소비되어 왔으며, 그로 인해 다량의 폐기물이 발생한다는 점에서 모델 원료로 선정했다. 촉매 열분해는 니켈(Ni) 기반 촉매를 사용하여 500, 600, 700℃의 온도에서 질소(N_2) 및 CO_2 조건 각각 수행되었다. 700°C에서 CO_2 하의 일산화탄소(CO)가 다량 포함된 합성가스를 얻을 수 있었으며, 합성가스의 수율은 N_2에 비해 4.07배 증가했다. WPB은 산소 원자를 포함하지 않고 있어 CO의 발생은 CO_2으로부터 기인한다. CO_2 효과를 최적화하기 위해 700°C에서 다양한 CO_2 농도(0~80 vol.%)를 주어 촉매 열분해를 추가로 진행했다. CO_2 50 vol.%에서 합성가스 생산량은 80 vol.%에서와 유사하였으며, 이는 CO_2 효과가 포화되었음을 나타낸다. 이는 플라스틱 폐기물과 CO_2의 탄소를 합성가스로 재분배하여 탄소 활용을 극대화한 공정으로 지속 가능한 폐기물 관리 및 가치 증대의 가능성을 보여준다.

사사: 본 연구성과는 2023년도 정부(교육기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2023-00219667) 본 연구성과는 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2023-00274658)

CT-SO23

해외 도입 바이오에탄올 기반 지속가능항공유 생산방식의 이산화탄소 배출 감축 전략 평가

Alcohol-to-Jet 공정설계, 경제성평가 및 환경성평가

정형준[1,2], 황성원[1,2,3]*

[1]인하대학교, 화학 화학공학융합학과
[2]인하대학교, 에너지공정혁신융합전공
[3]인하대학교, 스마트 에너지 소재 및 공정 교육연구단

항공 분야의 이산화탄소 배출은 전체 이산화탄소 배출의 4%정도를 차지하지만, 지속가능항공유(SAF)는 탄소중립을 달성하는데 있어 65%의 기여를 할 수 있을 것으로 예상되고 있다. 하지만 국내에서는 이러한 SAF를 생산하는데 필요한 원료를 확보하는 것이 어렵기 때문에, 해외에서 생산한 에탄올을 이용하는 방법이 주목받고 있다.

본 연구에서는 해외에서 수입한 바이오 에탄올을 원료로 하여 SAF를 생산하는 통합공정에 대한 공정설계 및 최적화를 진행하였으며, 경제성평가 및 전주기평가를 통해 원료에서 SAF생산까지의 경제성 및 탄소 배출량을 파악하였다. 또한 이 과정에서 발생하는 여러가지 이산화탄소 배출 원인을 파악하였으며, 다양한 이산화탄소 배출 저감 시나리오를 통해 감축할 수 있는 이산화탄소 배출량을 파악하였다.

본 연구를 통해, 수입 바이오 에탄올을 이용하여 SAF를 생산하는 공정의 경제성을 파악하였고, 약 6.38$/gal의 최소판매단가를 확보할 수 있는 것을 확인하였다. 또한 LCA평가를 통해 미국, 브라질 등에서 생산하는 바이오 에탄올을 이용하는 시나리오를 비교하는 과정을 통해, 각 시나리오 별 CI(Carbon Intensity)를 도출하였으며 미국의 옥수수를 통해 생산하는 바이오에탄올은 약 86.58gCO2e/MJ SAF, 브라질의 사탕수수를 통해 생산한 경우 약 61.19gCO2e/MJ SAF의 이산화탄소가 발생하는 것을 확인하였다. 또한 에탄올 발효과정에서의 CCUS 기술의 도입, RNG이용 및 LNG추진선박 도입 등 다양한 이산화탄소 배출량 저감 시나리오를 통해 감축량 및 실현 가능성을 평가하였다.

참고문헌

1. Hirunsit, Pussana, et al. "From CO2 to sustainable aviation fuel: navigating the technology landscape." ACS Sustainable Chemistry & Engineering 12.32 (2024): 12143-12160.

2. Uddin, Md Mosleh, et al. "Sustainable aviation fuel from ethanol: Techno-economic analysis and life cycle analysis." Applied Energy 398 (2025): 126373.

CT-SO24

Synergistic Roles of Fe/Co Ratio and Na Promotion in Direct CO_2 Hydrogenation toward C_{5+} Hydrocarbons

Hae Won Jung[1,2], Sun A Choi[1], Soon Kwan Jeong[1], Ki Bong Lee[2] and Sun-Mi Hwang[1*]

[1]Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeongro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Republic of Korea

[2]Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Republic of Korea

Direct catalytic conversion of carbon dioxide (CO_2) into long-chain hydrocarbons offers a promising route toward sustainable liquid fuel production and carbon neutrality [1]. In this study, Fe–Co bimetallic catalysts with systematically varied composition ratios were developed to investigate the effect of Fe/Co balance on C_{5+} hydrocarbon selectivity during CO_2 hydrogenation and to determine the optimal ratio. While Fe serves as the primary active phase in Fischer–Tropsch synthesis (FTS) and Co promotes hydrogenation activity, monometallic catalysts typically generate significant amounts of by-products such as CO and CH_4 [2,3]. To address this limitation, Na was introduced to further suppress by-product formation and enhance C_{5+} selectivity. Catalytic performance evaluation under various reaction conditions revealed that the optimally composed Na/Fe–Co catalyst exhibited substantially higher CO_2 conversion and C_{5+} selectivity than its monometallic counterparts. These findings highlight the synergistic roles of Fe and Co in the CO_2-to-liquid-fuel pathway and provide a rational design strategy for efficient bimetallic catalysts targeting high-value fuel production.

Acknowledgement

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20224C10300010).

References

1. Aresta, M., Dibenedetto, A., Angelini, A., “Catalysis for the Valorization of Exhaust Carbon: From CO_2 to Chemicals, Materials, and Fuels. Technological Use of CO_2,” *Chem. Rev*., **114** (3), 1709−1742 (2014).
2. Liu, R., Leshchev, D., Stavitski, E., Juneau, M., Agwara, J. N., Porosoff, M. D., “Selective Hydrogenation of CO_2 and CO over Potassium Promoted Co/ZSM-5,” *Appl. Catal. B Environ*., **284**, 119787 (2021).
3. Liu, N., Wei, J., Xu, J., Yu, Y., Yu, J., Han, Y., Wang, K., Orege, J. I., Ge, Q., and Sun, J., “Elucidating the Structural Evolution of Highly Efficient Co–Fe Bimetallic Catalysts for the Hydrogenation of CO_2 into Olefins,” *Appl. Catal. B Environ.*, **328**, 122476 (2023).

CT-SO25

Investigation of ruthenium loaded zeolite beta catalyst performance in vanillin hydrodeoxygenation yielding both monomeric and dimeric cycloalkanes

Jae Hyun Park[1], Hyungjoo Kim[1], Hyeongdong Jung[1], Jeong-Myeong Ha[2], and Do Heui Kim[1*]

[1]School of Chemical and Biological Engineering, Institute of Chemical Process, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Republic of Korea,

[2]Clean Energy Research Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul 02792, Republic of Korea

The valorization of lignin-derived bio-oil is studied extensively due to its promising contribution to sustainability. Among these studies, many have focused on the hydrodeoxygenation (HDO) of phenolic model compounds as it is a crucial process in obtaining valuable oxygen-free hydrocarbons. In this work, vanillin HDO was performed on various bifunctional ruthenium-based zeolite catalysts with different zeolite supports (Y, ZSM-5, and beta) in a batch reactor. Ru-loaded beta zeolite catalysts (Ru/Hβ) exhibited the highest HDO activity among them at 200 °C and 50 bar H2, and the formation of dimeric cycloalkanes of high value were also observed specifically when using it. Due to their benefits of direct use in blending of biofuel, factors promoting the dimerization of phenolic monomers were extensively examined through a series of experiments using a mix of phenolic model compounds as HDO reactants. Specific oxygen containing functional groups contributed to the aldol condensation of aromatic species, and the structure and kinetic diameter of the monomers had a profound effect on the ability to participate in dimerization. Additionally, the metal loading of the catalyst and reaction conditions such as temperature and hydrogen pressure were varied to observe each of their effects on the product distribution. Particularly, the change in metal loading had a remarkable impact on the preferred reaction pathway and product selectivity. Consequently, this study has provided valuable information on the production of both monomeric and dimeric cycloalkanes and has contributed to the development of the bio-oil upgrading process.

CT-SO26

Cu-Zn-Al 기반 고정층에서의 CO 공투입 효과 : COx-메탄올 전환 성능 비교

박경두, 장은호, 채호진, 배종욱 [1], 박노국 [2], 이수출 [3], 남형석*
경북대학교 기계공학과, [1] 성균관대학교 화학공학과, [2] 영남대학교 화학공학과
[3] 경북대학교 차세대에너지기술연구소

Enhancement by CO Co-Feeding in CO_X-to-Methanol : A Comparative Study on Cu-Zn-Al Fixed Bed

Kyungdu Park, Eunho Jang, Hojin Chae, Jong Wook Bae[1], No-Kuk Park[2], Soo Chool Lee[3], Hyungseok Nam*
Dept. of Mechanical Engineering, Kyungpook National University,
[1]School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University (SKKU),
[2]School of Chemical Engineering, Yeungnam University,
[3]Research Institute of Advanced Energy Technology, Kyungpook National University

Key Words: CO co-feeding(일산화탄소 공투입), Cu-Zn-Al catalyst(Cu-Zn-Al 촉매), CO_X-to-Methanol conversion(CO_X-메탄올 전환), Packed-bed reactor(고정층 반응기)

초록: CO_X(=CO_2/CO)로부터 메탄올을 합성하는 공정은 온실가스 활용과 고부가 화학원료 생산을 동시에 달성할 수 있는 유망 기술이다.본 연구는 Cu-Zn-Al(CZA) 촉매를 사용하여, CO_2/H_2 단독 피드와 $CO/CO_2/H_2$ 공투입의 성능을 동일 촉매 부피와 공간속도(SV) 조건에서 정량 비교하였다. 고정층(packed-bed) 반응기를 사용해 230℃-290℃, 30-50 bar 의 산업 유사 조건에서 운전하였고, 가스크로마토그래피(GC) 정량은 내부표준 및 외부 검량선을 병행해 수행하였다. 주요 지표로 CO_2 전환율, CO 전환율, CO_X 전환율, 메탄올 선택도 및 수율을 평가하였으며, 실험 결과, CO/CO2/H2 공투입 조건에서 동일 SV·촉매 부피 기준으로 메탄올의 절대 정량(생성량)이 유의하게 증가함을 확인하였다. CO 공투입은 CO 수소 첨가 경로의 병행 활성화, WGS 연동에 의한 OH^* 제거/활성 H^* 재생을 통해 메탄올 생성 성능을 개선하는 경향을 보였다. 본 연구는 CO 공투입의 정량적 효과를 실험적으로 검증하고, 피드 조성-SV-운전 조건 최적화에 필요한 기준 데이터를 제공한다. 향후에는 장기 안정성, 스케일업 및 CFD 기반 열·유동 해석을 결합한 설계 가이드를 제시할 예정이다.

Abstract The conversion of CO_X (CO_2/CO) to methanol is a promising route to simultaneously utilize greenhouse gases and produce high-value chemical feedstocks. This study quantitatively compares CO_2/H_2 single feeds with $CO/CO_2/H_2$ co-feeding over a commercial Cu–Zn–Al (CZA) catalyst under identical catalyst volume and space velocity (SV). Experiments were conducted in a packed-bed reactor at 230–290 °C and 30–50 bar, and gas-chromatographic quantification employed both an internal standard and external calibration. Key metrics included CO_2 conversion, CO conversion, CO_X conversion, and methanol selectivity and yield. Notably, under $CO/CO_2/H_2$ co-feeding, the absolute (GC-quantified) methanol production increased significantly at the same SV and catalyst volume. Co-feeding CO tended to improve methanol formation by activating the parallel CO-hydrogenation pathway and by removing surface OH^* and regenerating H^* via WGS-coupled steps. This work experimentally validates the quantitative benefits of CO co-feeding and provides baseline data for optimizing feed composition, SV, and operating conditions. Future efforts will address long-term stability, scale-up, and CFD-based thermal/flow analyses to guide reactor design.

Acknowledgments
This work was supported by the Carbon Neutral Industrial Strategic Technology Development Program funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (RS-2023-00261088).

대기환경

(학생 구두발표 V)

2025년 9월 25일(목) 13:00~14:20
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 스톤홀A

CT-SO27

Qualitative Validation of Core-shell Silica-Encapsulated Carbon-Zeolite Composites with Covalently Grafted PEI for Enhanced CO_2 Adsorption under Humid Conditions

Wathone Oo, Ji Hye Park[1], May Zaw Win and Kwang Bok Yi[1*]

Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Republic of Korea

[1]Department of Chemical Engineering Education, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Republic of Korea

Escalating atmospheric carbon dioxide (CO_2) level due to anthropogenic activities necessitates efficient adsorption-based removal strategies such as Direct Air Capture (DAC). The efficacy of DAC hinges on development of adsorbents with superior CO_2 selectivity and uptake, even in the presence of competing N_2, which exhibits similar kinetic diameters like CO_2. Although zeolite-based adsorbents are known for structural stability and moderate CO_2 uptake, their large supercages hinder CO_2 selectivity, necessitating further modification. This study explores the incorporation effects of hydrophobic carbonaceous materials within Faujasite supercages to leverage synergy between carbon and zeolite, taking advantage of their distinct adsorption natures to enhance CO_2 selectivity over N_2 while improving adsorbents' regeneration. Hydrothermal synthesis of carbon-zeolite (CZ) composites resulted in enhanced surface area and emergence of additional supermicropores (~0.7 nm), as evidenced by porous characterization. Owing to tailored porous architecture, the optimized CZ-composites exhibited enhanced CO_2 selectivity even under N_2-rich conditions representative of ambient atmosphere, revealing potential for DAC applications. To further enhance CO_2 adsorption performance, high-molecular weight branched polyethyleneimine (PEI), rich in diverse amine functionalities, was covalently grafted onto the pre-synthesized CZ-composites. However, under humid conditions, moisture intrusion poses a significant challenge by obstructing pore access and inducing structural degradation, primarily through competitive adsorption with CO_2 at active sites. This detrimental effect was particularly pronounced in conventionally impregnated PEI-CZ composites, where poor dispersion of bulky PEI molecules facilitates excessive water uptake over CO_2. To address this, thin SiO_2 shell was deposited onto CZ-composites, provided reactive anchoring sites for subsequent covalent PEI functionalization. The resulting core-shell architecture enables uniform PEI dispersion, effectively mitigating moisture interference while achieving superior CO_2 uptake under harsh conditions of RH (~ 75 – 80%) and continuous exposure to low – concentrated CO_2 (400 ppm CO_2/N_2), outperforming non-encapsulated analogues, promising for moisture-tolerant, amine-functionalized hybrid adsorbents.

CT-SO28

메탄 열분해 기반 연료 탈탄소화 연계 무화염 연소에서의 이산화탄소-질소산화물 동시 저감 연구

유지호[1,2], 홍종섭[1], 김성일[2], 이은도[2], 이영재[2,*]
[1]연세대학교, [2]한국생산기술연구원

탄화수소 기반 연료를 통한 에너지 생산은 필연적으로 대표적 온실가스인 이산화탄소(CO_2)를 배출한다. 이에 산업계에서는 탄소 기반 연료를 저탄소 또는 무탄소 대체 연료로 전환하거나 기존 에너지원을 전기로 대체하여 탄소중립을 달성하고자 하나, 전기 기반 에너지 전환은 산업 전반에 걸쳐 다양한 기술적 제약에 직면해 있다. 이러한 배경에서 기존 에너지 인프라를 활용할 수 있는 대안으로 수소가 주목받고 있으며, 수소의 공급 및 활용 기술 고도화 역시 중요하다.

메탄 열분해($CH_4 \rightarrow 2H_2 + C(s)$)는 천연가스의 주성분인 메탄을 수소와 고체 탄소로 전환하는 열화학적 공정으로, 이론적으로 수소 생산 과정에서 CO_2 배출이 없고 연료의 탈탄소화를 가능하게 한다. 그러나 열분해 생성물 중 수소는 연소 시 높은 화염 온도로 인해 thermal NO_x 배출이 증가할 수 있다. 또한 열분해 생성물 조성은 반응 온도 및 체류시간에 민감하여, 운전 조건에 따른 연료 특성의 변동성이 현저히 높아질 수 있다.

본 연구에서는 메탄 열분해 생성물인 수소, 탄화수소, 그리고 잔류 메탄을 무화염 연소에 직접 적용하여 화염 기반 연소의 한계를 극복하고자 하였다. 무화염 연소는 균일한 온도장 형성, 저 NO 및 CO 배출, 높은 연소 안정성, 우수한 에너지 효율성을 특징으로 한다. 이를 통해 메탄 열분해 생성물의 연료 활용 가능성을 평가하고, 연소 시 발생하는 NO 배출량을 최소화하는 것을 주요 목표로 설정하였다.

반응 온도 1000 – 1200 °C 범위에서 수행된 메탄 열분해 실험 결과를 기반으로 연료 조성을 선정하고, 이를 바탕으로 무화염 연소 실험 및 화학 반응 기구 기반의 수치 해석을 병행하였다. 실험에서는 연료 조성 변화에 따른 연소 안정성과 배출 특성을 분석하였으며, 수치 해석에서는 열분해 온도 변화에 따른 고체 탄소 생성량과 이에 따른 연소 연료의 에너지 손실 및 추가 에너지 요구량을 평가하였다.

연구 결과, 열분해 온도 상승에 따라 메탄 전환율이 증가하고 고체 탄소 생성량이 늘어나면서 총 생성물의 에너지는 감소하였으나, 연소 후 CO_2 배출량은 유의미하게 저감되었다. 또한 무화염 연소 실험에서 CO 배출이 관측되지 않았으며, NO 배출량 역시 25 ppm 이하로 유지되어 모든 연료 조건에서 안정적인 연소가 이루어졌음을 확인하였다. 본 연구는 메탄 열분해 기반 연료 탈탄소 공정과 무화염 연소 기술을 통합한 시스템의 수치적 분석을 통해, 다양한 산업 분야에서 온실가스 감축을 실현할 수 있는 기술적 가능성을 제시한다.

CT-SO29

Enhancing SO_2 resistance in vanadium catalysts with tungsten disulfide for NH_3-SCR

Donghyeok Kim[1,2], Myeung-Jin-Lee[1], Bora Jeong[1], Bora Ye[1], Seungho Cho[2], Hong-Dae Kim[1*]

[1]Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan 44413, Republic of Korea.
[2]Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan 44419, Republic of Korea.

NO_x emissions are a major environmental issue, and NH_3-SCR is a key method for their control. V-based catalysts perform well at high temperatures; however, SO_2-poisoning remains a critical issue for NH_3-SCR catalysts under low-temperature conditions. In this study, we develop an effective strategy of loading a stable sulfide two-dimensional (2D) material, WS_2, to enhance the SO_2 resistance of existing commercial V/Ti catalysts. In-situ DRIFTS analysis and spent SO_2-poisoning catalyst analyses are conducted to clarify the enhanced SO_2 resistance mechanism. These findings demonstrate that the superior SO_2 resistance can be attributed to the suppression of SO_2 by WS_2. Therefore, WS_2 loading inhibits the SO_2 adsorption and protects the NH_3 species adsorption, thereby enhancing the SO_2 resistance and low-temperature activity. This research can be utilized without changing the catalyst synthesis process, allowing it to be applied to current commercial catalysts, thereby underscoring its remarkable potential for industrial applications.

Keywords
NH_3-SCR; SO_2-resistance; tungsten disulfide; sulfur vacancy; in-situ DRIFTS

CT-SO30

Preparation of N-doping controlled carbon derived from crab shell for enhanced CO_2 adsorption

Jiyull Kim, Deok Woo Kim, Dong Seop Choi, Ji Bong Joo*

Department of Chemical Engineering, Konkuk University, 120 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05029, Republic of Korea.

In modern industrial societies, the continuous increase in carbon dioxide emissions exacerbates climate change and various environmental challenges. Against this backdrop, Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) technologies are increasingly recognized as crucial solutions, not only for reducing carbon dioxide emissions but also for capturing and storing existing CO_2. This study focuses on adsorption, a method noted for its low initial investment, simplicity, and cost efficiency in carbon dioxide removal. Nitrogen-doped carbon was synthesized using waste crab shells, exhibiting enhanced performance in carbon dioxide adsorption. The synthesis process was conducted under a consistent nitrogen flow with varying calcination temperatures, identifying optimal conditions for maximizing adsorption capacity. The surface properties of the carbon adsorbents were controlled through heat treatment at different temperatures, with N-CP600, synthesized at 600 °C, demonstrating the highest adsorption performance. The superior adsorption capacity is attributed to the advantageous surface characteristics, including the balanced presence of pyridinic nitrogen, which acts as active sites for CO_2 adsorption, and the large specific surface area. This research provides valuable insights into the development of waste-derived carbon adsorbents and contributes to greenhouse gas management strategies, particularly in the context of implementing CCUS policies.

Acknowledgement

This work was partly supported by the Technology development Program of MSS [S3215134].

References

1. Ktzas et al. "Removal of dyes from aqueous solutions with untreated coffee residues as potential low-cost adsorbents: Equilibrium, reuse and thermodynamic approach" *Chem. Eng. J.*, **180-190**, 148-159 (2012).

2. Huang et al. "Activated carbons prepared by the KOH activation of a hydrochar from garlic peel and their CO_2 adsorption performance" *New carbon mater.*, **34**(3), 247-257 (2019).

CT-SO31

Simultaneous NO_x and SO_x Removal for Flue Gas Applications via Single and Double Stage Absorption Columns with Additives

Jeong Min Lee, Jiyull Kim, Sang Bin Kim, Deok Woo Kim, Ji Bong Joo*

Department of Chemical Engineering, Konkuk University, 120 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05029, Republic of Korea.

Sulfur oxides (SO_x) and nitrogen oxides (NO_x) emitted from chemical processes pose serious threats to both the atmospheric environment and human health, making their mitigation a critical environmental challenge in modern society. Among the various methods developed to reduce such harmful substances, the wet absorption process where SO_x and NO_x are removed via oxidation or reduction reactions using additives in a liquid medium has been widely applied in industrial settings due to its ease of process control and high treatment efficiency. This study investigates SO_x and NO_x removal in wet absorption processes using laboratory-scale single- and double-column systems. Removal efficiencies under various oxidizing and reducing agent conditions were evaluated with a single-column system. A double-column system, designed to minimize additive interference, was employed to obtain fundamental data for estimating reaction mechanisms. In this system, oxidation and reduction stages were physically separated, enabling each reaction to proceed independently. The resulting data provided insights into additive reaction pathways and supported the derivation of optimal process conditions. These findings advance both the performance assessment and mechanistic understanding of wet absorption-based air pollutant control, with potential relevance to industrial applications.

References

1. Zhao, Yi et al. "Simultaneous removal of SO_2 and NO using M/$NaClO_2$ complex absorbent" *Chem. Eng. J.*, **160**(1), 42-47 (2010).

2. Jin et al. "Simultaneous removal of SO_2 and NO by wet scrubbing using aqueous chlorine dioxide solution" *J. Hazard. Mater.*, **135**(1-3), 412-417 (2006).

CT-SO32

Carbonized Titanium-MIL-125-Derived Anatase TiO_2 as a Novel Support for Enhanced Selective Catalytic Reduction

Hyejin Kim[1,2], Hee Soo Kim[1], Jungho Jae[2] and Dong-Ha Lim[1*]

[1]Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan, Republic of Korea
[2]Division of Chemical and Biomolecular Engineering, Pusan National University, Republic of Korea

Effective mitigation of NOx emissions from fossil fuel combustion requires the enhancement of the catalytic properties of conventional NH_3-SCR catalysts. In particular, intrinsic characteristics such as electron transfer capability and oxygen vacancies play a critical role in promoting the formation of reactive intermediates, lowering activation energy, and enhancing redox activity, thereby directly influencing catalytic efficiency [1]. This study aims to elucidate the effects of improved electron transfer and oxygen vacancy properties on the activity and durability of SCR catalysts and to propose a design strategy for the development of highly efficient and durable SCR catalysts.

In this study, MIL-125(Ti), a titanium-based metal–organic framework (MOF), was carbonized under a nitrogen atmosphere to form anatase TiO_2 and enhance electron transfer capability and oxygen vacancies. Carbonization was performed at 300, 450, and 600 °C, yielding materials that served as supports for SCR catalysts. The active metals V_2O_5 and WO_3 were impregnated onto the carbonized supports. The resulting NH_3-SCR catalysts were designated VW/TM-300, VW/TM-450, and VW/TM-600. Their structural and catalytic properties were subsequently evaluated. The physicochemical properties of the synthesized catalysts were characterized using XRD, BET, XPS, TPD, Raman spectroscopy etc. Catalytic performance was evaluated under simulated operating conditions, focusing on NOx reduction efficiency. VW/TM-600 exhibited the highest catalytic activity among the synthesized samples. This enhanced performance is attributed to the development of mesoporous structures, improved electron transfer due to abundant surface sp^2 carbon, and an increased concentration of oxygen vacancies.

These findings demonstrate that carbonized MIL-125(Ti) can serve as an effective anatase TiO_2 support, providing insights for the design of highly efficient NH_3-SCR catalysts. The study highlights the critical role of structural and electronic modifications in optimizing catalytic performance.

Reference

1. Zhang et al. “In situ DRIFTS study and mechanism analysis of selective catalytic reduction of NOx by NH_3 over ions doping MnCeOx/GR catalyst,” *Mol. Catal.*, **561**, 114177 (2024).

Acknowledgment

This research was supported by the Korea Institute of Industrial Technology as "Development of super clean modular platform technology based on AI for eco-friendly ship to respond to IMO 2020/2050 regulations” (KITECH EH-25-0005).

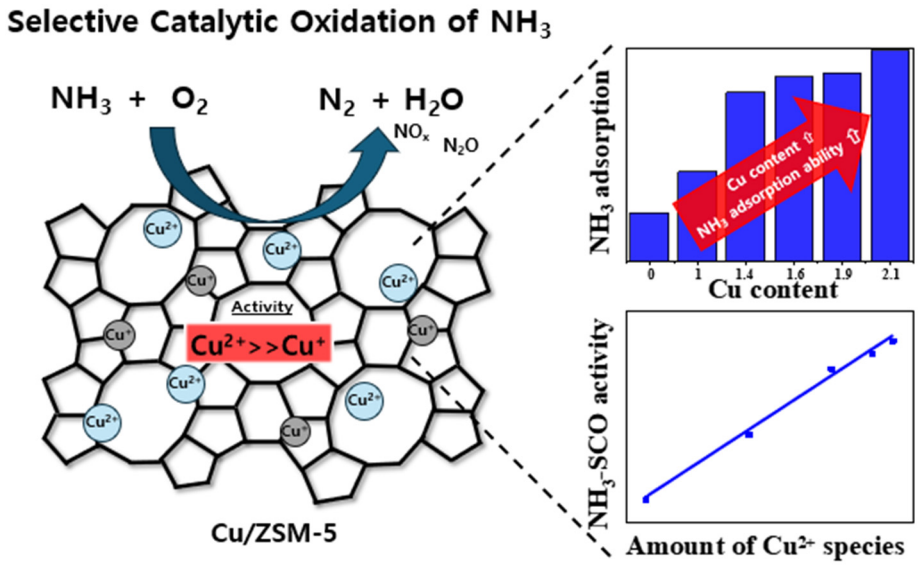
CT-SO33

Revealing the active Cu species in Cu/ZSM-5 catalysts for the selective catalytic oxidation of ammonia

Sein Hwang, Dong Chan Park, Hyeongdong Jung, Eunwon Lee, Do Heui Kim*

School of Chemical and Biological Engineering, Institute of Chemical Processes, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

Ammonia slip, a by-product of NH_3-based processes, poses significant environmental and health risks, necessitating its removal via selective catalytic oxidation of ammonia (NH_3-SCO). In this study, a series of Cu/ZSM-5 catalysts with varying Cu loadings was synthesized via ion-exchange, where the 2.1Cu/ZSM-5 catalyst achieved up to 99.5 % NH_3 conversion and 99.4 % N_2 selectivity at 400 °C. The distribution of Cu species was quantified using H_2-TPR and EPR analyses and correlating Cu speciation with reaction rates revealed a strong linear relationship between isolated Cu^{2+} ions and catalytic activity. A controlled experiment on the reduction of Cu^{2+} to Cu^{+} led to a marked decrease in NH_3 conversion, confirming Cu^{2+} ions as the primary active sites. The turnover frequency (TOF) normalized to Cu^{2+} ions remained nearly constant, with a slight increase at higher Cu loadings, indicating their dominant role in NH_3 oxidation. Further NH_3-TPD and in situ DRIFTS analyses demonstrated that Cu ion-exchange enhances NH_3 adsorption, facilitating its participation in the NH3-SCO reaction and potentially improving catalytic performance. These findings provide valuable insights for the rational design of efficient Cu/zeolite catalysts for NH_3 removal in industrial applications.



청정생산

(학생 구두발표 VI)

2025년 9월 25일(목) 14:00~14:30
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 윈드홀A

CT-SO34

Molecular dynamic simulations to estimate the solubility of fatty acids in water at elevated temperatures and pressures

Jeongho Park[1], Wonbin Seo[1], and Tae Jun Yoon[1,2*]

[1]School of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University, Institute of Chemical Processes, Seoul, 08826, Republic of Korea

[2]School of Transdisciplinary Innovations, Seoul National University, Seoul, 08826, Republic of Korea

One of the methods for producing biodiesel is hydrothermal liquefaction of waste cooking oil. To optimize the reaction conditions, understanding the thermodynamic behavior (particularly mutual solubility and solvation enthalpy) under high-temperature and high-pressure environments is crucial. However, under subcritical and supercritical conditions, experimental determination of such properties for biodiesel precursors, namely fatty acids, is challenging. In this study, molecular dynamics simulations were performed using LAMMPS with the TraPPE-UA force field and TIP4P/2005 water model to investigate the mutual solubility between water and selected fatty acids (palmitic, stearic, oleic, and linoleic acids). Free energy perturbation was employed to estimate solubility in a range of subcritical and supercritical conditions. Theoretical approaches based on statistical associating fluid theory (SAFT) and equations of state (EoS) were additionally employed to estimate mutual solubility, providing an independent comparison to the molecular simulation results.

CT-SO35

Bilayer gas sensors with a catalytic CeO_2 overlayer for exclusive detection of aromatic compounds

Seong-Young Yoon, Jung-Hoo Seo and Seong-Yong Jeong*
Division of Advanced Materials Engineering, Kongju National University, Cheonan, Chungnam 31080, Republic of Korea

Abstract

Volatile aromatic hydrocarbons (VAHs) are indoor air pollutants that cause serious health risks, as even trace-level exposure can lead to a variety of diseases. However, the poor selectivity of conventional sensors toward VAHs remains significant obstacle to their practical application in real-world environments. To overcome this challenge, bilayer sensors with a catalytic CeO_2 overlayer have been designed. The sensors achieve high response (S_B= 45.3, S_T= 61.2, S_E= 32.7, S_X=29.2, S_S= 35.4) and selectivity (44.7) towards the detection of VAHs, while also providing cost-effective, rapid, and highly accurate detection. In this study, a systematic analysis was conducted on both the composition of bilayer sensors and the thickness of the catalytic CeO_2 overlayer in order to optimize sensing performance. The CeO_2 catalytic overlayer was coated onto various sensing materials (SnO_2, Pt-SnO_2, Au-SnO_2, In_2O_3, Rh-In_2O_3, Au-In_2O_3, WO_3, and ZnO). The result sensors showed the high response and selectivity to VAHs demonstrating general potential for universal sensor design. Accordingly, the bilayer sensors coated with a catalytic CeO_2 overlayer can be considered as a new promising strategy to design highly reliabe oxide semiconductor gas sensors.

Keywords: Gas sensors, Volatile aromatic hydrocarbons, Bilayer sensors, CeO_2, Oxide semiconductors

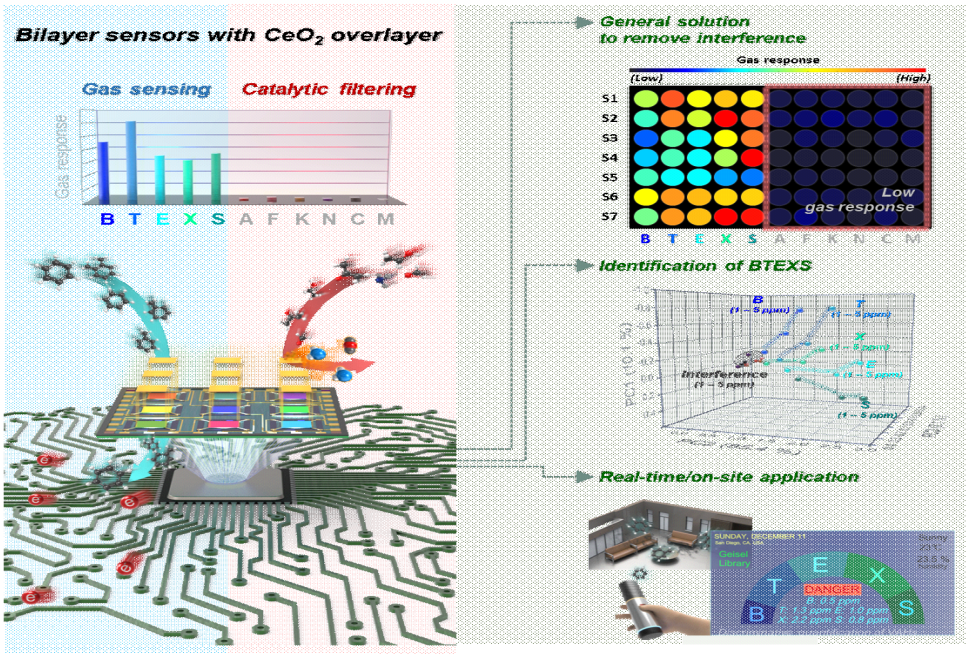


Fig. 1 Schematic of the detection mechanism of the bilayer sensor with CeO2 overlayer

CT-SO36

Ammonia separation using metal halides by high temperature pressure swing adsorption

HyeokSang Ryu[1,2], HeeSu Kim[1], Jung-Ho Jae[2*] and Dong-Ha Lim[1*]
Green Materials & Process R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan, Korea[1]
Division of Chemical and Biomolecular Engineering, Pusan National University, Korea[2]

Hydrogen derived from ammonia can be used in a variety of applications such as fuel cells and vehicles. However, the unreacted ammonia produced during the cracking process is lethal to hydrogen fuel cells, requiring very strict emission limits. Among several separation technologies that remove this unreacted ammonia, pressure swing adsorption (PSA) is the most economical hydrogen purification system known. However, the adsorption process is most effective at low temperatures, so it is not suitable for directly purifying the gas produced at the end of the decomposition process at high temperatures. Therefore, adding extra equipment for heat exchange and cooling increases the hydrogen selling price.

In this reason, the aim of this study is to develop an adsorbent that can absorb and separate ammonia under high-temperature and high-pressure operating conditions. For high-temperature adsorption, the metal halide chemical adsorbent was used instead of the conventional physical adsorbent such as zeolite and activated carbon. The main adsorbent used was $MgCl_2$, which is known for its excellent regeneration performance. In addition, to improve the adsorption, $MgCl_2$ was dispersed in an oxide substrate such as Al_2O_3, TiO_2, ZrO_2 to improve thermal resistance and performance. The performance of the adsorbent was evaluated using TPD and chemisorption, and compared with commercial ammonia adsorbents such as zeolite under PSA conditions at high temperatures, confirming its superiority.

Acknowledgements

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government (MOTIE).

References

1. Tokushige, M., Fujisawa, R., Aika, K., and Ryu, J., "Pressure Swing Absorption and Desorption of Ammonia in Calcium Halide Solid Mixtures," ACS Omega, 10, 3709-3717 (2025).
2. Aristizabal-González, C., Muñoz-Senmache, J. C., Prerna, Siepmann, J. I., Tsapatsis, M., and Hernández-Maldonado, A. J., "Ammonia Adsorption at High Temperature and Pressure Using Sodium Containing Aluminosilicates: Selectivity over Nitrogen and Multicycle Working Capacities," Ind. Eng. Chem. Res., 64, 4027-4039 (2025).

에너지저장

(학생 구두발표 VII)

2025년 9월 25일(목) 14:10~15:30
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 아일랜드볼룸B

CT-SO37

Structurally Engineered Liquid Crystalline $Ti_3C_2T_X$ MXene Films via Bio-Inspired Molecules for High-Performance Energy Storage

Seojin Woo[1], Sunghee Choi[1], Ingyu Choi[1], Dongju Lee[1*]

[1]Department of Urban, Energy, and Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Republic of Korea.

*dongjulee@chungbuk.ac.kr

Supercapacitors (SCs) are essential components in modern energy storage systems, known for their high power density, rapid charging/discharging capabilities, and excellent long term cycling stability. Recently, hybrid ion capacitors have attracted considerable interest as they offer enhanced energy density compared to traditional supercapacitors. Among various electrode candidates, two dimensional (2D) $Ti_3C_2T_X$ stands out for its high conductivity, large surface area, tunable surface chemistry, and mechanical flexibility. Nonetheless, the inherent van der Waals forces between MXene layers often cause restacking, which severely restricts their electrochemical efficiency.

Here, we introduce bio-inspired molecules as spacers to stabilize the MXene architecture and enhance its electrochemical properties. The resulting freestanding hybrid film exhibited an increased interlayer distance and a highly ordered lamellar architecture, promoting efficient ion diffusion and electron transport. The optimized electrode achieved a high specific capacity of 92.9 mAh/g at a current density of 0.2 A/g and preserved 94.7% of its initial capacity after 5,000 charge/discharge cycles, reflecting exceptional cycling endurance. Additionally, the films distinct structural features support the storage of multivalent ions, positioning it as a strong candidate for high energy hybrid ion capacitors. This work highlights the importance of structural engineering in advancing 2D materials for next-generation energy storage.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes(COMPA) grant funded by the Korean Government(Ministery of Science and ICT) (RS-2023-00304768), the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT)(No. RS-2023-00217581) and the National Research Council of Science & Technology(NST) grant by the Korea government (MSIT) (No. CAP 22074-000).

CT-SO38

금속-유기 골격체 기반 전이금속 질화물/탄소 복합체 합성 및 리튬 이차전지 음극 소재로의 적용

정승호[1], 조중상[1*]
[1]충북대학교 공업화학과

최근 전기차와 전자 기기의 수요 증가로 인해 고에너지밀도, 고출력, 장수명의 특성을 갖는 리튬 이차전지에 대한 필요성이 높아지고 있다. 다양한 음극 소재 중, 전이 금속 질화물은 우수한 전기전도성과 높은 이론 용량을 기반으로 유망한 차세대 음극 소재로 주목받고 있다. 그러나 낮은 리튬 이온 확산도와 충·방전 중 전이금속 질화물의 심각한 부피 팽창으로 인해 전지의 수명 및 용량 저하의 문제점을 초래한다. 따라서 해당 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 수열 합성, 탄소 코팅 공정, 후열처리 공정을 통해 질소 도핑 탄소층이 코팅된 비정질 탄소 복합 다공성 나노로드 내부에 분포된 금속-유기 골격체 기반 전이금속 질화물 나노입자를 합성하여 리튬 이차전지 음극 소재로 적용하였다. 금속-유기 골격체 기반 비정질 탄소는 열처리 과정 중 전이금속 질화물의 결정 성장을 효과적으로 억제하여 전기전도성과 리튬 이온 확산도가 향상된 전이금속 질화물 나노입자의 형성을 유도하였다. 또한 질소 도핑 탄소층으로 코팅된 나노로드 구조체는 3차원 전도성 네트워크를 형성함으로써 구조체 간 전기적 접촉을 향상시켜 전자전달을 효율적으로 촉진하였다. 또한 충·방전 중 전이금속 질화물의 부피 팽창은 다공성 구조와 질소 도핑 탄소층에 의해 완화되어 구조적 안정성을 향상시켰다. 그 결과, 합성된 나노구조체를 적용한 음극은 10.0 A g^{-1}의 높은 전류 밀도에서 5,000 사이클 후 73 mA h g^{-1}의 가역적인 방전 용량과 80.2%의 용량 유지율을 나타내어 우수한 수명 및 율속 특성을 입증하였다.

CT-SO39

이중 양·음이온 도핑한 Co-free $LiNi_{0.9}Mn_{0.08}Al_{0.02}O_2$ 양극재의 합성 및 고안정성 리튬이온이차전지로의 응용

김준[1], Srinivasan Alagar[3], 박기대[2,3*] 정상문[1,3*]
[1]충북대학교 화학공학과
[2]충북대학교 신소재공학과
[3]충북대학교 차세대에너지기술연구소

Synthesis of a dual cation‐anion‧doped Co-free $LiNi_{0.9}Mn_{0.08}Al_{0.02}O_2$ cathode material and its application to highly stable lithium-ion secondary batteries

Jun Kim[1], Srinivasan Alagar[3], Gi Dae Park[2,3*], Sang Mun Jeong[1,3*]

[1]Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University
[2]Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University
[3]Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University

90% 이상 Ni 함량의 층상 양극은 높은 이론용량에도 불구하고 Li^+/Ni^{2+} 혼입, 구조 불안정, 미세균열로 인한 과도한 SEI 형성으로 장기 성능 유지가 어렵다. 이를 해결하고자 공침법으로 Co-free high-Ni 기반 층상 $LiNi_{0.9}Mn_{0.08}Al_{0.02}O_2$(NMA) 양극재를 합성한 뒤 Mo^{6+}/F^-를 도핑하여 NMAMF(F‐Mo‐NMA)를 제조했고, XPS·FIB·EDS로 입자 내부 도핑을 검증하였다. DFT에 따르면 Mo^{6+}는 Ni site, F^-는 O site에 자발적으로 도핑되며, PDOS·Bader·전하 밀도 차이(CDD) 분석 결과 탈리튬 전후 O 2p 변화가 미미하고 Ni 3d 이동이 작으며 Ni‐O 전자 손실이 균형화되어 금속층‐Li층 상호작용이 강화됨을 확인했다. 전기화학적으로 NMA와 NMAMF는 0.1 C에서 각각 203.6 와 231 mAh g^{-1}의 초기 방전용량을 보였고, 1 C에서 200 사이클 후 용량 유지율은 각각 76 %와 82 %였다. 이러한 향상은 Mo^{6+} 도핑이 cation ordering을 유도하고 탈리튬화 과정에서 pillar로 작용해 층상 구조 붕괴를 억제했기 때문이다.[1] F^- 도핑은 유익한 antisite 결함층을 형성하여 Li^+ 확산 경로를 안정화하고 계면 열화와 격자 응력을 완화했기 때문이다[2]. 이와 같은, 층상 구조 붕괴 억제는 in-situ XRD로 확인하였고, antisite 결함층의 존재는 중성자 회절 분석으로 검증하였다. 흑연 음극과의 풀셀에서도 NMAMF는 0.1 C에서 176 mAh g^{-1}의 초기 방전용량과 200사이클 후 98 %의 용량 유지율을 달성했다. 따라서 Mo/F 공동 도핑은 Co-free high-Ni 양극재의 고에너지 밀도와 장기 사이클 안정성을 동시에 확보할 수 있는 효과적인 전략임이 입증되었다.

사사
본 연구는 과학기술정보통신부(MSIT)의 재원으로 한국연구재단(NRF) 및 과학기술사업화진흥원(COMPA)의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RS-2023-00217581, RS-2023-00304768).

참고문헌

1. Park et al. “Introducing High-Valence Elements into Cobalt-Free Layered Cathodes for Practical Lithium-Ion Batteries,” Nature Energy, 7, 946‐954 (2022).

2. Li et al. “Inducing Favorable Cation Antisite by Doping Halogen in Ni-Rich Layered Cathode with Ultrahigh Stability,” Adv. Sci., 6 (4), 1801406 (2019)

CT-SO40

리튬이온전지용 실리콘 내재된 3차원 CNT/rGO 복합 마이크로스피어 합성 및 피치 유래 탄소 코팅 최적화

조범수[1], 조중상[1,*]
충북대학교 공업화학과[1]

최근 전기차 및 ESS 등 대규모 에너지 저장 장치 수요의 증가에 따라 고에너지 밀도의 리튬이차전지 개발이 요구되고 있다. 실리콘은 흑연 대비 약 10배 높은 이론용량(3596 mA h g^{-1})과 낮은 전극 전위(~0.4 V vs. Li/Li^+)를 가지고 있어 유망한 리튬이차전지 음극 소재로 각광받고 있다. 하지만 실리콘(Si)은 리튬과의 합금/탈합금 반응 중 큰 부피 팽창(~360%)으로 인해 집전체로부터 박리되어 전기적으로 고립되는 문제를 가지고 있으며, 낮은 전기전도도(~10^{-5} S/cm)로 인해 상용화에 어려움을 겪고 있다. 따라서 부피 팽창에 의한 응력을 완화하고 구조 전반의 전기전도도를 향상시키기 위해 도전재와 바인더, 나노 구조화, 탄소·금속·MOF·MXene 복합 등의 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 분무건조 공정 기반의 실리콘/탄소 복합 마이크로스피어 내에 2차원 환원된 산화 그래핀(rGO)와 1차원 탄소나노튜브 (CNTs)를 동시에 도입하여 3차원 rGO-CNTs 전도성 네트워크를 형성하였다. 이는 구조체 내부에 효율적인 전하 이동 경로를 제공하여 전기전도도를 높이고, 부피 변화에 따른 기계적 응력을 완화한다. 또한 구조체 내부 기공 및 표면에 전도성 피치 유래 탄소를 충진하여 구조 전반의 기계적 강도를 높이고 전해질과의 불필요한 반응을 억제함으로써 초기 쿨롱 효율을 향상시켰다. 전기화학 특성 평가 결과, 합성된 Si-CNT/rGO/AC@PDC 음극은 3814/2791 mA h g^{-1}의 초기 방전/충전 용량과 73.2%의 높은 초기 쿨롱 효율을 보였으며, 1.0 A g^{-1}의 전류 밀도에서 350사이클 후에도 947 mA h g^{-1}의 용량을 유지하였다. 또한 350사이클 후 전극 표면의 전계 방출형 주사전자현미경 분석 결과를 통해, 장기 사이클 동안 전극 붕괴가 최소화됨을 입증하였다.

CT-SO41

Structural Engineering of $Ti_3C_2T_x$ MXene with Cellulose Nanocrystals toward High-performance Flexible Supercapacitors

Sunghee Choi[1], Seojin Woo[1], Dongju Lee[1*]

[1]Department of Urban, Energy, and Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Republic of Korea.

*dongjulee@chungbuk.ac.kr

Supercapacitors have garnered significant attention as advanced energy storage systems owing to their high-power density, rapid charge–discharge capability, and long-term cycling stability. Nevertheless, their relatively low energy density remains a major limitation, prompting the development of strategies to enhance performance. Two-dimensional $Ti_3C_2T_x$ MXene has emerged as a promising electrode material due to its outstanding electrical conductivity, large surface area, hydrophilicity, and abundant surface functional groups. However, $Ti_3C_2T_x$ MXene suffers from self-restacking driven by van der Waals interactions, which reduces interlayer spacing and hinders ion accessibility.

In this study, we address this challenge by incorporating cellulose nanocrystals (CNCs) as nanoscale spacers within MXene films to fabricate a composite electrode. The introduction of CNCs effectively expands the interlayer spacing, thereby facilitating ion transport pathways and increasing the exposure of electrochemically active sites. As a result, the $Ti_3C_2T_x$ MXene-CNC based flexible supercapacitor delivered a high areal energy density of 6.12 μWh cm^{-2} at a power density of 33 μW cm^{-2}, along with remarkable mechanical durability, retaining its initial capacitance after 500 bending cycles. This study highlights the potential of CNC-based structural engineering in MXene films for enhancing both electrochemical performance and mechanical flexibility, offering a promising strategy for the development of high-performance electrodes in next-generation flexible energy storage technologies.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT)(No. RS-2023-00217581) and the National Research Council of Science & Technology(NST) grant by the Korea government (MSIT) (No. CAP 22074-000).

CT-SO42

Novel Uniformly sized Yolk-Shell Microspheres Synthesis by One-Pot Spray Pyrolysis and Application as Potassium-Ion Battery anode

Tae Ha Kim[1], Yun Chan Kang[2*], Gi Dae Park[1,3*]

[1]Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-gu, Cheongju 28644, Republic of Korea

[2]Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Anam-Dong, Seongbuk-Gu, Seoul 136-713, Republic of Korea

[3]Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-gu, Cheongju 28644, Republic of Korea

Yolk-shell structures with a core@void@shell configuration have attracted significant attention due to their tunable physical and chemical properties, enabling a wide range of functional applications. However, conventional synthesis methods undergo complex and time-consuming processes. In this study, we present a scalable novel spray pyrolysis-based strategy that integrates in-situ polymerization with drying control agents for the uniform fabrication of yolk-shell microspheres. By systematically investigating various carbon sources, including citric acid, ethylene glycol, sucrose, polyvinylpyrrolidone, and combinations, we found that drying control agents enhanced spherical morphology and size distribution. Uniform-sized nickel oxide yolk-shell microsphere was selected as the initial target material, and enhanced yolk-shell structured nickel sulfide@C microspheres, obtained through post-treatments, were applied as anode materials for potassium-ion batteries. This study provides a novel scalable strategy to produce yolk-shell microspheres with tailored functionalities for diverse advanced applications.

Acknowledgments

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) and the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) funded by the Ministry of Science and ICT (Grant No.: RS-2023-00217581,RS-2023-00304768).

CT-SO43

Core–Shell structured composite Synthesis and Electrode Design for High-Energy-Density All-Solid-State Batteries

Jin Woong Lee[1,3], Jin Sung Park[2], Do Woong Yoon[1], Yoon Chan Kang[3,*] and Dae Soo Jung[1,*]
[1]Energy Storage Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology
Jinju-si, 52851, Republic of Korea
[2]Department of Materials Science and Engineering, Ajou University
Suwon, 16499, Republic of Korea
[3]Department of Materials Science and Engineering, Korea University,
Seoul, 02841, Republic of Korea

All-solid-state batteries (ASSBs) with sulfide-based solid electrolytes (SSEs) are widely recognized as next-generation rechargeable batteries due to their superior safety and high energy density. However, compared to conventional LIBs, securing intimate physical contact between active materials (AMs) and solid electrolytes (SEs) in ASSBs remains challenging, resulting in high interfacial resistance, poor lithium-ion percolation, and increased electrode porosity. These issues cause high ionic/electronic tortuosity, non-uniform component distribution, and low AM utilization, severely degrading electrochemical performance at high AM loading. Therefore, the key to achieving high energy density in ASSBs lies in simultaneously ensuring intimate interfacial contact, homogeneous material distribution, continuous ion/electron conduction pathways, and low electrode porosity.

In this research stream, we first developed $LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O_2$ (NCM811)@Li_6PS_5Cl (LPSCl) core–shell particles via a mechano-fusion (MF) process, enabling conformal and thin SE coatings that establish a robust lithium-ion percolation network while maintaining intimate contact during cycling. This approach improved electrochemical performance without increasing SE content. In the subsequent study, we systematically optimized the LPSCl coating thickness to balance ionic and electronic conductivities in NCM811@LPSCl composites, identifying ~300 nm as the optimal thickness for ensuring homogeneous coating and maximizing high-rate capability. Building on these findings, we designed an electrode combining NCM811@LPSCl core–shell particles with small SE fillers to fill micro-voids, reducing packing porosity and conduction tortuosity.

Collectively, this progressive approach — from core-shell composite synthesis to coating thickness optimization and particle size distribution engineering — enables thick electrodes with high AM content (≥85 wt%) and high volumetric energy density (up to 1258 Wh L^{-1}), which provides a comprehensive guideline for the realization of high-performance and high-energy-density ASSBs.

This work was supported by the Technology Innovation Program (20026752, RS-2024-00418815) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

CT-SO44

Spray pyrolysis of waste-derived solutions for the synthesis of heteroatom-doped cobalt oxide yolk-shell microspheres with enhanced lithium storage

Yeong Beom Kim[1,2], Yun Chan Kang[1,*] and Gi Dae Park[2,3*]

[1]Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Anam-Dong, Seongbuk-Gu, Seoul 136-713, Republic of Korea.

[2]Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-Gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Republic of Korea.

[3]Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-gu, Cheongju 28644, Republic of Korea.

The development of sustainable and high-performance electrode materials is vital for next-generation lithium-ion batteries. Among various options, heteroatom-doped transition metal oxides are promising candidates due to their high capacity and favorable electrochemical characteristics. However, the scarcity and rising cost of critical metals such as cobalt and nickel hinder their broad adoption. Recycling these metals from industrial waste offers an effective solution, with cobalt recovery being particularly valuable. In this work, cobalt was reclaimed from cemented tungsten carbide waste and converted into yolk–shell structured, heteroatom-doped cobalt oxide anodes through a simple leaching process and spray pyrolysis. The presence of additional metals from the waste enabled multi-heteroatom doping, which created oxygen vacancies in the cobalt oxide lattice and enhanced lithium storage capability. This approach not only recovers valuable resources but also delivers a robust anode material for sustainable battery technologies.

Acknowledgments

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) and the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) funded by the Ministry of Science and ICT (Grant No.: RS-2023-00217581,RS-2023-00304768).

대기환경

(포스터발표 I)

2025년 9월 25일(목) 09:00~11:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비

PE-1

탄닌산 기반 금속-킬레이트 복합체를 이용한 저온 환원 촉매 제조 및 암모니아 분해 반응 적용

황성범, 김나연, 최동섭, 주지봉*
건국대학교, 05029 서울특별시 광진구 능동로

Preparation of Low-Temperature Reduction Catalysts Using Tannic Acid-Based Metal-Chelate Complexes and Their Application to Ammonia Decomposition Reactions

Sung Beom Hwang, Nayeon Kim, Dong Seop Choi, Ji Bong Joo*
Konkuk University, 120, Nengdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, 05029, KOREA

미래 친환경 에너지 시스템에서 주목받는 수소의 저장•운반 매개체로서 주목받는 암모니아로부터 효과적인 수소 생산을 위해서는 암모니아 분해 촉매 기술이 핵심이다. 그러나 산업 현장에서 촉매 전환 온도가 반응 온도보다 높을 경우 추가적인 에너지 소모와 시간 지연 문제가 발생한다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 천연 고분자 킬레이트제인 탄닌산을 활용한 촉매 제조법을 제시한다. 탄닌산의 페놀성 수산기가 금속 이온과 강한 킬레이트 착물을 형성하는 특성을 이용하여, 촉매 지지체 (MgO, Al_2O_3)에 탄닌산 층을 형성하고 Ni 전구체를 담지한 후 질소 분위기에서 열처리를 수행하였다. 이 과정에서 Ni-탄닌산-금속 킬레이트 구조로부터 탄소 골격체가 형성되어 Ni 나노입자와 지지체 간 상호작용을 완화함으로써 금속 환원 온도를 반응 온도와 동일하게 수행할 수 있는 수준으로 감소시켰다. 제조된 촉매는 550 ℃ 이하 저온 환원만으로 활성종이 형성되었으며, MgO 지지체를 사용 때 금속-지지체 상호작용이 감소하였음에도 불구하고 96시간 시간 연속 운전에서 전통적인 WI 방법으로 제조한 NiMgO 대비 높은 활성을 유지하였다. 본 연구는 탄닌산 기반 저온 환원 공정이 촉매 예비 처리의 에너지•시간 절감과 함께 고분산 촉매 설계에 효과적임을 입증한다.

참고문헌

1. Shanmugam, V., Neuberg, S., Zapf, R., Pennemann, H., and Kolb, G., "Effect of Support and Chelating Ligand on the Synthesis of Ni Catalysts with High Activity and Stability for CO_2 Methanation", *Catalysts*, Chapman and Hall, London, 10(5), 493 (2020).

PE-2

Al_2O_3 중공사막 모듈의 혈액투석 성능 및 혈액적합성 평가

황재연, 박소희, 허승희, 박정훈*
동국대학교 화공생물공학과

Evaluation of Hemodialysis Performacne and Hemocompatibility of Al_2O_3 Hollow Fiber Membrane Module

Jae Yeon Hwang, So Hee Park, Seung Hee Huh, Jung Hoon Park*
Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University

초 록

Conventional polymer-based hollow fiber membranes can exhibit varying levels of biocompatibility depending on the patient and may cause allergic reactions due to surface treatment agents. In this study, alumina (Al_2O_3) hollow fiber membranes were fabricated and assembled into a lab-scale hemodialysis module to evaluate their applicability in hemodialysis. The membranes were prepared via phase inversion and sintered at different temperatures (1200 ℃, 1300 ℃, and 1400 ℃) to examine the effects of sintering conditions on membrane properties. The membrane surface area of the fabricated module was approximately one-tenth that of commercial polymer-based hemodialyzers. Characterization of the membranes and modules was conducted using SEM, AFM, contact angle measurements, and UTM analysis. The hemocompatibility of the membranes was assessed using a BSA protein adsorption test with BCA assay. Hemodialysis performance was evaluated using urea and creatinine solutions, and removal efficiency was determined through TOC analysis.

참고문헌

1. Huang, Z. et al., "A Study of a New Ceramic Membrnae for Us in Hemodialysis" ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo., IMECE2004-59404, 669-675 (2004)

PE-3

Structure Modulation of SBA-15-Based Porous Materials for Enhanced CO_2 Capture Performance

SO HEE PARK, MIN YEONG KO, JAE YEON HWANG, JUNG HOON PARK*

Department of Chemical Engineering, Dongguk university

The accelerating challenges of global climate change and greenhouse gas emissions have intensified the need for technologies to reduce atmospheric CO_2 concentrations. Among these, Direct air capture (DAC) technology stands out for its capacity to extract low concentrations of CO_2 directly from ambient air, necessitating sorbents with expansive specific surface areas and well-defined porous structures. In this work, SBA-15 mesoporous silica was integrated into a Polyethersulfone (PESf)-based hybrid matrix, combining structural robustness with enhanced porosity. Surface functionalization with amine groups was employed to promote CO_2 selectivity. The composite was fabricated via phase inversion, enabling controlled pore architecture and ensuring both permeability and durability. Various analytical techniques confirmed the morphological features, crystalline phases, and the successful introduction of amine functionalities. CO_2 capture capacity was assessed using temperature-programmed desorption (TPD), revealing both the adsorption performance and the effect of different amine types on CO_2 capture efficiency. These results underscore the significant role of pore modulation and targeted surface functionalization in advancing the development of high-performance DAC adsorbents.

References

1. Mahendran, Shalini, et al. "Enhanced Carbon Dioxide Capture: Adsorption and Physicochemical Properties of SBA-15 Mesoporous Silica." *Chemical Engineering & Technology* 48.3 (2025): e202300576.
2. Yan, Xinlong, et al. "Amine-modified SBA-15: effect of pore structure on the performance for CO_2 capture." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 50.6 (2011): 3220-3226.

PE-4

리그닌 고순도화 및 염분 분리 기술 개발

강은희, 장학룡, 신민창, 황재연, 박정훈*
동국대학교

Development of Lignin Purification and Salinity Separation Technology

Eun Hee Kang, Xuelong Zhuang, Min Chang Shin, Jae Yeon Hwang, Jung Hoon Park*
Dongguk University

효율적인 분리 기술의 부재는 리그닌을 고부가가치 자원으로 활용하는 데 큰 난관으로 작용합니다. 이를 극복하고자, 본 연구에서는 초박형 γ-Al_2O_3 코팅이 적용된 α-Al2O3 중공사막 (γ/α-HF)을 이용한 세라믹 나노여과 공정을 설계했습니다. 이 공정은 알칼리성 리그닌 폐액에서 알칼리 금속 이온(Na^+, K^+ 등)과 고농도 리그닌을 동시에 분리하는 것을 목표로 합니다.

고온 처리 후, α-HF 지지체와 γ/α-HF막의 평균 기공 크기는 각각 0.2 μm 및 1.6 nm로 분석되었습니다. 염류 제거율은 Na_2SO_4, $MgSO_4$, NaCl, KCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$, $AlCl_3$ 순으로 개선되었습니다. 최적화된 조건에서 나트륨과 칼륨 이온은 각각 92%, 85%의 높은 제거 효율을 보였습니다. 리그닌은 약 19.34%만 막을 통과했으며, 5일간의 연속 여과 실험을 통해 γ/α-HF막은 안정적인 성능과 내구성을 증명했습니다.

PE-5

항공유의 흡열량 향상과 코킹 저감을 위한 개시제 첨가 연구

신민창, 박상민, 정병훈[1], 박정훈*
동국대학교 화공생물공학과, [1]국방과학연구소

Study on the Addition of Initiators for Enhancing the Heat Sink Capacity and Reducing Coking in Aviation Fuel

Min Chang Shin, Sang Min Park, Byung Hun Jeong[1], Jung Hoon Park*
Department of Biochemical & Chemical Engineering, Dongguk University
[1]Agency for Defense Development

초록

마하 수 이상의 속도로 추진하는 비행체는 빠른 속도로 인한 외부 마찰열과 엔진 자체의 열로 인해 온도가 급상승하여 내구성을 크게 떨어뜨린다. 이러한 문제를 해결하기위해 재생 냉각 시스템을 활용한 냉각 기술이 이용되는데 이는 연료의 흡열 반응으로 주위로부터 열을 빼앗아 냉각시킴과 동시에 흡열 반응으로 연료를 크래킹하여 연소 효율을 높이는 기술이다. 하지만, 연료가 분해되는 과정에서 코킹이 발생하여 연료관 내부에 침적되면 열전달 효율을 크게 떨어뜨려 흡열 성능이 떨어지고, 심할 경우 관을 막아 연료의 흐름을 크게 방해한다. 이러한 문제를 해결하고자 본 연구에서는 연료의 코킹을 크게 저감시키고 나아가 흡열 성능을 향상시키기 위하여 첨가제로서 개시제에 대한 연구를 수행하였다. 흡열 성능은 반응기에 투입된 전력량으로부터 계산하고, 생성된 가스 및 액체 시료는 GC(Gas Chromatograpy)로 분석하였다. 실험이 끝난 후 반응기의 실험 전, 후 무게와 필터의 실험 전, 후의 무게를 각각 비교하여 생성된 코크양을 측정하였다.

사사

This research was funded by a Grant-in-aid from the Korean Agency for Defense Development (ADD project No. 912969201) funded by the Korean Defense Acquisition Administration (DAPA) and the Korean Ministry of National Defense (MND).

PE-6

Pd-Ru 중공사 분리막의 제작 및 성능 향상: γ-Al_2O_3로 개질한 α-Al_2O_3 지지체 기반 고온 수소 분리

한성우, 장학룡, 박정훈*
동국대학교 화공생물공학과

Fabrication and Performance Enhancement of Pd-Ru Hollow Fiber Membranes Supported on γ-Al_2O_3 Modified α-Al_2O_3 for High-Temperature Hydrogen Separation

Sung Woo Han, MinChang Shin and Jung Hoon Park*
Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University

본 연구에서는 α-Al_2O_3 중공사막(HFM) 지지체 표면에 γ-Al_2O_3층을 코팅하고, 이를 기반으로 Pd 및 Pd-Ru 수소 분리막을 무전해 도금법으로 제작하였다. γ-Al_2O_3 코팅은 HFM의 표면 거칠기를 효과적으로 줄이고 기공 구조를 제어하여, 이후 금속 증착에 최적화된 지지체를 제공하였다. 코팅된 지지체 위에 Pd 및 Pd-Ru 합금 분리막이 성공적으로 형성되었으며, 이들의 미세구조 및 기체 투과 특성을 체계적으로 평가하였다.
450℃에서 수행한 단일 수소 투과 시험 결과, Pd-Ru 분리막은 Pd 분리막에 비해 약 70% 높은 수소 플럭스를 나타냈는데, 이는 Ru 첨가로 인한 격자 왜곡과 수소의 용해도 및 확산도 증가에 기인한 것이다. H_2:N_2 = 3:1 혼합 기체 투과 실험에서도 Pd-Ru 분리막은 다양한 공급 유량 조건에서 높은 수소 투과를 유지하였다. 공급 유량 증가 시, 농도 분극으로 인해 수소 투과도가 향상되었지만, 수소 회수율이 감소하는 형태를 보였다.
이러한 결과는 γ-Al_2O_3 표면 개질과 Pd-Ru 합금화의 결합 전략이 중공사막 기반 시스템의 수소 투과 성능과 선택도를 크게 향상시킬 수 있음을 보여준다. 본 연구에서 개발한 Pd-Ru 분리막은 암모니아 분해와 같은 고온 수소 생산 및 정제 공정에 적용될 수 있는 높은 잠재력을 지닌다.

PE-7

알루미나 중공사 기반 팔라듐 합금 분리막의 수소 투과 특성 향상을 위한 표면 조도 개선과 진공 보조 도금 기법

허승희, 한성우, 박정훈*
동국대학교 화공생물공학과

Improving H_2Transport in Pd Alloy Membranes with Alumina Supports via Surface Roughness Control and Vacuum-Assisted Plating

Seung Hee Huh, Sung Woo Han, Park Jung Hoon*
Department of chemical and biochemical engineering, Dongguk University

지구 온난화가 급격히 심화됨에 따라, 수소 에너지는 화석 연료를 대체할 수 있는 청정 대체 에너지원으로서 전력과 함께 주목받고 있다. 석탄 가스화 공정에서 발생하는 부산가스로부터 수소를 분리하는 기술에는 흡착, 활성탄 흡착, 극저온 증류, 막 분리 등이 있으며, 그중 혼합가스의 막 분리 공정은 높은 효율성과 선택성으로 인해 활발히 연구되고 있다.

본 연구에서는 phase inversion 기법을 이용하여 α-Al_2O_3 중공사 지지체를 제작하고, 무전해 도금 방식을 통해 팔라듐 및 팔라듐 합금 분리막을 형성하였다. 팔라듐 층의 표면 조도 향상을 위해 GO와 γ-Al_2O_3 중간층을 도입하였으며, 추가적으로 진공 보조 무전해 도금 기법을 적용하여 수소 투과 성능을 향상시켰다.

형성된 중간층 및 팔라듐 합금층의 표면 미세구조와 두께는 주사전자현미경으로 분석하였고, 합금 조성은 에너지 분산형 X선 분광법으로 확인하였다. 또한, X선 회절을 통해 합금의 성공적인 형성을 입증하였다. 수소 투과 플럭스는 BFM으로 측정하였으며, 분리계수는 가스크로마토그래피를 이용해 산출하였다.

참고문헌

1. Samhun Yun, and S.Ted Oyama, “Correlations in palladium membranes for hudrogen seperation: A review”, J. Membr. Sci., 375, 28-45 (2011).

PE-8

다성분 합금설계를 통한 Pd-Ag-Cu 수소 분리막 제조 및 성능 검증

박상민[1], 한성우[1], 신민창[1], 장학룡[1], 박정훈[1*]
[1]동국대학교 화공생물공학과, 04620

Fabrication and Performance Evaluation of Pd-Ag-Cu Hydrogen Separation Membranes Via Multi-Component Alloy Design

Sang-Min Park[1], Sung-Woo Han[1], Min-Chang Shin[1], Xuelong Zhuang[1] and Jung-Hoon Park[1*]
[1]Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University, Seoul 04620, Republic of Korea

Pd-Ag-Cu 합금 수소 분리막은 α-Al_2O_3 다공성 지지체 위에 무전해 도금(electroless plating) 공정을 적용하여 제조되었다. 제조 과정은 Pd, Ag, Cu를 순차적으로 증착하는 방식으로 진행되었으며, 중간 단계에서 500℃로 18시간 동안 수소 분위기 열처리를 수행해 합금화를 유도하였다.
형성된 분리막의 표면 특성은 주사전자현미경(SEM) 분석을 통해 확인하였고, Pd 막의 두께는 7.82 μm, 합금막의 두께는 3.54 μm로 측정되었다. 또한 에너지 분산형 X-선 분광기(EDS) 및 X-선 회절(XRD) 분석을 통해 Pd-78wt%, Ag-8.8wt%, Cu-13.2wt%의 조성을 가진 Pd-Ag-Cu 합금이 성공적으로 형성된 것을 검증하였다. 수소 투과 및 분리 성능은 350~450℃, 1~4 barg 조건에서 단일 수소(H_2)와 H_2/N_2 혼합 기체를 대상으로 수행되었다. 단일 수소 조건에서 450℃, 4 barg 일때 Pd 분리막의 최대 수소 플럭스는 74.16 ml/cm²·min, Pd-Ag-Cu 분리막의 최대 수소 플럭스는 113.64 ml/cm²·min으로 나타나 합금막이 더 높은 투과율을 보였다. H_2/N_2 혼합 기체 조건에서의 분리 계수(separation factor)는 동일조건 기준에서 Pd 막의 2,437에 비해 Pd-Ag-Cu막은 11,032로 나타나 합금막에서 크게 향상됨을 확인할 수 있다.
이러한 결과는 Pd-Ag-Cu 합금 설계가 Pd 단일막 대비 수소 투과율과 선택성을 동시에 향상시킬 수 있음을 보여준다.

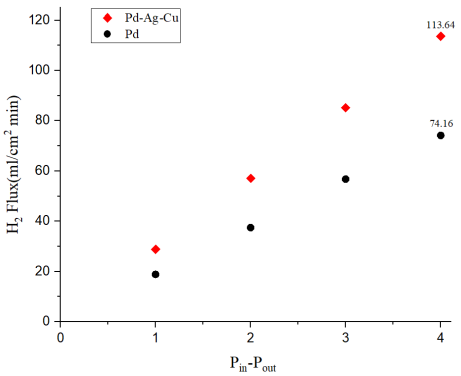


Figure 1. Hydrogen Flux of Pd and Pd-Ag-Cu Membrane at 450℃.

PE-9

Chitosan-Functionalized Prussian Blue/TiO_2 Nanohybrids for Photocatalytic Mineralization of PFOA in Water

Gaeun Kim, Kyubeom Lee, Yujeong Jeong, and Sungwook Chung*
School of Chemical and Biomolecular Engineering, Pusan National University,
Busan, South Korea 46241

PFASs (per- and polyfluoroalkyl substances) have garnered considerable attention due to their environmental persistence, immunotoxic effects, and bioaccumulative nature. Among them, PFOA (perfluorooctanoic acid) and PFOS (perfluorooctanesulfonic acid) are frequently detected. The International Agency for Research on Cancer (IARC) has classified PFOA as a Group 2B carcinogen. Conventional remediation techniques—such as adsorption, membrane separation, and coagulation—have shown limited efficacy in permanently eliminating PFOA and often result in secondary pollution. To overcome these limitations, photolytic degradation has emerged as a promising alternative for effective mineralization of PFOA in aqueous media. In this study, we report the synthesis and physicochemical characterization of chitosan-functionalized Prussian Blue/TiO_2 nanohybrids and evaluate their photocatalytic performance in degrading PFOA. Structural and spectroscopic analyses, along with photocatalytic activity data, will be presented.

감사의 글:
"본 연구는 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479)의 지원을 받아 수행되었습니다."

PE-10

Comparative Analysis of Adsorption Energy Distributions of CO_2 and N_2 on Microporous Activated Carbon

Tae Heon Kim[1], Min Ju Kim[1], Soon Do Yoon[2], Heseong An[1], Sung Ho Song[3] and Wang Geun Shim [1,*]

[1]Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, South Korea

[2]Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Chonnam National University, South Korea

[3]Division of Advanced Materials Engineering, Kongju National University, South Korea

This study investigates the adsorption behavior of CO_2 and N_2 on chemically modified microporous activated carbon. The activated carbon samples were prepared via chemical activation and comprehensively characterized using N_2 adsorption, XRD, XPS, and SEM. Adsorption isotherms for CO_2 and N_2 were experimentally measured using a volumetric adsorption apparatus at three temperatures—298, 308, and 318 K—over a pressure range from 0 to 101.3 kPa. The equilibrium data were fitted by applying three different isotherm equations: the Langmuir, the Sips, and a Langmuir model based on adsorption energy distribution functions (AEDF). Among these, the AEDF-based Langmuir model provided the most satisfactory fitting results across all conditions, characterizing the heterogeneity of the adsorbent surface more effectively. Analysis of the adsorption energy distribution functions revealed significant differences in CO_2 adsorption between chemically treated and untreated activated carbon, indicating that surface chemical modification altered both the distribution and intensity of adsorption sites. In contrast, N_2 adsorption exhibited a unimodal energy distribution, though peak intensity and position varied between treated and untreated samples. These findings highlight the distinct interactions of CO_2 and N_2 with the activated carbon surface and the effect of chemical treatment on adsorption energy characteristics. Furthermore, the equilibrium parameters derived from the AEDF-based model were incorporated into Ideal Adsorbed Solution Theory (IAST) calculations to predict binary gas adsorption selectivity.

References

1. Park, K.H., Ko, B., Ahn, J., Park, T., Yoon, S.D., Shim, W.G., and Song, S.H., "An Ultramicroporous graphene-based 3D structure derived from cellulose-based biomass for high-performance CO_2 capture, " *ACS Applied Materials & Interfaces*, **16**, 30137-30146 (2024).
2. Hwang, K.-J., Balathanigaimani, M.S., Choi, T.S., Jin, S., Yoon, S.D., and Shim, W.G., "Natural-basalt-originated hierarchical nano porous zeolite with strong and selective gas separation capability," *Materials Research Letters*, **12**, 264-272 (2024).

PE-11

Preparation and Characterization of Carbonaceous Materials from Waste Denim Fabrics for CO_2 Adsorption

Min Ju Kim[1], Tae Heon Kim[1], Soon Do Yoon[2], Heseong An[1], Sung Ho Song[3] and Wang Geun Shim [1,*]

[1]Department of Chemical Engineering, Sunchon National University, South Korea

[2]Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Chonnam National University, South Korea

[3]Division of Advanced Materials Engineering, Kongju National University, South Korea

Porous carbonaceous materials were synthesized from waste denim fabrics through chemical activation using potassium hydroxide (KOH). The effects of activation conditions on pore structure and surface properties were systematically characterized through nitrogen adsorption isotherm, XRD, XPS, SEM and TGA. Significant variations in pore architecture and surface chemistry were observed depending on the activation parameters, which directly influenced the adsorption performance. Volumetric adsorption measurements of CO_2 and N_2 gases were performed at atmospheric pressure across a temperature range of 298 to 318 K to evaluate their uptake behavior. The CO_2 adsorption capacity exhibited a clear correlation with the chemical activation conditions, demonstrating the critical role of pore development in adsorption efficiency. Equilibrium adsorption data were further fitted using well-known isotherm models, including Langmuir, Freundlich, Sips, and an adsorption energy distribution (AED)-based Langmuir model. Among these, the AED-based Langmuir isotherm provided superior fitting accuracy by effectively accounting for surface heterogeneity. The calculated adsorption energy distribution functions revealed distinct energy profiles for CO_2 and N_2 adsorption, which varied according to the chemical activation conditions, indicating energetic heterogeneity of the synthesized activated carbons. In addition, binary adsorption selectivity for CO_2/N_2 was evaluated using Ideal Adsorbed Solution Theory (IAST), and the resulting trends were analyzed to assess the separation potential of the materials.

References

Hwang, K.-J. Hwang, M.-J., Balathanigaimani, M. S., New, K., Youn, Y., Choi, W.-S., Kim, H.-A., Nah, J.-W., and Shim, W.-G., Adsorption characteristics of light gases on basalt rock-based zeolite 4A, *Adsorption*, 25, 833-842 (2019).

Hwang, K.-J., Balathanigaimani, M.S., Choi, Y.H., Yoon, S.D., and Shim, W.G., "Influence of ultra-micropore volume of activated carbons prepared from noble mung bean on the adsorption properties of CO2, CH4, and N2," *New Journal of Chemistry*, **46**, 17577-17584 (2022).

PE-12

Effect of Design Parameter Variations on CO_2 Absorption Performance of a Membrane Contactor

Huijun Kim[1,2], Hojun Song[1], Jo Hong Kang[1,2], Seonyeop Hwang[1], Hyun Sic Park[1*], Jong Hak Kim[2]

Korea Institute of Industrial Technology(KITECH)[1], Yonsei University[2]

This study was conducted as part of the development of a high-efficiency absorption process for atmospheric carbon dioxide reduction. A membrane contactor was fabricated using directly fabricated PVDF hollow fiber membranes, and its CO_2 absorption characteristics were evaluated. The hollow fiber membranes were prepared via the Non-Solvent Induced Phase Separation (NIPS) method, and the effect of drying condition variations during fabrication on pore structure formation and surface properties was investigated. Based on the prepared hollow fiber membranes, membrane contactor modules with different packing densities were designed and fabricated, and the correlation between module structure and gas–liquid contact efficiency was analyzed. Through this work, the influence of membrane fabrication conditions and module design parameters on CO_2 absorption performance was comprehensively assessed, and the potential applicability of the technology for large-scale industrial flue gas treatment and greenhouse gas mitigation was proposed.

1. Dongfei Li, et al., “Fabrication of lab-scale hollow fiber membrane modules with high packing density,” Sep. Purif. Technol., 40, 15-30 (2004).
2. Jan Günther, et al., “A numerical approach to study the impact of packing density on fluid flow distribution in hollow fiber module,” J. Membr. Sci., 348, 277-286 (2010).
3. Fushan Wang, et al., “Enhancing CO_2 absorption efficiency using a novel PTFE hollow fiber membrane contactor at elevated pressure,” AIChE J., 64(6), 2135-2145 (2018).
4. Muhammad Usman, et al., “Mathematical modeling and validation of CO_2 mass transfer in a membrane contactor using ionic liquids for pre-combustion CO_2 capture,” Chem. Eng. Res. Des., 123, 377-387 (2017).
5. Fan Cao, et al., “Theoretical modeling of the mass transfer performance of CO_2 absorption into DEAB solution in hollow fiber membrane contactor,” J. Membr. Sci., 593, 117439 (2020).

PE-13

$MgAl_2O_4$ 지지체 기반 Ni 촉매의 CO_2 해리 반응 및 건식 개질 반응 특성

장정규[1], 권병찬[2], 김민규[1], 이승우[1], 박노국[2]*
[1]영남대학교 화학공학부, 38541 경상북도 경산시 대학로 280
[2]영남대학교 청정기술연구소, 38541 경상북도 경산시 대학로 280

CO_2 Dissociation and Dry Reforming Characteristics of Ni Catalysts Supported on $MgAl_2O_4$

Jang Jung Gyu[1], Byoung Chan Kwon[2], Minkyu Kim[1], Seung Woo Lee[1], No-kok Park[2]*
[1]School of Chemical Engineeing, Yeungnam University, 280, Daehak-ro, Gyeongsna-si, Gyeongbuk, 38541, Korea
[2]Institute of Clean Technology, Yeungnam University, 280, Daehak-ro, Gyeongsna-si, Gyeongbuk, 38541, Korea

Abstract

기후 위기로 인해 우리나라에서는 심각한 피해들이 발생하고 있으며, 대표적으로 올봄의 대형 산불이 그 피해 사례들 중 하나이다. 기후 위기를 해결하기 위해, 화석 연료를 최대한 사용하지 않기 위해 지속가능한 에너지원을 모색 중이다. 수소는 무탄소 및 고효율 에너지원으로서 주목받는 차세대 에너지원 중 하나이며, 본 연구에서는 바이오가스를 개질하여 수소를 생산하는 건식 개질 기술을 다뤘다.

본 연구에서는 바이오가스 건식 개질을 통한 수소 생산을 위해, 지지체로서 $MgAl_2O_4$를 적용한 Ni 기반 촉매의 반응 특성을 평가하였다. 기존 DFT 계산 연구에 따르면 CO_2 개질 반응은 CO_2 의 해리에 의해 CO와 표면 산소가 형성되며, 생성된 표면 산소가 CH_4 분해로부터 유래한 CH_x* 종을 산화하여 CH_xO* 중간체를 거쳐 CO와 H_2를 생성하는 경로를 따른다고 보고된 바 있다[1)]. 이를 검증하기 위해 Ni-$MgAl_2O_4$ 촉매 상에서 CO_2 해리 반응에 따른 CO 생성 거동을 조사하고, 반응 전후 촉매 표면의 산소 상태를 XPS 분석을 통해 규명하였다. 실험 결과, CO_2 농도 감소와 CO 생성이 확인되었으며, γ-Al_2O_3 지지체 기반 Ni-Al_2O_3 촉매 대비 Ni-$MgAl_2O_4$ 촉매에서 더 높은 CO 수율이 나타났다. 또한 XPS 분석 결과 $MgAl_2O_4$ 지지체를 사용한 경우 촉매 표면 산소 비율이 증가함을 확인하였다. 이는 CO_2 해리로 생성된 산소 종이 CH_x의 산화를 촉진하여 CH_xO 형성을 증가시키고, 이에 따라 탄소 침적을 억제함을 시사한다. 따라서 건식 개질 반응에서 촉매 안정성을 향상시키기 위해서는 CO_2 해리에 높은 활성을 제공하는 지지체의 활용이 효과적인 전략임을 제안한다.

Key words CCUS, CO_2 해리 반응

참고문헌

1) Z. Wang, Z. Mei, L. Wang, Q. Wu, C. Xia, S. Li, T. Wang and C. Liu, J. Mater. Chem. A, 2024, 12, 24802.

PE-14

알루미늄 기반 MOF(Metal-Organic Framework)의 제조 및 CF_4 흡착 특성 평가

박제성*
한국생산기술연구원

Synthesis of Aluminum-Based MOF(Metal-Organic Framework) for CF_4 Adsorption

Jeasung Park*
Korea Institute of Industrial Technology
(E-mail: jpark@kitech.re.kr)

지구온난화가 가속화됨에 따라, 고온실가스(Global Warming Potential, GWP) 물질의 배출 규제 필요성이 점차 증가하고 있다. 국내 3대 산업 중 하나인 반도체 산업은 GWP 가스를 대량으로 사용하는 대표적 분야이며, 향후 AI 및 첨단 산업의 고도화에 따라 과불화탄소(PFC), 육불화황(SF_6), 삼불화질소(NF_3) 등 GWP 가스의 사용과 배출이 더욱 증가할 것으로 예상된다. 현재는 회생촉매시스템(RCS), 플라즈마, 습식 스크러버(wet scrubber) 기반의 처리 장치를 통해 GWP 가스 저감을 시도하고 있으나, 사불화탄소(CF_4)는 화학적으로 매우 안정한 구조를 가지고 있어 기존 방식으로는 완전 분해에 높은 에너지가 요구되며, GWP 가스의 분해 과정에서도 생성되기 때문에 제거가 특히 어려운 것으로 알려져 있다. 최근 환경부가 CF_4 배출 평가 기준을 고시함에 따라, 이에 대한 기술적 대응과 관리의 필요성이 더욱 부각되고 있다.

이에 본 연구에서는 Zhu et al.[1]이 보고한 알루미늄 기반 금속-유기 골격체(Metal-Organic Framework, MOF)의 CF_4 및 C_2F_6 흡착 성능에 착안하여, Al과 fumarate를 리간드로 하는 MOF를 100 L급 상압 반응기에서 대량 합성하고 이를 성형체로 제조하였다. 제조된 MOF 성형체의 CF_4 흡착 특성을 상온(25°C), 1 atm 조건에서 평가하였으며, 상용 활성탄과의 비교 실험을 통해 흡착 성능이 우수함을 확인하였다. 본 연구는 CF_4의 효과적인 흡착 제거를 위한 새로운 대안 소재로서 Al 기반 MOF의 실용적 가능성을 제시한다.

참고문헌

1. Zhu, J., Hu, J., Xiao, H., Yang, L., Yang, M., Wang, S., Zhang, J., and Xing, H., "Aluminum-based metal organic frameworks for greenhouse gases CF_4 and C_2F_6 capture with excellent capacity and selectivity", *Sep. Purif. Technol.*, **331**(1), 125614 (2024)

PE-15

Enhanced surface and catalytic behaviour of the NH_3-SCR catalyst

Bora Jeong[1,2], Myeung-jin Lee[1], Ye Jin Choi[1], Donghyeok Kim[1], Hong-Dae Kim[1]*

[1]Ulsan Division, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan, Republic of Korea

[2]Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan, Republic of Korea

Nitrogen oxides (NOx) cause major air pollution, including acid rain, the generation of particulate matter and photochemical smog. Recently, regulations for NOX have been strengthened, prompting various studies on the elimination of NOX by selective catalytic reduction (SCR). The industrial catalyst most commonly used consists of anatase TiO_2 on a monolith, with V_2O_5 as the active component and WO_3 or MoO_3 as the promoter component. However, this type has serious drawbacks, such as a narrow operating temperature range, SO_3 oxidation and the formation of N_2O at high temperatures. Thus, a low-temperature catalyst is required due to shutdowns caused by operating errors at power plants or vessels.

In the present work, we focused on improving the surface and catalytic properties, as well as adding co-catalysts and 2D materials, to significantly enhance its de-NOx efficiency and SOx oxidation resistance over a wide temperature range.

Consequently, the catalyst was fabricated using a simple mixing and impregnation method with different co-catalyst contents and components. The obtained catalysts were characterised using XRD, XRF, BET and FT-IR. Furthermore, the de-NOX efficiency and SOX oxidation were evaluated using a micro-reactor (MR). As the results show, the catalyst's surface acidity is enhanced by the addition of co-catalysts. Additionally, we confirmed that VW/TiO_2 based catalysts increased de-NOx efficiency compared with conventional catalysts, depending on the catalyst loading, co-catalyst and 2D materials.

PE-16

Simultaneous Reduction of Methane Slip and CO over a Non-Noble $NiCo_2O_4$ Catalyst for LNG-Powered Ships

Wonjung Cho[1,2], Gyungmin Choi[2], Hee Soo Kim[1*], Dong-Ha Lim[1,2*]

[1]Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Republic of Korea

[2]Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

The enforcement of stringent maritime environmental regulations, such as the IMO's MARPOL Annex VI and the EU's Fit for 55 policy, has increased the demand for catalytic technologies capable of simultaneously mitigating methane (CH_4) slip and carbon monoxide (CO) emissions from LNG-powered vessels. Although noble metal catalysts (Pd, Pt) exhibit high activity at low temperatures, their high cost limits large-scale application.

In this study, a cost-effective, non-precious Ni–Co-based catalyst was developed via a sequential co-precipitation method using KOH and K_2CO_3 as precipitants and characterized by XRD, BET, O_2-TPD, and SEM. Performance evaluation under simulated LNG exhaust conditions (0.5% CH_4, 0.1% CO, 10% O_2, balance N_2) in a fixed-bed reactor demonstrated that the K_2CO_3-precipitated catalyst achieved complete oxidation of CH_4 and CO (> 99%) below 350 °C and maintained high conversion efficiency within the typical LNG engine exhaust temperature range (250–400 °C).

Notably, the catalyst enables simultaneous CH_4 and CO removal without an additional diesel oxidation catalyst (DOC), simplifying emission control systems and reducing operational costs. The results further indicate that the choice of precipitant significantly influences surface chemistry, redox properties, and overall catalytic performance. This study demonstrates that Ni–Co-based non-precious catalysts are a promising solution for LNG marine emission reduction and provide practical guidance for designing high-performance, environmentally friendly exhaust gas treatment catalysts.

Reference

Tao, F., "Understanding Complete Oxidation of Methane on Spinel Oxides at a Molecular Level," *Nature Communications,* **6**, 7798 (2015).

Acknowledgment

This work was supported also by the Korea Institute of Industrial Technology as "Development of the super clean modular platform technology based on AI for eco-friendly ship to respond to IMO 2020/2050 regulations" (KITECH EH-25-0005).

PE-17

아민 조합 및 혼합에 따른 이산화탄소 포집 특성

손주희[1,2], 강조홍[1,2], 백경민[1,2], 이승윤[1,2], 송호준[1*], 배윤상[2]
[1]한국생산기술연구원 울산기술실용화본부, [2]연세대학교 화공생명공학과

Characteristics of carbon dioxide absorption depending on amine selection and combinations

Juhee Son[1,2], Jo Hong Kang[1,2], Gyeongmin Baek[1,2], Seungyun Lee[1,2],
Hojun Song[1*], Youn-Sang Bae[2]
[1]Ulsan Technology Application Division, Korea Institute of Industrial Technology
[2]Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University

기후 변화의 주 원인인 산업 이산화탄소 배출을 저감하기 위한 방법으로서, 아민 수용액을 사용하는 흡수법이 연구되고 활용되고 있다 [1]. 아민 흡수법은 단일 아민 물질 사용에서 흡수 용량 및 속도, 탈거 능력 등을 증진하는 목적으로 2개 이상의 아민을 혼합하는 방법으로 진행, 연구되고 있으며 이러한 성능을 최적화하기 위한 아민 종류의 선택과 혼합 비율이 중요하다 [1, 2].

3종류의 아민을 혼합함으로써 이산화탄소 포집 특성의 변화를 파악하는 실험을 진행하였다. 아민은 이산화탄소의 흡수능을 증가하는 base fluid와 이산화탄소 흡수능 및 속도 촉진제, 탈거 촉진제로 분류하였으며 일정한 비율로 3종씩 선택하여 혼합하였다 [1, 2, 3]. 40 ℃에서 흡수, 80 ℃에서 탈거를 진행하는 스크리닝 테스트를 통해 흡수 및 탈거량, 속도 등을 측정하였으며, 이를 30 wt%의 MEA (Monoethanolamine) 수용액의 결과와 함께 비교하였다.

참고문헌

1. Lim, H. et al., “Carbon dioxide capture in aqueous potassium serinate and piperazine solution using bubbling reactor for membrane contactor applications,” *J. Ind. Chem.*, **122**, 200-209 (2023).

2. Kim, J. et al., “Structural investigation of aqueous amine solutions for CO_2 capture: CO_2 loading, cyclic capacity, absorption-desorption rate, and pK_a,” *J. Erviron. Chem. Eng.*, **12**, 112664 (2024).

3. Kumar, S., and Mondal, M. K., “Selection of efficient absorbent for CO_2 capture from gases containing low CO_2,” *Korean J. Chem. Eng.*, **37**, 231-239 (2020).

PE-18

Evaluation of the Effect of Nanoparticle Addition on the CO_2 Capture Performance of the CO_2 Absorbents with High Concentration

Gyeongmin Baek[1,2], Jo Hong Kang[1,2], Hyun Sic Park[1], Hojun Song[1*] and Youn-Sang Bae[2*]

[1]Korea Institute of Industrial Technology, 55, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 44413, Korea

[2]Yonsei University, 50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul, 03722, KOREA

As the concentration of CO_2 in the atmosphere has increased since the industrial revolution, technologies to reduce CO_2 emissions have been actively investigated. CO_2 absorption using amine-based absorbent is one of the most widely applied methods, capturing the CO_2 from exhaust gas in different industries such as steel, chemical, and power generation industries. Increasing the concentration of amine-based absorbents offers advantages, including higher CO_2 absorption capacity and improved efficiency, but there are practical limitations to further concentration increases. Nanoparticles, even in small amounts, can enhance CO_2 capture performance by improving heat and mass transfer through mechanisms such as the bubble-breaking effect, surface effect, and shuttle & boundary effects.

In this study, CO_2 absorption and desorption performances were evaluated using a laboratory-scale CO_2 absorbent screening apparatus for different absorbents. All absorbents contained more than 40 wt% amine and less than 0.1 wt% nanoparticles. The absorption experiments were conducted at 313 K with a feed gas containing 15 vol% CO_2 (N_2 balance). The desorption experiments were performed at 353 K with pure N_2. The study on the effect of nanoparticle addition is expected to contribute to further improvements in the performance of high-concentration amine absorbents.

References

1. Wang, Tao, et al. “Enhanced CO_2 absorption and desorption by monoethanolamine (MEA)-based nanoparticle suspensions.” *Ind. Eng. Chem. Res*., **55**(28), 7830-7838 (2016).

PE-19

금속 재료 부식 및 NO_X 열화 분석을 통한 이산화탄소 흡수제의 장기 성능 평가

이승윤[1], 백경민[1,2], 강조홍[1,2], 박현식[1], 송호준[1,*]
[1]한국생산기술연구원, 44413 울산광역시 중구 종가로 55
[2]연세대학교, 03722 서울특별시 서대문구 연세로 50

지속적인 온실가스 배출로 인한 지구온난화의 악화는 심각한 기후변화를 동반한다. 기후변화 대응을 위한 탄소 포집 및 저장 기술(CCS)의 상용화에 따라 이산화탄소 흡수제의 실제 공정 적용에서의 재료 건정성 평가가 중요한 기술적 과제로 대두되고 있다. 이산화탄소 흡수제로 흔히 사용되는 아민계 용매는 부식성 환경을 조성하며, 연소가스에 포함되어있는 NO_X 성분은 흡수제의 열화를 가속화한다. 본 연구는 이산화탄소 흡수제 노출 환경에서 다양한 금속 시편의 부식 거동 분석 및 실제 연소가스와 유사한 가스 조성이 이산화탄소 흡수제에 미치는 영향 분석을 목표로 한다. 실험에서는 이산화탄소 흡수제에 각기 다른 7종의 부식 시편을 동일한 온도에 노출시켰으며, 연소가스 내의 NOx, O_2 등의 성분들이 흡수제의 화학적 열화에 미치는 영향을 가스크로마토그래피를 통해 정량적으로 분석하였다. 이산화탄소 흡수제에 따른 포집 설비 재료의 내구성 평가 및 유사 연소가스에 따른 흡수제 열화 분석은 탄소 포집 설비의 재료 선정 및 흡수제 유지관리 등에 도움이 될 것이다.

PE-20

반도체 식각 공정 내 NO2-N2 환원 특성 분석 관련 실험적 연구

한유진[1,2], 이승연[1,3], 이용운[1*]
한국생산기술연구원[1] 건국대학교[2] 성균관대학교[3]

Experimental Study on Reductant-Based NO2-N2 Conversion Characteristics in Semiconductor Etching Processes

Yujin Han[1,2], Seungyeon Lee[1,3], Yong-Woon Lee[1*]
Korea Institute of Industrial Technology[1]
Konkuk University[2]
Sungkyunkwan University[3]

반도체 8대 공정은 규소 웨이퍼의 생산부터 회로 입력, 패키징 및 테스트로 구성된다. 8대 공정 중 식각 공정은 웨이퍼 위의 패턴 중 불필요한 부분을 액상 및 기체상 부식액(Etchant)을 이용하여 제거하고, 포토레지스트까지 제거하여 원하는 패턴의 규소산화물을 완성하는 공정이다. 박막 공정은 웨이퍼 위에 다른 산화물을 입혀 패턴된 반도체를 보호, 고정, 정련의 역할을 수행하는 공정으로 대표적으로 CVD(Chemical Vapor Deposition) 공정이 있다. 식각과 박막 공정에서는 불소(F)가 포함되어 있는 과불화화합물(Perfluoro Compounds, PFCs) 등의 가스를 사용하게 되며 부식성, 폭발성이 있는 배기가스가 생성된다. 식각 공정에서 사용되는 F-gas는 배출 제거를 위해 고온의 연소식, 플라즈마 방식과 비교적 저온의 촉매연소 방식을 사용하게 된다. 고온의 연소 조건에서는 일산화질소(NO)의 생성량이 저온의 촉매 연소 방식 대비 높으며 NOx 배출 제거를 위해 POU, 미들급, 루프급 습식 스크러버를 사용한다. 일산화 질소는 오존(O3)을 사용하여 수용성 물질은 NO2로 전환하며 습식 스크러버에서 물과 첨가제를 사용하여 최종 제거한다. 이 과정에서 폐수의 발생으로 인해 N2로 환원을 통한 폐수 발생 억제 기술의 요구가 증가하고 있다.
본 연구에서는 습식 스크러버 기반의 NO2-N2 환원 반응 공정을 설계하고, 환원제와 NO2의 몰비 변화에 따른 NO2 제거 효율의 영향성 평가를 수행하였다. NO2-N2 환원 특성 규명 실험은 가스 유량 50 L/min의 Lab-scale 실험 장치를 통해 수행되었으며 NO2의 투입 농도는 250 ppm (Ar basis)으로 설정하였다. N2 환원 특성 분석을 위해 FT-IR 분석기를 통해 입구와 출구의 NO2 농도를 측정하였다. 실험 과정에서 투입되는 수용액은 회수하여 특성을 분석하였다. 환원제의 몰비에 따른 NO2 제거 효율은 낮은 몰비에서는 매우 낮았으며 몰비 3 이상에서 ~50%, 몰비 8 이상에서 ~70%로 나타났다. 또한, 본 연구에서는 수용액의 pH 농도, 첨가제의 조성 변화에 따른 N2 환원 실험을 수행하였다. 향후 연구에서는 반도체 공정의 모사가스를 기반으로 N2 환원 특성에 대해 규명할 예정이다.

PE-21

대기오염물질 배출기준의 강화가 소형·중형 소각로에 미치는 환경적 영향의 전과정평가(LCA) 기반 정량평가

이수민[1,2], 조경일[1], 이용운[1*]
한국생산기술연구원 지속가능기술연구소[1]
건국대학교 화학공학부[2]

Quantitative Life Cycle Assessment of the Environmental Impacts of Strengthened Air Pollutant Emission Standards on Small- and Medium-Sized Incinerators

Soomin Lee[1,2], Kyungil Cho[1], Yongwoong Lee[1*]
Research Institute of Sustainable Development Technology, Korea Institute of Industrial Technology[1]
School of Chemical Engineering, Konkuk University [2]

폐기물 소각시설은 산업 및 도시 지역에 필요한 열원과 에너지를 공급하는 핵심 인프라로, 안정적인 폐기물 처리를 위해 연속 가동이 이루어진다. 그러나 이러한 특성은 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 염화수소(HCl), 미세먼지(PM), 전구가스, 중금속 등 다양한 대기오염물질을 지속적으로 배출하는 주요 점오염원이라는 한계로 이어진다. 배출 저감을 위해 반건식·습식 처리 공정, 선택적 무촉매환원(SNCR) 등 후단 오염물질 저감설비가 널리 적용되고 있으며, 이를 통해 굴뚝에서의 직접배출 농도는 점진적으로 낮아지고 있다. 그러나 이 과정에서 시약 투입량과 에너지 사용이 증가하고, 부산물 처리에 따른 환경부담이 발생하는 등 공정 외부에서의 간접배출이 새롭게 부각되고 있다. 그럼에도 불구하고 기존의 환경영향 평가는 굴뚝 직접배출 수치나 단일 범주 지표에만 집중되는 경향이 강해, 오염물질 저감 과정에서 나타날 수 있는 부담 전가(trade-off)나 범주 간 상충(cross-category effect)을 충분히 반영하지 못했다. 이에 따라, 소각시설의 배출기준 강화가 전체 환경에 미치는 영향을 공정 경계를 넘어 통합적으로 분석하고, 기술 조합과 운전 전략을 합리적으로 설계할 수 있는 정량적 근거가 필요하다.

본 연구는 2000 kg h^{-1} 처리용량의 중소형 소각로를 대상으로, 배출기준 강화가 직접배출(굴뚝)과 간접배출(시약 생산·제조·운송) 모두에 미치는 영향을 전과정평가(LCA) 관점에서 통합 분석하였다. 규제 강화 시나리오는 HCl, SOx, NOx 각각에 대해 현행 배출허용기준 대비 20%, 50%, 70%, 90% 강화되는 4단계로 설정하였다. 분석대상 환경설비는 선택적 무촉매환원장치(SNCR), 반건식 반응기(SDR), 건식 벤츄리 스크러버, 습식 스크러버의 4종이며, 각 설비의 화학 반응 모델과 기존 문헌의 Full-scale 운전 자료를 기반으로 규제 강화 시 필요한 첨가제(요소수, 소석회, 수산화나트륨) 사용량을 역산하였다. LCA 방법론은 범주별 단일법(single method per category) 원칙을 적용하여, 광화학 오존 생성(인체·생태), 미세먼지 형성, 토양 산성화, 기후변화(GWP)를 각각 정량화하였다. 이 중 기후변화 범주는 ReCiPe 2016 midpoint의 Climate change (GWP100, IPCC 기반)를 적용하였으며, 산성화는 CML-IA를 사용하여 HCl의 기여를 반영하였다.

분석 결과, (1) 오존-인체건강 범주에서 총순영향은 12.55에서 9.44 kg NOx-eq로 약 24.8% 감소하였으며, 이는 규제 강화가 순환경개선에 기여함을 보여준다. 그러나 단위 ppm NOx 저감당 간접부담 기울기는 규제 강도가 높아질수록 가속되는 경향을 보였다. (2) 미세먼지 형성 범주에서는 NH_3 슬립이 9.24 ppm(95% CI: 8.75–9.73) 수준에서 $\eta \approx 0.50$ 부근을 기점으로 단위 ppm 저감의 한계효과가 음에서 양으로 전환되어, 고효율 SNCR 운전 시 PM 배출이 오히려 증가할 위험이 확인되었다. (3) 산성화 범주에서는 업스트림 시약 생산·공급에 따른 간접부담이 지배적이었으며, NaOH의 단위 투입당 간접 기여가 석회 대비 약 50배로 나타나, 시약 선택이 전체 환경영향에 결정적 변수가 될 수 있음을 시사하였다.

종합적으로, 대기오염물질 배출기준 강화는 대부분의 범주에서 환경영향을 감소시키지만, 고효율 구간에서는 간접부담이 가속되고 범주 간 상충이 나타날 수 있다. 따라서 규제 설계와 설비 운용은 직접·간접영향을 함께 고려한 다목적 최적화 접근이 필요하며, 이를 위해 본 연구와 같이 범주별 적합한 LCIA 방법론을 결합한 전과정 기반 분석이 중요한 의사결정 도구가 될 수 있다.

PE-22

Stepwise pH-Controlled Seawater Carbonation for Efficient Mg^{2+} and Ca^{2+} Recovery

Jaeyong Yang[1,2], Taejong Jang[1], Young Bok Ryu[1]

[1]Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)

[2]Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University

Carbon dioxide (CO_2) is a major driver of global warming, necessitating the development of effective reduction technologies. Mineral carbonation, which converts atmospheric or dissolved CO_2 into chemically stable carbonate minerals for permanent storage, has emerged as a promising and environmentally friendly CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage) approach. Various materials, including natural minerals, industrial by-products, and seawater, can be used for mineral carbonation, with seawater being a particularly attractive feedstock due to its abundance of magnesium (Mg^{2+}) and calcium (Ca^{2+}) ions. Using seawater, this study investigated precipitation behavior under pH control and carbonation characteristics via CO_2 injection. Artificial seawater was prepared and pretreated to remove impurities, followed by pH adjustment with NaOH to precipitate hydroxides for separation and recovery. The supernatant was reacted with dissolved calcium ions by injecting CO_2 under controlled pH conditions to form calcium carbonate ($CaCO_3$). Seawater composition changes were monitored by ICP-OES, and precipitate phases were characterized by XRD. Stepwise control of seawater composition and optimization of carbonation conditions improved both precipitate purity and process efficiency. These results provide essential baseline data to determine optimal operating parameters for seawater-based raw material production and demonstrate the potential for large-scale industrial application.

References

1. Wang, F., Lu, X., Li, Q., and Zhao, L., "Sequential Carbonate Mineralization of Desalination Brine for CO_2 Capture and Utilization", J. CO_2 Util., 39, 72-80 (2020).

2. Pan, S. Y., Chiang, P. C., Chen, Y. H., and Chang, E. E., "Advancing Seawater-Based Mineral Carbonation Technology for CO_2 Sequestration and Utilization", Environ. Sci. Technol., 51(15), 8920-8933 (2017).

Acknowledgement

This study has been conducted with the support of the Korea Institute of Industrial Technology as “Development of fiber-based technology for reduction of hazardous substances in the air (KITECH EO-25-0003)”

PE-23

Design and Performance Evaluation of Metal Monolith-Based Coated Catalysts with Enhanced Low-Temperature Activity and Water Resistance for NH_3-SCR

Chaekyeong Kim[1,2], Jong-Hoon Lee[1], Jungho Jae[2], Hee Soo Kim[1*] and Dong-Ha Lim[1,2*]

[1]Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Republic of Korea

[2] Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

Selective catalytic reduction (SCR) of nitrogen oxides (NO_x) with ammonia (NH_3) is a widely applied and effective technology for mitigating industrial combustion emissions. However, the presence of water vapor (H_2O) in exhaust gases and low-temperature operation can significantly reduce SCR efficiency by inhibiting NH_3 adsorption, blocking active sites, and altering catalyst structures. These effects are closely associated with changes in oxygen vacancy formation and disruptions in electron transfer, which affect the NO_x reduction mechanism. Therefore, developing SCR catalysts with high water resistance and enhanced low-temperature activity is essential for practical industrial applications.

In this study, the developed catalyst with enhanced low-temperature activity and water resistance was coated onto metal monoliths to produce the final monolithic catalyst. The catalyst was synthesized by supporting active metal oxides on TiO_2 and characterized via XRD, BET, SEM, and H_2-TPR to assess structural, surface, and redox properties. Its performance in NH_3-SCR was evaluated at 150–350 °C, including under water vapor. The coated catalyst exhibited excellent NO_x reduction at 200–300 °C and maintained high stability under 10 vol% H_2O. Optimization of the coating composition and structure enabled effective control of oxygen vacancies and electron transfer, enhancing both low-temperature activity and water resistance.

These findings indicate that metal monolith-based coated catalysts are a promising approach for improving NH_3-SCR performance under real industrial exhaust conditions. The study provides a practical foundation for the development of high-performance, environmentally friendly catalysts for industrial NO_x emission control applications.

References

Han, L., *et. al.*, “Selective Catalytic Reduction of NOx with NH_3 by Using Novel Catalysts: State of the Art and Future Prospects," *Chem. Rev.*, **119**, 10916-10976 (2019).

Acknowledgements

This work was supported also by the Korea Institute of Industrial Technology as "Development of the super clean modular platform technology based on AI for eco-friendly ship to respond to IMO 2020/2050 regulations” (KITECH EH-25-0005).

PE-24

고성능 및 고내구성 CF_4 가수분해 촉매에 관한 연구

이은한[1,2], 조원섭[1,3], 조재현[4], 김한성[2], 이신근[1,*]
[1]한국에너지기술연구원, 34129 대전광역시 유성구 가정로 152
[2]연세대학교 화공생명공학과, 03772 서울특별시 서대문구 연세로 50
[3]고려대학교 신소재공학과, 02841 서울특별시 성북구 안암로 145
[4]나노화인테크(주), 16954 경기도 용인시 기흥구 흥덕1로 13

Research on High-Performance and High-Durability CF_4 Hydrolysis Catalysts

Eun-Han Lee[1,2], Won-Seob Cho[1,3], Jeahyun Cho[4], Hansung Kim[2], Shin-Kun Ryi[1,*]
[1]Korea Institute of Energy Research (KIER), 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Republic of Korea
[2]Department of Chemical and Biological Engineering, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03772, Republic of Korea
[3]Department of Materials Science and Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, Republic of Korea
[4]Nano Fine Tech, 13, Heungdeok 1-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

Abstract

사불화탄소 (CF_4)는 지구온난화지수가 CO_2 대비 6,500으로 높으며, 대기 중 수명이 50,000년으로 매우 높은 온실가스이다. CF_4는 반도체 및 디스플레이 생산 시설에서 광범위하게 사용하고 있으며, 에칭(Etching)과 증착(CVD) 공정에서 주로 사용한다. CF_4 배출을 저감하기 위한 다양한 방식 중 알루미나 기반 촉매를 활용한 촉매 가수분해는 낮은 에너지 소모, 간단한 공정의 이점이 있다. 하지만, 기존 γ-Al_2O_3 촉매는 불화수소(HF) 노출 시 구조적 열화와 비가역적 상전이로 인해 촉매 활성이 없은 α-Al_2O_3로 변하는 문제가 있다. 본 연구에서는 γ-Al_2O_3 촉매를 기반으로 구조적 안정성과 촉매 성능을 동시에 향상하는 초고안정성 $ZnAlPO_4$ 촉매를 개발하였다. 인은 HF에 의한 상전이를 효과적으로 억제하여 장기 내구성을 향상하고, 아연은 총 표면 산도를 증가하여 CF_4 활성을 촉진함으로써 내구성과 분해 성능을 향상할 수 있었다. 본 연구에서 개발한 촉매는 가수분해를 통해 700℃에서 CF_4 5,000 ppm 완전 분해가 가능하였으며, 3,700시간 동안 연속 운전 결과 성능 저하 없이 100% 내구성을 유지하였다. 따라서 제조한 촉매는 우수한 장기 내구성 결과를 바탕으로 반도체 및 디스플레이 생산 시설에서 배출하는 CF_4 저감을 위한 촉매로 적용할 수 있을 것으로 판단한다.

사사 : 저자는 본 연구를 한국에너지기술연구원 주요사업 (C5-2476)지원을 통해 수행하였습니다.

PE-25

Red mud 촉매를 이용한 복합 냉매 분해에 관한 연구

조원섭[1,2], 이은한[1,3], 김세호[2], 이신근[1,*]
[1]한국에너지기술연구원, 34129 대전광역시 유성구 가정로 152
[2]고려대학교 신소재공학과, 02841 서울특별시 성북구 안암로 145
[3]연세대학교 화공생명공학과, 03772 서울특별시 서대문구 연세로 50

Research on the Decomposition of Blended Refrigerant Using Red Mud Catalysts

Won-Seob Cho[1,2], Eun-Han Lee[1,3], Se-ho Kim[2], Shin-Kun Ryi[1,*]
[1]Korea Institute of Energy Research (KIER), 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Republic of Korea
[2]Department of Materials Science and Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, Republic of Korea
[3]Department of Chemical and Biological Engineering, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03772, Republic of Korea

Abstract

본 연구는 산업 폐기물인 red mud를 촉매로 제조하여 수소불화탄소(HFCs) 복합 냉매(HFC-143a, HFC-125, HFC-134a)를 효과적으로 분해하기 위한 연구이다. HFCs는 냉각 시스템에서 사용하고 있으며, 주로 냉장고, 에어컨의 냉매로 활용한다. HFCs는 지구온난화지수가 CO_2 대비 최대 수만 배로 매우 높고, 배출량이 해마다 증가하고 있는 온실가스이다. 이러한 HFCs 온실가스를 저감하기 위한 방식 중 산업 폐기물인 red mud를 활용한 촉매 분해는 낮은 가격과 폐기물을 재활용한다는 점에서 경제성이 우수하고, 친환경적인 이점을 가진다. 실험에 사용한 촉매는 red mud를 건조 및 분쇄하여 직경 6 mm, 길이 3 mm인 펠렛 형태로 성형하고, 800 ℃에서 소성 공정을 거쳐 제조하였다. 제조한 촉매의 성능 확인을 위해 Inconel 600 소재의 반응기에 red mud 촉매 20 ml를 장입한 후 HFC-143a 0.52%, HFC-125 0.44%, HFC-134a 0.54%, steam 8%, Air 600 sccm을 공급하여 평가하였다. 실험결과 700 ℃에서 HFC-143a, HFC-125, HFC-134a가 각각 97.1%, 99.7%, 100%의 전환율을 보이며, 100시간 동안 성능 저하 없이 내구성이 안정적으로 유지하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제조한 촉매는 높은 경제성과 내구성을 바탕으로 냉각 시스템의 냉매로 사용하는 HFCs 복합 냉매를 효과적으로 처리할 수 있는 촉매로 적용할 수 있을 것으로 판단한다.

사사 : 저자는 본 연구를 한국에너지기술연구원 주요사업 (C5-2443)지원을 통해 수행하였습니다.

PE-26

Development of transition metal-based catalysts for unburned ammonia mitigation in ammonia co-firing with coal

*Yeon-Jeong Jo, Sangmin Lee, Kyoungil Park, Min Eui Lee**

Power Generation & Environment Lab., KEPCO Research Institute, Daejeon 34056, Korea

(*mineui@kepco.co.kr)

Carbon-Free Energy (CFE) technology has attracted great attention to achieve the 2050 carbon neutrality goal. However, the unstable supply and intermittency of renewable energy pose challenges to securing domestic power stability.[1] Among CFE technologies, practical study on ammonia co-firing with coal is focused on prospective an alternative to solve those issues. However, the unburned ammonia generated during the combustion process can react with sulfate (SO_4^{2-}) and nitrate (NO_3^-) in the atmosphere, contributing to particulate matter (PM) formation and increasing the potential emission of N_2O.[2] Therefore, selective catalytic oxidation (NH_3-SCO) technology, which selectively converts NH_3 to N_2 and H_2O, is essential for removing the unburned NH_3.

In this present study, we synthesized a transition metal (Mn, Cu, Co, etc.)-based catalyst considering both cost-effectiveness and high performance. By controlling the electronic state of copper through the Ce–O–Cu structure, in particular, it can be suppressed the NOx and N_2O resulting from side reactions. The physicochemical properties of the synthesized catalysts were analyzed using ICP, XRD, XPS, BET and NH_3-TPD. The manufactured catalyst exhibits an high catalytic activity above 90% under the conditions of a space velocity of 20,000 h^{-1}, temperature of 350 ℃, NH_3 100 ppm, O_2 10% and H_2O 10%.

Keywords: Carbon-Free Energy, Ammonia co-firing, Selective catalytic oxidation, Transition metal

References

1. Tian, You, et al. "Sn modulation function on active intermediate species for enhancing NH_3-SCO performance of Cu/Ce0.3TiO_x catalyst." Journal of the Energy Institute 119 (2025): 101976.

2. Wang, Fei, et al. "Progress on selective catalytic oxidation of ammonia (NH_3-SCO) over Ag-based catalysts." Catalysis Today 423 (2023): 113990.

PE-27

비 귀금속 복합 산화물 촉매의 스케일 업 및 성형 촉매 연구 개발

이연진[1], 임영환[1], 김영민[1], 채호정[1*]
[1]수소C1가스연구센터 한국화학연구원

지속가능한 에너지 전환과 탈탄소 사회로의 전환을 위해, 메탄 및 암모니아의 효율적 전환을 위한 촉매 기술 개발이 중요한 과제로 대두되고 있다. 메탄은 이산화탄소보다 지구온난화에 훨씬 큰 영향을 미치는 물질로서 단순 제거뿐만 아니라 CO_2 로 전환하여 환경적 부담을 줄이는 동시에, 에틸렌·수소·메탄올 등 고부가가치 화학 원료로 활용될 수 있다. 또한 암모니아는 차세대 수소 캐리어로 주목받고 있으나, 이를 수소로 효율적으로 분해하기 위해서는 촉매 연구가 필수적이다. 특히, 촉매 소재의 개발뿐 아니라 실제 상용 공정 적용을 위한 대량생산 공정 확립과 촉매 성형 기술 확보가 필수적이다[1,2].

본 연구는 Lab scale 에서 개발된 촉매 소재를 기반으로, 촉매 대량생산에 적합한 제조 방법, 촉매생산의 스케일 업, 그리고 촉매의 성형까지의 최적화를 통한 실용화 가능성 확보를 목표로 수행되었다. 먼저, 다양한 합성 방법(mortar grinding, ball-milling method, One-pot synthesis)을 통해 제조된 비금속 산화물 기반 촉매들의 특성을 비교하고, 각 촉매의 활성 차이를 반응 실험을 통하여 평가하였다. 합성 조건에 따라 표면적, 결정성 등 촉매의 물리화학적 특성이 달라졌으며, 이는 최종적인 반응 활성에 영향을 미쳤다. 그 후, 우수한 활성을 보인 촉매의 조성을 바탕으로 스케일 업을 위한 펠렛 및 비드 코팅 형태의 성형 촉매를 제조하였고, 그 중 사출 성형 기반 펠렛 촉매가 종합적인 성능에 더 유리하다고 판단되었다. 더 나아가 펠렛 촉매의 조성을 조정하여 기계적 강도와 촉매 활성을 동시에 개선하였으며, 벤치 규모 고정층 반응기에서 성능과 내구성을 평가하였다.

본 연구는 촉매 합성에서 구조화 및 스케일 업에 이르기까지 전 주기적 접근을 통해 실제 공정 적용 가능성을 모색하였다는 점에서 의의가 있으며, 향후 청정 기술 적용을 위한 촉매 개발 방향성 제시에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Makepeace, J. W., Wood, T. J., Hunter, H. M. A., Jones, M. O., David, W. I. F., “Ammonia Decomposition Catalysis Using NonStoichiometric Lithium Imide”. *Chem. Sci.* 2015, 6 (7), 3805-3815.

2. Bell, T. E., Torrente-Murciano,L., “H_2 Production via Ammonia Decomposition Using Non-Noble Metal Catalysts: A Review”. *Top. Catal.* 2016, 59 (15), 1438-1457.

PE-28

Performance and Stability of CHA Zeolite Membranes under Humid Conditions for Biogas Purification

Yubin Lee[1,2], Ahrumi Park[1], Jungkyu Choi[2,*] and Jaesung Park[1,*]

[1]Green Carbon Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology,

[2]Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University

Biogas is a sustainable energy source that can potentially replace or supplement fossil fuels [1]. Raw biogas typically contains impurities such as CO_2 and moisture, requiring purification to improve fuel quality and reduce carbon emissions. In membrane-based CO_2/CH_4 separation processes, this requires pre-treatment such as a dehumidification step, which increases both capital and operating costs. Avoiding this step can simplify the process, reduce costs, and improve energy efficiency. Chabazite (CHA) zeolite membranes, with pore sizes of 0.37 × 0.42 nm², can selectively permeate CO_2 (0.33 nm) over CH_4 (0.38 nm), making them promising candidates for biogas upgrading [2]. While the excellent CO_2/CH_4 separation performance is well established, their stability under humid conditions has been less extensively studied. In this study, we characterized the CO_2/CH_4 separation performance of tubular CHA membranes under humidified conditions, ranging from 0 to ~90% RH. We also investigated their long-term stability (~6 h) and performance recovery after exposure to ~90% RH. In addition, the performance recovered after drying, confirming its ability to restore original level after water exposure. These findings suggest the potential of CHA zeolite membranes for dehydration-free biogas upgrading, offering economic and operational advantages.

References

1. Jeong et al., “Hybrid Zeolite Membrane-Based Breakthrough for Simultaneous CO_2 Capture and CH_4 Upgrading from Biogas,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*., 14, 2893-2907 (2022).
2. Lee et al., “Chabazite-Type Zeolite Membranes for Effective CO2 Separation: The Role of Hydrophobicity and Defect Structure,” *ACS Appl. Mater. Interfaces.,* 11, 3946−3960 (2019).

PE-29

마이크로웨이브 보조 탈착을 적용한 산화구리/제올라이트 복합체 기반 고효율 CO_2 흡착제 개발

이준상[1], 손수빈[1], 정주현[1], 김정철[1*]
[1]국립한밭대학교 화학생명공학과

Development of a High-Efficiency CO_2 Adsorbent Based on a CuO/Zeolite Composite Using a Microwave-Assisted Desorption

Junsang Lee[1], Subin Son[1], Juhyun Jeong[1], Jeong-Chul Kim[1*]
[1]Department of Chemical and Biological Engineering, Hanbat National University

전 세계적인 기후 변화 대응을 위해 직접 공기 포집(Direct Air Capture, DAC) 기술이 차세대 이산화탄소(CO_2) 저감 핵심 기술로 주목받고 있다. 그러나 대기 중 CO_2는 부분압이 매우 낮아, 이를 효과적으로 포집하기 위해서는 높은 흡착 효율을 갖는 흡착제가 반드시 필요하다. 또한, 상용화를 위해서는 흡착제 재생 과정에서의 에너지 소비를 최소화하는 것이 필수적이다. 현재까지 아민 기반 유기계 흡착제 개발과 온도 변환 흡착(Temperature Swing Adsorption, TSA) 방식 등이 제안되었으나, 장기 안정성 저하와 높은 재생 에너지 비용이 여전히 주요한 한계로 남아있다. 따라서, DAC 기술의 실질적 확산을 위해서는 고효율 흡착제의 개발과 더불어 에너지 절감형 재생 공정의 도입이 요구된다[1].

본 연구에서는 13X 제올라이트의 우수한 CO_2 흡착 성능과 산화구리(CuO)의 우수한 마이크로웨이브 흡수 특성을 결합한 복합 흡착제를 설계하고 그 성능을 체계적으로 평가하였다. 이 연구를 위하여 13X 제올라이트와 CuO를 단순 물리 혼합한 시료와 $Cu(NO_3)_2{\cdot}3H_2O$를 전구체로 사용하여 초기 습식 함침법(Incipient Wetness Impregnation)으로 제조한 복합체를 비교하였다. 이후 제조된 시료를 STEM-EDS 분석 결과, 물리 혼합 시 CuO 입자는 수 마이크로미터 크기의 큰 입자 형태로 존재하는 반면, 함침법에서는 CuO가 제올라이트 표면에 수십 나노크기로 균일하게 분산됨을 확인하였다. 이러한 시료들을 CO_2 흡착에 활용해본 결과, CO_2 흡착량은 함침법 시료에서 물리 혼합 대비 약 9% 감소하였다. 이러한 결과는 제올라이트 내 카운터 이온(counter ion)으로 존재하는 Na^+가 Cu^{2+}로 치환되면서, 정전기적 상호작용이 감소하여 흡착 성능이 저하된 데 기인한다[2]. 이를 보완하기 위해, 함침 후 이온교환법을 적용하는 2단계 합성 전략을 적용하였으며, 분석 결과 Na^+ 재도입이 성공적으로 이루어졌음을 확인하였다. 그 결과, 2단계 합성 복합체는 1단계 함침법 시료와 물리 혼합 시료 모두에 비해 향상된 CO_2 흡착량을 나타내었다. 이러한 시료의 마이크로웨이브 흡수율을 Microwave swing adsorption 장비를 이용하여 평가하였다. 마이크로웨이브 흡수율의 경우 2단계 합성 복합체가 순수 13X 대비 40% 이상 증가하였으며, 이는 CuO 도입에 의한 마이크로웨이브 흡수 특성에 기인한다. 이러한 향상은 국부적 및 신속한 가열을 가능하게 하여 CO_2 탈착 효율을 높일 수 있었다. 종합적으로, 본 연구는 제올라이트 기반 흡착제의 CO_2 포집 성능과 마이크로웨이브 재생 공정 간의 시너지 효과를 실험적으로 입증하였으며, 향후 저농도 및 다양한 습도 조건에서의 장기 안전성 평가를 위한 기초 자료를 제공하였다.

참고문헌

1. X. Zhu, W. Xie, J. Wu, Y. Miao, C. Xiang, C. Chen, B. Ge, Z. Gan, F. Yang, M. Zhang, D. O'Hare, J. Li, T. Ge and R. Wang, "Recent advances in direct air capture by adsorption," *Chem. Soc. Rev.*, **51**, 6574–6651, (2022).

2. A. Gęsikiewicz-Puchalska, M. Zgrzebnicki, B. Michalkiewicz, A. Kałamaga, U. Narkiewicz, A. W. Morawski and R. Wrobel, "Changes in Porous Parameters of the Ion Exchanged X Zeolite and Their Effect on CO_2 Adsorption," *Molecules*, **26**, 7520, (2021).

PE-30

H_2-SCR의 산화물 지지체의 산화마그네슘 담지량에 따른 유해 가스 저감 특성

서충길*
호원대학교 자동차기계공학과

Characteristics of Harmful Gases Reduction according to the Loading amount of MgO of the Oxide Support of H_2-SCR

Choong-Kil Seo*
Dept. of Automotive & Mechanical Engineering, Howon University

최근에 지구온난화로 인하여 이상기온, 열대야, 한파, 호우, 폭설, 가뭄 등 이상기후가 빈번하게 발생하고 있다. 화석에너지원에서 배출되는 CO_2와 유해 가스 때문이며, 이로 인하여 인체의 폐해와 대기의 질을 악화시키고 있다. 최근 미국 정부는 "파리기후협약"을 다시 탈퇴하면서 미국 주도의 에너지 및 환경 정책을 추진하지만, 탄소를 저감하는 정책과 기술은 아무리 강조해도 부족함이 없다. 전기자동차(EV)와 연료전지 전기자동차(FCEV)로 파워트레인의 전환이 진행되고 있다. 최근에는 전기자동차의 화재 문제와 인프라 부족 등으로 인하여 보급률이 주춤하고 있으며, 하이브리드 전기자동차(Hybrid Electric Vehicle) 판매가 증대되고 있다. 국내외를 막론하고 자동차에서 내연기관이 차지하는 비중이 크다. 최근에는 건설기계, 선박, 농기계, 보일러 및 이륜 자동차에까지 배기 가스 규제가 더욱 더 엄격하게 강화되고 있다. EC(European Commision)는 Euro 7 배기가스 규정을 제안하였고, 새로운 경차량에 대해서는 2025년도 7월 1일에, 대형차량에 대해서는 2027년 7월 1일에 발효된다[1]. 내연기관에서 연소 온도가 높은 조건에서 발암 물질인 NOx가 배출되며, 현재까지 NOx 저감용 강력한 후처리 촉매시스템은 SCR(Selective Catalytic Reduction)[2,3]이 다용되고 있다. 최근 청정에너지원인 수소(Hydrogen)에 관한 제조, 생산 및 활용에 관한 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. 그 중 H_2-SCR은 배출 가스 온도가 낮은 내연기관이나 향후 상용화될 H_2-엔진에서 배출되는 유해 가스 저감용 후처리 촉매시스템으로 활용성이 NOx 저감 성능을 향상시키는 연구가 진행되어왔다. H_2-SCR 촉매의 성능 향상을 위해 주촉매(main catalyst), 안정제(promoter), 지지체(support) 및 반응 메커니즘 등에 관하여 선행 연구가 진행되어져 왔다. 유해 가스 저감용 후처리 촉매의 성능은 제조 방법 및 촉매를 구성하는 여러 물질 및 담지량 등 촉매 성능에 미치는 변수는 너무 많다.
이 연구는 촉매 지지체 중 산화물 지지체에 들어가는 물질 중 MgO 담지량에 따른 5종류 H_2-SCR의 유해 가스 저감 특성을 파악하고자 한다. SEM/TEM, BET 비표면적, H_2-TPR, XPS 분석 및 de-NOx/CO 성능 평가의 물리·화학적인 분석법을 이용하였다. (3) 0.75Pt-9.25MgO/CeO_2 H_2-SCR에서 산소 화학종의 흡착 및 활성에 좋은 Ce^{3+} 양이온은 901.56Ev, 883ev에서 피크가 뚜렷하게 생성되었다. Ce^{4+} 양이온은 916ev, 907ev, 899ev, 888ev에서 생성되었고, Ce^{3+} 상태는 H_2-SCR에 활성종으로 (2) 0.75Pt-9.25MgO/CeO_2 (3) 0.75Pt-9.25MgO/CeO_2 H_2-SCR에서 피크의 높이와 면적이 넓은 경향을 나타냈다. (4) 0.75Pt-50MgO/CeO_2와 (5) 0.75Pt-90MgO/CeO_2 H_2-SCR에서 Binding energy 차이가 조금 나지만, 형성된 두 개의 피크는 PtO 화학종으로 판단이 된다. MgO 담지량이 적을수록 촉매 활성이 좋은 Pt^0 화학종이 일부 생성이 되었고, MgO 담지량이 많을수록 Pt 산화물 화학종인 PtO가 생성이 많이 되었다. (3) 0.75Pt-9.25MgO/CeO_2 H_2-SCR은 75°C에서 약 13%, 125C에서 약 44%의 NOx 전환율을 나타냈다. 다른 H_2-SCR에 비해 100°C 이하에서 가장 저온 활성이 좋았고, 또한 250°C 이상 온도에서도 5-13%의 NOx 저감 성능이 향상되었다. MgO 함량이 가장 낮은 (1) 0.75Pt-2MgO/CeO_2 H_2-SCR은 100°C에서 시작해 125°C에서 약 48%의 NOx 전환율은 나타냈다. MgO 담지량이 많은 (5) 0.75Pt-90MgO/CeO_2 H_2-SCR의 CO 전환율이 가장 낮았다. 산화물 지지체에 MgO 담지량이 많으면, H_2-SCR의 NOx와 CO 전환율이 낮았으며 활성이 저하되었다. 지지체 중 CeO_2는 산화 능력과 산소흡장능력(OSC)이 있는 물질로써 촉매 활성에 기여하나, MgO의 담지량은 9.25wt%가 적절한 양이 하다고 할 수 있으며, 촉매의 반응 속도를 향상시켰다. 향후 연구 계획은 산화물 지지체에 들어가는 물질 중 H_2-SCR의 유해 가스 NOx와 CO 전환율 향상과 내구성 향상을 위하여 전이금속 첨가에 따른 반응 특성을 연구하고자 한다.

참고문헌

1. Seo, C. K. "Effect on Reduction of NOx and CO according to the Alkali Metal Loading of H_2-SCR", *Journal of Power System Engineering*, 28(3), 13-20 (2024).
2. Zhang, X et al. "$CeMn/TiO_2$ Catalyst Prepared by Different Methods for enhanced low-temperature NH_3-SCR Catalytic Performance", *Chemical Engineering Science*, 238(20), 116588 (2021).
3. H. Sjovall, H et al, "Detailed kinetics modeling of NH_3 SCR over Cu-ZSM-5". *Applied Catalysis b: Environmental*, 92(1-2), 138-153 (2009).

에너지저장

(포스터발표 I)

2025년 9월 25일(목) 09:00~11:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비

PB-1

Electrodeposition-Driven Surface Engineering for High-Performance Lithium Metal Anodes

Da Eun Hyun, Jong Chan Choi, Yoon Ho Kim, Myungsung Sohn, Jiyeon Seo, Yun Chan Kan*
Department of Materials Science and Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

Lithium (Li) metal is considered a promising anode material for high-energy-density batteries due to its high theoretical capacity. However, commercialization is hindered by the unstable electrode–electrolyte interface and safety concerns. The native solid electrolyte interphase (SEI) layer formed on Li metal is structurally unstable, leading to continuous rupture and regeneration during cycling, which irreversibly consumes Li ions. This process also induces the formation of Li dendrites and electrically isolated dead Li, eventually resulting in battery failure.

To address these issues, the formation of an artificial SEI layer on Li foil has emerged as a key strategy for interface stabilization. In this study, three-dimensional (3D) nanowires were synthesized via a facile electrodeposition method, followed by mechanical rolling to transfer the nanostructure onto Li foil, thereby constructing an artificial SEI layer. The resulting layer, containing Li compounds such as Li_2S and LiF, facilitates uniform Li-ion flux and suppresses dendrite growth. Furthermore, the synergistic effect between the lithiation-induced 3D nano-dot structure and the artificial SEI layer significantly enhances the electrochemical performance. This simple electrodeposition-based approach improves interfacial stability and offers a practical route toward the commercialization of high-performance Li metal batteries.

PB-2

Balancing Insulating and Conductive Component in Composite Scaffolds for Stable Lithium Metal Anodes

Min Kim[1], Yeon Woo Nahm[1], Ju Young Kim[1], Kyung Yoon Hong[1], and Yun Chan Kang[1,*]

[1]Department of Materials Science and Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

Lithium metal batteries (LMBs), which use lithium metal as the anode, offer a high theoretical specific capacity of 3,860 mAh g^{-1} and the lowest redox potential (-3.04 V vs. the standard hydrogen electrode) of lithium metal, enabling superior energy density for advanced energy storage [1]. However, their practical application is limited by non-uniform lithium plating and stripping during cycling, which induces dendrite growth, volume changes, and electrode pulverization, ultimately leading to internal short circuits and safety hazards [2]. In this study, a scaffold mixing strategy was developed that combines insulating calcium carbonate ($CaCO_3$) and conductive carbon nanotubes (CNTs) to regulate electron pathways and promote uniform lithium deposition. $CaCO_3$/carbon composite microspheres with multivoid hollow structures were synthesized via spray pyrolysis, producing hollow particles that fractured into nanoparticles during mixing with CNTs, thereby ensuring homogeneous dispersion within the scaffold. Optimization of the $CaCO_3$/C-to-CNT ratio was performed to balance electron pathways and interfacial stability, resulting in a composite scaffold that balanced electrical conductivity and enhanced lithium-ion adsorption at the electrode-electrolyte interface, which suppressed localized lithium growth and strengthened interfacial stability. As a result, the optimized electrode exhibited improved cycling stability and rate capability in both lithium symmetric and full cells with a $LiFePO_4$ cathode, demonstrating the potential of this approach for high-performance LMBs.

References

1. He, X., Zhang, K., Zhu, Z., Tong, Z., and Liang, X., "3D-hosted lithium metal anodes," *Chem. Soc. Rev.*, **53**(1), 9-24 (2024).
2. Yuan, H., Ding, X., Liu, T., Nai, J., Wang, Y., Liu, Y., Liu, C., and Tao, X., "A review of concepts and contributions in lithium metal anode development," *Mater. Today*, **53**, 173-196 (2022).

PB-3

Engineered $Na_3V_2(PO_4)_3$/Carbon Composites for High-Performance Symmetric Sodium-Ion Batteries

Yejin Ra[1], Jae Wook Kang[1], Jaesol Sim[1], Jihoon Lee[1] and Yun Chan Kang[1*]

[1]Department of Materials Science and Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

Sodium-ion batteries (SIBs) are gaining increasing attention as sustainable and economical energy storage systems, primarily due to the abundance of sodium and the potential for reduced production costs compared to lithium-based technologies [1]. Realizing practical SIB applications relies heavily on the development of advanced cathode materials. Among these, $Na_3V_2(PO_4)_3$ (NVP) with its NASICON-type structure offers outstanding structural robustness and interconnected channels that promote rapid and reversible Na^+ diffusion [2]. Furthermore, the presence of two distinct voltage plateaus, near 3.4 V (V^{3+}/V^{4+}) and 1.6 V (V^{2+}/V^{3+}), enables NVP to serve dually as both cathode and anode in symmetric full-cell configurations. Such systems not only maintain structural integrity during cycling but also streamline manufacturing processes and improve safety, reinforcing NVP's potential for cost-effective large-scale applications.

Despite these advantages, the inherently low electrical conductivity of NVP restricts its rate capability and achievable energy density. Incorporating conductive carbon networks has proven to be an effective strategy for overcoming this limitation by enhancing electron transport. In this study, a two-step synthesis approach that integrates spray drying with carbon compositing is presented to obtain dense NVP/C composites with uniform carbon distribution. Dextrin and carbon nanotubes were employed as carbon sources, that retained a homogeneous conductive framework after calcination and exhibited notable improvements in cycling stability and energy density. A symmetric full-cell concept using electrodes with distinct microstructures was also implemented, where the NVP@Dex || NVP@Dex configuration delivered the most favorable electrochemical performance. Insights from in situ EIS and GITT confirmed superior ion/electron transport, lower internal resistance, and improved mechanical accommodation during cycling.

References

1. Kate, R.S., Jadhav, H.S., Chothe, U.P., Bhattacharjee, K., Kulkarni, M.V., Deokate, R.J., Kale, B.B. and Kalubarme, R.S., "Critical review of the recent progress and challenges of polyanion Na 3 V 2 (PO 4) 3 cathode materials in rechargeable sodium-ion batteries. "*Journal of Materials Chemistry A*, *12*(13), 7418-7451 (2024).
2. Jian, Z., Hu, Y.S., Ji, X. and Chen, W., "Nasicon-structured materials for energy storage. *Advanced Materials"*, *29*(20), 1601925 (2017).

PB-4

Advanced carbon-transition metal oxide 3D hosts for stable lithium deposition in metal anodes

SungJu Kim[1], Jae Hun Choi[1], Noeul Kim[1], EunHye Kim,[1], Yun Chan Kang[1,*]

[1]Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

Stable and high-performance lithium metal anodes (LMAs) are crucial for next-generation energy storage. Despite their ultrahigh theoretical capacity over ten times that of graphite and low redox potential, LMAs face challenges such as dendritic growth and large volume changes during cycling. [1] Integrating carbon-based 3D host structures with lithiophilic components effectively suppresses dendrite formation and accommodates lithium volume fluctuations, enhancing cycling stability. [2] The high surface area of these hosts lowers local current density, while their conductivity and tunable porosity further limit dendrite growth. Transition metal oxides embedded within the carbon framework provide lithiophilic nucleation sites through conversion reactions and alloying with lithium, promoting uniform and reversible plating and stripping. [3] Together, carbon–metal oxide composite hosts offer improved stability, safety, and electrochemical performance for lithium metal batteries.

In this study, we synthesized a carbon–transition metal oxide composite 3D host via a simple two-step impregnation. Activated carbon microspheres were partially graphitized and then impregnated with transition metal oxides, followed by heat treatment. The resulting composite exhibited excellent electrochemical performance: asymmetric cells showed over 99% Coulombic efficiency with stable cycling beyond 800 hours, while symmetric cells maintained low voltage hysteresis over 800 cycles. In full cells with a commercial $LiNi_{0.6}Co_{0.2}Mn_{0.2}O_2$ cathode, the composite enhanced cycling stability and rate performance. Post-deposition SEM analyses revealed that both carbon and metal oxides contributed to uniform lithium plating, demonstrating the potential of these composites as effective 3D hosts for stable and safe lithium metal anodes.

1. Wang, R., Cui, W., Chu, F., Wu, F., *Lithium metal anodes: Present and future*, *J. Energy Chem.*, 48, 145–159 (2020).
2. Yang, C.-P., Yin, Y.-X., Zhang, S.-F., Li, N.-W., Guo, Y.-G., *Accommodating lithium into 3D current collectors with a submicron skeleton towards long-life lithium metal anodes*, *Nat. Commun.*, 6(1), 8058 (2015).
3. Liu, K., Zhang, R., Wu, M., Jiang, H., Zhao, T., *Ultra-stable lithium plating/stripping in garnet-based lithium-metal batteries enabled by a SnO2 nanolayer*, *J. Power Sources*, 433, 226691 (2019).

PB-5

Hierarchically Porous Sn-NiO-carbon-CNT Framework via One-step Spray Pyrolysis Enabling Synergistic Conversion-Alloying Reactions for Stable Lithium Metal Anodes

Hyo Yeong Seo[1], Ji Hong Park[2], Jae Won Lee[2], Yun Chan Kang[1*], Gi Dae Park[2,3*]

[1]Department of Materials Science and Engineering, Korea University

[2]Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University

[3]Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University

Lithium metal anodes (LMAs) possess an ultrahigh theoretical capacity of 3860 mAh g^{-1} and the lowest electrochemical potential (–3.04 V vs. the standard hydrogen electrode), have emerged as a promising next-generation high-energy-density batteries. However, their practical application is hindered by uncontrollable dendritic growth, dead lithium formation, and severe volume fluctuations during repeated plating/stripping, which lead to rapid capacity fading and safety risks.

In this study, a three-dimensional multi-voids host structure composed of Sn-doped NiO-carbon-CNT composite microspheres was synthesized via a one-pot spray pyrolysis process. The multi voids accommodate volume changes, while uniformly distributed Sn doped NiO nanocrystals and well-dispersed CNTs synergistically provide lithiophilic nucleation sites and efficient electron pathways. Upon initial lithiation, the host undergoes integrated conversion and alloying reactions to form Li4.4Sn, metallic Ni, and a Li2O matrix, enhancing lithium-ion transport and enabling uniform deposition. Benefiting from these structural and chemical features, multi voids-Sn-NiO-C-CNT anode achieves a Coulombic efficiency of 97% over 300 cycles in asymmetric cells. Furthermore, full cells paired with $LiFePO_4$ (LFP) cathodes demonstrate excellent cycling stability and high rate capability, underscoring the practical applicability of the developed 3D host for high-performance LMAs.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) and the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) funded by the Ministry of Science and ICT (Grant No.: RS-2023-00217581, RS-2023-00304768).

PB-6

Fabrication Process of Supercapacitor Separator Using Waste Resources

Min Jun Lee and Kwang Se Lee*

Gyeongkuk National University, Andong 36729, Korea

This study introduces a sustainable approach to fabricating supercapacitor separators by upcycling waste newspapers into a cellulose-based framework, sequentially coated with a mechanically robust polymeric layer and a conductive coating [1]. The polymeric deposition enhanced the separator's structural stability, optimized pore architecture, and introduced controlled surface hydrophobicity [2]. The subsequent conductive layer provided electrochemically active sites, enabling both double-layer capacitance and pseudocapacitive charge storage [3]. Comprehensive morphological and chemical analyses confirmed uniform surface modification, improved interfacial compatibility with electrolytes, and enhanced ion transport pathways. Electrochemical evaluations revealed that the sequentially coated separator exhibited substantially higher charge storage efficiency and lower internal resistance compared to both the unmodified and singly coated counterparts. These improvements were attributed to the synergistic effects of structural reinforcement and redox-active functionality, demonstrating the potential of this strategy for producing eco-friendly, high-performance components for next-generation energy storage systems [4].

References

1. Yu, H., Tang, Q., Wu, J., Lin, Y., Fan, L., Huang, M., Lin, J., Li, Y., and Yu, F., "Using eggshell membrane as a separator in supercapacitor," *J. Power Sources*, **206**, 463–468 (2012).
2. Zhang, L., Wei, M., Shao, L., Li, M., Dai, W., Cui, Y., Li, Z., and Wang, W., "Enhanced parylene-C fluorescence as a visual marker for neuronal electrophysiology applications," *Lab Chip*, **18**(23), 3539–3549 (2018).
3. Kim, K. M., Lee, Y. G., Shin, D. O., and Ko, J. M., "Supercapacitive properties of layered electrodes composed of electrodeposited RuO_2 and polyaniline," *Electrochim. Acta*, **196**, 309–315 (2016).
4. Poonam, Sharma, K., Arora, A., and Tripathi, S. K., "Review of supercapacitors: materials and devices," *J. Energy Storage*, **21**, 801–825 (2019).

PB-7

Characterization of Cellulose Depending on the Contents of Carbon Nanotube

Hyun Woo Hong[1], Kwang Se Lee[1*]

[1]Department of Materials Science and Engineering, Gyeongkuk National University

1375, Gyeongdong-ro, Andong-si, Gyeongsangbuk-do 36729, Republic of Korea

Cellulose is a biodegradable and renewable natural polymer that has attracted considerable attention as an eco-friendly separator material [1]. However, cellulose nanofibers (CNFs) tend to aggregate and have limited porosity, and their high hydrophilicity can hinder application in high-performance energy storage devices when used alone [2]. Carbon nanotubes (CNTs) possess high electrical conductivity and mechanical strength, making them suitable for improving both structural stability and electrochemical performance. In this study, a composite material was developed by combining CNFs, which feature a large specific surface area and excellent mechanical properties, with CNTs. Physicochemical properties were characterized using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), contact angle measurements, atomic force microscopy (AFM), and scanning electron microscopy (SEM). Electrochemical performance was evaluated in terms of ionic conductivity and interfacial resistance. Through a comprehensive comparison of the physicochemical and electrochemical characteristics, the optimal CNT content was identified. This study demonstrates the potential of bio-based CNF–CNT composite membranes as high-performance and environmentally friendly separators for energy storage devices.

References

1. Lizundia, E., Costa, C, M., Alves, R., and Lanceros-Méndez, S., “Cellulose and its derivatives for lithium ion battery separators: A review on the processing methods and properties,” *Car-bohydr. Polym. Technol. Appl*., **1**, 100001 (2020).

2. Turossi, T. C., Júnior, H. L. O., Monticeli, F. M., Dias, O. T., and Zattera, A. J., “Cellulose-Derived Battery Separators: A Minireview on Advances Towards Environmental Sustainability,” *Polymers*, **17**(4), 456(2025).

PB-8

안정적인 수계 아연 금속 전지를 위한 PVA/PVP 블렌드 폴리머 코팅

이태현[1], 엄지현[1*]
국립공주대학교 화학공학부[1]

PVA/PVP Blended Polymer Coating for Stable Aqueous Zinc Metal Batteries

Taehyun Lee[1], Ji Hyun Um[1*]
Department of Chemical Engineering, Kongju National University[1]

수계 아연 전지는 높은 이론 용량과 낮은 환원 전위, 풍부한 매장량, 그리고 수계 전해질 사용이라는 장점을 바탕으로 차세대 지속 가능한 에너지 저장 기술로 주목받고 있다. 그러나 구동 과정에서 발생하는 수소 발생, 부식, 아연계 부산물 형성과 같은 부반응은 장기 수명을 심각하게 저해하며, 특히 아연의 불균일한 증착은 덴드라이트와 데드 Zn 형성을 촉진해 비가역적인 전극 손상을 초래한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 다양한 방법 중 표면 개질이 널리 연구되고 있으며, 박막 형성이 용이하고 기능기 설계가 자유로운 고분자 기반 코팅층 형성 방법은 전극과 전해질 사이에 균일한 보호층을 마련하여 부반응을 억제하고, 이온 전도 경로를 제어함으로써 전지의 수명과 안정성을 향상시키는 데 효과적이다. 폴리비닐알코올(PVA)은 기계적 안정성이 뛰어나지만 반결정성 구조로 인해 이온전도도가 낮으며, 폴리비닐피롤리돈(PVP)은 비정질 구조와 카보닐기를 통해 아연 이온과 배위 결합하고 수분을 흡수해 이온 전도 경로를 향상시키지만 기계적 안정성이 부족하다. 본 연구에서는 두 고분자의 고유한 특성을 결합해 장점을 극대화하고 단점을 보완하기 위해 PVA/PVP 블렌드 고분자 코팅층을 설계하여 아연 금속 음극에 적용하였다. 두 고분자의 극성 기능기는 아연 증착을 균일하게 유도하고 수소 발생을 억제하여 4500 시간 이상의 장수명 구동을 가능하게 하였으며, 이는 고분자의 물성을 전극 설계에 반영함으로써 수계 아연 전지의 안정성 향상과 장수명화에 기여할 수 있음을 보여준다.

PB-9

나노 크기의 TiO_2 및 PVDF를 활용한 수계 아연 전지의 안정화

김현서[1], 엄지현[1*]
국립공주대학교 화학공학부[1]

Stabilization of Aqueous Zinc Batteries Using Nano-Sized TiO_2 and PVDF

Hyeon Seo Kim[1], Ji Hyun Um[1*]
Department of Chemical Engineering, Kongju National University[1]

최근 기존의 전지들에서 유기 용매로 인한 화재 및 폭발 등의 안전성 문제가 발생하고 있으며, 이를 해결하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 그 중 수계 아연 전지는 우수한 이론 용량(820 mAh g^{-1} or 5855 mAh cm^{-3})과 낮은 환원 전위(-0.763 V vs SHE) 및 수계 전해질을 사용하여 확보되는 환경 친화성, 안전성, 무독성의 특성으로 주목을 받고 있다. 그러나 수계 아연 전지는 물을 전해질로 사용한다는 점에서 불가피한 수소 가스 발생과 함께 아연 이온(Zn^{2+})의 불균일한 증착으로 인한 결정 수지상(덴드라이드, dendrite) 성장에 대한 문제를 안고 있으며, 이는 전지의 내부 단락 및 수명 단축의 주요 원인으로 여겨지고 있다. 이산화티타늄(TiO_2)은 우수한 전기 촉매 활성과 안정적인 화학적 특성, 그리고 저렴한 비용을 갖춘 금속산화물이다[1]. TiO_2의 이러한 특성을 통해 나노 입자 TiO_2로 아연 음극을 코팅하여 전류 분포를 조절하고 증착되는 아연 이온을 일정하게 분배해 dendrite 형성을 억제하고, 전극 표면을 보호하여 부식을 억제해 가스의 발생을 줄여 향상된 전극을 연구하였다[2,3]. 본 연구에서는 나노입자의 TiO_2와 PVDF(Polyvinylidene Fluoride) 매트릭스를 아연 전극의 인공 SEI로 도입하여 아연 계면에서의 부반응을 완화하며, TiO_2를 통해 전지 내 전류 분포를 조절함으로써 아연 이온의 균일한 증착을 유도하였다. TiO_2가 분포된 PVDF층을 적용한 인공 SEI층의 물리적, 전기화학적 특성을 최적화하기 위해 코팅액의 농도와 인공 SEI층의 두께를 조절하였으며, 전지의 전기화학적 분석을 진행하여 1.0 mA/cm^2의 전류밀도로 2000 시간 이상의 장수명 특성을 보였다. 추가적으로 인공 SEI층의 효과와 전극에서의 아연 증착을 확인하기 위해 실시간 현미경 이미징 분석을 진행하였다.

참고문헌

1. ZHAO et al, Advanced Functional Materials, Redirected Zn electrodeposition by an anti-corrosion elastic constraint for highly reversible Zn anodes., 31.2 : 2001867. (2021).

2. Li, Bin, et al. “A facile coating strategy for high stability aqueous zinc ion batteris: Porous rutile nono-TiO2 coating on zinc anode.” Surface and Coatings technology 421 : 127367. (2021).

3. Zhang, Qi, et al. “Revealing the role of crystal orientation of protective layers for stable zinc anode.” Nature Communications 11.1 : 3961. (2020).

PB-10

수계아연전지의 폴리도파민 코팅 전극 적용

김희성, 김진현, 엄지현*
국립공주대학교

Application of Polydopamine-Coated Electrodes in Aqueous Zinc-Ion Batteries

Hui Seong Kim, Jin-Hyun Kim, Ji Hyun Um*
Deptartment of Chemical Engineering, Kongju National University

수계 아연 전지는 저비용, 풍부성, 무독성, 부피당 높은 에너지 밀도 그리고 높은 음극 용량을 가져 ESS(Energy Storage System)에 매우 매력적인 전지이다. 그러나 충전 초기에 Zn^{2+} 이온이 음극 표면에 불균일하게 증착되면 핵이 생성하고 전기장이 집중되면 한곳에 이온 증착이 가속되고 덴드라이트가 성장한다. 이때 덴드라이트는 분리막을 관통해 양극과 접촉하거나, 전해질에 떨어져 나와 떠다니는 불순물이 되어 분리막을 뚫어서 쇼트를 일으키는 문제점을 가지고 있어 이를 해결하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서 폴리 도파민(PDA)은 우수한 친수성으로 전극과 수계 전해질의 계면 특성을 개선해 금속의 균일한 증착을 유도한다. 또한 PDA로 코팅된 전극의 표면에서는 풍부한 하이드록실기(-OH)를 가져 Zn 친화 부위(Zinc philic)로 작용해 Zn^{2+} 이온의 흡착을 촉진한다. 또한 Zn^{2+} 이온과 반응해 카보닐기로 산화되어 균일한 덴드라이트 성장을 유도하고, 물의 활성을 낮춰 부반응을 효과적으로 억제한다. 따라서, PDA의 강한 접착력과 Zn^{2+} 이온과의 배위결합 형성하여 풍부한 하이드록실기를 가진 친수성 고분자인 PDA를 음극 코팅층으로 설계하였다[1,2]. 합성된 PDA 코팅 전극은 PDA 층의 안정화 효과는 실시간 Zn 증착 과정을 모니터링한 실시간 현미경 이미징 분석과, Zn 석출이 (002) 결정면 방향으로 우선 성장하여 덴드라이트 형성을 억제함을 확인한 XRD 분석을 통해 입증되었다.

참고문헌

1. Guoli Zhang et al., “A polydopamine coating enabling the stable cycling of MnO2 cathode materials in aqueous zinc batteries”, Published by the Royal Society of Chemistry, 3545 - 3551 (2024).
2. Xinpeng Li et al, “Regulation and Stabilization of the Zinc Metal Anode Interface by Electroless Plating of a Multifunctionalized Polydopamine Layer”, ACS Appl. Mater. Interfaces, 43215−43225 (2022).

PB-11

Yolk-Shell 구조의 Sn/Sn-Chalcogenide@Carbon 복합체 설계를 통한 리튬 이온 배터리 전기화학 특성 개선

이진형[1,2], 정슬[1,2], 박지면[1,2], 박진성[1,2,*]
[1]아주대학교 에너지시스템학과, [2]아주대학교 첨단신소재공학과

Yolk-Shell 나노구조는 사이클링 과정에서 부피 변화를 효과적으로 완충하고 전극 구조의 안정성을 유지할 수 있는 독특한 구조적 특징으로 인해, 고성능 리튬이온전지(LIB) 음극 소재로 주목받고 있다. 해당 연구에서는 Sn 기반 음극 소재의 전기화학적 성능 향상을 위해 Sn/Sn-Chalcogenide@Carbon yolk-shell 이종구조를 설계하였는데, 이는 이전 연구에서 구조 안정화와 용량 유지를 위해 Sn 나노입자를 둘러싼 중공 구조의 탄소 마이크로스피어를 사용한 사례에 추가로 chalcogen 족 원소를 도입하였다. 이를 통해 이온 및 전자 수송을 촉진하고 전극 파쇄를 억제하는 이종 계면 효과를 유도하였다.

합성은 one-pot spray pyrolysis와 후속 열처리를 통해 수행되었으며, Sn, Sn-Chalcogenide, Carbon 영역 간에 긴밀한 계면을 갖는 yolk-shell 형태를 구현하였다. 전기화학적 평가 결과, 이종 접합 구조의 복합체는 Sn@C 물질에 비해 용량, 사이클 안정성, 율속 특성이 현저히 향상되었다. 이러한 성능 향상은 chalcogenide 기반의 계면 제어와, 부피 팽창을 완충하면서도 전기적 접촉을 유지하는 yolk-shell 구조의 내부 빈 공간이 만들어내는 시너지 효과에 기인한다. 본 연구는 차세대 LIB 음극 소재를 위한 yolk-shell 이종구조 설계에 있어서 범용적인 전략을 제시한다.

참고문헌

1. Hong, Y. J., Kang, Y. C., “General formation of tin nanoparticles encapsulated in hollow carbon spheres for enhanced lithium storage capability,” Small, 11(18), 2157-2163 (2015)

PB-12

에어로졸 기반 3차원 나노기공이 내포된 탄소 복합 이종금속 황화물 마이크로 구형입자의 합성 및 소듐 이온 배터리 음극재 적용

박지면[1,2], 정슬[1,2], 이진형[1,2], 박진성[1,2,*]
[1]아주대학교 에너지시스템학과, [2]아주대학교 첨단신소재공학과

전이 금속 칼코게나이드는 높은 이론 용량으로 소듐 이온 기반 음극재 물질로 주목받고 있다. 그럼에도 불구하고, 큰 부피 변화로 인한 급격한 용량 감소와 낮은 전기 전도도로 인해 실제 적용에는 어려움이 있다. 본 연구에선 이종 구조를 갖는 금속 황화물 나노 입자와 정육면체 형태의 중공 나노 공간으로 구성된 탄소질 마이크로 구형 입자를 one-pot 분무 열분해 공정으로 합성하는 방법을 보고하고자 한다. 금속 질산염, 염화 나트륨, 덱스트린을 녹인 전구체 용액을 분무 열분해하면, 내부에 염화 나트륨 나노 입자가 박혀있는 마이크로 사이즈의 구형 입자가 형성된다. 염화 나트륨은 템플릿으로 사용되며, 물에 의해 제거되어 마이크로 구형 입자 내부에 있는 정육면체 형태의 나노 공간을 형성한다. 이후 sulfidation 공정을 거쳐 수많은 비어 있는 나노 공간을 갖는 3차원 탄소 복합 이종 금속 황화물 마이크로 구형 입자가 형성된다.
이러한 독특한 구조적 특징을 가진 마이크로 구형 입자를 소듐 이온 전지에 적용하면, 급격한 부피 변화의 스트레스를 수용하고 전극과 전해질 계면을 확대하고, 소듐 이온의 kinetics를 향상시킨다.
여기서 코발트 원소는 핵생성 촉진 역할을 하여 나노 크기의 이종 금속 황화물 입자 형성을 유도하여, 소듐 이온의 확산거리를 효과적으로 줄일 수 있다.
합성된 이종 구조의 금속 황화물 마이크로 구형 입자는 높은 가역 용량, 훌륭한 사이클 안정성과 레이트 특성을 보여준다. 이러한 확장 가능하고 간단한 분무 열분해 방법은 중공 나노 공간과 탄소 매트릭스를 갖는 차세대 이차전지 소듐 이온 음극 소재 개발에 유용한 전략을 제공할 것으로 보인다.

참고문헌

1. Jin Koo Kim, Seung-Keun Park, Jin-Sung Park, and Yun Chan Kang, "Uniquely structured composite microspheres of metal sulfides and carbon with cubic nanorooms for highly efficient anode materials for sodium-ion batteries," J. Mater. Chem. A., 7, 2636-2645 (2019).

PB-13

중공 탄소 나노스피어에 캡슐화된, 전이금속이 도핑된 금속 셀레나이드 합성 전략 및 소듐 이온 전지 음극에의 적용

정슬[1,2], 이진형[1,2], 박지면[1,2], 박진성[1,2*]
[1]아주대학교 에너지시스템학과, [2]아주대학교 첨단신소재공학과

리튬의 한정된 매장량으로 인해, 소듐 이온 전지(SIBs)는 리튬 이온 전지(LIBs)의 유망한 대안으로 주목받고 있다. SIBs는 LIBs와 유사한 전기화학적 반응 메커니즘을 이용하지만, 소듐의 더 큰 이온 반지름으로 인해 충·방전 과정에서 현저한 부피 변화가 발생하는 경우가 많다. 이러한 부피 변화는 구조적 안정성과 장기 사이클 성능을 저하시키기 때문에 부피 변화를 견딜 수 있는 음극 소재의 개발은 SIB 기술 발전에 있어 매우 중요하다.
SIB의 음극 소재 중 하나인 전이금속 칼코겐화물은 높은 이론 용량으로 인해 많은 관심을 받고 있다. 그러나, 충·방전 과정에서의 큰 부피 팽창과 그에 따른 급격한 용량 저하, 그리고 낮은 전기 전도성으로 인한 속도 특성 저하는 실제 적용에 부정적인 영향을 끼친다. 나노 스케일에서의 혁신적인 전극 설계를 통해 실제 적용 가능한 SIB 연구가 진행되고 있는 상황에서 요크 - 쉘(yolk - shell) 구조의 다공성 탄소 구체 속 캡슐화된 금속 칼코겐화물은 유망한 음극 후보로 부상하고 있다. 탄소 구체는 전자 전달 경로를 제공할 뿐만 아니라, 견고한 지지체로 작용하여 합성 과정에서 금속 셀레나이드 나노입자의 불규칙한 성장을 억제한다. 또한, 전이금속 도핑 전략을 통해 전자 구조를 정밀하게 조정할 수 있으며, 이는 전기 전도성을 크게 향상시키고 Na^+ 저장 동역학을 가속화하여 전반적인 전기화학적 성능을 개선한다.
본 연구에서는 전이금속이 도핑된 금속 셀레나이드 나노입자가 요크(yolk)로 작용하고, 그 주위가 속이 빈 메조 다공성 탄소 껍질로 둘러싸인 요크 - 쉘 나노구체를 개발하였다. 합성은 간단한 드롭 캐스팅(drop-casting)과 건조 과정을 통한 염 침투(salt infiltration) 후, 단일 단계의 열처리를 통해 최종 구조를 구현하였다.
이렇게 제작된 복합체는 뛰어난 전기화학적 특성을 보였으며, 0.5 A g^{-1}에서 150 사이클 후에도 높은 방전 용량을 유지하였고, 3.0 A g^{-1}의 전류 밀도에서도 우수한 속도 성능을 나타냈다. 속이 빈 탄소 구체는 금속 셀레나이드 나노입자를 캡슐화하여 전기 전도성을 향상시킬 뿐 아니라, 충·방전 과정에서 발생하는 부피 변화를 완화한다. 실험적 특성과 이론적 분석을 통해 이러한 우수한 전기화학적 거동을 면밀히 평가하였으며, 밀도 범함수 이론(DFT) 계산을 통해 전이금속 도핑이 구조적 안정성을 강화하고 전하 이동을 가속화하여 배터리 성능 향상에 기여함을 확인하였다.

PB-14

배터리 셀 간 편차를 고려한 파라미터 확률 모델링 기반 팩 수준 전압·온도 예측 방법론 개발

박훈[1], 김찬호[2], 이나은[1], 김정환[2*]
[1]연세대학교 이차전지융합공학 협동과정, [2]연세대학교 화공생명공학과

전기차 및 에너지 저장 시스템의 고성능화와 안정적인 운용을 위해서는 배터리 팩의 전압 및 온도를 정밀하게 예측할 수 있는 모델이 필수적이다. 특히, 배터리 셀 간의 제조 및 사용 편차로 인한 전압 및 온도의 변동성은 팩 전체의 성능 및 수명에 중대한 영향을 미치므로, 이를 정량적으로 반영한 예측 모델링 기법이 필요하다. 본 연구에서는 셀 수준의 실험 데이터를 기반으로 셀 간 변동성을 확률적으로 모델링하고, 이를 활용하여 팩 수준의 성능을 예측하는 통합적 방법론을 제안한다. 먼저 HPPC 실험을 통해 셀의 동적 응답 데이터를 확보하고, EIS 및 GITT 실험으로부터 초기 파라미터를 도출하였다. 이 파라미터를 HPPC 데이터에 기반한 피팅을 통해 최적화한 뒤, 셀 간 특성 편차를 반영하기 위해 확률변수로 표현하였다. 확률적으로 모델링된 파라미터를 이용해 셀 수준에서 전압 및 온도 응답을 예측하고, 이를 팩 수준으로 확장하기 위해 선형 변환 기법을 적용하였다. 전압은 직렬 연결 셀 수 및 시스템 상수를 반영하여 계산하였으며, 온도는 lumped thermal model을 통해 팩의 대표 온도로 산정하였다. 추가적으로, 제안된 모델의 현실 적용 가능성을 검증하기 위해 실제 배터리 팩 운용 중 수집된 전압, 전류, 온도 데이터를 활용하였다. 검증 결과, 예측값과 실제 측정값 간의 일치도는 높게 나타났으며, 검증 데이터셋에서 상관 계수(R^2) 기준 0.87의 성능을 기록하였다. 이를 통해 셀 간 변동성을 반영한 확률 모델이 팩 수준의 성능 분포와 불확실성까지 효과적으로 설명할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 셀 실험, 확률 모델링, 실증 데이터를 연계한 팩 성능 예측 프레임워크를 제시함으로써, 배터리 시스템의 설계 및 운용 전략 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Mohamed, Mohamed A.A. et al., "Advancements in parameter estimation techniques for 1RC and 2RC equivalent circuit models of lithium-ion batteries: A comprehensive review," *Journal of Energy Storage*, Vol. 65, 108248 (2024).

2. Singh, Sourabh et al., " Decoding range variability in electric vehicles: Unravelling the influence of cell-to-cell parameter variation and pack configuration," *eTransportation*, Vol. 20, 100329 (2024).

3. Abdellahi, Aziz et al., "Impact of cell variability on pack statistics for different vehicle segments," *Journal of Power Source*, Vol. 508, 230246 (2021).

4. Barbers, Elias et al., "Exploring the effects of cell-to-cell variability on battery aging through stochastic simulation techniques," *Journal of Energy Storage*, Vol. 84, 110851 (2024).

5. Chang, Long et al., "Multidimensional Statistical Model of Relationships Between Battery Cell-to-Cell and Pack Variations Considering Parametric Correlation," *IEEE TRANSACTIONS ON TRANSPORTATION ELECTRIFICATION*, Vol. 10(2), 4302-4321 (2024).

PB-15

급속 충전 기반 배터리 열화 예측 통계 모델 개발

이나은[1], 김찬호[2], 박훈[1], 김정환[2,*]
연세대학교 이차전지융합공학협동과정[1]
연세대학교 화공생명공학과[2]

전기차(EV) 시장의 확대에 따라 배터리 수명 예측과 안정성 확보에 대한 기술적 수요가 증가하고 있다. 특히 충전 시간을 단축하기 위해 널리 사용되는 급속 충전은 고전류로 인해 내부 저항 상승과 열화를 유발하며, 이로 인해 배터리 수명이 단축되고 전반적인 활용 안정성에 위협이 될 수 있다. 이러한 문제에 선제적으로 대응하기 위해서는 배터리 상태를 실시간으로 진단하고 예측할 수 있는 SoH(State-of-Health) 추정 기술이 필수적이다. 본 연구에서는 충전 과정에서 측정된 배터리 데이터를 기반으로, SoH 추정을 위해 내부 저항 변화를 예측하는 통계 기반 회귀 모델을 개발하였다. 실제 운용 환경을 반영하기 위해, 수집된 데이터셋에 기존의 분포를 유지하며 다양한 수준의 Custom 노이즈를 주입하여 모델의 견고성과 일반화 성능을 향상하였다. 데이터셋은 Linear Regression[1], Polynomial Regression, SGDRegressor, SVR[2], NN[3] 등 다양한 회귀 알고리즘에 비교 평가하였으며, 예측 성능과 함께 BMS의 메모리 한계를 고려해 경량성을 주요 기준으로 고려하였다. 그 결과, SGDRegressor는 약 0.76KB의 비교적 작은 모델 크기에도 불구하고 검증 데이터셋에서 상관 계수(R^2) 기준 0.9761의 높은 성능을 보여 최종 모델로 선정되었다. 경량 통계 모델 기반의 본 접근법은 실제 배터리 관리 시스템(BMS, Battery Management System)에 탑재 가능성이 있으며, 급속 충전 환경에서의 배터리 열화 상태를 실시간으로 모니터링하고 예측하는 데 유용한 기술적 기반이 될 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Kang, Seung-Hyun, Tae-Won Noh, and Byoung-Kuk Lee. “Machine Learning-based SOH Estimation Algorithm Using a Linear Regression Analysis.” The Transactions of the Korean Institue of Power Electronics26.4 (2021): 241-248.

2. Kim, Byoungwook, Ji Su Park, and Hong-Jun Jang. “Learning Data Model Definition and Machine Learning Analysis for Data-Based Li-Ion Battery Performance Prediction.” Korea Information Processing Society(2023).

3. Kwon, Sanguk, Dongho Han, Jonghoon Kim. "Artificial Neural Network based SOH prediction of lithium-ion battery." Power Electronics Annual Conference (2018): 133-134.

PB-16

Water adsorption based heat storage agent : Applications of zeolite 13X in various cation forms and heteroatom-doped aluminophosphate-based adsorbent

정원준, 김영훈, 김가영, 조강희*
Weonjun Jeong, Younghoon Kim, Gayeong Gim, and Kanghee Cho*
인하대학교 화학공학과
22212 인천광역시 미추홀구 인하로 100

흡착 기반 열에너지 저장 시스템 개발에서는, 수분 흡착 능력과 흡착 효율이 높은 흡착제를 합성하여 수분 탈착을 통해 열 저장을 극대화하는 연구에 중점을 두고 있다. 본 연구에서는 zeolite 13X에 간단한 양이온 교환을 통해 높은 수분 흡착 용량, 빠른 흡착 메커니즘, 구조적 안정성을 개선하고자 하였다.

수분 흡착 기반 축열 소재로서의 잠재력을 평가하고자 >99.9% Na^+를 포함한 상업용 zeolite 13X를 Li^+, K^+, Cs^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Ba^{2+} 이온들과 양이온교환으로 zeolite 13X 내의 Na^+이온을 교환했다. 흡착 열 저장량이 개선되었는지 평가하기 위해 수분 흡착 용량과 탈착 열량의 증가를 측정하였다. 열중량분석(TGA) 및 시차 주사 열량계(DSC) 측정 결과 Li^+ 및 Mg^{2+} 형태 zeolite 샘플은 실온의 완전 포화 조건에서 각각 26%와 29% 더 높은 수분 흡착 용량을 보임을 확인하였다. 특히, Mg^{2+} 형태는 Na^+ 형태에 비해 18% 더 높은 탈착 열량을 보인 반면, Li^+ 형태는 매우 높은 수분 흡착 용량에도 불구하고 주로 저온(388K 미만)에서 탈착을 나타냈다. 확률밀도함수 (DFT) 계산을 바탕으로 교환된 양이온이(Mg^{2+}, Li^+) zeolite에 흡착된 물 분자의 강한 분극을 유도하여 저장용량을 증가시키는 것을 확인했다.

또한, 골격 내 알루미늄, 인, 실리콘의 조성과 결정 구조를 제어하여 수분흡착량을 조절할 수 있는 aluminium phosphate(AlPO)와 silico-alumino phosphate(SAPO)에 다양한 이종 원소(Mg, Co, Fe, Cr 등)를 도핑한 뒤 zeolite에서의 양이온 효과와 완전히 다른지 혹은 유사한지를 규명하고자 하였다. 다양한 이종원소를 골격 내에 도핑하여 구조 안정성, 수분 흡·탈착 속도, 열중량분석(TGA) 및 시차 주사 열량계(DSC)의 결과를 조사하였다. 특히, SAPO-34에 Cr을 도핑한 경우 기존대비 12% 더 높은 수분 흡착 용량을 보임을 확인할 수 있었다.

본 연구는 Zeolite 13X의 양이온 교환을 통한 성능 향상과 AlPO-34, SAPO-34에서의 이종원소 도핑 효과를 비교·분석함으로써, 수분 흡착 기반 열저장 소재 설계의 새로운 방향성을 제시하였다. Mesoporosity를 도입하여 물질 확산 속도를 높이는 복합화 전략을 통해 고효율 열저장 소재에 적합한 물질을 개발할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Zettl, B., Englmair, G., and Steinmaurer, G., “Development of a revolving drum reactor for open-sorption heat storage processes,” Appl. Therm. Eng., 70, 42-49 (2014).
2. Tahraoui, Z., Nouali, H., Marichal, C., Forler, P., and Jean Daou, T., “Influence of the Compensating Cation Nature on the Water Adsorption Properties of Zeolites,” Molecules, 25, 944 (2020).
3. Youn, Y., Yoon, S., Kim, T. W., Hong, S. K., and Cho, K., “Significant improvement of adsorption thermal energy storage of zeolite by simple cation exchange, inducing strong polarization of water,” J. Energy Storage, 89, 111805 (2024).
4. Kim, S. H., Cho, K., Kim, J.-N., Beum, H. T., Yoon, H. C., and Lee, C. H., “Improvement of cooling performance of water adsorption chiller by using aluminophophate adsorbent,” Microporous Mesoporous. Mater., 309, 110572 (2020).

PB-17

고전압 리튬이온전지를 위한 유연성과 확장성을 갖춘 NASICON 구조 $LiZr_2(PO_4)_3$ 하이브리드 고체전해질

박강환, 김재광*
청주대학교 에너지융합학과

초록

차세대 리튬이온전지(LIB)는 전기자동차, 하이브리드 전기자동차, 스마트폰 및 노트북과 같은 휴대용 전자기기의 수요 증가에 대응하기 위해, 보다 높은 에너지 밀도와 향상된 사이클 안정성이 요구되고 있다. 그러나 기존 LIB의 에너지 밀도는 양극 소재의 용량과 작동 전압에 의해 제한되어, 이론적 한계에 근접한 상황이다. 이러한 한계를 극복하기 위하여, 본 연구에서는 NASICON 구조를 갖는 $LiZr_2(PO_4)_3$ (LZP)를 대량 생산이 가능한 고상 반응법으로 합성하고, 이를 유연한 poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) (PVDF-HFP) 고분자 매트릭스와 결합한 하이브리드 고체전해질(HSE)을 개발하였다. 고전압 $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ (LNMO) 양극과 조합하였을 때, 본 HSE는 고전압 양극에서 장기 안정성을 저해하는 주요 요인인 망간 용출을 효과적으로 억제하였다. Li/HSE/LNMO 전지는 0.2 C에서 100사이클 후 초기 용량의 92.0%를 유지하여, 기존의 폴리프로필렌(PP) 분리막을 사용한 전지 대비 우수한 전기화학적 성능을 나타내었다. 이러한 결과는 Li/HSE/LNMO 시스템이 고전압 전고체 리튬이온전지의 견고한 플랫폼으로서의 가능성을 보여준다. 특히, HSE의 구조적 안정성, 이온전도도 및 계면 호환성의 시너지 효과는 에너지 밀도 향상, 수명 연장 및 신뢰성 있는 성능 구현을 위한 유망한 설계 방향을 제시하며, 차세대 전고체 LIB 구조 설계에 중요한 통찰을 제공한다[1].

References

[1] Kim, Hyun Woo, et al. "A scalable and flexible hybrid solid electrolyte based on NASICON-structure Li3Zr2Si2PO12 for high-voltage hybrid batteries." Journal of Power Sources 635 (2025): 236415.

PB-18

친수성 고분자 기반 친환경 수계 바인더를 이용한 리튬-황 전지 성능 향상 연구

강채은[1], 류잉[2], 김재광[3*]
청주대학교 에너지융합학과

리튬–황 전지는 높은 이론 에너지 밀도(2600 $Wh \cdot kg^{-1}$)와 풍부한 원재료로 인해 차세대 이차전지 시스템으로 각광받고 있다. 그러나 충·방전 과정에서 생성되는 리튬 폴리설파이드(LiPSs)의 용출과 이에 따른 셔틀 효과(shuttle effect)는 전지 수명 저하와 효율 감소를 유발한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 전극 내 LiPSs를 효과적으로 고정하고, 동시에 구조적 안정성을 유지할 수 있는 바인더의 개발이 필수적이다. 폴리비닐리덴 플루오라이드(PVDF)는 상용 리튬 이온 전지(LIBs)에서 널리 사용되는 전통적인 바인더로, 우수한 화학적 안정성을 지니고 있다. 그러나 리튬–황 전지에서는 PVDF가 리튬 폴리설파이드와의 상호작용이 본질적으로 미약해 셔틀 효과를 효과적으로 억제하지 못한다. 이를 극복하기 위해, 최근에는 극성 작용기를 도입하여 폴리설파이드와 강한 화학적·물리적 결합을 형성함으로써 그 확산을 억제하는 차세대 바인더 시스템이 주목받고 있다.

본 연구에서는 덱스트린(dextrin)을 붕산(BA)으로 가교시켜 수계 공정이 가능한 3차원 고분자 바인더 네트워크를 설계하였다. BA 농도(0, 0.05, 0.10, 0.15 M)가 리튬–황 전지의 전기화학적 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석한 결과, KB/S 전극과 결합된 dextrin–BA0.10 바인더가 높은 황 적재 조건에서도 뛰어난 사이클 안정성을 보였다. 황 적재량 3.2 $mg \cdot cm^{-2}$에서 0.2 C로 300회 충·방전 후에도 520 $mAh \cdot g^{-1}$의 높은 방전 용량을 유지하였으며, 이는 폴리설파이드를 효과적으로 고정하고 전극 구조를 안정적으로 유지하는 3차원 가교 친수성 네트워크의 상승 효과를 입증한다. 이러한 결과는 비용 효율적이고 환경 친화적인 수용성 3차원 가교 고분자 바인더가 고성능 리튬–황 전지 개발을 위한 유망한 대안이 될 수 있음을 시사한다.

PB-19

PEO 기반 리튬 치환 고분자 고체 전해질의 전기화학적 특성

박주은[1], 박평용[2], 김재광[1*]

[1]청주대학교 에너지융합학과

[2]더블유스코프코리아 기술연구소

이차전지의 전기화학적 성능을 향상시키기 위해, 새로운 리튬 치환 PEO 기반 고분자 고체 전해질이 개발되었다. 본 연구에서는 리튬 수산화 일수화물($LiOH·H_2O$)과 염화리튬(LiCl)을 PEO 고분자 사슬 구조에 도입하여 우수한 리튬 이온 전도성을 갖는 리튬 치환 고분자 고체 전해질을 제작하였다. 제작 과정은 PEO 기반 CD20 및 CH20 분리막을 에탄올, 탈이온수, $LiOH·H_2O$ 또는 LiCl과 혼합한 후, 80℃에서 12시간 이상 교반하는 방식으로 진행되었다. 이후 생성된 필름은 진공 오븐에서 80℃로 추가 12시간 건조하여 완전히 준비하였다. 제작된 리튬 치환 고분자 고체 전해질의 전기화학적 특성은 EIS, LSV 및 고체 NMR과 같은 기법을 사용하여 분석하였다. 실험 결과, 리튬 치환 고분자 고체 전해질은 전기화학적 특성이 크게 향상되었으며, 차세대 이차전지 응용을 위한 유망한 후보로 평가되었다.

PB-20

PAN/Al_2O_3 복합 고체 전해질 고전압 안정성에 대한 Sodium ion battery

김태욱, 김재광

청주대학교

PAN/Al_2O_3 Composite Solid Electrolyte for High-Voltage Stability in Sodium-ion Battery

Tae Wook Kim, Jae -Kwang Kim

Cheong -Ju University

초록

나트륨 이온 배터리의 양극 활물질인 NFM($Na[Ni_{1/3}Fe_{1/3}Mn_{1/3}]O_2$)은 최근 활발히 연구되고 있는 금속 층상 구조 소재이다. 이 소재는 다른 양극재에 비해 우수한 용량과 유지율을 나타내지만, 고전압 조건에서 실험 시 최대 용량에 도달한 이후 수명과 유지율이 급격히 감소하는 경향을 보인다. 이는 고전압에 의해 Na 금속이 과량 석출되어 양극의 전이금속(TM) 층 사이에 포집되고, 방전 과정에서 해당 나트륨이 탈리되면서 NFM의 층상 구조가 붕괴되기 때문이다. 이러한 구조 붕괴는 용량 저하와 수명 단축을 초래한다. 본 연구에서 사용한 복합 고체 전해질은 미세 다공성 구조를 가져 액체 전해질을 효율적으로 함침할 수 있으며, 기존 에틸렌계 분리막보다 열적 안정성이 우수하다. 또한 세라믹 복합 전해질의 상온 이온전도도는 $5.2 \times 10^{-3}\ S \cdot cm^{-1}$로 보고된 바 있다. 본 연구에서는 유기 고분자인 PAN(Polyacrylonitrile)을 DMF 용매에 용해하고 세라믹 분말과 최적 비율로 혼합한 후, 전기방사(Electrospinning) 방법으로 복합 고체 전해질을 제조하였다. 이를 고전압 양극 NFM과 나트륨 금속 음극으로 구성된 전지에 적용하여 전기화학적 성능을 평가하였다. 그 결과, 제조된 복합 고체 전해질은 고전압 조건에서도 높은 용량과 우수한 사이클 안정성을 유지하여, 나트륨 이온 배터리의 고전압 안정성 향상에 적합한 소재임을 확인하였다.

참고문헌

1. Ji Hye Lee et al “A high-stable polyacrylonitrile/ceramic composite membranes for high-voltage lithium-ion batteries”. Materials Chemistry and Physics., 291, 126516 (2022)

PB-21

고성능 리튬–황 전지를 위한 Tri-금속 하이브리드 개질 분리막 설계: 원리 분석과 실용적 응용

정태훈, 김재광[1]*
에너지융합공학과, [1]청주대학교

리튬–황(Li–S) 전지는 이론적 비용량(1675 mAh/g)과 중량당 에너지 밀도(2600 Wh/kg)가 매우 높아 차세대 에너지 저장 시스템의 가장 유망한 후보 중 하나로 부상하고 있으며 전기차와 대규모 전력망 저장과 같은 응용 분야에서 큰 매력을 지닌다. 황은 지각 내 풍부한 매장량, 저비용, 그리고 환경 친화성 덕분에 Li–S 전지의 상업적 잠재력을 더욱 높여준다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 황과 방전 생성물(Li_2S)의 낮은 전기전도도, 충·방전 사이클 동안의 큰 부피 팽창, 제어하기 어려운 리튬 수지상 형성, 그리고 폴리설파이드 셔틀 효과 등 여러 고유한 문제로 인해 실용화는 심각하게 제약을 받고 있다[1]. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 삼금속 금속-유기 골격체로부터 in-situ 유도한 Tri-metal 하이브리드 개질 분리막을 합리적으로 설계하였다. 이 Tri-metal 하이브리드는 다중 금속 중심을 정교하게 통합하여 시너지 촉매 활성을 발휘하며 폴리설파이드의 흡착과 촉매적 전환을 효과적으로 향상시킨다. 하이브리드 구조는 폴리설파이드를 강력하게 화학적으로 고정할 뿐만 아니라 국소 전자 구조 조절과 배위 환경 최적화를 통해 산화환원 반응 속도를 촉진한다. 이러한 복합적인 효과는 전자/이온 전달을 가속화하여 전반적인 반응 속도를 향상시킨다. 그 결과, Super P/S 양극과 Tri-metal 하이브리드 개질 분리막을 조합한 전지는 1 C에서 100 사이클 후에도 660 mAh/g의 높은 비용량을 유지하고 최대 5 C의 고율에서도 우수한 레이트 성능을 발휘하였다. 이러한 결과는 구조적으로 단순한 황 양극과 조합하더라도 Li–S 전지의 핵심 한계를 극복하는 Tri-metal 하이브리드 개질 분리막의 효능을 입증하며 고성능·대규모 확장 가능한 에너지 저장 기술 발전에 대한 잠재력을 보여준다.

참고문헌

1. H. Lin et al.[1], Coupled Ni-Co dual-atom catalyst for guiding sulfur and lithium evolutions in lithium-sulfur batteries, Small 20 (2024).

PB-22

Anode-Free All-Solid-State Batteries with Liquid Metal–LiFSI Core–Shell Nanoparticle Interlayer

Jimin Kwon, Do-Hun Kim and Sangbaek Park*

Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

Abstract: Anode-free sulfide-based all-solid-state batteries (ASSBs) are emerging as next-generation energy storage systems, offering high energy density enabled by their excellent ionic conductivity. However, poor interfacial contact within the porous carbon structure induces non-uniform lithium plating/ stripping, leading to lithium dendrite formation and short-circuiting. In addition, lithium metal deposited on the current collector (CC) during cycling undergoes severe side reactions with the sulfide solid electrolyte, causing rapid performance degradation. To overcome these challenges, we introduce a liquid metal-based core–shell structure as an interlayer between the sulfide electrolyte and the CC. Gallium-based liquid metal nanoparticles, which remain in a liquid state at room temperature, fill the pores of the porous carbon matrix, enhancing interfacial contact and promoting uniform lithium deposition. Furthermore, the LiFSI salt-based shell formed on the liquid metal surface strongly binds to the core and facilitates the formation of a stable LiF-rich solid electrolyte interphase (SEI), effectively suppressing side reactions between the sulfide electrolyte and deposited lithium metal. As a result, anode-free ASSBs with the liquid metal–LiFSI core–shell structure exhibit significantly longer cycle life and higher Coulombic efficiency compared to cells employing conventional additives. This strategy provides a new design direction for utilizing liquid metals and additives in sulfide-based ASSBs and offers valuable insights toward the practical realization of anode-free ASSBs.

Keywords: All solid state batteries; Sulfide Solid Electrolytes; Liquid Metal; Additives; LiF-Based SEI Layer; Anode-Free; Core-Shell Structure.

PB-23

Synergistic Template and Dopant Engineering for Low-Temperature, Pressureless Sintering of $Li_7La_3Zr_2O_{12}$ Electrolyte

Seung Hoon Chun and Sangbaek Park*

Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134 Korea

Garnet-type $Li_7La_3Zr_2O_{12}$ (LLZO) is a promising solid electrolyte for solid-state lithium batteries owing to its high ionic conductivity and compatibility with lithium metal. However, achieving dense microstructures typically requires high-temperature or pressure-assisted sintering. Here, we demonstrate a pressureless sintering strategy at 1000 °C by combining a $La_{2.4}Zr_{1.2}Ta_{0.4}O_7$ (LZT) template with Ga/Si co-addition. The LZT template promotes early cubic-phase crystallization and fine particle formation, while Ga and Si additives generate transient Li–Ga–O and Li–Si–O phases, enabling liquid-phase-assisted pore filling and enhanced grain connectivity. The Li–Si–O phase additionally suppresses Ga segregation, stabilizing the cubic structure. As a result, LLZO with 95.4% relative density and 0.58 mS cm^{-1} ionic conductivity is obtained via conventional sintering. Symmetric cells operate stably for over 1200 h without liquid electrolytes, and full cells retain 99% capacity after 300 cycles. This approach offers a scalable and practical route toward high-performance garnet electrolytes for solid-state batteries.

PB-24

LiF Nano-Island Interfacial Design for Dendrite-Free Li Nanorod Growth in Anode-Free Lithium Batteries

Jiwoo Kim, Mee-Ree Kim, and Sangbaek Park*

Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

Abstract

Anode-free lithium batteries (AFBs), which use a bare current collector without any lithium metal at the anode, are attracting considerable attention as next-generation energy storage systems due to their high energy density and simplified cell configuration. To address the drawbacks via the absence of a lithium source at the anode, such as non-uniform lithium plating and stripping, lithium loss during cycling and rapid capacity degradation due to continuous side reactions with the electrolyte, creating an artificial solid electrolyte interphase(ASEI) on the Cu current collector(CC) prior to lithium plating has been explored using solution-based methods, gas-phase reactions or electrolyte additives. However, these approach produce non-uniform deposition of ASEI layers with uncontrolled thickness, complicating the mechanistic understanding of ASEI effects in AFBs. Herein, we systematically investigate the role of ASEI by depositing LiF thin films with controlled thickness on Cu CCs using a vacuum deposition process. Interestingly, a fully continuous 50-nm LiF layer, owing to its intrinsically low Li^+ conductivity, impedes uniform lithium plating and stripping, whereas a partially covered 1-nm LiF film enables uniform lithium deposition through gaps between LiF domains. The 1-nm LiF-modified surface promotes the formation of nanorod-like lithium morphology, which suppresses dendrite growth and maintains a flatter interface compared to bare Cu CCs, thereby significantly enhancing cycling stability. These findings demonstrate that uniform and precisely controlled ASEI thin films can effectively regulate lithium plating/stripping behavior, offering a viable route to improving the performance and stability of AFBs.

Keywords: Anode-free lithium batteries, surface modification, solid electrolyte interphase, LiF thin film, lithium nanorods

PB-25

Artificial Dual-Layer Coatings for Interface-Stabilized Lithium Metal Batteries

Mee-Ree Kim, Jiwoo Kim, and Sangbaek Park*

Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

Abstract

Lithium metal batteries, which utilize lithium metal as the anode, are gaining significant attention as next-generation energy storage systems due to lithium's high energy density. When lithium metal is used as an anode, dendritic growth can occur, leading to severe safety concerns and performance degradation due to side reactions between lithium and the electrolyte. Creating an artificial solid electrolyte interface (ASEI) on Li metal surface has been attempted to address these issues using solution-based methods, gas-phase reactions, and electrolyte additives. However, challenges such as uneven deposition and lack of precise thickness control persist. In this study, we employ a nanoscale dual-layer approach, consisting of a thin film and a protective coating. When a uniform thin film layer is deposited on lithium, it facilitates uniform lithium plating while suppressing side reactions by preventing direct contact between lithium and the electrolyte. Additionally, the brittleness of the thin film layer is compensated by the elastic and soft organic layer. Although the initial interfacial resistance increases as the thickness of artificial layer inceases, the trend becomes reverse after cycling: the interfacial resistance of Li metal with artifical layer is lower than that of bare Li. It is because lithium is plated uniformly, preventing dendritic growth, with the double-layer structure, whereas Li deposition occurrs in a popcorn-like morphology at specific points in bare Li, serving as nucleation sites for dendrite formation. The inorganic/organic dual layers are expected to complement each other, synergistically suppressing dendrite growth and reducing reactivity. This could significantly enhance lithium metal battery safety and performance. Moreover, the artificial double-layer structure is anticipated to play a key role in protecting the lithium metal anode in next-generation batteries.

Keywords: Lithium metal anode, Artificial solid electrolyte interface, Artificial dual-layer, Interfacial control, Li dendrite.

PB-26

Laser-Irradiated Coffee Waste: Green Anode Materials for Lithium-Ion Batteries

Si Eun Park[1], Tongmei Jing[2], Han Ku Nam[3], Sangbaek Park[1*] and Young-Jin Kim[2*]

[1]Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Republic of Korea

[2]Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 34141, Republic of Korea

[3]Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Republic of Korea

Biomass waste is an abundant, cost-effective, and renewable carbon source with great potential for lithium-ion battery (LIB) electrodes. However, the production of high-performance hard carbon often requires additional pre-/post-treatment steps or fossil-fuel-based synthetic polymer precursors, and offers limited control over microstructure, significantly increasing manufacturing costs. In this study, we propose a simple and rapid laser irradiation process in ambient air to synthesize anode-active materials from spent coffee grounds (SCG). Femtosecond laser irradiation generates localized temperatures exceeding 3000 °C within seconds, inducing carbonization and structural transformation into LIH (laser-induced hard carbon) and LIG (laser-induced graphene). By controlling laser parameters and applying post-treatment, we can precisely control the microporous structure of SCG, thereby optimizing electrochemical properties. As a result, the optimized coffee-waste-derived anode material (CWAM) delivers a reversible capacity of 255.8 mAh g^{-1} at 0.1 C and exhibits notable long-term cycling stability at 1 C. After 250 cycles, it retains 273 mAh g^{-1}, approximately 54% higher than commercial hard carbon. This study demonstrates a sustainable and energy-efficient strategy for upcycling biomass waste, particularly SCG, into high-performance LIB anode materials through laser-induced carbonization.

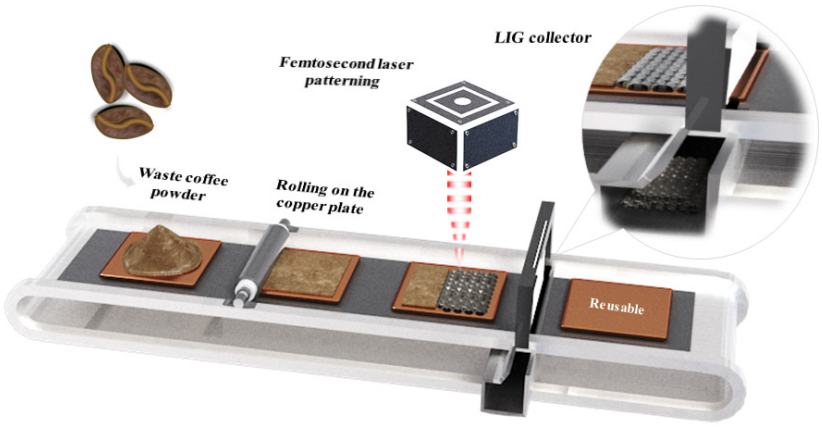


Figure 1. Schematic of the fabrication process for coffee-waste-derived anode materials using a femtosecond laser.

PB-27

Biomimetic PEO/BNNS Hybrid Interface for Stabilizing Li Anodes in High-performance Lithium–Sulfur Batteries

Yechan Kim[1], Hyunsu Yu[1], Dongju Lee[1*]

[1]Department of Urban, Energy, and Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Republic of Korea.

*dongjulee@chungbuk.ac.kr

The lithium-metal anode plays a pivotal role in determining the overall performance and cycling stability of lithium–sulfur (Li–S) batteries. Its exceptionally high theoretical capacity and low electrochemical potential make it ideal for pairing with sulfur cathodes to achieve high-energy-density storage. However, the intrinsic challenges of lithium metal—such as dendritic growth, unstable solid–electrolyte interphase (SEI) formation, severe volume changes, and continuous electrolyte consumption—lead to rapid capacity decay and raise serious safety concerns. Overcoming these limitations through robust interfacial engineering is therefore essential for unlocking the practical potential of Li–S battery systems.

Here, we introduce a biomimetic hybrid protective layer (PBN-Li), composed of polyethylene oxide (PEO) and boron nitride nanosheets (BNNS), enhance the stability of lithium-metal anodes in Li–S batteries. The alternating soft–rigid nacre-like architecture combines BNNS's mechanical strength with PEO's flexibility, ensuring uniform Li^+ flux and strong interfacial contact while mitigating dendrites, lithium loss, and electrolyte degradation. The high Li^+ conductivity of both materials enables efficient ion transport, resulting in over 400 hours of stable cycling at 1 mA cm^{-2} and excellent rate capability up to 5 mA cm^{-2}. Full cells with sulfur cathodes deliver outstanding rate performance and durability, highlighting the strategy's potential for practical high-energy Li–S batteries.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes(COMPA) grant funded by the Korean Government(Ministery of Science and ICT) (RS-2023-00304768) and the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT)(No. RS-2023-00217581).

PB-28

분무 열분해 공정을 이용한 Ni-rich NCA 양극재의 합성 및 전이 금속 도핑 효과

김하경[1], 김태하[2], 박기대[2,3,*], 정상문[1,3,*]
[1]충북대학교 화학공학과
[2]충북대학교 신소재공학과
[3]충북대학교 차세대에너지기술연구소

Synthesis of Ni-Rich NCA Cathode Materials via Spray Pyrolysis and the Effects of Transition Metal Doping

Ha Kyeong Kim[1], Tae Ha Kim[2], Gi Dae Park[2,3,*], Sang Mun Jeong[1,3,*]
[1]Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University
[2]Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University
[3]Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University

니켈 함량이 높은 층상 양극재(Ni-rich layered oxides)는 차세대 고에너지 리튬이온전지의 핵심 소재이지만, 합성 과정에서 발생하는 Li/Ni cation mixing이 전기화학적 성능 저하를 초래한다. 이를 해결하기 위해 전이금속 도핑 방법을 주로 사용하고 있으나, 상업적으로 널리 사용되는 공침법은 pH 범위(11.0 - 11.5)로 Zr, Ti과 같은 금속이온의 도핑이 제한적이다[1]. 본 연구에서는 pH 제약이 없는 분무 열분해법을 활용해 전구체 단계에서 리튬을 동시 투입하고, Zr과 Ti을 단독 또는 co-도핑하여 one-step 공정으로 Ni-rich NCA 양극재를 합성하였다. Li/Ni cation mixing을 줄이고, 구조적 안정성을 향상시키기 위해 Zr과 Ti을 도핑 물질로 선택하였으며 Zr, Ti, Zr-Ti의 총 도핑량은 Ni+Co+Al 기반 금속의 1 mol% 이하로 제한하였다. 순수 Ni-rich NCA 양극재는 0.5 A g^{-1}에서 초기 방전용량은 174 mA h g^{-1}, Zr, Ti를 단독 도핑한 NCA-Zr과 NCA-Ti의 초기 방전용량은 187 mA h g^{-1}, 176 mA h g^{-1}로 나타났다. 반면에 co-도핑 NCA-Zr-Ti는 0.5 A g^{-1}에서 196 mA h g^{-1}로 기타 양극재에 비해 높은 초기 방전용량을 기록하였다. 또한 100 사이클 후 185 mA h g^{-1}(용량 유지율 95 %)을 유지해 NCA(92 %) 및 단일 도핑한 NCA-Zr(92 %), NCA-Ti(93 %)에 비해 우수한 사이클 안정성을 나타내었다. 이는 Zr^{4+}/Ti^{4+} co-도핑이 Li 이온층 내 Ni 이온 침입을 효과적으로 억제해 층상 구조의 붕괴를 방지한 결과이다. 따라서 분무 열분해 공정을 이용한 Zr-Ti의 co-도핑을 통해 공침법의 도핑 한계를 극복하고, 고에너지 밀도와 구조적·전기화학적 안정성을 동시에 확보한 Ni-rich 양극재를 구현할 수 있는 합성 전략을 제시하고자 한다.

사사
본 연구는 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20224000000070)
본 연구는 과학기술정보통신부가 지원하는 한국연구재단(NRF)과 연구성과사업화지원사업단(COMPA)의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No.: RS-2023-00217581, RS-2023-00304768)

참고문헌

1. Entwistle, J. et al. “Co-precipitation synthesis of nickel-rich cathodes for Li-ion batteries,” Energy Rep., 8(S11), 67-73 (2022).

PB-29

탄소 코팅된 Nb MXene 지지 전이금속 셀레나이드 음극재의 합성 및 리튬이온이차전지로의 응용

이응준[1], Erdenebayar Baasanjav[1], 정상문[1,2]*
[1]충북대학교 화학공학과
[2]충북대학교 차세대에너지기술연구소

Synthesis of Carbon-Coated Nb MXene-Supported Transition-Metal Selenide Anodes and Lithium-Ion Battery Applications

Eung Joon Lee[1], Erdenebayar Baasanjav[1], Sang Mun Jeong[1,2]*
[1]Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University
[2]Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University

리튬이온전지(Lithium-ion batteries, LIBs)는 높은 작동 전압, 고에너지 밀도, 긴 수명 덕분에 휴대 전자기기와 전기차의 핵심 전력원으로 자리 잡았으나, 고에너지·고출력 수요 증가로 흑연을 비롯한 기존 탄소계 음극재는 성능 한계에 직면하고 있다[1]. 전이금속 셀레나이드(TMS) 음극재는 높은 이론용량 높은 전기전도도, 0.5 - 1.5 V의 안정적인 작동 전압창, 그리고 빠른 전환-반응 동역학 등으로 차세대 리튬이온이차전지 음극재로 주목받고 있다. 그러나 TMS는 전환 반응시 200 % 이상 부피 팽창으로 인한 구조 붕괴, 급격한 용량 감소, 낮은 쿨롱 효율 등을 유발한다[2].
본 연구에서는 수열합성 공정을 통해 전도성 2D Nb MXene (Nb_2CT_x, Nb-MX) 표면에 다성분 NiCoMn-Se (NCMSe) 나노입자를 고정하고, 외부에 얇은 탄소 코팅을 도입한 하이브리드 Nb-MX-NCMSe@C 음극을 제조하였다. Nb-MX의 높은 전기전도도와 층상 간극은 전극 저항을 낮추고 이온 확산 경로를 확장하였고, 탄소 코팅은 반복적인 충방전 과정에서 발생하는 부피 팽창을 완화하여 전극/전해질 계면에서의 안정성을 향상시키고 초기 쿨롱 효율을 개선하였다. 비교를 위하여 MX가 없고 탄소 코팅하지 않은 NCMSe 음극을 동일 방법으로 제조하였다. 그 결과, 두 전극은 1 A g^{-1}에서 약 600 mAh g^{-1} 정도의 비슷한 초기 방전용량을 나타내었지만, 사이클이 진행됨에 따라 NCMSe 음극은 급격한 용량 감소를 나타내었다. 반면에 Nb-MX-NCMSe@C 음극은 150 사이클 후 621 mAh g^{-1}로 약 94.5 %의 용량 유지율을 달성하였다(NCMSe 음극=68%). 따라서 Nb MXene 지지-탄소 코팅 복합 하이브리드 구조는 TMS 음극재가 전환반응중 겪는 구조 불안정성을 효과적으로 개선하였고, Nb-MX-NCMSe@C는 고용량과 장수명 특성을 동시에 구현할 수 있는 차세대 리튬이온이차전지 음극재로서의 잠재력을 입증하였다.

사사
본 연구는 과학기술정보통신부가 지원하는 한국연구재단(NRF)과 연구성과사업화지원사업단(COMPA)의 지원을 받아 수행된 연구임(No.: RS-2023-00217581, RS-2023-00304768).

참고문헌

1. Hossain, M. H., Chowdhury, M. A., Hossain, N., Islam, M. A., and Mobarak, M. H., “Advances of Lithium-Ion Batteries Anode Materials－A Review,” Chem. Eng. J. Adv., 16, 100569 (2023).
2. Wang, H., Chen, S., Fu, C., Ding, Y., Liu, G., Cao, Y., et al., “Recent Advances in Conversion-Type Electrode Materials for Post Lithium-Ion Batteries,” ACS Mater. Lett., 3(7), 956-9

PB-30

고엔트로피 금속산화물 나노 파이버 합성을 통한 리튬이온 배터리 음극의 전기화학적 성능 특성

명준재[1], 김승리[1], 김은미[2], 정상문[1,2,*]
[1]충북대학교 화학공학과
[2]충북대학교 차세대에너지기술연구소

Electrochemical Performance Characteristics of Lithium-Ion Battery Anodes Based on High-Entropy Metal Oxide Nanofibers

Jun Jae Myeong[1], Seung Ri Kim[1], Eun Mi Kim[2], Sang Mun Jeong[1,2,*]
[1]Chemical Engineering, Chungbuk National University
[2]Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University,

고엔트로피 금속산화물(High-entropy metal oxides, HEOs)은 (i) 다원소(cacktail) 효과에 따른 광범위한 조성 설계 자유도, (ii) 높은 구성 엔트로피가 유도하는 단일상 안정성, (iii) 전이금속 다중 전자 산화-환원 경로로 인한 높은 이론용량 등 장점을 지니고 있어 차세대 리튬이온이차전지 전극 소재로 각광받고 있다[1,2]. 그러나 양이온 무질서에 기인한 Li^+ 확산 저하와 큰 극화(over-polarization), 복잡한 합성 공정은 여전히 대량 적용의 걸림돌로 남아있다[3]. 본 연구에서는 전기방사-소결(one-step electrospinning/sintering) 공정과 Cr 선택 도핑을 결합하여 이러한 한계를 해결하고자 하였다. 파이버 직경이 약 200 nm의 다공성 (NiCoCuFeCr)O HEO 나노파이버는 3D 네트워크가 제공하는 초단 Li^+ 확산 경로로 전이금속 무질서에 따른 확산 지연을 최소화하고, $Cr^{3+} \leftrightarrow Cr^{4+}$ 가역 전자전이를 통한 혼성 전도 채널이 초기 전하 전달 저항을 현저히 감소시켰다[4]. 또한 Cr-O의 높은 결합 에너지(377 kJ mol^{-1})와 Cr-유도 산소 공공은 반복 충방전 과정에서 발생하는 부피변화를 완충해 구조 안정성을 강화하였다. 그 결과, (NiCoCuFeCr)O HEO 나노파이버는 2 A g^{-1}에서 초기방전용량 >1000 mAh g^{-1}, 100사이클 후 용량 유지율 >95%를 달성했으며, 이는 동일 공정으로 합성한 (NiCoCuFeMg)O HEO (~500 mAh g^{-1}, >95%)와 (NiCoCuFeMn)O HEO (~800 mAh g^{-1}, >95%) 대비 현저히 향상된 성능으로 Cr 도핑과 전기방사 공정의 시너지 효과를 입증하였다. 따라서 본 연구는 HEO 고질적 약점 (확산저하·극화현상·공정 복잡성 등)을 소재 설계와 공정 혁신으로 동시에 해소하였으며, (NiCoCuFeCr)O HEO 나노파이버는 고용량·장수명 특성을 모두 충족하는 차세대 리튬이온이차전지 음극으로서 높은 상용화 잠재력을 제시한다.

사사
본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단(NRF)및 연구개발성과사업화촉진원(COMPA)의 지원을 받아 수행되었으며(과제번호: RS-2023-00217581, RS-2023-00304768) 진행되었습니다.

참고문헌

1. *Hong Chen* et al, *"A new spinel high-entropy oxide ($Mg_{0.2}Ti_{0.2}Zn_{0.2}Cu_{0.2}Fe_{0.2)3}O_4$ with fast reaction kinetics and excellent stability as an anode material for lithium ion batteries", RSC Advances, 16, 9736-9744(2020).*
2. *Xuan Liang Wan* et al, *"High-Entropy Metal Oxide $(NiMnCrCoFe)_3O_4$ Anode Materials with Controlled Morphology for High-Performance Lithium-Ion Batteries", Batteries, 9(3), 147 (2023).*
3. *Lishan Dong* et al, *"Porous High-Entropy Oxide Anode Materials for Li-Ion Batteries: Preparation, Characterization, and Applications", Materials, 17(7), 1542 (2024).*
4. *Changqing Jin* et al *"A Novel Spinel High-Entropy Oxide $(Cr_{0.2}Mn_{0.2}Co_{0.2}Ni_{0.2}Zn_{0.2})_3O_4$ as Anode Material for Lithium-Ion Batteries", Inorganics, 12(7), 198 (2024).*

PB-31

다성분계 고엔트로피 산화물 도핑을 통한 Ni-Rich 코발트-프리 리튬이온이차전지용 양극재의 합성 및 성능 최적화

김승리[1], 김은미[2], 정상문[1,2,*]
[1]충북대학교 화학공학과
[2]충북대학교 차세대에너지기술연구소

Synthesis and Performance Optimization of Cobalt-Free Ni-Rich Cathodes for Lithium-Ion Batteries via Compositionally Complex High-Entropy Oxide Doping

Seung Ri Kim[1], Eun Mi Kim[2], Sang Mun Jeong[1,2,*]
[1]Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University
[2]Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University

현재 상용 리튬이차전지의 대표적인 NCM811 양극재는 높은 에너지밀도를 제공하지만, Co에 대한 의존도가 높다. 특히, Co는 최근 원자재 가격 변동성과 공급망 불안정으로 인해 생산 비용 증가 및 소재 안정성에 심각한 제약이 발생하고 있다. 그 대안으로 $LiNiO_2$는 약 274 mAh/g의 높은 이론용량과 Co 미포함이지만 반복된 충방전에 따른 구조 붕괴, 산소 방출, 계면반응 증가와 같은 문제로 상용화가 제한적이다[1]. 이러한 한계를 극복하기 위해 표면 안정화 기술이 필수적이다. 본 연구에서는 다성분 고엔트로피 산화물(High-Entropy Oxide, HEO) 도핑을 통해 코발트-프리 Ni-rich 양극재의 구조 안정성과 전기화학 성능을 향상시키는 공정에 대한 연구를 진행하였다. 수열합성으로 제조한 $Ni(OH)_2$ 1 mol에 대해 Mn, Al, Mg, Fe, Cr 금속 전구체(합계 0.10 mol)와 Li 전구체 1.05 mol을 첨가한 후, 3D 믹서(72 rpm, 2 h)에서 균질 혼합하였다. 혼합 분말은 산소 분위기에서 열처리하여 $Li_{1.05}Ni_{1.0}Mn_{0.02}Al_{0.02}Mg_{0.02}Fe_{0.02}Cr_{0.02}O_2$(LNO-HE) 를 합성하였다. 각각의 도핑 원소의 역할은 다음과 같다: Mn^{4+}는 Li/Ni 캐이션 혼입 억제 및 열적 안정성 향상, Al^{3+}는 층상 격자 고정으로 장수명 특성 개선, Mg^{2+}는 Li 층 간격 완만 확장(pillar 효과)으로 Li^+ 확산 촉진 및 응력 완화, Fe^{3+}는 전자 전도 경로 제공, Cr^{3+}는 강한 TM−O 결합에 따른 산소 방출 억제이다. 합성된 LNO와 LNO-HE 모두 평균 직경 10 μm의 구형 2차 입자를 형성하며, R-3m 공간군의 층상 구조를 나타내었다. 전기화학분석 결과, LNO-HE는 0.3 C(1 C = 200 mA g^{-1}) 조건에서 초기 방전 용량 183.0 mAh g^{-1}을 기록하였고, 100사이클 후에도 약 80 %의 용량을 유지하였다. 이는 도핑하지 않은 LNO(초기 188.0 mAh g^{-1}, 100사이클 유지율 약 50 %) 대비 우수한 사이클 수명과 가역성을 입증하였다. 본 결과는 고가·유독성 Co를 배제하면서도 고니켈계 양극재의 성능을 향상시킬 수 있는 HEO 도핑 전략의 실효성을 입증하였으며, HEO 합성 균일성 및 대량 공정 최적화를 통해 비용 효율적이며 지속 가능한 차세대 리튬이온배터리 양극재 개발이 가능함을 시사한다.

사사

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. RS-2023-00217581)
이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 과학기술일자리진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임. (2023년도 학연협력플랫폼구축 시범사업, 과제번호 RS-2023-00304768)

참고문헌

1. *Wu, Z., et al.“Gradient Doping of Mg and Al to Stabilize Ni-Rich Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries.” Nano Energy, 119, 109726 (2024).*

PB-32

Spray Pyrolysis-Based Pre-Lithiation Strategy with Lithium Flux for Co-Free Single-Crystal Ni-Rich Cathodes

Seung Woo Chun[1], Jae Hyeon Choi[2], Gi Dae Park[2,3*] and Sang Mun Jeong [1,3*]

[1]*Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University*

[2]*Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University*

[3]*Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University*

Abstract

Ni-rich layered oxide cathodes are promising candidates for next-generation high-energy-density lithium-ion batteries due to their high specific capacity and favorable rate capability. Conventional co-precipitation for precursor synthesis often suffers from long reaction times and compositional inhomogeneity, whereas spray pyrolysis enables rapid production of transition-metal-homogeneous precursors within seconds. However, uniform lithium distribution remains difficult when lithium salts are added only during high-temperature calcination.[1]

To address this, a modified spray pyrolysis method was developed by introducing a lithium source directly into the precursor solution. Lithium chloride (LiCl) serves as a flux to promote nucleation, enhance face-oriented crystal growth, reduce interfacial energy, and enable single-crystal morphology formation. The resulting material exhibited a uniform single-crystal structure with homogeneous elemental distribution, confirmed by FE-SEM, EDS, and EBSD analyses, indicating improved crystallinity and structural integrity through the proposed synthesis strategy.

Acknowledgements

This work was supported by the Human Resources Development of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korean government (No. 20224000000070), the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) (No. RS-2023-00217581).

References.

1. Shi-jie Lu. Et al, “Single-Crystal Nickel-Based Cathodes: Fundamentals and Recent Advances”, Electrochemical Energy, Springer,5,15(2022).

PB-33

Enhanced Polysulfide Conversion in Lithium–Sulfur Batteries Using a V_2CT_x MXene/Porous Carbon Nanofiber Interlayer

Hyunsu Yu[1], Yechan Kim[1], Dongju Lee[1*]

[1]Department of Urban, Energy, and Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Republic of Korea.

*dongjulee@chungbuk.ac.kr

Lithium–sulfur batteries (LSBs) have attracted considerable attention due to their high theoretical energy density; however, their practical application is hindered by the polysulfide shuttle effect and sluggish sulfur redox kinetics. Interlayers between the cathode and separator have emerged as an effective strategy to suppress shuttling and enhance LiPS conversion by serving as redox-active interfaces. However, conventional carbon-based interlayers exhibit weak interactions with polar LiPSs and lithiophobic surfaces, leading to inadequate LiPS retention and poor long-term stability.

In this study, we design a multifunctional freestanding interlayer composed of V_2CT_x MXene and porous carbon nanofibers (PCNFs) to address these challenges. The V_2CT_x–PCNF heterostructure enhances interfacial electron mobility, improving conductivity and charge transport, while the V_2CT_x component exhibits superior catalytic activity for sulfur reduction, enabling high reversibility in both liquid–solid and solid–solid conversions. Theoretical simulations elucidate the underlying interfacial and catalytic mechanisms. As a result, LSBs incorporating this interlayer deliver a high initial discharge capacity of 1319.4 mAh g^{-1} at 0.1 C, retain 707.5 mAh g^{-1} at 5 C, and exhibit significantly improved cycling stability, providing a promising strategy for next-generation energy storage systems.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT)(No. RS-2023-00217581). This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes(COMPA) grant funded by the Korean Government(Ministery of Science and ICT). (RS-2023-00304768)

PB-34

분무 건조 공정 기반 이성분계 전이금속 산화물/질소-도핑 탄소 복합 마이크로스피어의 합성 및 리튬 이차전지 음극 성능 평가

곽영신, 조중상*
충북대학교 공업화학과

Synthesis of Transition Metal Oxide/N-doped Carbon Composite Microspheres Based on Spray Drying Process and Evaluation of Anodes for Lithium-Ion Battery

Young Shin Gwak, Jung Sang Cho*
Department of Engineering Chemistry, Chungbuk National University

최근 에너지 저장 장치에 대한 수요 증가로, 고에너지 밀도와 고출력, 긴 수명을 특징으로 하는 리튬 이차전지의 활용이 확대되고 있다. 기존에 널리 사용되는 음극 소재인 흑연은 낮은 이론용량(372 mAh/g)과 에너지 밀도를 한계점으로 가지며, 이에 따라 흑연 대비 이론 용량이 높은 전이 금속 산화물이 차세대 음극 소재로 주목받고 있다. 하지만 전이 금속 산화물은 충·방전 과정에서 발생하는 큰 부피 변화와 구조적 불안정성, 낮은 전기전도도로 인해 용량 감소 및 낮은 율속 특성을 단점으로 한다. 본 연구에서는 금속-유기 골격체를 기반으로 한 이성분계 전이 금속 산화물과 질소-도핑 탄소 복합 마이크로스피어를 분무건조 및 후열처리 공정을 통해 합성하여 리튬 이차전지 음극 소재로의 특성 평가를 진행하였다. 그 결과, 0.5 A/g의 전류밀도에서 200 cycle 후 750 mAh/g의 높은 방전 용량을 나타내었고, 5.0 A/g의 고 전류밀도 조건에서도 270 mAh/g의 방전 용량을 유지하였다. 이성분계 전이 금속 산화물 내 이종 금속 종은 리튬과의 서로 다른 반응 전압으로 인하여 충·방전 시 발생하는 부피 팽창을 서로 억제하고, 금속-유기 골격체에서 유래한 질소-도핑 탄소는 우수한 전기전도도와 구조적 안정성을 제공하여 전지의 율속 특성과 수명 특성을 개선하였다.

PB-35

Ethylene-based triamine/전이 금속 산화물 complex 복합 중공형 N-도핑 탄소 마이크로스피어의 단일 분무 열분해 기반 합성과 리튬 이차전지 음극 성능 연구

김진웅, 조중상*
충북대학교 공업화학과

리튬 이온 전지(LIB)에서 널리 사용되는 흑연 음극은 안정적인 장기 사이클 성능을 제공하지만, 372 mAh/g의 낮은 이론 용량으로 인해 에너지 밀도 향상에 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로, 전이 금속 산화물은 높은 이론 용량을 지녀 차세대 고용량 음극 소재로 각광받고 있다. 그러나 낮은 이온 전도도 및 전기 전도도로 인하여 실용화에 어려움이 존재한다. 본 연구에서는 단일 분무 열분해 공정을 이용하여 ethylene-based triamine/전이 금속 산화물 복합체와 N-도핑된 탄소 매트릭스로 이루어진 중공 마이크로스피어를 제조하는 새로운 합성 전략을 제안한다. Ethylene-based triamine은 금속 전구체와의 선택적 결합을 통해 전이 금속 산화물 상의 제어된 형성을 유도하며, 표면 흡착된 amine 계열 작용기는 리튬 이온의 확산 경로를 확보한다. 동시에, 분무 열분해 과정에서 형성된 중공 구조는 전해질의 침투를 촉진하고, 내부 나노구조에서의 산화·환원 반응 속도를 향상시킨다. 또한 N-도핑된 탄소 프레임워크는 충·방전 과정에서 발생하는 부피 팽창을 완화하여 전극의 구조적 안정성을 강화한다. 이러한 합성 방법으로 제작된 ethylene-based triamine/전이 금속 산화물 복합 중공형 N-도핑 탄소 복합체는 1.0 A/g에서 600 사이클 후에도 471 mAh/g의 방전 용량을 유지하였으며, 2.0 A/g의 고전류 밀도에서도 우수한 속도 특성을 나타냈다. 종합적으로, 본 연구는 고성능 차세대 에너지 저장 분야뿐만 아니라 촉매 및 반도체 등 다양한 소재 개발을 위한 실용적이고 확장 가능한 공정 방안을 제시한다.

참고문헌

1. Lee et al,[1] “Coral-like porous microspheres comprising polydopamine-derived N-doped C-coated MoSe2 nanosheets composited with graphitic carbon as anodes for high-rate sodium- and potassium-ion batteries” Chem. Eng. Jou. 456(0) 141118 (2023)

2. G. Sanyal et al, “2D/2D Molybdenum Sulfo Selenides/Black Phosphorus Heterostructures for Supercapacitors and Light-Driven Hydrogen Generation Applications" Advanced Sustainable Systems 8, 2300572 (2024)

PB-36

Stabilizing Zinc Metal Anodes with Surface Engineered MXene for Aqueous Zinc Ion Batteries

Minseo Kim[1], Ingyu Choi[1], Dongju Lee[1*]

[1]Department of Urban, Energy, and Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Republic of Korea.

*dongjulee@chungbuk.ac.kr

MXene, a class of two-dimensional transition metal carbides and nitrides, has emerged as a versatile material for electrochemical interfaces owing to its high conductivity, tunable surface chemistry, and strong mechanical integrity. Its layered architecture and abundant functional groups enable precise regulation of ion transport, suppression of dendrite formation, and mitigation of side reactions. These attributes make MXene particularly promising for stabilizing metal anodes, where uncontrolled deposition and interfacial degradation remain critical challenges.

In this work, we employed surface engineered MXene nanosheets as a functional interfacial layer for Zn metal anodes in aqueous zinc-ion batteries (ZIBs). The coated MXene layers act as a physical and chemical barrier, effectively suppressing corrosion and hydrogen evolution reactions (HER) while promoting uniform Zn deposition. Zincophilic functional groups on modified MXene surface further enhances Zn^{2+} transport kinetics through favorable ionic interactions, contributing to improved electrochemical performance. As a result, the modified Zn anodes exhibit significantly enhanced cycling stability, maintaining stable operation over 1,000 hours at a current density of 1 mA cm^{-2} with an areal capacity of 1 mAh cm^{-2}. These findings underscore the potential of MXene-based surface engineering as a robust approach to achieving durable Zn anodes and advancing the practical deployment of aqueous ZIBs.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT)(No. RS-2023-00217581) and the National Research Council of Science & Technology(NST) grant by the Korea government (MSIT) (No. CAP 22074-000).

PB-37

Stable Lithium Metal Batteries Enabled by 3D Porous Yolk–Shell Carbon Integrated with Multi-Anion Metal Compound ZnSSe Nanocrystals

Jin Won Yang[1], Hyo Yeong Seo[2], Seung Yup Baek[1] and Gi Dae Park[1,3*]

[1]Department of Advanced Materials Engineering. Chungbuk National University, Chungbuk 28644. Republic of Korea

[2]Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Anam-Dong, Seongbuk-Gu, Seoul 136-713, Republic of Korea

[3]Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-gu, Cheongju 28644, Republic of Korea

The rapid growth in demand for electric vehicles and portable electronic devices has driven the need for high–energy-density batteries. Lithium metal, with its high theoretical capacity (3860 mA h g^{-1}) and low reduction potential (−3.04 V vs. standard hydrogen electrode), enables the development of batteries with significantly higher energy densities compared to conventional graphite anodes. However, issues such as Li dendrite formation and severe volume expansion during Li plating/stripping can cause internal short circuits and explosion risks. To address these challenges, research on three-dimensional (3D) host materials has attracted considerable attention.

In this study, porous conductive carbon microspheres were composited with ZnSSe nanocrystals and employed as 3D lithium metal host materials. The porous carbon yolk–shell CNT microspheres possess internal voids that facilitate smooth Li plating/stripping while mitigating volume expansion during cycling. ZnSSe undergoes alloying and conversion reactions during cycling to form lithiophilic ZnLi, Li_2S, and Li_2Se phases. The Li_2S and Li_2Se phases form heterogeneous interfaces that enhance the electrochemical reaction kinetics while mitigating volume changes, thereby delivering higher Coulombic efficiency and cycling stability. Consequently, ZnSSe@PC-YS-CNT microspheres exhibited stable Li plating/stripping behavior, and its rate capability and cycling stability were confirmed through various analyses and electrochemical tests.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) and the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) funded by the Ministry of Science and ICT (Grant No.: RS-2023-00217581,RS-2023-00304768).

PB-38

폴리도파민 유래 질소-도핑 탄소 코팅 이원 금속 셀레나이드/그래핀 복합 마이크로스피어의 합성 및 소듐이온배터리 음극소재로의 적용

유동국[1], 조중상[1]*
[1]충북대학교 공업화학과

에너지 저장 장치의 전반적인 성능 향상을 위해서는 전극 소재의 구조적 안정성과 전기전도성 확보가 필수적이다. 특히 차세대 이차전지 시스템인 소듐이온배터리는 자원적 풍부함과 비용 경쟁력에도 불구하고, 소듐 이온의 큰 반경으로 인해 전극 반응 속도가 저하되고 반복 충·방전 과정에서 부피 팽창과 구조 붕괴가 발생하는 한계를 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 높은 전도성을 제공하면서도 장기 구동 시 구조적 변화를 억제할 수 있는 정교한 나노구조 설계 전략이 요구된다.

본 연구에서는 간단한 스프레이 건조 공정과 셀렌늄화, 그리고 표면 탄소 코팅 과정을 통해 고성능 소듐이온배터리 음극용 3차원 복합 마이크로스피어를 제조하는 나노구조체 설계 전략을 제시한다. 나노구조체는 환원 그래핀 산화물(rGO) 골격에 균일 분산된 이원 금속 셀레나이드($Co_{0.85}Se$와 $MoSe_2$) 나노결정을 포함하며, 금속-유기 골격체 내 Co 종의 흑연화로 인한 유기리간드 유래 질소-도핑 흑연질 탄소(NGC)와 폴리도파민 유래 질소-도핑 탄소(PDA-NC)층으로 둘러싸여 있다. rGO 골격은 주요 전자 전달 경로를 제공하고, NGC는 나노결정과 rGO 매트릭스 사이에서 2차 전자 전달 경로를 형성하여 전하 이동도를 크게 향상시킨다. 이원 금속 셀레나이드는 $Co_{0.85}Se$와 $MoSe_2$ 간 시너지 효과를 통해 향상된 산화환원 반응 속도와 우수한 전기화학적 성능을 구현하며, 최종 PDA-NC층은 구조 안정성과 전극 내 전자 전도성을 향상시킨다. 이 최적화된 음극은 소듐이온배터리에서 1.0 A g^{-1}의 전류밀도에서 300회 이상의 사이클 안정성을 유지하며, 7.0 A g^{-1} 까지의 높은 율속 특성, 그리고 약 10^{-13} cm^2 s^{-1} 의 향상된 Na^+ 확산 계수를 나타내었다.

PB-39

Enhancing Zinc Anode Stability via Surface-Modified BN Nanosheet Protective Coatings in Aqueous Zinc-Ion Batteries

Ingyu Choi[1], Seojin Woo[1], Minseo Kim[1], Dongju Lee[1*]

[1]Department of Urban, Energy, and Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Republic of Korea.

*dongjulee@chungbuk.ac.kr

Aqueous zinc-ion batteries (ZIBs) have emerged as promising candidates for next-generation energy storage owing to their inherent safety, low cost, and high theoretical capacity. However, the practical utilization of zinc anodes is impeded by dendritic growth, hydrogen evolution reactions (HER), and surface passivation, which collectively degrade cycling stability. Strategies such as electrode architecture optimization, interfacial engineering, and electrolyte modification have been investigated to mitigate these issues. Two-dimensional (2D) nanomaterials offer large surface area and tunable chemistry, enabling controlled Zn electroplating, dendrite suppression, and fewer side reactions. Additionally, 2D materials can create nanofluidic pathways with well-defined channels to guide Zn-ion flux for uniform deposition.

In this work, we introduce surface-engineered boron nitride nanosheets (BNNS) as a protective layer for Zn anodes. The tailored BNNS layer served as a physical barrier, mitigating corrosion and HER while facilitating uniform Zn-ion transport. Furthermore, the surface modification enhanced Zn^{2+} migration kinetics through strong ionic interactions. As a result, the modified anodes achieved a prolonged cycling lifespan of over 1,200 hours at a current density of 1 mA cm^{-2} with an areal capacity of 1 mAh cm^{-2}. These findings demonstrate the potential of surface engineered 2D protective layers for realizing durable Zn anodes in aqueous ZIBs.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT)(No. RS-2023-00217581) and the National Research Council of Science & Technology(NST) grant by the Korea government (MSIT) (No. CAP 22074-000).

PB-40

전기차 배터리팩 케이스의 압축 및 진동 해석을 통한 구조 신뢰성 평가

김현수[1], 조민구[1], 강성욱[2], 이창연[3], 김재웅[4]
한국생산기술연구원 극한공정제어그룹[1],
창원대학교 스마트오션 모빌리티 공학과[2],
대주코레스(주) R&D 센터[3],
한국생산기술연구원 모적기반 모빌리티 그룹[4]

Structural Reliability Assessment of Electric Vehicle Battery Pack Cases through Compression and Vibration Analyses

Hyun Soo Kim[1], Mingoo Cho,[1], Sung Wook Kang[2], Chang Yeon Lee[3], Jaewoong Kim[4]
Extreme Process Control Group, Korea Institute of Industrial Technology[1],
Department of Smart Ocean Mobility Engineering, Changwon National University[2],
R&D Center, Daejoo kores Company[3],
Purpose Built Mobility Group, Korea Institute of Industrial Technology[4]

본 연구는 전기차 배터리팩 케이스(Battery Pack Case, BPC)의 구조적 신뢰성을 확보하고 장기 내구성을 향상시키기 위한 핵심 기계 해석으로서 압축 해석과 진동 해석을 수행하였다. BPC는 전기차 주행 과정에서 반복적인 동적 하중, 외부 충격, 노면 기인 진동, 온도 변화 등 다양한 환경 하중에 지속적으로 노출되며, 이러한 물리적·열적 환경은 배터리 시스템의 구조 안정성과 수명에 직접적으로 영향을 미친다. 특히, 배터리 모듈 및 셀을 보호하는 케이스 구조물의 성능 저하는 전기차 화재·폭발과 같은 심각한 안전사고로 이어질 수 있으므로, 이에 대한 기계적 내구성 평가와 설계 검증은 필수적이다.
본 연구에서는 국제 안전 규격(IEC 62660-2, UL 2596, ISO 12405-3, UN R100 등)에 근거하여, BPC에 대해 X·Y축 방향의 정적 압축 해석과 X·Y·Z축 방향의 랜덤 진동 해석을 수행하였다. 압축 해석의 경우, 시험 조건은 1 mm/s의 하중 속도로 최대 200 kN까지 압축력을 인가하였으며, 해석 결과 모든 하중 방향에서 발생한 최대 응력은 소재 항복강도 이하였고, 변형량은 1 mm 미만으로 나타나 충분한 구조 안정성을 확보함을 확인하였다. 이를 통해 BPC가 장기간 운행 중 발생 가능한 국부 압축 하중에도 구조적 변형이나 손상 없이 안정적으로 기능할 수 있음을 입증하였다.
진동 해석에서는 모달 해석을 먼저 수행하여 총 6개의 주요 고유진동수를 도출하였다. 이후 실제 차량 운행 환경을 모사하기 위해, 현장 계측 데이터를 기반으로 작성된 파워 스펙트럴 밀도(Power Spectral Density, PSD) 데이터를 각 축(X, Y, Z)에 적용하였다. 해석 결과, X·Y축 방향에서는 변형 및 응력 값이 미미하였으나, Z축 방향에서 상대적으로 큰 응력이 발생하였다. 그러나 해당 응력 수준은 설계 허용치를 충분히 하회하여 구조적 문제를 유발하지 않는 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 BPC가 랜덤 진동 환경에서도 피로 손상 가능성이 낮으며, 장기간 사용 시에도 안정적인 구조 성능을 유지할 수 있음을 시사한다.
결론적으로, 본 연구에서 수행한 압축 및 진동 해석은 전기차 배터리팩의 기계적 내구성 향상과 직결되는 설계 검증 자료를 제공하며, 이를 통해 화재·폭발 위험 저감, 장기적 신뢰성 확보, 그리고 친환경 운송수단의 안전성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 본 해석 결과는 향후 배터리팩 경량화 설계, 진동 절연 구조 최적화, 모듈 통합형 케이스 개발 등의 연구에 기초 자료로 활용될 수 있다.

참고문헌

1. Lim, H. S., and Sim, P. R., "A Study on Vibration Fatigue Analysis of Electric Vehicle Battery Cover using PSD," Proceedings of the KSAE Annual Conference, pp. — (2018).

2. Lim, J. Y., Choi, Y. H., and Han, Y. H., "Development of Simulation Platform for Crashworthiness and Fire Safety under Dynamic Loading," Proceedings of the KSAE Spring Conference, pp. — (2023).

3. Kim, M., Choi, W., Jeong, K., and Kim, C., "A Study on Design Process Using CAE of Battery Case," Transactions of KSAE, Vol. 31, No. 2, pp. 89-97 (2023).

PB-41

외기 온도 변화에 따른 차량용 PVT 시스템의 열전달 해석 평가

하을용[1], 김영현[1], 정현정[1], 김재웅[1,*]
한국생산기술연구원[1]

IHeat transfer analysis and evaluation of a vehicle PVT system according to changes in ambient temperature

Eulyong Ha[1], Younghyun Kim[1], Hyunjeong Jeong[1], Jaewoong Kim[1,*],
Korea Institute of Industrial Tehcnology[1]

초록

전 세계적인 환경 규제에 따라 다양한 산업군에서 친환경 연료 및 에너지 사용을 통한 온실가스 배출량 감소를 목표로 다양한 연구가 이루어지고 있다. 특히 자동차 산업에서는 각종 이차전지 및 수소를 활용한 연구 개발이 이루어지고 있으며, 차량 상부에 태양광 패널을 설치함으로써 일정 부분의 자체적인 배터리 충전이 가능하게 만드는 PVT 시스템에 대한 연구 개발 또한 이루어지고 있다. 본 과제에서는 차량 상부에 설치되는 PVT 시스템 중 태양광 패널, 방열판, 열회수 유로등으로 이루어진 일체형 시스템을 모델링한 이후 사계절의 온도 편차가 큰 국내 상황을 고려하여 극한 조건에 해당하는 외기 온도를 적용 후 온도에 따른 유한요소 기반의 열전달 해석 이후 그 결과를 분석하였다.

PVT 구성 요소

(Unit : mm)

Component	Layer	L	D	H
Solar Panel	ETFE	1,680	2,520	1
	EVA_TOP	1,680	2,520	0.5
	CELL	1,680	2,520	0.5
	EVA_BTM	1,680	2,520	0.5
	PP	1,680	2,520	0.5
Heatsink		1,680	2,520	2
Thermal Collector		1,680	2,520	40
Car roof		1,680	2,520	0.7

Component	Material	Density (kg/㎥)	Thermal Conductivity (W/m·K)	Specific Heat (J/kg·K)
Solar Panel	ETFE	1,800	0.24	1,000
	EVA	950	0.31	2,090
	PP	910	0.16	1,764
	Cell	2,329	148.00	700
Heatsink	Cu+Cr	8,932	364.08	386
Thermal Collector	Al	2,700	160.00	936
Car roof	Mild Steel	7,880	75.63	449

해석 방법

열전달 해석을 위해 차량은 정지된 상태로 가정하여 외부 표면의 대류계수를 선정하였고, 또한 상온, 고온, 저온에 해당하는 외기 온도를 각각 25℃, 40℃, -20℃로 설정하였다. 이후 각각의 조건에서 태양광 패널 표면에 태양으로부터 동일한 열에너지가 전달되도록 경계조건을 가정하고, 1초 단위로 최대 1시간 동안 열에너지가 입열되는 상황에 대해 온도 분포등을 검토하였다.

PB-42

리튬-황전지용 계층적 기공 구조를 갖는 Co-NC/CNT 복합체의 전기화학적 특성

신성민[1,2], 김수연[1,2], 정휘돈[1,2], 한수진[1,2], 한승엽[1,2], 강윤찬[1], 김정현[2*]
[1]고려대학교 신소재공학부, [2]한국세라믹기술원

리튬-황(Li-S) 전지는 높은 에너지 밀도와 저렴한 활성 물질 비용으로 차세대 에너지 저장 시스템으로서 많은 주목을 받고 있다 [1-3]. 그러나 용해성 리튬 폴리설파이드(LiPSs)의 셔틀 효과, 느린 산화·환원 반응 속도, 황의 낮은 전기 전도성, 그리고 높은 황 적재량 확보의 어려움과 같은 여러 핵심적인 문제가 상용화를 가로막고 있다 [1-3]. 이러한 문제를 해결하기 위해, 우리는 질소 도핑된 탄소(NC)와 탄소 나노튜브(CNT) 복합체 내에 코발트 나노입자를 균일하게 분산시킨 Co-NC/CNT 황 호스트를 합성하였다. 합성은 초음파 분무 열분해와 pseudomorphic replication 공정을 통해 수행되었다. ZIF 유래 NC에서 기인한 micropore과 CNT에 의해 형성된 meso/macropore으로 구성된 계층적 다공성 구조는 높은 황 수용 능력과 우수한 전기 전도성을 제공한다. 또한, 코발트 촉매는 LiPS의 전환 반응을 촉진하고 Li_2S의 핵생성을 용이하게 한다. 더불어, 극성 NC, 풍부한 활성 사이트를 가진 CNT, 그리고 코발트 촉매는 모두 강력한 LiPSs 흡착 능력을 나타낸다. Co-NC/CNT 호스트의 구조적·촉매적 특성은 Li-S 전지 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였으며, 이러한 구성 요소들의 시너지 효과가 높은 용량, 뛰어난 속도 성능, 그리고 높은 황 적재 조건에서도 우수한 장기 사이클 안정성을 구현함을 입증하였다.

참고문헌

1. Gong, Y., Li, J., Yang, K., Li, S., Xu, M., Zhang, G., Shi, Y., Cai, Q., Li, H., and Zhao, Y., "Towards Practical Application of Li–S Battery with High Sulfur Loading and Lean Electrolyte: Will Carbon-Based Hosts Win This Race?," *Nano-Micro Lett.*, **15**, 149, 2106004 (2023).

2. Huang, Y., Lin, L., Zhang, C., Liu, L., Li, Y., Qiao, Z., Lin, J., Wei, Q., Wang, L., Xie, Q., and Peng, D. -L., "Recent Advances and Strategies toward Polysulfides Shuttle Inhibition for High-Performance Li–S Batteries," *Adv. Sci.*, **9**(12), 2106004 (2022).

3. Zhou, L., Danilov, D. L., Eichel, R.-A., and Notten, P. H. L., "Host Materials Anchoring Polysulfides in Li–S Batteries Reviewed," *Adv. Energy. Mater.*, **11**(15), 2001304 (2021).

※본 연구는 한국산업통상자원부의 지원을 받아 한국세라믹기술원 내역사업으로 수행되었습니다. (PROJ25016-0-01)

PB-43

Cathode Design for High-Performance All-Solid-State Batteries with High Active Material Loading

Do Woong Yoon[1], Jin-Sung Park[2], Jin Woong Lee[1,3], Yun Chan Kang[3,*], Dae Soo Jung[1,*]

[1]Energy Storage Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology
Jinju, 52851, Republic of Korea

[2]Department of Materials Science and Engineering, Ajou University
Suwon, 16499, Republic of Korea

[3]Department of Materials Science and Engineering, Korea University
Seoul, 02841, Republic of Korea

All-solid-state batteries (ASSBs) are regarded as promising next-generation energy storage systems owing to their superior safety and potential for high energy density. However, under high mass-loading conditions, the practical energy density of ASSB cathodes is often limited by the reduced utilization of active materials (AMs). In particular, when the content of solid electrolyte (SE) in the cathode is low, insufficient AM–SE interfacial contact and inhomogeneous phase distribution lead to increased tortuosity, restricted lithium-ion/electron transport pathways, and deteriorated electrochemical performance.

In this study, we achieved a high volumetric energy density of 1258 Wh L^{-1} at an AM content of 85 wt% by integrating AM@SE core–shell composite particles—featuring uniform and thin SE coating layers produced via a mechano-fusion process—with fine SE fillers. The conformal thin SE coating provides continuous and efficient ionic conduction pathways without compromising electronic conductivity, while the fine SE particles serve as fillers to minimize packing porosity within the cathode bulk and at the cathode–separator interface.

The partially covered “glitter-cake” cathode architecture proposed here offers a practical design guideline for ASSB electrode engineering, enabling the simultaneous realization of high electrode density, high capacity, and high overall energy density. This approach provides a viable pathway toward the development of high-performance, high-energy-density ASSBs through integrated structural and interfacial optimization.

This work was supported by the Technology Innovation Program (RS-2024-00418815) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea) & This work was supported by the Technology Innovation Program (20026752) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea)

PB-44

폐자원 업사이클링을 통한 리튬이온 배터리용 차세대 음극 소재 개발

이 인욱 [1,2], 김 가은 [1], 이 종덕 [1,2], 강 윤찬 [2,*], 정 대수 [1,*]

[1]Energy Storage Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology

Jinju, 52851, Republic of Korea

[2]Department of Materials Science and Engineering, Korea University

Seoul, 02841, Republic of Korea

최근 온실가스(GHG) 배출로 인한 지구 온난화와 기후변화가 심화됨에 따라, 이를 완화하기 위한 핵심 전략으로 넷 제로(net - zero) 탄소 배출 달성이 전 세계적으로 중요한 과제로 부상하고 있다. 특히 수송 부문은 전 세계 CO_2 배출량의 상당 비중을 차지하며, 기존 내연기관 차량에서 전기차(EV)로의 전환을 통한 배출 저감 노력이 가속화되고 있다. 이러한 변화와 함께 리튬이온전지(LIB) 수요는 급격히 증가하고 있으나, 배터리 제조 전 과정(특히 원료 채굴 및 정제 단계)에서 발생하는 막대한 CO_2 배출은 진정한 의미의 탄소중립 실현에 걸림돌이 되고 있다. 이에 따라, 재생자원 및 산업 부산물을 고부가가치 소재로 전환하는 업사이클링 기반의 산업 순환경제(Industrial Circular Economy) 구축 전략이 환경 · 경제적 측면 모두에서 중요한 대안으로 부각되고 있다.

본 연구에서는 반도체 산업에서 발생하는 등방흑연(isotropic graphite) 스크랩과 태양전지 산업에서 발생하는 실리콘 스크랩을 활용하여, 이차전지 산업의 핵심 소재인 고용량 음극 소재를 개발함으로써 산업 간 자원 순환을 실현하고, 탄소중립 목표 달성과 LIB 수요 증가 대응을 동시에 달성할 수 있는 방안을 제시한다. 스크랩 흑연(S - Gr)은 피치 유래 탄소와 함께 메카노퓨전(Mechano - fusion, M.F.) 공정을 통해 복합화되어, 높은 밀도의 낮은 비표면적을 가지는 흑연 (M - Gr)을 형성하였으며, 이는 상용 흑연(C - Gr)과 유사한 전기화학적 성능을 구현하였다. 나아가, S - Gr 과 실리콘 스크랩을 복합화하여 고에너지밀도 LIB 용 음극 복합체(U - Gr@Si@C) 를 제조하였다. Flake 구조의 S - Gr 은 복합체 내에서 기계적 골격(skeleton) 역할을 수행하여 Si 의 부피 팽창을 효과적으로 억제하였고, 균일하게 분산된 Si 입자는 전극 전반에서 균질한 분포를 유지하여 장기 사이클 안정성과 우수한 전기화학 특성을 확보하였다.

본 연구에서 개발한 M - Gr 과 U - Gr@Si@C 는 반도체 · 태양전지 · 이차전지 산업을 연결하는 3 대 산업 순환경제 모델의 핵심 소재로서, 전기차용 리튬이온전지의 환경 발자국(Carbon Footprint)을 저감하면서도 고성능 구현이 가능한 지속가능한 차세대 음극 소재 개발 전략을 제시한다.

본 연구는 산업통상자원부 (MOTIE)의 연구비 지원에 의한 연구임(RS - 2024 - 00432013) & 본 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)의 연구비 지원에 의한 연구임(20026752)

PB-45

High-Performance Lithium-Ion Battery Anodes Based on Novel Structured Silicon–Graphite Composites with Two-Dimensional Graphite Framework

Ga Eun Kim[1], Inuk Lee[1,2], Yun Chan Kang[2,*], Dae Soo Jung[1,*]

[1]Energy Storage Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology
Jinju, 52851, Republic of Korea

[2]Department of Materials Science and Engineering, Korea University
Seoul, 02841, Republic of Korea

본 연구에서는 높은 이론 용량을 가지지만 충·방전 시 심각한 부피 팽창으로 인해 전기화학적 안정성이 저하되는 실리콘(Si) 음극의 한계를 극복하기 위해, 2차원 구조의 흑연과 결합된 신규 구조 실리콘 기반 복합체를 설계·제조하였다. 제안된 복합체는 나노구조 실리콘 입자를 2차원 흑연 기판과 효과적으로 결합시켜, 부피 변화 완화와 전극의 전기적 전도성 향상을 동시에 달성하였다.

합성된 복합체의 미세구조 분석(SEM, TEM) 결과, 실리콘 입자는 흑연 층 사이와 표면에 균일하게 분산되어 기계적 완충 효과를 제공하였으며, 전기화학 임피던스 분석(EIS)을 통해 낮은 전하 전달 저항을 확인하였다. 반쪽전지 평가에서 1C 조건에서 초기 용량 대비 85% 이상의 용량 유지율을 보였고, 고율(3C) 조건에서도 우수한 속도 특성을 나타냈다. 또한, 장기 사이클링 시험에서 300회 충·방전 후에도 안정적인 용량 유지가 가능함을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 2차원 흑연 기반 실리콘 복합체 설계 전략은 기계적 안정성과 전기화학적 성능을 동시에 향상시킬 수 있는 효과적인 접근법으로, 차세대 고에너지밀도 리튬이온전지 음극 소재 개발에 중요한 방향성을 제시한다.

본 연구는 산업통상자원부 (MOTIE)의 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00432013) & 본 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)의 연구비 지원에 의한 연구임(20026752)

PB-46

단일 공정으로 합성된 개방형 다공성 SnO_2-SiO_2 복합체의 리튬이온전지 음극 특성

한수진[1,2], 신성민[1,2], 김수연[1,2], 정휘돈[1,2], 한승엽[1,2], 강윤찬[1], 김정현[2*]
[1]고려대학교, [2]한국세라믹기술원

리튬이온전지는 높은 에너지밀도와 장수명으로 휴대용 전자기기, 전기 자동차, 대용량 에너지 저장 시스템 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 최근, 고용량 음극 소재로서 기존의 흑연을 대체할 수 있는 금속산화물에 대한 연구가 진행 중이며, 그중 비교적 낮은 전위를 갖는 주석계 음극 소재인 SnO_2 가 유망한 후보로 떠오르고 있다. 그러나 리튬과의 conversion 및 alloying 과정에서 부피 변화로 인해 분말의 크랙 및 집전체로부터 탈리가 발생되어 수명 특성이 저하되는 단점이 있다. 본 연구에서는 개방형 다공성 SnO_2-SiO_2 복합체(p-SnSi)를 단일 공정인 분무열분해를 통해 합성하였다. p-SnSi의 개방형 다공성 구조는 충·방전 과정에서 발생하는 부피 변화로 인한 기계적 변형을 효과적으로 완화하고, 리튬이온 확산 거리를 단축시켜 우수한 전기화학적 성능을 구현하였다. 또한, p-SnSi 내의 SiO_2 층은 높은 비표면적을 갖는 다공성 SnO_2 표면에서의 부반응을 억제하여 계면 안정성을 향상시키고, 그 결과 수명 성능을 개선하였다. 1 A g^{-1} 전류밀도에서 200 사이클 후 p-SnSi, 치밀한 구조 SnO_2-SiO_2 복합체(f-SnSi), 개방형 다공성 SnO_2 마이크로스피어(p-Sn), 치밀한 구조 SnO_2 마이크로스피어(f-Sn)의 방전 용량은 각각 530, 89, 106, 58 mA h g^{-1} 이었다. p-SnSi는 f-SnSi, p-Sn, f-Sn에 비해 더 높은 용량과 용량 유지율을 보여주었으며, 특히 1 A g^{-1} 전류밀도에서 500 사이클 후에도 544 mA h g^{-1}의 안정적인 가역 용량을 나타냈다.

참고문헌

1. Peng, M.,. et al, "Alloy ;type anodes for high performance rechargeable batteries", *Angew. Chem.*, **134**(33), e202206770 (2022).

2. Xie, M., et al, "Effective anode materials for in situ Sn@C nano-lamellar assembly with doped nanotubes in lithium-ion batteries", *RSC Adv.*, **15**(24), 19176-19191 (2025).

3. Namsar, O., et al, "Improved electrochemical performance of anode materials for high energy density lithium-ion batteries through Sn(SnO_2)-SiO_2 /graphene-based nanocomposites prepared by a facile and low-cost approach", *Sustain. Energy Fuels*, **4**(9), 4625-4636 (2020).

4. Schnabel, M., et al, "Enhanced interfacial stability of Si anodes for Li-ion batteries via surface SiO_2 coating", *ACS Appl. Energy Mater.*, **3**(9), 8842-8849 (2020).

※본 연구는 한국산업통상자원부의 지원을 받아 한국세라믹기술원 내역사업으로 수행되었습니다. (PROJ25016-0-01)

PB-47

리튬-황 전지용 Co-NC/NCNT 복합 계면층의 합성 및 전기화학적 특성 연구

정휘돈[1,2], 김수연[1,2], 신성민[1,2], 한수진[1,2], 한승엽[1,2], 강윤찬[1], 김정현[2]*
[1]고려대학교, [2]한국세라믹기술원

리튬-황 전지(Lithium-Sulfur Batteries, LSBs)는 높은 에너지 밀도를 가지고 있기 때문에 기존의 리튬-이온 전지를 대체 할 수 있는 차세대 에너지 저장 장치로 각광받고 있다[1]. 그러나 충·방전 과정에서 발생하는 용해성 리튬 폴리설파이드(LiPS)의 확산으로 인해 셔틀(shuttle) 현상으로 인한 성능 저하가 발생한다[2]. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 양극에서 음극으로의 LiPS 확산을 억제하고, 고상의 Li_2S로의 빠른 변환 반응을 유도하기 위한 전략으로 기능성 계면층으로 개질된 분리막의 활용이 LSBs의 성능 향상 해결책으로 주목받고 있다[3].

본 연구에서는 LSBs의 성능향상을 위해 Co와 질소가 도핑된 탄소/질소 도핑 탄소나노튜브(Co-NC/NCNT) 복합체를 제조하였다. Co-NC/NCNT 복합체는 분무열분해 공정을 통해 제조된 ZnO template를 기반으로 한 Zeolitic Imidazolate Framework (ZIF)으로의 변환 공정, 그리고 촉매 화학기상증착를 통해 NCNT 성장 과정을 거쳐 형성되었다. Co-NC/NCNT 복합체는 균일하게 생성된 NCNT로 인해 높은 전도성을 나타내었으며, 계층적인 다공성의 구조의 구조적 특징과 Co 및 질소 도핑의 시너지 효과로 인해 LiPS와의 우수한 화학적 흡착력과 Li_2S로의 빠른 변환 반응을 나타내었다.

참고문헌

1. Bruce, P. G., Freunberger, S. A., Hardwick, L. J., and Tarascon, J.-M., "Li−O_2 and Li−S Batteries with High Energy Storage," *Nat. Mater.*, **11**, 19−29 (2012).

2. Manthiram, A., Fu, Y., and Su, Y.-S., "Challenges and Prospects of Lithium-Sulfur Batteries," *Acc. Chem. Res.*, **46**, 1125-1134 (2013).

3. Liu, M., Li, Q., Qin, X., Liang, G., Han, W., Zhou, D., He, Y., Li, B., and Kang, F., "Suppressing Self-Discharge and Shuttle Effect of Lithium-Sulfur Batteries with V_2O_5-Decorated Carbon Nanofiber Interlayer," *Small*, **13**, 1602539 (2017).

※본 연구는 한국산업통상자원부의 지원을 받아 한국세라믹기술원 내역사업으로 수행되었습니다. (PROJ25016-0-01)

PB-48

리튬-황전지 양극용 Co 기반 다성분계 촉매/CNT 복합체의 전기화학적 특성

한승엽[1,2], 신성민[1,2], 정휘돈[1,2], 한수진[1,2], 강윤찬[1], 김정현[2*]
[1]고려대학교, [2]한국세라믹기술원

리튬-황전지는 1,675 mAh/g의 높은 이론 용량과 2,500 Wh/kg의 높은 에너지 밀도로 인해 차세대 배터리로 각광받고 있다. 리튬-황전지의 원료인 황은 풍부하고 저렴한 자원일 뿐만 아니라 독성이 없고 재활용, 폐기 과정에서 환경 부담이 적다는 강점이 있다 [1-3]. 그러나 황의 전기전도도가 낮고, 충방전 과정에서 발생하는 셔틀 효과에 의한 비가역적인 용량 손실과 장기수명특성이 낮다는 문제를 갖고 있다 [1-3]. 이를 개선하기 위해 전도성 탄소와 복합화하여 전기전도도를 향상시키거나 촉매를 도입하여 리튬 폴리설파이드를 흡착하고 리튬 폴리설파이드의 산화 환원 반응을 가속화하는 연구가 진행되고 있다 [2,3]. Co계 촉매는 우수한 리튬폴리설파이드 (LiPS) 전환 특성과 LiPS 흡착특성을 가진다고 알려져 있다[2]. 반면 Fe, Zn 등 일부 금속기반 촉매들은 LiPS 전환 단계 중 일부 반응에서 더 뛰어난 전환 특성을 보이거나 흡착 특성이 더 우수한 것으로 보고되었다[2,4]. 본 연구에서는 에어로졸 공정과 화학 기상 증착 공정을 통해 균일하게 분산된 Co기반 다성분계 촉매/CNT를 제조하였다. 제조된 분말은 다공성의 구형의 형태를 가졌으며, 다성분계의 촉매 설계 및 다공성 CNT의 시너지 효과를 통해 촉매의 상호 보완적 특성을 조합함으로써 리튬-황 전지의 특성을 향상시켰다.

참고문헌

1. Fu, A., Wang, C., Pei, F., Cui, J., Fang, X., and Zheng, N., "Recent Advances in Hollow Porous Carbon Materials for Lithium–Sulfur Batteries," *Small*, **15** (10), e1804786 (2019).

2. Chen, L., Cao, G., Li, Y., Zu, G., Duan, R., Bai, Y., Xue, K., Fu, Y., Xu, Y., Wang, J., and Li, X., "A Review on Engineering Transition Metal Compound Catalysts to Accelerate the Redox Kinetics of Sulfur Cathodes for Lithium–Sulfur Batteries," *Nano-Micro Lett.*, **16**, 97 (2024).

3. Zhu, L., Zhang, X., Zhang, J., Ren, H., Yao, Y., Wang, M., and Song, Y., "A Review on Sulfur-Based Composite Cathode Materials for Lithium-Sulfur Batteries: Progress and Prospects," *J. Alloy. Compd.*, **1010**, 178282 (2025).

4. Sun, X., Qiu, Y., Jiang, B., Chen, Z., Zhao, C., Zhou, H., Yang, L., Fan, L., Zhang, Y., Zhang, N., "Isolated Fe–Co Heteronuclear Diatomic Sites as Efficient Bifunctional Catalysts for High-Performance Lithium–Sulfur Batteries," *Nat. Commun.*, **14**, 291 (2023)

※본 연구는 한국산업통상자원부의 지원을 받아 한국세라믹기술원 내역사업으로 수행되었습니다. (PROJ25016-0-01)

에너지전환

(포스터발표 I)

2025년 9월 25일(목) 09:00~11:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비

PC-1

BMP test를 통한 미세플라스틱과 항생제의 혐기성 소화에 미치는 영향 분석

지태현, 이지섭[1], 장순웅[2], 정우진[2*]
[1]경기대학교 환경에너지공학과, [2]경기대학교 사회에너지시스템공학과

Influence of Microplastics and Antibiotics on Anaerobic Digestion Assessed by Biochemical Methane Potential Test

Taehyeon Ji, Jiseob Lee[1], Soonwoong Chang[2], Woojin Chung[2*]
[1]Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University
[2]Department of Civil and Energy System Engineering, Kyonggi University

최근 하수처리장에 유입되고 있는 미세플라스틱과 항생제에 의한 혐기성 소화와 같은 생물학적 공정의 성능 및 안정성 저해에 대한 문제가 대두되고 있다. 특히, PVC(Polyvinyl Chloride)와 FLO(Florfenicol)은 독성이 강하고 사용량이 많기 때문에 해당 물질에 대한 혐기성 소화 공정에 미치는 영향에 대한 검토가 필요하다. 이에 본 연구에서는 하·폐수처리시설에 유입되는 농도로 알려진 PVC(30mg/L)와 FLO (10μg/L) 조건에서 각 물질의 단독 및 혼합 존재가 혐기성 소화 공정의 바이오가스 생산성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. PVC와 FLO를 첨가한 4개 군(Control, PVC, FLO, Mixed)을 조건으로 BMP(Biochemical Methane Potential) test를 수행하여 바이오가스 발생량을 측정하고 Gompertz model을 적용하여 미생물 성장 특성과 생산 속도를 분석하였다. 그 결과, PVC 단독 첨가군에서 가장 큰 바이오가스 발생량 감소율(대조군 대비 5.7%)을 보였으며 FLO 단독 첨가군과 Mixed 혼합 첨가군에서는 각각 0.6%, 2.7%의 감소가 나타났다. Gompertz model 적용 결과, PVC 단독첨가군에서 가장 긴 미생물의 지체성장기를 보였으며 최대 바이오가스 생산 속도의 저하 또한 확인되었다.

참고문헌

1. Wang, Xinying, et al. "Inhibition of aged microplastics and leachates on methane production from anaerobic digestion of sludge and identification of key components." Journal of Hazardous Materials 446 (2023)

2. Mitchell, Shannon M., et al. "The effects of the antibiotics ampicillin, florfenicol, sulfamethazine, and tylosin on biogas production and their degradation efficiency during anaerobic digestion." Bioresource technology 149, 244-252. (2013)

3. Wei, Wei, et al. "Polyvinyl chloride microplastics affect methane production from the anaerobic digestion of waste activated sludge through leaching toxic bisphenol-A." Environmental science & technology 53.5, 2509-2517. (2019)

사사

본 연구는 과학기술정보통신부과 한국연구재단의 기초연구실지원사업 'OW-BECCUS 플랫폼 기반 항생제/미세플라스틱 제어 기초연구실(과제번호: RS-2023-00219983)' 지원에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

PC-2

미세조류 수열액화를 통한 바이오항공유 원료 생산의 최적화 연구

이건호, 이아영[1], 장순웅[1], 정우진[1*]
경기대학교 환경에너지공학전공, [1]경기대학교 사회에너지시스템공학과

Optimization of Hydrothermal Liquefaction of Microalgae for Sustainable Aviation Fuel Feedstock Production

GeonHo Lee, Ahyoung Lee[1], SoonWoong Chang[1], WooJin Chung[1*]
Department of Enviromental Energy Engineering, Kyonggi University
[1]Department of Civil and Energy System Engineering, Kyonggi University

최근 전 세계적으로 항공 부문 탄소 배출 저감을 위한 지속가능항공연료(Sustainable Aviation Fuel, SAF) 혼합 의무화 정책이 시행 중이며 국내 또한 2027년부터 모든 항공편에 SAF 혼합급유가 의무화될 예정이다. 이러한 규제 강화 및 2050 탄소중립 목표 달성 계획에 대응하기 위해 안정적인 SAF 공급원 확보가 요구되고 있다. 비식용·고생산성 자원인 미세조류는 기존 1·2세대 바이오매스의 한계를 극복할 수 있는 3세대 바이오매스로 주목받고 있으며, 아임계 영역에서의 수열액화(Hydrothermal Liquefaction, HTL) 공정은 건조 전처리 없이 미세조류를 고품질 바이오 원유로 전환할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이에 본 연구는 미세조류 HTL을 이용한 SAF 업그레이드용 바이오오일 생산 조건에 대한 최적화 하고자 하였다. MiniTab 기반 반응표면법(Response Surface Methodology, RSM)을 적용하여 온도(200~300 ℃), 압력(50~200 bar), 반응 시간(15~45 min) 범위 내에서 공정성능을 평가한 결과 바이오 원유의 수율 및 질소 함량을 상승시키는 주도 인자는 온도인 것으로 나타났으며, 200℃에서 300℃로 온도 증가 시 지방산의 탈카르복실화에 의해 탄화수소류 생성이 촉진되는 것을 확인했다. HTL 공정을 통해 생산된 바이오 원유의 발열량 및 원소분석, GC-MS 분석을 수행한 결과 석유계 원유 대비 약 70~80% 수준의 발열량을 가지는 것으로 나타났으며, 기존 항공유 대비 불포화탄화수소 함량이 높고 헤테로 원자 비율이 더 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

1. P. Kiran Kumara, S. Vijaya Krishnab, Kavita Vermaa, K. Poojac, D. Bhagawana, K. Srilathaa and V. Himabindua, “Bio oil production from microalgae via hydrothermal liquefaction technology under subcritical water conditions”, Journal of Microbiological Methods 153, 108-117, (2018).

2. Bin Cao, Shuanhu Hu, Kai Zhu, Cheng Pan, Fatma Marrakchi, “Response surface optimization of product yields and biofuel quality during fast hydrothermal liquefaction of a highly CO_2-tolerant microalgae”, Science of the Total Enviroment 860 (2023) 160541.

사사

본 연구는 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다. (RS-2023-00255939, 미세조류를 이용한 탄소저감형 바이오항공유 업그레이드용 바이오오일 생산 통합시스템 개발)

PC-3

바이오매스 가스화에서 폐자원 기반 CaO-Ni DFM을 이용한 수소 생산

정세은[1], 김문영[1], 채호진[1], 남형석[1]*
[1]경북대학교, 41566 대구광역시 북구 대학로 80

Hydrogen Production from Biomass Gasification Using Waste-Derived CaO-Ni Dual-Function Materials

Se-Eun Jeong[1], Moon Young Kim[1], Ho Jin Chae[1], Hyungseok Nam[1]*
[1]Kyungpook National University, 80, Daehak-ro, Buk-gu, Daegu, 41566, Korea

Abstract

본 연구는 바이오매스를 가스화하여 얻은 합성가스에서 DFM(Dual-Function Material)를 활용해 수소 성분을 강화하는 공정 구성을 제안합니다. 바이오매스를 가스화 합성가스는 일반적으로 CO, H_2, CO_2, CH_4 및 수증기를 포함합니다. 촉매·흡수 일체형 소재는 폐자원 기반 CaO(달걀껍질, 패각 등에서 유래한 $CaCO_3$의 소성으로 제조) 위에 Ni를 담지하여 합성하며, 단일 모듈에서 CO_2 포집($CaO \leftrightarrow CaCO_3$ 루핑)과 촉매 전환(Ni 기반 전환·WGS 촉진)을 동시에 구현합니다. 연구 범위는 (i) 폐자원 유래 CaO의 소성 조건 최적화와 미세구조·기공특성 정량화, (ii) Ni-CaO DFM 및 CaO 탑재 고온 정합 모듈의 제조·특성 비교, (iii) 바이오매스 가스화 조건을 모사한 합성가스 분위기에서의 H_2/CO 비, CO 전환, CO_2 breakthrough, 수소 순도·수율, 사이클 안정성 평가를 포함합니다. 실험 장치는 우선 TGA를 사용하여 CaO의 탄산화/탈탄산 용량, 반응속도, 사이클 내구성을 정량화하고, 필요 시 가스 분석기(예: FTIR/GC 연계)를 통해 반응 가스의 조성 변화를 모니터링합니다. 본 연구는 폐자원 기반 CaO의 자원순환 가치와 DFM의 공정 통합성을 결합함으로써, 가스화 유래 합성가스에서의 수소 품질 향상과 단순화된 후단 정제 가능성을 입증합니다. 또한 소재-공정 연계를 통해 DFM 설계 변수(담지량, 입자 구조, CaO/촉매 비)와 수소 성능 지표 간의 상관관계를 제시하며, 후속 고정층 스케일 실증으로의 확장 기반을 마련합니다.

Key words Biomass gasfication, DFM, Ca looping, H_2 production, CO_2 Capture

사사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다. (RS-2024-00410397)

참고문헌

1. D. Wang et al, “Ni-CaO dual function materials prepared by different synthetic modes for integrated CO2 capture and conversion”, Chemical Engineering Journal, 428, 132110 (2022).

PC-4

파라핀계 탄화수소 제조를 위한 방향족의 촉매 수소화 반응 특성

한기보, 장정희, 이지은, 장현성, 윤여진, 이재홍
고등기술연구원

Reaction Characterization on Catalytic Hydrogenation of Aromatics for Paraffin-Based Hydrocarbon Production

Gi Bo Han*, Jung Hee Jang, Ji Eun Lee, Hyun Sung Jang, Yeojin Yoon, Jae Hong Lee
Institute for Advanced Engineering

정유 및 석유화학 산업에서 석유계 제품을 생산하는 과정에서 유용한 물질로의 전환을 위한 과정으로 방향족에 대한 수소화 공정을 동반하는 경우가 많다. 다양한 유용한 화합물의 종류인 연료 및 화학원료를 제조하는 과정에서 안정성을 고려하여 파라핀계 탄화수소 화합물을 얻기 위하여 방향족으로부터 얻어질 수 있도록 촉매를 동반한 수소화 반응을 활용하기 때문이다. 수소화 공정은 방향족에 포함된 불포화 탄화수소에 수소를 공여하여 포화 탄화수소로 전환시킴에 따라 파라핀계 탄화수소 화합물의 열적, 그리고 구조적 안정성을 기대할 수 있다. 본 연구에서는 반응물인 단일 성분 또는 다성분계 방향족 성분으로부터 파라핀계 탄화수소 화합물을 생성물로 획득하기 위하여 촉매를 적용하여 각각의 수소화 반응을 수행하였으며, 다양한 반응조건을 적용한 가운데, 생성물을 분석하여 선택성을 확인함으로써 반응특성을 조사하였다. 그 결과, 조성에 따른 반응물 종류에 따라 각기 서로 다른 반응조건에 따른 반응특성이 관찰되었으며, 얻어지는 생성물의 선택도 또한 반응조건에 따라 달라짐이 확인되었다.

PC-5

전해질 엔지니어링을 통한 (광)전기화학적 과산화수소 생성 및 전극 안정성 향상

한재빈, 박이슬*
국립부경대학교 화학공학과

과산화수소(H_2O_2)는 환경 정화, 살균, 화학 합성 등 다양한 분야에서 중요한 화학물질로, 특히 친환경 에너지 변환 및 저장 시스템에서도 활용 가능성이 높다. 그러나 현재 산업 생산은 유기 용매를 사용하는 안트라퀴논 공정에 의존하고 있으며, 이 과정은 에너지 소모가 크고 부산물 발생 및 환경 오염 문제가 뒤따른다. 이에 따라 물과 $KHCO_3$ 전해질을 이용해 H_2O_2를 생성하는 메커니즘이 활발히 연구되고 있으며, 이는 광전기화학 (Photoelectrochemical, PEC) 및 전기화학 (Electrochemical, EC) 방식 모두에서 적용 가능한 친환경 대안으로 주목받고 있다. $BiVO_4$ 전극은 비교적 저전압에서 광양극 산화 반응을 유도할 수 있어 H_2O_2 생성에 널리 연구되고 있으며, 최근 보고에 따르면 인산이수소칼륨(KH_2PO_4) 첨가가 PEC 시스템에서 H_2O_2 안정성을 향상시킬 수 있으나, 그 작용 메커니즘은 아직 명확히 규명되지 않았다. 본 연구의 목적은 KH_2PO_4 첨가가 H_2O_2 생성 효율과 분해 속도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, OH 라디칼 농도 및 전극 안정성에 대한 기초 데이터를 확보하여 향후 메커니즘 규명을 위한 기반을 마련하는 것이다. 이를 위해 $BiVO_4$ 전극을 사용하여 1 M KH_2PO_4 존재/부재 조건에서 PEC 및 EC 실험을 수행하였다. PEC 실험에서는 1 sun 조건으로 광을 조사하였고, EC 실험은 동일 전해질 조성에서 암조건으로 진행하였다. 전해질로는 2 M $KHCO_3$를 사용하였으며, H_2O_2 농도는 DPD-POD 방법을 사용하여 UV-Vis 분광법으로 정량 분석하였다. 분해 속도는 H_2O_2 첨가법(H_2O_2 addition method)으로 초기 농도 100 μM에서 시간에 따른 잔존량을 측정하였다. OH 라디칼 농도는 메틸렌블루(MB) 탈색 실험으로 간접 추정하였다. 실험 결과, KH_2PO_4가 없는 조건에서는 OH 라디칼 농도가 높아 MB 탈색 속도가 현저히 빨랐으며, 광 조사 시 전극 부식과 구조적 손상이 가장 심했다. 또한 H_2O_2 첨가법 분석 결과, 저전압 PEC 조건에서 anodic oxidation(AO)에 의한 H_2 O_2 손실 비율은 무인산 조건이 KH_2PO_4 조건보다 높았다. 전류 안정성 면에서도 KH_2PO_4 첨가 시 PEC 조건에서 크게 향상되었으며, 특히 EC 조건보다 PEC 조건에서 그 효과가 두드러졌다. 장시간 운전 후에도 KH_2PO_4 첨가군의 전극 손상은 완화되었다. 이러한 결과는 KH_2PO_4가 OH 라디칼 생성을 억제하고 AO 손실을 줄임으로써 H_2O_2 안정성과 전극 내구성을 향상시킨다는 것을 시사한다. 본 연구는 PEC 기반 H_2O_2 생산의 장기 안정성 확보를 위한 전해질 설계 방향을 제시한다.

참고문헌

1. Gill, T. M., Vallez, L., and Zheng, X., "The Role of Bicarbonate-Based Electrolytes in H_2 O_2 Production through Two-Electron Water Oxidation," ACS Energy Lett., 6(8), 2980-2987 (2021).

PC-6

Mechanochemical synthesis of multicomponent bismuth-based molybdate catalysts for propylene ammoxidation to produce acrylonitrile

ChangJin Han, Jeong Hwan Chun[1], Chan Hun Kim[1], and Do Heui Kim[*]
School of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University
[1]R&D Center, Chemical Division, Hanwha Solutions

The activities and structures of metal oxide catalysts significantly rely on the synthesis procedures and conditions. In this study, a novel solvent-free mechanochemical method was employed to prepare catalysts for the ammoxidation of propylene. Multicomponent oxide catalysts containing bismuth, iron, cobalt, and molybdenum were successfully synthesized using a ball-mill mixer and zirconia jars without the use of nitric acid. The mechanochemically synthesized catalysts exhibited higher catalytic performance than traditional catalysts prepared by coprecipitation (CP) and rotary evaporation (RE) methods in propylene ammoxidation. Propylene ammoxidation reactions with ball-milled catalysts showed a synergistic effect and improved acrylonitrile yield, especially at a 50:50 wt% ratio of $Bi_2Mo_3O_{12}$ to $Fe_{0.36}Co_{0.64}MoO_4$. Comprehensive analyses, including XRD, SEM-EDS, Raman spectroscopy, and XPS, support the conclusion that the improved performance of the mechanochemically synthesized catalysts can be attributed to the increased interaction between different phases prepared under mechanical forces, leading to a favorable change in the oxidation state of iron.

PC-7

Sensitivity of Spin Initialization, Cell Parameters, and Dispersion Corrections in DFT Modeling of ORR on Pt–Na Single-Atom Catalysts

Ye Won Kang[1,2] and Seok Ki Kim[1,2*]

[1]Department of Chemical Engineering, Ajou University, 206 Worldcup-ro, Suwon 16499, Korea
[2]Department of Energy Systems Research, Ajou University, 206 Worldcup-ro, Suwon 16499, Korea

Accurate density-functional-theory (DFT) modeling of the oxygen reduction reaction (ORR) on single-atom catalysts critically depends on several user-controlled inputs that are rarely reported in a systematic way. Here we quantify how three practical choices—(i) magnetization initialization for O-bearing adsorbates, (ii) cell size and vacuum parameters, and (iii) inclusion of long-range dispersion corrections—impact thermochemistry and kinetics on a Pt–Na single-atom motif supported on a graphene-like host. Using spin-polarized PBE and PBE-D3 calculations with scalar-relativistic PAW potentials, we find that (i) initial spin guesses can shift the optimized spin state of *OOH/*O intermediates and alter adsorption energies by up to ~0.10 eV unless a short spin-quench is performed; (ii) lateral cell expansion from ~(10×10) to (12×12) Å reduces spurious image interactions, tightening reaction-energy convergence from ~0.15 eV to ≤0.05 eV; and (iii) dispersion corrections stabilize *OOH by ~0.05–0.12 eV and lower the computed barrier of the *OOH→*O step by ~0.04–0.07 eV, thereby improving internal consistency with the scaling relations discussed in the literature [1,2]. A practical workflow is proposed: (a) short pre-relaxations with randomized spin seeds, (b) cell-size checks to ≤0.05 eV tolerance, and (c) mandatory reporting of dispersion settings. The protocol reduces avoidable uncertainty in ORR energetics and should generalize to other alkali-modified single-atom catalyst models.

References

1. Pletcher, D., and Walsh, F. C., *Industrial Electro-chemistry*, 2nd ed., Chapman and Hall, London, 256–269 (2001).
2. Williams, A. C., Panagiotopolous, M. K., and Kenneth, H., "Supercritical Fluid Extraction," *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39(10), 4657–4665 (2003).

PC-8

CPFD Simulation for Enhanced Heat Management in CO_2 Fischer-Tropsch Fluidized Bed Reactors

Seo Young Park[1,2] and Seok Ki Kim[1,2 *]

[1] Department of Chemical Engineering, Ajou University, 206 Worldcup-ro, Suwon 16499, Korea

[2] Department of Energy Systems Research, Ajou University, 206 Worldcup-ro, Suwon 16499, Korea

Direct CO_2 Fischer–Tropsch synthesis (CO_2-FTS) offers high efficiency for liquid-fuel production but its strongly exothermic nature makes heat removal and control a central design challenge. This study evaluates heat-management strategies for a fluidized-bed reactor equipped with internal heat-exchange pipes by performing three-dimensional CPFD (MP-PIC) simulations that adopt an experimentally based kinetic model.

The kinetics include direct CO_2 hydrogenation and the reverse water–gas shift (RWGS) pathways reported for Fe catalysts at 553–603 K and 3.5 MPa. The reactor geometry is a vertical cylinder (1.0 m height, 0.1 m diameter) with a catalyst-bed height of 0.3 m. Catalyst particles (mean size 148 μm; density 5170 $kg \cdot m^{-3}$) were packed at a solids volume fraction of 0.6. The minimum fluidization velocity (u_mf) was estimated by pressure differential analysis between the bottom and top of the catalyst bed (z = 0 and z = 0.3 m), yielding $u_mf = 0.029\ m \cdot s^{-1}$.

At lower velocities, intense heat accumulation formed near the reactor bottom, driving temperature divergence and producing unrealistic CO_2 conversions approaching 100%. In contrast, operation within 0.04–0.058 $m \cdot s^{-1}$ progressively improved temperature uniformity and, under behavior comparable to isothermal conditions, sustained CO_2 conversions of 31–38% over periods exceeding 500 s. Heat-exchanger temperature control contributed only supplementarily; without sufficient fluidization it was not effective on its own. Bubble-behavior analysis showed that proper fluidization optimizes bubble size and number distributions, enhances gas–solid contact, and suppresses hotspots and heat buildup.

Overall, for strongly exothermic systems, traditional u_mf-based criteria alone are insufficient to ensure sound design; securing a superficial velocity with adequate margin above u_mf, combined with internal heat exchange, is essential for scaling up CO_2-FTS fluidized-bed reactors.

PC-9

개인 사정으로 인해 발표가 취소되었습니다.

PC-10

침전제에 따른 메탄올 합성 촉매 전구체의 침전 특성 영향 조사

권병찬, 장정규[1], 박노국*, 이승우[1], 김병기[2], 배종욱[2]
영남대학교 청정기술연구소, [1]영남대학교 화학공학부, [2]성균관대학교 화학공학부

Effect of Precipitating Agents on the Precipitation Characteristics of Methanol Synthesis Catalyst Precursors

Byung Chan Kwon, Jung Gyu Jang, No-Kuk Park*, Seung Woo Lee[1],
Byeong Gi Kim[2], Jong Wook Bae[2]

Institute of Clean Technology, Yeungnam University
[1]School of Chemical Engineering, Yeungnam University
[2]School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University

초록

지속적인 온실가스 배출량 증가에 따른 지구온난화현상이 가속되고 있는 가운데, 이를 완화시키려는 노력이 여러 분야에서 이루어지고 있다. 특히 여러 온실가스 중 이산화탄소의 경우 화석 연료의 연소, 산업 공정 등의 인간 활동으로 인해 그 발생량이 급격히 증가되고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 이산화탄소의 포집, 활용, 저장(CCUS) 기술이 활발히 연구되고 있다. 최근에는 이산화탄소를 처리하는데 그치지 않고 이를 활용하여 다양한 고부가 가치의 화합물을 생산하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 그 예로 화학적 전환과정을 거쳐 메탄올, 포름산, DME 등의 화합물 생산이 가능하다. 이 중 특히 메탄올은 연료 및 화학 원료로 사용할 수 있는 물질이다. 현재 대부분의 산업용 메탄올 합성 공정에서는 높은 수율, 비교적 저렴한 비용 등의 이유로 Cu-Zn-Al계 촉매가 사용된다.

본 연구에서는 이산화탄소를 수소화 반응에 의한 직접 메탄올 합성 공정에 적용할 수 있는 Cu-Zn계 산화물 촉매를 공침법으로 제조함에 있어, 침전제의 종류에 따라 공침되는 전구체의 침전속도 거동을 조사하고자 하였다. 그 결과 공침의 과정에서 침전제에 따라 활성물질, 조촉매, 지지체로 사용되는 전구체 물질의 상이한 침전속도로 인해 공침 제조 후 얻어진 촉매 성분의 함량 차이가 상당할 수 있음을 확인하였다. 이는 전구체별로 침전제에 따른 침전 반응이 각각 특정 pH 구간에서 일어나기 때문인데 이로 인해 여러 종류의 전구체를 동시에 침전 시 원래 얻고자한 비율대로의 촉매를 합성하기 어렵게 함을 의미한다. 따라서 침전에의 침전 특성을 고려하여 전구체 물질의 순차적인 침전의 방법을 이용하여 원하는 비율의 메탄올 합성 촉매를 제조하여 그 특성을 확인하고자 하였다.

참고문헌

1. Binglian Liang et al., “Investigation on Deactivation of Cu/ZnO/Al_2O_3 Catalyst for CO_2 Hydrogenation to Methanol”, Industrial & Engineering Chemistry Research, 58(21), 9030-9037 (2019).

사사

본 연구는 한국전력공사의 사외공모 기초연구(단체)에 의해 지원되었음. [과제번호 : R23XO05-06]

PC-11

합성 pH 조건에 따른 Cu-Zn-In 촉매의 조성 안정성 및 메탄올 합성 성능

권민석, 장정규, 권병찬[1], 박노국[1], 배종욱[2], 권재현[2]
영남대학교 화학공학과, [1]영남대학교 청정기술연구소, [2]성균관대학교

Effect of Synthesis pH on the Composition Stability and Methanol Synthesis Performance of Cu-Zn-In Catalysts

Min Seok Kwon, Jeong Gyu Jang, Byung Chan Kwon[1], No-Kuk Park[1*], Jong Wook Bae[2], Jae Hyun Kwon[2]
School of Chemical Engineering, Yeungnam University
[1]Institute of Clean Technology, Yeungnam University
[2]Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract

CO와 CO_2 의 직접 수소화 반응을 통한 메탄올 합성은 탄소 자원화와 에너지 전환에 매우 중요한 연구 주제로 주목받고 있다. 메탄올은 액체 연료 및 화학 원료로 활용될 수 있는 대표적인 에너지 캐리어이며, 이를 고효율로 생산하기 위한 촉매 개발은 지속가능한 에너지 개발이 핵식점인 과제이다.

본 연구에서는 Cu - Zn - In 삼원계 촉매를 공침법으로 합성하고, 합성 규모 확대 시 발생하는 문제를 규명하였다. 소규모 합성에서는 pH 9 조건에서 안정적이고 균일한 조성의 촉매를 얻을 수 있었으나, 대량 합성 시에는 높은 염기성 조건에서 Cu와 Zn이 심각하게 용출되어 원하는 조성을 확보하기 어려운 한계가 나타났다. 이에 따라 합성 pH를 9, 7.5, 6.5로 조절하여 촉매를 제조하고, 금속 조성 분석 및 BET분석, 메탄올 합성 반응 평가를 수행하였다.

그 결과, BET 분석을 통해 합성 pH가 높아질수록 촉매의 표면적과 기공 구조가 발달하는 경향을 확인하였다. 그러나 반응성 평가에서는 이러한 구조적 이점에도 불구하고 고 pH 조건에서 금속 용출과 조성 불균일이 발생하여 촉매 활성이 저하되었다. 반대로 pH 6.5 조건에서 합성한 촉매는 금속이 안정적으로 도입되고 조성이 균일하게 유지되어 가장 우수한 메탄올 합성 활성을 보였다. 또한 합성 pH에 따라 활성점의 분포와 반응 선택성이 달라짐을 확인하였으며, 이를 통해 Cu - Zn - In 촉매의 대량 합성 시 구조 - 조성 - 활성 간 상관관계와 최적 조건을 규명하였다. 본 연구는 CO/CO_2 수소화 반응을 통한 메탄올 합성 촉매의 확장 가능성과 실용화를 위한 중요한 기반을 제공한다.

참고문헌

1. Heondo Jeong et al.[2].:Effect of Zr and pH in the preparation of Cu/ZnO catalysts for the methanol synthesis by CO_2 hydrogenation. Reac. Kinet. Mech. Cat. 105, 147-159 (2012).

2. Mota, N et al.[3].:Effect of aging on the structure and activity of $Cu/ZnO/Al_2O_3$ catalysts prepared by co-precipitation for methanol synthesis. RSC Adv. 8, 30875-30886 (2018).

PC-12

매체순환-산화탈수소화 공정용 Ti 치환 $SrFeO_{3-\delta}$ 산소전달입자 연구

백승훈, 김향동, 신지현, 손정민*
전북대학교 자원·에너지공학과

A Study on Ti doped $SrFeO_{3-\delta}$ as Oxygen Carrier for Chemical Looping Oxidative Dehydrogenation

Seung Hun Baek, Hyang-Dong Kim, Jihyeon Shin, Jung Min Sohn
Department of Mineral Resources & Energy Engineering, Jeonbuk National University

에틸렌은 다양한 분야에서 활용되며, 수요가 점차 늘고 있어 안정적인 공급을 위한 생산 기술 연구가 수행되고 있다. 산화탈수소화(Oxidative Dehydrogenation, ODH) 반응을 적용한 에틸렌 생성 공정은 기존 열분해 공정과 달리 추가적인 열 공급 상대적으로 적게 요구되어, 비교적 용이한 공정 운영이 가능하다는 장점이 있다. 다만 CO_x 등 부산물 형성으로 인한 선택도 저하 및 온실가스 배출 문제가 주된 단점으로 지적된다.
이러한 단점을 보완하기 위해, 최근 매체순환-산화탈수소화 공정과 이에 적합한 신규 산소전달입자 개발 연구가 진행되고 있다. 페로브스카이트 구조 산화물은 우수한 산소 전달 용량과 A, B 사이트 조성 조절을 통한 성능 개조가 가능하다는 특성으로 인해, 공정 목적에 맞는 설계가 가능하다. 특히 $SrFeO_{3-\delta}$ 기반 물질은 높은 산소 저장 능력과 산소 이동성을 바탕으로 다양한 매체순환 공정에서 산소전달입자로 사용되어왔다. 그러나 높은 산소 이동성은 오히려 탄화수소 과산화를 유도하여 선택도를 저하시킬 수 있다.
이에 본 연구에서는 $SrFeO_{3-\delta}$ 환원 중 구조 붕괴를 억제하고, 산소 이동성을 제어하여 ODH 반응으로 유도하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 환원성이 낮은 Ti를 B 사이트 내 일부 치환하여 구조 안정성을 강화하고 격자 산소 이동성을 조절하였다. 결과적으로 에탄 과산화를 억제하고 에틸렌 및 물 생성 경로를 선택적으로 유도할 수 있는 산소전달입자 특성을 확인하였으며, 본 물질을 매체순환-산화탈수소화 공정에 적용 가능한지 평가하였다.

PC-13

바나듐계 매체순환-산화탈수소화용 산소전달입자 연구

김향동[1], 백승훈[1], 신지현[1], 손정민[1*]
전북대학교 자원·에너지공학과[1]

A Study on V-based Oxygen Carrier for Chemical Looping Oxidative Dehydrogenation

Hyang-Dong Kim[1], Seung Hun Baek[1], Jihyeon Shin[1] Jung Min Sohn[1*]
Department of Mineral Resources & Energy Engineering, Jeonbuk National University[1]

인구증가 및 생활수준 증가로 발생한 올레핀 수요 및 생산량 증가에 따른 생산공정 필요성이 대두되었다. 산화탈수소화는 기상 산소가 반응에 참여함에 따른 과산화 문제와 공정 위험성이 높은 단점을 가지고 있다. 매체순환 공정과 산화탈수소화 반응이 결합된 매체순환 산화탈수소화는 기상 산소를 금속산화물 내 고체산소로 대체할 수 있다. 금속산화물 조절을 통한 다양한 반응경로 형성을 통한 선택도 향상과 기상 산소 회피를 통한 공정 안정성을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서 매체순환 산화탈수소화용 바나듐-계열 산소전달입자를 합성하여 사용하였다.
제조한 촉매는 XRD, TPR 등을 통해 분석하였으며, 특정온도에서 에틸렌 선택도 및 전환율 개선 가능성을 고정층 반응기와 GC 등을 통하여 확인하였다.

PC-14

칼슘루핑이 접목된 매체순환 메탄부분산화용 철산화물 산소전달입자 연구

신지현, 백승훈, 김향동, 손정민*
전북대학교 자원·에너지공학과

A Study on Iron Oxide as Oxygen Carrier for Chemical Looping Partial Oxidation of Methane Associated with Ca-Looping Manner

Jihyeon Shin, Seung Hun Baek, Hyang-Dong Kim, Jung Min Sohn*
Department of Mineral Resources & Energy Engineering, Jeonbuk National University

메탄 부분산화(Partial Oxidation of Methane, POM), 습식 개질(Steam Methane Reforming, SMR) 등 다양한 공정에서 발생한 CO_2는 합성가스 선택성과 수율을 저하시킨다. 매체순환 공정에 접목하여 공정 효율 개선을 시도하고 있음에 불구하고 CO_2는 여전히 발생하고 있다. Ca-Looping 방식은 CaO를 반응기 내에 주입하고 CO_2와 반응하여 고체상 $CaCO_3$를 형성한 후, 이를 다시 열분해하여 CO_2를 따로 포집할 수 있다. 이러한 메커니즘으로 인해, 반응 중 발생하는 CO_2를 고순도로 포집할 수 있는 기술로 각광받고 있다.
철 산화물은 낮은 가격, 무독성 등 다양한 장점으로 인해 매체순환 메탄 부분산화 공정용 산소전달입자로 많이 활용 되어왔다. 다만, 철 산화물의 높은 반응성은 메탄을 과산화시키고, 반응 온도에서 환원된 철 표면이 소결되어 성능을 저하시킨다는 큰 단점이 있다. CaO는 매체순환공정에서 지지체로서도 많이 활용되어왔다.
본 연구는 CaO가 Fe 산화물과 동시에 활용되었을 때 CaO가 CO_2 포집제로 역할을 수행함과 동시에 Fe와 상호작용에 의한 산소전달성능 개선 여부를 다양한 분석을 통해 확인하였다.

청정생산
(포스터발표 I)

2025년 9월 25일(목) 09:00~11:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비

PG-1

Development of Graphene Synthesis Methodology : Enhanced Dispersibility and Substrate Adhesion for Solution-Based Processing

Yonghyun Lee[1], Chungmin Ahn[1], Chang-Ho Choi[*]

[1]Department of Chemical Engineering, Gyeonsnag National University, 501, Jinju-daero, Jinju-si, Gyengsangnam-do, Korea (ch_choi@gnu.ac.kr)

In this study, we developed a novel graphene synthesis methodology that extends the application potential of graphene through precise control of the oxidation degree. While graphene has been recognized for its excellent electrical and mechanical properties-including outstanding electron mobility, thermal conductivity, mechanical strength, and optical transparency-its practical applications have been limited by challenges in mass production and processing. Our approach overcomes these limitations by producing graphene sheets larger than 10 micrometers.

This study established a methodology to precisely control graphene size through regulation of the oxidation process. By investigating the direct relationship between oxidation degree and graphene dimensions, we achieved reliable size control with reproducibility. The process demonstrated stability under mass production conditions, suggesting feasibility for industrial-scale production.

The developed large-scale graphene features selective functional groups on its surface that significantly improve its dispersibility in various media. These functional groups enhance solvent affinity, allowing excellent dispersion in both aqueous and organic solvents. Additionally, the increased size of graphene sheets (larger than 10 micrometers) directly contributes to improved adhesion to substrates, as the larger surface area creates stronger interfacial interactions. This enhanced adhesion enables stable pattern formation in solution-based processes without additional binders or adhesives, simplifying manufacturing processes and reducing production costs.

The graphene was successfully applied to various solution-based processing techniques, including screen printing, slot die printing, spray coating, spray drying, and dip coating. The excellent dispersibility in liquid media made it particularly suitable for these solution-based fabrication methods. This compatibility expands potential applications in electronic devices, flexible displays, wearable sensors, energy storage devices, and composite materials. The methodology advances graphene technology particularly for solution-processable electronics where stable dispersions and strong substrate adhesion are crucial for commercialization.

PG-2

Size-controllable, High-yield, and Additive-free $Ti_3C_2T_x$ MXene Inks for Inkjet and Slot-die Printed MXene Film with High-quality

Yeongwon Kwak, Sujin Park and Chang-Ho Choi*
Department of Chemical Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

<Abstract>

$Ti_3C_2T_x$ (MXene) is a promising 2D material with excellent electrical conductivity, mechanical strength, and chemical tunability, making it attractive for energy storage, catalyst and printed electronics. However, conventional HF-based synthesis limits its yield, safety, and scalability. In this study, we developed a green synthetic method involving a hydrothermal-assisted etching of MAX material and subsequent water intercalation of multilayer MXene to produce high-quality MXene flakes with a high yield with 77.5 %. In addition, our approach allows the lateral size of MXene flakes to be tunable by adjusting the post treatment condition for multilayer MXene. This flake size control enabled optimizing the applicable printing process of additive-free MXene flake inks: the ink with larger MXene flakes is suitable for slot-die coating, which requires large flakes to form improved connection between the flakes. In contrast, the ink consisting of smaller flakes is more appropriate for inkjet printing to ensure stable droplet formation of MXene ink. Both MXene inks showed excellent printability, transparency, and electrical conductivity. Inkjet printed films exhibited a sheet resistance of 837.33-21.76 Ω/sq with transmittance of 73.5-17.56 %, reaching up to 6.44 × 103 S/cm. Slot-die coated films showed a sheet resistance of 311.33-5.44 Ω/sq with a transmittance range of 91.33–35.79 % with an electrical conductivity as high as 2.54×10^4S/cm. This work offers a scalable and eco-friendly method for producing high-quality MXene flakes, along with the ability of size-tailored MXene production for target printing processes.

PG-3

VOCs 농도 측정용 PID 센서를 이용한 실시간 모니터링 특성 연구

윤성필, 이지은, 전동환*
고등기술연구원

Real-Time Monitoring Characteristics of VOCs Concentration Using a PID Sensor

Sung Pill Yun, Ji Eun Lee, Dong Hwan Jeon*
Institute for Advanced Engineering

Abstract

휘발성 유기화합물(VOCs)은 산업 공정 및 생활환경에서 광범위하게 발생하며, 인체에 발암성·신경독성을 유발할 뿐만 아니라 대기 중 광화학 반응을 통해 오존과 스모그를 형성하여 환경오염을 가중시킨다. 또한 높은 인화성과 폭발성을 지닌 경우가 많아 산업 현장에서 안전 위해 요인으로 작용한다. 이러한 이유로 VOCs 배출의 정밀한 측정과 관리 기술 개발은 환경 보호 및 산업 안전 확보를 위해 필수적이다.

본 연구에서는 산업 현장에서 배출되는 VOCs 농도 측정 모니터링 시스템 개발의 일환으로, PID(Photo Ionization Detector) 센서의 VOCs 농도 감지 성능 시험을 진행하였다. PID 센서는 자외선(UV) 광원을 이용해 VOC 분자를 이온화한 후 이온 전류의 세기를 측정함으로써 가스의 농도를 산출하는 방식으로 작동하며, 빠른 응답 속도와 넓은 측정 범위를 제공한다.

본 연구에서는 시험가스 공급장치와 측정 센서 모듈, 그리고 LabVIEW 프로그램을 활용하여 PID 가스센서의 농도와 계측기 측정값을 실시간으로 모니터링할 수 있는 시스템으로 구성된 Lab-scale 시험 장치를 구축하였다. 측정 대상 VOCs로는 톨루엔을 이용하였고, 시험가스 농도를 변화시키면서 PID 센서의 감지 감도 및 응답 특성을 확인하였다.

사사

본 연구는 중소벤처기업부의 재원으로 중소기업기술정보진흥원의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다. (No RS-2024-00509012)

PG-4

고압가스의 안전 배출을 위한 볼밸브 개도율 변화에 따른 가스 배출 특성 연구

윤성필, 윤덕규, 전동환*
고등기술연구원

Gas Discharge Characteristics with Ball Valve Opening Variations for Safe Release of High-Pressure Gas

Sung Pill Yun, Deok kyu Youn, Dong Hwan Jeon*
Institute for Advanced Engineering

Abstract

수소경제 활성화를 위한 배관 공급망 구축을 위해서는 고압 수소의 공급망 안전성 확보가 매우 중요하다. 특히, 천재지변 또는 사고 발생과 같은 비상 상황 시 수소 공급 배관 내부의 수소를 신속하게 대기 중으로 배출시키고, 불활성 가스로 치환할 필요가 있다. 그리고 법적으로 수소 배출구에서 배출되는 가스 유속을 150 m/s를 초과하지 않도록 제어할 필요가 있다.

본 연구에서는 볼 밸브의 개도율 변화에 따른 가스 배출 특성 확인을 통해서 안정적 유속 제어 방안을 제시하고자 실험을 진행하였다. 실험 장치는 1인치 크기의 배관을 길이 100 m로 제작하였고, 고압 압축기를 이용하서 공기를 공급하여 내부압력을 100 bar로 제어하였다. 볼 밸브는 3/4인치와 1인치 세그먼트 볼 밸브를 이용하였으며, 각각의 밸브 개도율 변화에 따른 배출 가스 유속을 측정하였다. 실험결과 볼 밸브와 세그먼트 볼 밸브의 개도율에 따른 배출 유속에 차이가 있음을 확인하였는데, 3/4인치 볼 밸브의 경우에는 개도율 20%에서 반복시험 시 유속이 약 8 m/s 차이가 발생하였고, 1인치 크기의 세그먼트 볼 밸브의 경우에는 동일한 유속으로 배출되었다. 따라서 세그먼트 볼 밸브는 볼 밸브 보다 배출가스 유속을 일정하게 제어가 가능하므로 정확한 시스템 제어가 가능할 것으로 판단되었다.

사사

본 연구는 중소벤처기업부 재원으로 중소기업기술정보진흥원의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다. (No RS-2024-00454664)

PG-5

고농도 VOCs 측정을 위한 센서 비교 연구

이지은, 윤성필, 윤덕규, 전동환
고등기술연구원

A Comparative Study of Sensors for High-Concentration VOCs Measurement

Jieun Lee, Sung Pill Yun, Deok kyu Youn, Dong Hwan Jeon
Institute for Advanced Engineering

Abstract

대기 중의 휘발성유기화합물(VOCs)은 광화학반응을 통해 오존을 생성하고, 2차 미세먼지의 원인 물질로 작용하는 등 심각한 대기 오염을 유발한다. 현재 VOCs 농도 측정에 주로 사용되는 불꽃 이온화검출기(FID, Flame Ionization Detector)는 높은 정확도를 제공하지만, 높은 비용 및 장기 연속 모니터링의 한계로 인해 산업 공정 환경에 적용하기에는 어려움이 있다.

하여, 본 연구에서는 고농도 VOCs가 배출되는 환경에서 안정적이고 장기적인 연속 모니터링이 가능한 센서를 모색하고, 경제성과 내구성을 갖춘 센서들의 성능을 비교 및 분석하고자 하였다. 이를 위해 MOS(Metal Oxide Semiconductor), EC(Electrochemical), PID(Photo Ionization Detector) 센서를 사용하여 FID 분석기와 성능을 비교 분석하였다.

사사

본 연구는 2024년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임 [RS-2024-00420620]

PG-6

실란화된 ZSM-5 제올라이트 촉매에서 Mo 담지 조건과 바인더 함량 최적화 및 성형 형태의 영향

김지연[1], 이중엽[1], 김민채[1], 김민희[1], 백승주[1], 이소정[1], 김도희[2], 전종기[1,*]
국립공주대학교 화학공학부[1]
서울대학교 화학생물공학부[2]

Effect of Mo Loading Conditions, Binder Content, and Shape on Silylated ZSM-5 Catalysts

Jiyeon Kim[1], Jungyeop Lee[1], Minhee Kim[1], Minchae Kim[1], Seungju Baek[1], Sojeong Lee[1], Do Heui Kim[2], Jong-Ki Jeon[1,*]
[1]Dept. of Chemical Engineering, Kongju National University
[2]Dept. of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University

메탄탈수소방향족화 반응(Methane Dehydroaromatization, MDA)은 메탄을 직접 전환하여 고부가가치인 benzene, toluene 및 xylene (BTX)를 합성하는 기술로 전 세계적으로 환경오염에 따른 기후 문제에 중점을 두고 이를 대응하기 위한 탄소 중립의 주요 전략의 일환으로 주목받고 있다. MDA 반응에서 가장 대표적인 NiO-Mo/HZSM-5 촉매가 주로 사용되며 최근 Mo을 담지하는 여러 조건들이 활발히 연구되고 있다. 그러나 Powder-type의 촉매를 상업 규모로 scale-up할 경우 고정층 반응기 내에서 압력 강하가 발생한다. 이러한 문제로 인해 powder-type의 촉매를 성형하는 과정은 필수적이다. 본 연구에서는 회전식 ballmilling 기계의 Mo 담지 조건의 영향을 확인하였다. 또한, powder 촉매를 extrudate와 bead 형태로 성형하는 과정에서 바인더로 사용되는 Kaolin의 함량을 조절하여 압력 강하를 최소화하고자 하였다. 제조한 촉매의 물리화학적 특성은 질소 흡착 실험, NH_3-TPD, 피리딘 FT-IR, TPR, 압축 강도 측정을 통해 분석하였다. MDA 반응은 고정층 반응기에서 수행되었으며, Mo 담지 시간과 속도의 영향, Kaolin 함량과 성형 형태의 영향에 대하여 평가하였다. BTX 수율은 시간과 속도에 대한 유의미한 차이는 없었으나, scale-up시 경제성과 안정성을 고려하여 100 rpm으로 30 min 간 담지한 powder 촉매가 가장 적합했다. 또한 Kaolin의 함량에 따른 BTX 수율에서 유의미한 차이는 없었으나, Kaolin 함량이 높을수록 MDA 반응 후 촉매의 원형을 유지하여 장기간 운전에 유리한 특성이 나타났다. 또한 extrudate 형태보다 bead 형태가 MDA 반응 후 촉매의 원형을 유지하는 경향이 나타났다.

참고문헌

1. Mirshafiee, Karimzadeh et al., "Intelligent Catalyst Shaping: Effect of Binders on the Physicochemical and Catalytic Properties of Zeolite-Based Catalysts," J. Chem. Petrol. Eng., 58(1), 131-147 (2024).

2. Chen, et al., "Dehydro-oligomerization of Methane to Ethylene and Aromatics over Molybdenum/HZSM-5 Catalyst," J. Catal., 157, 190-200 (1995).

3. Kim, S.-Y., Lee, H., Ryu, H.W., Kim, D.-H., "Effect of silica addition on coke formation during propane dehydrogenation over Pt-Sn/Al_2 O_3 catalyst," J. Catal., 207, 51–57 (2001).

PG-7

Bead-type NiO-Mo/HZSM-5 성형 촉매의 전처리가 메탄 탈수소방향족화에 미치는 영향

이중엽, 김민희, 김민채, 김지연, 백승주, 이소정, 김도희[1], 전종기*
국립공주대학교 화학공학부, [1]서울대학교 화학생물공학부

Effect of pre-treatment of Bead-type NiO-Mo/ZSM-5 molding catalysts on methane dehydroaromatization

Jungyeop Lee, Minhee Kim, Minchae Kim, Jiyeon Kim, Seungju Baek, Sojeong Lee, Do Heui Kim[1], Jong-Ki Jeon*
Dept. of Chemical Engineering, Kongju National University
[1]Dept. of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University

메탄 탈수소방향족화(MDA)는 메탄을 직접 변환하여 벤젠, 톨루엔, 자일렌(BTX)을 생산하는 고부가가치 기술이다. 최근 NiO-Mo/ZSM-5 촉매는 MDA 공정에서 가장 유망한 촉매 중 하나로 보고되고 있다. 추가로, 주로 환원성 분위기에서 일어나는 촉매 전처리는 MDA 반응에서의 수율을 결정짓는 주요한 요인 중 하나이다. 본 연구에서는 Bead-type 성형 촉매의 전처리 과정에 초점을 두어, 전처리 가스의 조성과 공간속도, 전처리의 시점이 MDA 반응에 미치는 영향을 조사하였다. 촉매의 물리화학적 특성은 질소 흡착 실험, NH_3-TPD, 피리딘 FT-IR 및 압축 강도 측정을 통해 분석되었다. MDA 반응은 촉매의 활성을 평가하기 위해 고정층 반응기에서 수행되었다.

참고문헌

1. Wang et al., "Dehydrogenation and aromatization of methane under non-oxidizing conditions", Catal. Lett., 21, 35-41 (1993).
2. Nam et al., "Enhanced reactivity and stability in methane dehydroaromatization over Mo/HZSM-5 physically mixed with NiO," Appl. Catal. B, 296, 120377 (2021).
3. Honda et al., “Preparation of highly active binder-added MoO3/HZSM-5 catalyst for the non-oxidative dehydroaromatization of methane”, Appl. Catal. A, 351, 122-130 (2008)

PG-8

실란 처리한 NiO-Mo/ZSM-5 Powder 촉매와 Extrudate 촉매의 재생

백승주[1], 이중엽[1], 김민채[1], 김민희[1], 김지연[1], 이소정[1], 김도희[2], 전종기[1,*]
[1]국립공주대학교 화학공학부
[2]서울대학교 화학생물공학부

Effect of ZSM-5 silanation on methane dehydroaromatization over NiO-Mo/ZSM-5 catalyst

Seungju Baek[1], Jungyeop Lee[1], Minchae Kim[1], Minhee Kim[1], Jiyeon Kim[1], Sojeong Lee[1], Do Heui Kim[2], Jong-Ki Jeon[1,*]
[1]Dept. of Chemical Engineering, Kongju National University
[2]Dept. of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University

온실가스로 인한 환경오염 문제가 심각해짐에 따라 탄소 중립이 전 세계적인 과제로 떠오르고 있다. 이에 따라서 납사 분해 공정(Naphtha Cracking Center, NCC)의 부산물인 메탄을 직접 전환하여 벤젠, 톨루엔, 자일렌(BTX)을 생산하는 고부가가치의 기술인 메탄 탈수소방향족화(Methane Dehydroaromatization, MDA)가 주목받고 있다. 본 연구에서는 MDA 반응에서 주로 사용되는 실란 처리한 NiO-Mo/ZSM-5 촉매의 재생성을 확인한다. powder 형태의 촉매와 유기 바인더와 무기 바인더를 이용한 extrudate 형태의 성형 촉매로 실험을 진행하였다.

실란화합물을 사용하여 촉매의 외부 산점을 제거하고, 몰리브덴을 첨가하여 촉매의 활성점을 높였고, 실란 처리한 NiO-Mo/ZSM-5 촉매를 fixed-bed ractor에 장착하여 MDA 재생 반응을 수행하였다. 촉매의 물리화학적 특성은 N_2-adsorption and desorption, 압축강도, X-ray Diffractometer(XRD), X-ray Photoelectron(XPS), Scanning Electron microscope(SEM), Thermogravimetric Analyzer(TGA)을 통해 분석하였다. 재생을 거듭할수록 구조의 변화와 재생 가능성을 파악하고 비교하기 위해 두 형태의 촉매로 분석을 진행하였다.

참고문헌

1. Kang, N., "EU's New Climate Target: '90% Reduction in Greenhouse Gas Emissions by 2040' – What's at the Core?," SK ecoplant NEWSROOM, ESG Column (2024).

2. Nam, K., Ryu, H. W., Gim, M. Y., and Kim, D. H., "Enhanced Reactivity and Stability in Methane Dehydro-aromatization Over Mo/HZSM-5 Physically Mixed with NiO," Applied Catalysis B: Environmental, 296, 120377 (2021).

PG-9

외부산점 실란화가 NiO-Mo/ZSM-5 촉매의 Methane DehydroAromatization 반응에 미치는 영향

김민채[1], 이중엽[1], 김민희[1], 김지연[1], 백승주[1], 이소정[1], 김도희[2], 전종기[1*]
[1]국립공주대학교 화학공학부, [2]서울대학교 화학생물공학부

Effect of External Acid Point Silanization on Methane DehydroAromatization Reaction of NiO-Mo/ZSM-5 Catalyst

Minchae Kim[1], Jungyeop Lee[1], Minhee Kim[1], Jiyeon Kim[1], Seungju Baek[1], Sojeong Lee[1], Do Heui Kim[2], Jong-Ki Jeon[1*]
[1]Dept. of Chemical Engineering, Kongju National University,
[2]Dept. of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University

전 세계적으로 온실가스에 의한 환경오염 문제가 심화됨에 따라, 탄소중립은 이제 국제 사회가 직면한 핵심 과제로 떠오르고 있다. 이러한 흐름 속에서, 메탄의 탈수소 방향족화 반응을 활용하여 석유화학 산업의 핵심 기초유분인 Benzene, Toluene, Xylene(BTX)을 생산하는 기술이 새로운 주목을 받고 있다. 이 반응에 활용되는 NiO-Mo/ZSM-5 촉매는 코크 생성으로 인한 급격한 비활성화라는 한계를 지닌다. 본 연구에서는 이러한 촉매의 수명을 개선하고자 분자 사이즈가 큰 실란화합물을 사용하여 NiO-Mo/ZSM-5 촉매의 외부 산점을 제거하는 실란화를 진행하고, 실란화 진행 시점을 성형 전 및 성형 후로 달리하여 Bead 및 Extrudate의 성형체 형태로 제조하였다. 제조된 촉매를 질소흡착실험, NH_3-TPD, pyridine FT-IR 및 압축강도 측정을 통해서 촉매의 물리·화학적 특성을 분석하였다. 또한, 2,4,6-trimethylpyridine FT-IR 분석 결과를 통해 외부산점 제거 효과를 확인하였다. 고정층 촉매 반응기에 실란화한 NiO-Mo/ZSM-5를 장착하여 methane dehydroaromatization 반응 활성을 평가하였다.

참고문헌

1. Wang et al. "Dehydrogenation and aromatization of methane under non-oxidizing conditions," Catal. Lett., 21, 35-41 (1993).
2. Liu et al. "Methane dehydroaromatization over Mo/HZSM-5 catalysts in the absence of oxygen: effects of silanation in HZSM-5 zeolite," Catal. Today, 93-95, 65-73 (2004).
3. Nam et al. "Enhanced reactivity and stability in methane dehydroaromatization over Mo/HZSM-5 physically mixed with NiO," Appl. Catal., B, 296, 120377 (2021).

PG-10

$PdO-SnO_2$ 다공성 분말을 활용한 초고속·고감도·고선택성 H_2 가스센서 설계

서정후, 윤성영, 정성용*
국립공주대학교 신소재공학과

Abstract

호기 분석 기반의 질병 진단 기술은 환자의 거부감을 최소화하는 비침습적인 차세대 진단 방법으로 주목받고 있다. H_2는 과민성대장증후군(Irritable Bowel Syndrome, IBS) 질환의 중요한 바이오마커로서 호기에 포함된 H_2 검지할 수 있다면 질병의 조기 진단이 가능하다. 그러나, 실제 호흡으로 방출되는 H_2 농도는 ppm 수준의 극미량이며 다양한 방해가스와 함께 혼재하여 선택적 감지가 어려운 문제가 있다. 본 연구에서는 분무열분해(spray pyrolysis) 공정을 통해 다공성 구형 구조를 갖는 산화주석(SnO_2) 입자에 팔라듐(Pd) 촉매를 균일하게 기능화 한 복합 센서 소재를 설계했다. 다공성의 SnO_2 구조는 가스의 빠른 확산을 위한 경로를 제공하며, PdO 촉매는 H_2의 흡착과 해리를 촉진하여 반응속도와 감도를 극대화 할 수 있다. PdO-SnO_2 센서는 400 °C에서 20 ppm H_2 gas에 대해 4초 이내의 빠른 응답 속도, 높은 감도($S_{Hydrogen}$ = 6.9)를 나타냈으며 주요 방해 가스(Ethanol, Acetone, CH_4, NH_3) 대비 우수한 선택성($S_{Hydrogen}/S_{Interferant}$ = 5.2)을 나타냈다. 본 연구에서 제안된 센서 설계 방식은 초고속, 고감도, 고선택성의 차세대 가스센서 및 전자코 기술에 적용될 것으로 기대된다.

PG-11

메탄 탈수소화 반응용 실란 처리한 NiO-Mo/HZSM-5 Powder 및 Bead 성형 촉매의 재생

이소정[1], 이중엽[1], 김민희[1], 김민채[1], 백승주[1], 김지연[1], 김도희[2], 전종기[1,*]
국립공주대학교 화학공학부[1]
서울대학교 화학생물공학부[2]

Regeneration of Silane-Treated NiO-Mo/HZSM-5 Powder and Bead-Shaped Catalysts for Methane Dehydroaromatization

Sojeong Lee[1], Jungyeop Lee[1], Minhee Kim[1], Minchae Kim[1], Seungju Baek[1], Jiyeon Kim[1], Do Heui Kim[2], Jong-Ki Jeon[1,*]
[1]Dept. of Chemical Engineering, Kongju National University
[2]Dept. of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University

메탄 탈수소화 (MDA)는 메탄을 직접 전환하여 벤젠, 톨루엔, 자일렌 (BTX)을 생산하는 고부가가치 기술이다. Mo/ZSM-5 촉매는 MDA 공정에 가장 널리 적용되는 촉매로 알려져 있으며, 그중에서도 실란 처리한 NiO-Mo/ZSM-5 촉매가 유망한 촉매로 보고되어 있다. Powder 형태의 촉매는 압력강하에 의한 문제가 있어 실제 공정에서는 반드시 성형 촉매를 사용하여야 한다. 또한, 성형 촉매는 재생을 통한 반복적인 반응 환경에 노출되기 때문에, 촉매의 형태 유지력과 압축강도, 그리고 재생성은 공정의 경제성 평가에 매우 중요한 요소이다.

본 연구에서는 실란 처리한 NiO-Mo/ZSM-5를 powder 형태와 bead 성형 형태로 제조하여 재생 특성을 평가하였다. 촉매의 물리·화학적 특성은 N_2 흡착 실험, XRD, XPS, SEM, TGA, 압축강도 측정을 통해 분석하였다. 촉매 형태에 따른 재생 특성을 평가하기 위해 MDA 반응 및 촉매 재생은 총 3rd cycle 진행하였으며, 고정층 반응기에서 수행되었다. Powder 형태의 촉매는 3rd cycle까지 반응이 안정하였으며 BTX 수율이 증가하는 양상을 보였다. Bead 성형 형태의 촉매 또한 3rd cycle까지 반응 안정성을 보였으며 2nd cycle의 BTX 수율이 가장 높게 나타났다.

참고문헌

1. Liu et al. "Methane dehydroaromatization over Mo/HZSM-5 catalysts in the absence of oxygen: effects of silanation in HZSM-5 zeolite," Catal. Today, 93-95, 65-73 (2004).

2. Matus et al. "Deactivation and Regeneration of Mo/ZSM-5 Catalysts for Methane Dehydroaromatization." Eurasian Chem.-Technol. J. 12 (1), 1–8 (2010).

3. Mirshafiee and Karimzadeh. "Intelligent Catalyst Shaping: Effect of Binders on the Physicochemical and Catalytic Properties of Zeolite-Based Catalysts." Journal of Chemical and Petroleum Engineering, 58(1), 131–147 (2024).

4. Nam et al. "Enhanced reactivity and stability in methane dehydroaromatization over Mo/HZSM-5 physically mixed with NiO," Appl. Catal., B, 296, 120377 (2021).

PG-12

Mo/ZSM-5 촉매에서 Mo 담지 조건이 메탄 탈수소 방향족화 반응에 미치는 영향

김민희[1], 이중엽[1], 김민채[1], 김지연[1], 백승주[1], 이소정[1], 김도희[2], 전종기[1,*]
[1]공주대학교 화학공학부
[2]서울대학교 화학생물공학부

The effect of Mo loading over Mo/ZSM-5 catalysts on the methane dehydroaromatization

Minhee Kim[1], Jungyeop Lee[1], Minchae Kim[1], Jiyeon Kim[1], Seungju Baek[1], Sojeong Lee[1], Do Heui Kim[2], Jong-Ki Jeon[1,*]
[1]Dept. of Chemical Engineering, Kongju National University
[2]Dept. of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University

온실가스 감축과 기후 변화 대응을 위한 탄소 중립의 필요성이 강조된 가운데, 메탄 탈수소 방향족화 반응(methane dehydroaromatization, MDA)은 온실 가스의 주요 성분인 메탄을 벤젠(benzene), 톨루엔(toluene), 자일렌(xylene)과 같은 고부가가치 화합물로 전환하는 기술로 주목받고 있다. 본 연구에서는 MDA 공정에서 가장 널리 사용되는 Mo/ZSM-5 촉매를 대상으로 몰리브데넘(Mo)의 담지 방법 및 담지량을 달리하여 촉매를 제조하였다. 이때, rotary evaporator, rotational ball mill, vibration ball mill 을 이용한 각기 다른 담지 방법을 사용하고, Mo의 담지량을 변화시키며 촉매를 제조하였다. 질소흡착실험, temperature-programmed desorption (NH_3-TPD), pyridine FT-IR를 이용하여 촉매의 물리·화학적 특성을 분석하였다. 제조된 촉매를 fixed-bed reactor에 장착하고 MDA 반응실험을 진행하여 최적 촉매를 선정하였다.

참고문헌

1. Cui, Y., Xu, Y., Lu, J., and Zhang, Z.-G., "The effect of zeolite particle size on the activity of Mo/HZSM-5 in non-oxidative methane dehydroaromatization," Appl. Catal. A: Gen., 400, 8-14 (2011).

2. López-Martín, A., Caballero, A., and Colón, G., "Structural and surface considerations on Mo/ZSM-5 systems for methane dehydroaromatization reaction," Mol. Catal., 486, 110787 (2020).

PG-13

해조류 바이오매스와 생분해성 폐플라스틱의 공동수열액화 반응 특성 연구

정승묵[1], 강주원[1], 차재원[1], 전혜린[2], 이도연[2]*
[1]국립한밭대학교 환경공학과, [2]국립한밭대학교 건설환경공학과

Co-hydrothermal Liquefaction of Seaweed Biomass and Biodegradable Waste Plastic

Seungmook Jung[1], Juwon Kang[1], Jaewon Cha[1], Hyerin Jeon[2], Doyeon Lee[2]*
[1]Department of and Environmental Engineering, Hanbat National University,
[2]Department of Civil and Envioronmental Engineering, Hanbat National University

폐플라스틱 처리 문제와 재생 가능한 바이오매스의 활용 가능성은 최근 지속 가능한 에너지 연구 분야에서 중요한 환경·에너지 이슈로 대두되고 있다. 특히, 공수열액화(Co-Hydrothermal Liquefaction, Co-HTL) 공정은 고온·고압의 수열 조건에서 바이오매스와 석유화학계 폐기물을 동시에 처리하여 바이오연료 및 유용 화학물질을 생산할 수 있는 효율적인 열화학적 기술로 주목받고 있다. 그러나 기존 미세조류 기반 HTL 연구에서는 생산된 원유 내 높은 질소 함량, 수율 한계, 그리고 높은 생산 비용 등 기술적 제약이 보고되어 왔다. 이에 본 연구에서는 해양 갈조류 중 하나인 황소다시마 (Bulk Kelp)와 괭생이모자반 (Sargassum Horneri)을 원료로 선정하였으며, 생분해성 플라스틱인 PLA (Polylactic Acid)와의 Co-HTL 반응 특성을 체계적으로 분석하였다. 실험은 TGA (Thermogravimetric Analysis) 분석을 통해 황소다시마와 괭생이모자반 그리고 PLA의 열분해 특성과 주요 분해 온도를 파악하였으며 이를 기반으로 260°C에서 320°C까지의 반응 온도 범위에서 실험을 수행하였다. 단일 원료 조건과 두 가지 혼합 조건(1:3, 3:1, w/w 비율)을 설정하여 반응 온도와 혼합 비율이 생성물 특성에 미치는 영향을 비교하였으며 반응 후 생성물에 대해서는 오일 수율을 산출하고, 원소분석(Elemental Analysis)을 통해 발열량(Higher Heating Value, HHV)을 평가하였다. 또한 FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) 분석을 통해 주요 작용기 변화를 확인하였으며, GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry) 분석을 통해 오일 내 주요 화합물 조성을 파악하였다. 이를 통해 혼합 비율 및 반응 온도 변화가 오일의 수율과 조성에 미치는 영향을 규명하였다. 연구 결과, 황소다시마와 괭생이모자반의 혼합 사용 시 PLA와의 반응 조건에 따라 오일 수율 및 화학적 특성에서 뚜렷한 차이가 나타났으며, 이는 해양 바이오매스와 생분해성 플라스틱의 동시 자원화 가능성을 시사한다. 본 연구는 해조류 기반 폐기물 바이오매스와 지속 가능한 플라스틱 처리 기술의 융합 활용 가능성을 제시함으로써, 청정에너지 생산 및 자원순환형 환경기술 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

사사: This research was supported by the National Research Foundation (NRF) of Korea grant funded by the Korean Government (MSIT) (RS-2025-00556963)

PG-14

In-situ activation of photoelectrochemical performance and high stability of three-dimensional hierarchical BiOBr in bromide electrolyte

Wonjung Choi and Yiseul Park*

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

Photoelectrolysis is being evaluated as promising in various industrial fields, including water purification, oxygen generation, and the production of solar fuels. Among various candidates of photoelectrocatalyst material, BiOBr has attracted significant interest due to its layered structure advantageous for forming an internal electric field that promotes separation of electron-hole pairs and high surface area. However, challenges related to low activity and stability must be addressed for successful commercialization. In this study, we fabricated a three-dimensional hierarchical BiOBr nanoflake array and demonstrated that photoelectrolysis in a bromide electrolyte can significantly in-situ activate the photoelectrochemical performance and stability of 3D hierarchical BiOBr. The current rose by approximately 9 times during the 20 h of photoelectrolysis at 1.4 V vs. Ag/AgCl in a bromide solution, without additional treatment and with no detectable morphological or compositional degradation of BiOBr. In addition, the reactive bromine species produced from the oxidation reaction in BiOBr was utilized for the rhodamine B decomposition, an organic pollutant, while the process was paired with hydrogen evolution (HER) at the cathode. These results demonstrate that BiOBr can be promising for application to a value-added photoelectrochemical redox reaction. Overall, this study highlights the enhanced properties and stability of BiOBr, and it can contribute to the advancement of economical and eco-friendly photoelectrochemical systems and solar fuel generation.

PG-15

Electrocatalytic Reduction of Lignin to Aromatic Compounds and Cyclohexenes

Seoyeon Kim[a], Neha Karanwal[b,c], Noritatsu Tsubaki[d] and Jaehoon Kim[a,b,c]*

[a]School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, 2066, Seobu-Ro, Jangan-Gu, Suwon, Gyeonggi-Do, 16419, Republic of Korea
[b]School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 2066, Seobu-Ro, Jangan-Gu, Suwon, Gyeonggi-Do, 16419, Republic of Korea
[c]SKKU Advanced Institute of Nanotechnology (SAINT), Sungkyunkwan University, 2066, Seobu-Ro, Jangan-Gu, Suwon, Gyeonggi-Do, 16419, Republic of Korea
[d]Department of Applied Chemistry, School of Engineering, University of Toyama, Gofuku 3190, Toyama 930 − 8555, Japan

*Corresponding author: jaehoonkim@skku.edu

The transition from fossil-based feedstocks to renewable, bio-based resources requires efficient routes for producing value-added chemicals from biomass. Electrocatalytic upgrading offers a promising option, enabling selective C−O bond cleavage in lignin-derived structures under comparatively gentle conditions. In this study, a 5 wt% Pd/C catalyst was applied for the hydrogenolysis of lignocellulosic biomass and diaryl ether models. Reactions carried out in $HClO_4$ buffer at 50 mA cm^{-2} and 70 °C led to full conversion of both 4−O−5 and α−O−4 dimers within 90 min, with high yields of the corresponding monomers.
The influence of operational parameters—temperature, solvent type, current density, and reaction duration—was systematically examined using diphenyl ether and phenyl tolyl ether as 4−O−5 analogues, and benzyl phenyl ether as an α−O−4 analogue. Extending this approach to birch wood biomass in 0.5 M acetate buffer at 70 °C afforded lignin-derived phenolic monomers in 19.6 C% yield, with 4-n-propanol syringol representing the most abundant product (41.6% selectivity).

참고문헌

1. Garedew, M., et al. (2020). "Electrocatalytic cleavage of lignin model dimers using ruthenium supported on activated carbon cloth." Sustainable Energy & Fuels 4(3): 1340-1350.
2. Fang, Z., et al. (2022). "Mild, Electroreductive Lignin Cleavage: Optimizing the Depolymerization of Authentic Lignins." ACS Sustainable Chemistry & Engineering 10(23): 7545-7552.

PG-16

저순도 e-메탄의 증기 혼합 연소 시 화학 반응 메커니즘 비교

류익환, 한태훈*
수원대학교 기계공학과, 경기도 화성시 봉담읍 와우안길 17, 18323.

Comparison of chemical kinetic mechanisms for low-purity e-Methane combustion under steam-diluted conditions

Ik-Hwan Ryu, Taehoon Han*
Department of Mechanical Engineering, University of Suwon.

e-메탄(e-methane)은 재생에너지 기반 수소와 이산화탄소로부터 합성된 차세대 청정연료로 CNG 선박, 버스 등, 기존 천연가스 인프라를 활용하면서도 탄소중립 실현에 기여 할 수 있는 대안으로 주목받고 있다. 하지만, e-메탄 제조 과정 중 순도를 높이는 것 또한 많은 에너지를 사용하므로, e-메탄의 정제 과정 없이 바로 연소에 활용하는 방안이 적극적으로 연구되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 수증기, 일산화탄소, 이산화탄소 등 불순물이 포함된 함량에 따라 저순도 e-메탄의 연소 과정을 분석하고, 다양한 키네틱 메커니즘을 적용하여 비교하였다. 연소 과정의 핵심인 점화 지연 시간(ignition delay) 과 층류 화염속도(laminar flame speed)를 주요 지표로 설정하여 수증기 농도 등의 변화에 따른 연소 반응성을 실험값과 비교하여 평가하였다. 연구 결과, 압력이 증가함에 따라 점화 지연이 단축되는 반면, 수증기 희석이 증가할수록 점화 지연은 연장되고 화염속도는 감소하는 경향을 보였다. 이러한 특성은 수증기가 반응 활성 종 농도와 열역학적 조건에 직접적으로 영향을 미치기 때문으로 해석된다. 본 연구로 저순도 e-메탄의 실제 연소 적용 시 수증기 등 불순물 조건이 연소 안정성과 배출 특성에 중요한 변수임을 확인하였으며, 향후 청정 연소 시스템 설계 및 수치 모델 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

사사

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구입니다. (No. RS-2025-02311095)

참고문헌

1. Yu, Y., Guillaume Vanhove, J. F. Griffiths, Solène De Ferrières, and J-F. Pauwels. "Influence of EGR and syngas components on the autoignition of natural gas in a rapid compression machine: A detailed experimental study." *Energy & fuels* 27(7), 3988-3996, (2013).
2. Mohapatra, S., Mohapatro, M. B. R., Pasha, A. A., Alsulami, R. A., Dash, S. K., & Reddy, V. M. "Adaptability of different mechanisms and kinetic study of methane combustion in steam diluted environments" *Scientific Reports*, 12(1), 4577. (2022).

PG-17

Life cycle assessment of e-methane fueled marine powertrain systems

Taegeun Lee, Taehoon Han*

Department of Mechanical Engineering, University of Suwon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do,18323.

e-Methane, a synthesized fuel from renewable hydrogen and carbon dioxide, is of increasing interest as an alternative fuel that can contribute to achieving carbon neutrality while utilizing existing natural gas infrastructure. In particular, the use of green hydrogen and e-methane derived from water and carbon dioxide is emerging in the marine transportation sector. Accordingly, this study investigates the greenhouse gas impact of e-methane fueled marine powertrain systems with green hydrogen process including marine powertrain combustion systems. The first step involves investigating the environmental impact analysis encompassing the catalyst production, water utilization, carbon dioxide capture, and e-methane synthesis. The second step involves quantitative measuring for the environmental impact of a spark ignition-based marine engine operation using e-methane as fuel. The GREET program was utilized for life cycle assessment to calculate greenhouse gases. The study resulted that e-methane can effectively reduce CO_2 emissions when combined with renewable energy and optimized powertrain operations further reduced emissions. This study is expected to provide practical information for planning the energy transition from conventional methane to e-methane with powertrain systems in the marine transportation sector.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. RS-2025-02311095)

References

1. Lee, K., Sun, P., Elgowainy, A., Baek, K. H., and Bobba, P., “Techno-economic and life cycle analysis of synthetic natural gas production from low-carbon H2 and point-source or atmospheric CO2 in the United States” Journal of CO2 utilization, 83, 102791. (2024).
2. Zincir, B. A., and Arslanoglu, Y. “Comparative life cycle assessment of alternative marine fuels”. *Fuel*, 358, 129995. (2024).

PG-18

Lattice Hydroxyl-Driven Mechanism of Zn-gallate-Catalyzed PO/CO_2 Copolymerization

Hye Jeong Joe[1], Seok Ki Kim[1,*]
[1]Department of Energy Systems Research, Ajou University, Suwon 16499, Korea
* Corresponding author: seokki@ajou.ac.kr

Introduction

The sustainable utilization of CO_2 through catalytic transformation into value-added polymers offers a promising route to mitigate carbon emissions and reduce dependence on fossil resources. Zn-gallate has recently emerged as a highly active heterogeneous catalyst for PO/CO_2 copolymerization, yet its mechanistic origins remain unclear. This study integrates density functional theory (DFT) calculations with experimental results to elucidate the active sites, reaction pathways, and rate-determining step (RDS) of Zn-gallate catalysis.

Methods

DFT calculations were conducted using a hydroxylated zinc hydroxide slab model to elucidate the reaction pathways involving lattice OH and surface OH species. For each pathway, reaction intermediates and transition states were optimized, and energy barriers as well as reaction enthalpies were calculated to compare the contributions of the active sites. The rate-determining step (RDS) was identified, and the reactivity differences between the lattice OH and surface OH pathways were quantitatively analyzed.

Results and Discussion

DFT results reveal that lattice hydroxyl groups, rather than surface OH, initiate polymerization via nucleophilic attack on PO to form Zn–alkoxide without additional activation steps. CO_2 insertion into Zn-alkoxide is kinetically accessible and favored under high CO_2 pressure, while the coupling of Zn–carbonate with PO is the RDS (1.56 eV barrier). Experimental trends in product composition under different CO_2 pressures strongly support the computational findings.

Conclusion

This study identifies the lattice hydroxyl origin of activity in Zn-gallate-catalyzed PO/CO_2 copolymerization and clarifies the kinetic bottleneck of the process. These insights provide a molecular-level foundation for designing efficient, low-cost, and scalable catalysts for CO_2 conversion into high-value polymers.

Keywords: Zn-gallate, CO_2 utilization, copolymerization, density functional theory, lattice hydroxyl

PG-19

머신러닝 기반 이산화탄소-메탄올 전환 촉매 조성 최적화

김남규[1], 김석기[1,*]
[1]아주대학교
* Corresponding author: seokki@ajou.ac.kr

서론

이산화탄소(CO_2)의 자원화는 기후변화 대응과 지속가능한 에너지 전환을 위한 핵심 과제이다. 특히 CO_2를 수소화하여 메탄올로 전환하는 반응은, 메탄올이 연료·화학원료·수소저장체로서 활용 가능하다는 점에서 주목받고 있다. 그러나 높은 활성과 선택성을 동시에 달성할 수 있는 촉매 설계는 여전히 도전 과제이다. 전통적인 조성 탐색 방식은 많은 실험 반복이 필요해 시간과 비용 부담이 크다. 이에 본 연구에서는 Cu - Zn - Al 촉매의 조성비 변화에 따른 성능을 머신러닝으로 예측하고, 이를 실험 설계에 적용하여 조성 최적화 가능성을 평가하였다

연구방법

Cu - Zn - Al 3성분 촉매를 대상으로, 각 금속의 몰비를 변화시키며 촉매를 합성하였다. 합성된 촉매는 고정층 반응기에서 CO_2 수소화 반응을 수행하여 CO_2 전환율과 메탄올 선택도를 측정하였다. 수집된 실험 데이터를 표준화(Standardization)한 뒤, Gaussian Process Regression(GPR) 모델을 구축하여 조성 - 성능 상관관계를 학습하였다. 예측 모델은 Bayesian Optimization을 적용하여, 높은 전환율과 선택도가 기대되는 새로운 조성을 제안하였다. 이러한 예측 - 실험 - 재학습 과정을 반복하여 모델의 정확도를 향상시켰다.

결과 및 고찰

모의 분석 결과, Cu - Zn - Al 조성비 변화가 촉매 성능 예측값에 영향을 주는 경향이 확인되었다. 일부 조성은 모델 상에서 높은 CO_2 전환율과 메탄올 선택도를 동시에 나타낼 가능성이 있었으며, Bayesian Optimization은 이러한 영역을 효과적으로 탐색하는 데 기여하였다. 현재 반응기 실험이 초기 단계에서 진행 중이며, 향후 축적되는 실험 데이터를 통해 모델 예측값의 정확성을 검증하고, 예측 - 실험 간의 일치 정도를 분석할 예정이다. 이러한 병행 접근은 실험과 데이터 기반 예측의 상호 보완성을 높이는 동시에, 촉매 탐색 과정의 효율성을 향상시키는 데 기여할 것으로 기대된다.

결론

본 연구에서는 Cu - Zn - Al 촉매 조성 최적화를 목표로 머신러닝 기반 모의 분석을 수행하고, 이를 바탕으로 초기 실험을 시작하였다. Gaussian Process Regression과 Bayesian Optimization을 결합한 방법은 실험 전 단계에서 효율적인 조성 탐색 방향성을 제시하며, 향후 실험 결과를 반영한 반복 학습을 통해 예측 정확도를 지속적으로 향상시킬 수 있다. 본 접근법은 CO_2 전환형 메탄올 합성 촉매 설계의 효율성을 높이고, 개발 기간 단축에 기여할 수 있을 것으로 전망된다.

PG-20

Mesoporous Zeolite Beta Nanosponge with Enhanced Acidity for High-Performance Tributyrin Transesterification

Kyungmin Cho, Jaewhan Lee and Kanghee Cho*
Department of Chemical Engineering, Inha University

The demand for technologies converting waste bio-oils and fats into HEFA biofuels is rapidly rising. Herein, we synthesized a zeolite beta nanosponge using a structure-directing surfactant, featuring a highly mesoporous architecture of ultrathin (~5nm) frameworks. Its catalytic performance was evaluated in the transesterification of tributyrin, a crucial pre-treatment prior to hydroprocessing. The reaction was conducted in a batch reactor at 373K using a 1:60 molar ratio of tributyrin to methanol. Because of the large molecular size of tributyrin, catalysis primarily occurs at acid sites on external surfaces and mesopore walls, rather than within internal micropores. The zeolite beta nanosponge showed a 13.5-fold higher catalytic activity than commercial zeolite beta, and also outperformed Al-MCM-41, a mesoporous material with fewer strong acid sites. Furthermore, the catalyst maintained crystallinity and acidity over five consecutive reaction cycles, demonstrating excellent durability.

References

1. Nygren, E., Aleklett, K., Hook, M., " Aviation fuel and future oil production scenarios, *Energy Policy*, **37**, 4003-4010 (2009).

PG-21

김(*Pyropia* spp.)의 육상 양식을 위한 영양분 물질수지 및 에너지 수지

김승건[1], 박상현[2], 이호원[1], 목영선[1*]

[1]제주대학교 화학공학과, [2]제이케이푸드

*교신저자: smokie@jejunu.ac.kr

최근 김(*Pyropia* spp.)은 K-푸드의 힘입어 웰빙 음식으로 여기지면서 전 세계적으로 각광을 받고 있는 식품중의 하나이다. 특히 김에는 칼슘, 칼륨, 비타민 A, 비타민 B12, 요오드 등 많은 영양소를 함유하고 있어 건강한 식품으로 여겨지고 있다. 김은 수온이 낮은 겨울철(12월~3월)에 한시적으로 생산되는 해조류로 주로 서해 및 남해안에서 주로 생산되고 있다. 하지만 최근 기후변화로 인한 수온 상승과 눈에 잘 보이지 않는 미세플라스틱 등에 의한 해양오염으로 김 생산이 위협을 받고 있다. 본 연구는 김의 실규모의 육상 양식을 위한 기초 자료를 제시하기 위하여 실험실 규모의 양식조를 제작하여 김의 성장에 필요한 대표적인 영양분인 질산성 질소의 수지 및 에너지 수지에 수립하고자 연구를 진행하였다.

PG-22

파이롯 분무건조 공정 기반 다공성 수산화아파타이트 마이크로스피어의 제조 및 콜라겐 생성능 평가

정재인[1], 조중상[1,*]
[1]충북대학교 공업화학과

칼슘 기반 필러(CaHA 필러)는 장기적인 볼륨 유지와 조직 재생 효과로 인해 안면 주름 개선, 연부조직 보충, 피부 재생 등 다양한 미용·의료 분야에서 널리 활용되고 있다. 특히, 칼슘 필러의 핵심 성분인 수산화아파타이트(HAp)는 인체 경조직과 유사한 화학 조성을 가지며, 우수한 생체적합성과 콜라겐 생성 촉진 능력을 보유하고 있어 장기적인 조직 재형성을 유도할 수 있다. 그러나 필러 내 HAp 입자의 크기, 형상 및 기공 구조는 대식세포의 포식작용, 체내 잔존 기간, 조직 재생 효율 등에 직접적으로 영향을 미치므로, 미세구조 제어를 통한 성능 향상이 필수적이다.

본 연구에서는 나노 크기의 막대형 HAp 입자를 분무건조 공정을 이용하여 다공성 HAp 마이크로스피어로 합성하였다. 체내 대식세포의 포식작용을 최소화하기 위해 입자를 40–70μm 크기로 조절하였으며, 소결 온도 변화에 따라 기공 크기와 결정성이 조절됨을 확인하였다. 세포독성 평가 결과, 모든 시료에서 독성이 나타나지 않아 우수한 생체적합성을 입증하였고, 콜라겐 생성능 평가에서는 결정성이 높은 시료에서 더 높은 콜라겐 분비가 관찰되었다.

이러한 결과는 다공성 HAp 마이크로스피어가 골 조직 재생 및 장기 지속형 칼슘 필러의 소재로서 높은 활용 가능성을 지님을 시사한다.

PG-23

Process Understanding of 3D Lattice Structure Fabrication by Metal Binder

H. Cho, J.-H. Ha, J. W. Ko*

Korea Institute of Industrial Technology, Republic of Korea
**jwko@kitech.re.kr*

ABSTRACT

Three-dimensional (3D) lattice structures offer high specific strength with minimal material usage, making them ideal candidates for light-weighting applications in the aerospace and automotive industries. Such lightweight structures contribute significantly to clean production strategies by enhancing energy efficiency and reducing fuel consumption throughout a product's lifecycle. However, the complex geometry of these structures poses manufacturing challenges and high costs when using conventional processes. Additive manufacturing (AM) technologies have emerged as viable alternatives, with Powder Bed Fusion (PBF) processes like Selective Laser Melting (SLM) and Electron Beam Melting (EBM) being widely explored due to their high precision and mechanical performance. Yet, they also present limitations such as the need for support removal, overhang constraints, and residual stress formation due to rapid thermal gradients.

Metal Binder Jetting (MBJ), a sinter-based AM process, is receiving growing attention as a clean and efficient manufacturing route for complex metal structures. It offers key advantages such as lower residual stresses, reduced overhang limitations, and a support-free process, making it particularly suitable for fabricating intricate 3D lattice structures. MBJ also aligns well with clean production principles due to its potential for reduced material waste, lower energy consumption during processing, and minimal need for post-processing like machining or welding.

Despite these advantages, MBJ faces challenges that hinder its industrial adoption—specifically, the low mechanical strength of green parts makes them prone to damage during depowdering, and shape deformation can occur during sintering due to self-weight. In this study, we systematically investigated the fabrication issues of 3D lattice structures via MBJ, focusing on the critical stages of depowdering and sintering. The goal is to optimize the MBJ process for reliable production of lightweight and material-efficient structures, contributing to broader implementation of sustainable manufacturing in clean technology.

KEYWORDS
Additive manufacturing, Metal binder jetting, Lattice structure, Process

PG-24

열수처리를 이용한 폐펄프의 리그닌-셀룰로오스 전환 연구

김성현[1,2], 이철진[2], 이홍식[1*]

[1]한국생산기술연구원, [2]중앙대학교

(leehongshik@kitech.re.kr*)

셀룰로오스는 지구상에서 가장 풍부한 천연 고분자로, 친환경적이고 쉬운 접근성으로 다양한 분야에 활용되고 있다. 현재 산업적으로 사용되는 셀룰로오스는 단독적으로 사용되는 경우도 있지만, 대체로 다른 물질들에 첨가되어 성능을 향상시키는 첨가제로써 큰 역할을 수행하고 있다. 하지만 셀룰로오스는 친수성이 강하고, 분산이 잘 되지 않는 물질로, 성능과 잠재력에 비해 사용되는 곳이 상당히 한정적이다. 이러한 셀룰로오스의 한계를 보완하기 위해 리그닌-셀룰로오스라는 물질이 최근 연구되고 있으며, 이는 리그닌이 셀룰로오스의 결정구조를 안정화시키는 동시에 친수성을 약화시켜 일반 셀룰로오스보다 더 우수한 물성 향상 효과와 호환성을 가지고 있다.

본 연구는 별도의 추가 공정 없이 폐펄프를 열수처리하여 바로 리그닌-셀룰로오스를 만들어내는 것을 목표로 하였다. 펄프는 이미 한 차례 정제가 된 물질로, 대부분 셀룰로오스로 이루어져 있으며, 소량의 리그닌과 헤미셀룰로오스가 함유되어 있다. 사용할 펄프의 함량 분석은 NREL의 바이오매스 함량 분석 연구를 기반으로 하였고, 펄프의 성분 중 헤미셀룰로오스만을 제거하기 위하여 열수처리를 선택하였다. 함량 분석 실험과 열수처리는 실험 환경에 맞추어 최적화를 위해 온도, 반응 시간 등 다양한 조건에서 수행하였다.

PG-25

레이저 쇼크 피닝을 통한 L-DED 316L 스테인리스강의 기계적 특성 및 수소 취성 저항성 향상

하정홍*
한국생산기술연구원 스마트정형공정그룹

Enhancement of Mechanical Properties and Hydrogen Embrittlement Resistance of L-DED 316L Stainless Steel via Laser Shock Peening

Jeonghong Ha*
Smart Forming Process Group, Korea Institue of Industrial Technology (KITECH)

수소 에너지 산업의 확산에 따라, 수소 저장 및 수송용 금속 재료의 기계적 안정성과 수소 취성(Hydrogen Embrittlement, HE) 저항성 확보가 중요한 기술적 과제로 대두되고 있다.[1] 316L 오스테나이트계 스테인리스강은 FCC 결정구조, 낮은 수소 확산 계수, 우수한 내식성 등의 특성으로 인해 수소 환경에 적합한 재료로 평가되나, 상대적으로 낮은 항복강도와 장기 수소 노출 시 HE 민감도가 증가한다는 한계가 존재한다.[2] 레이저 직접 에너지 증착(Laser-Directed Energy Deposition, L-DED)은 고속 열이력과 급냉 효과를 통해 우수한 기계적 강도를 제공할 수 있지만, 그 과정에서 높은 인장 잔류응력과 기공이 유발되어 HE 감수성을 증가시킬 수 있다.[3]

본 연구에서는 L-DED로 제조된 316L 스테인리스강에 다회 통과의 레이저 쇼크 피닝(Laser Shock Peening, LSP)을 적용하여, 표면 미세조직 및 잔류응력을 제어함으로써 기계적 성능 및 수소 취성 저항성을 향상시키고자 하였다. EBSD 분석 결과, LSP 7회 처리 시 평균 결정립 크기는 약 246 μm에서 127 μm로 감소하였고, KAM 평균값은 0.56에서 2.34로 증가하여 전위 밀도 증가와 소성 변형 강화를 확인하였다. 결정립 세립화는 오스테나이트 상 안정성을 향상시켜 변태 마르텐사이트 형성을 억제하고, 수소의 입계 집중을 줄여 HE 저항성 향상에 기여한다.[4] XRD 분석에서는 오스테나이트 상이 유지되었으며, FWHM 증가를 통해 결정립 미세화와 내부 응력 증가를 간접적으로 확인하였다. X선 잔류응력 분석에서는 무처리 시편(LSP X)의 +395.5 MPa 인장 응력이 LSP 7 시편에서는 +129.2 MPa로 완화되었고, 비커스 경도는 표면에서 186.4 HV에서 289.2 HV로 약 55% 증가하였다. 저속 변형률 인장시험(SSRT) 결과, 수소 충전 전후 모두에서 LSP 처리 시편이 무처리 대비 항복강도 및 연신율이 향상되었고, 수소 취성 지수는 LSP X의 36.1%에서 LSP 7의 12.5%로 감소하여 LSP가 HE 억제에 효과적임을 입증하였다.

파면 분석 결과에서도, 무처리 시편에서는 약 184 μm 깊이의 취성 파괴 영역과 다수의 균열이 관찰되었으나, LSP 7 시편에서는 약 42 μm로 감소하고 파괴 형상이 quasi-cleavage로 변화하여 수소 유입 억제 및 균열 발생 저감 효과가 나타났다.

이와 같이, 본 연구는 LSP가 L-DED 316L 스테인리스강의 미세조직, 잔류응력 및 수소 취성 거동을 제어하여 기계적 성능과 HE 저항성을 동시에 향상시킬 수 있는 유효한 후처리 기술임을 실험적으로 검증하였다.

참고문헌

1. Niaz, S. et al., “Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives,” Renew. Sustain. Energy Rev., 50, 457–469 (2015).

2. Bertsch, K. et al., “Hydrogen embrittlement of additively manufactured austenitic stainless steel 316L,” Corros. Sci., 192, 109790 (2021).

3. Singh, S.N. and Deoghare, A.B., “Laser shock peening of L-DED and PBF AM parts: A review,” Metals Mater. Int., 29, 1563–1585 (2023).

4. Mirzadeh, H. and Najafizadeh, A., “Correlation between processing and martensite in AISI 301,” Mater. Charact., 59, 1650–1654 (2008).

PG-26

Surface and Pore Modification of Activated Carbon Using HNO_3 and H_2O_2 for Regenerable VOC Adsorbents

방나현, 김수한*
한국생산기술연구원

Volatile organic compound (VOC) are hazardous air pollutants that pose significant threats to human health and the environment. Activated carbon (AC) is widely used for VOC removal due to its high surface area and cost-effectiveness. However, desorption is often difficult because of capillary condensation within micropores and the hydrophilicity of the pore surface, which hinders regeneration. To address this issue, AC will be treated with nitric acid (HNO_3) and hydrogen peroxide (H_2O_2) to enlarge pore size, and to modify surface more hydrophilic.characteristics toward greater hydrophobicity, facilitating more efficient desorption. Structural and chemical changes will be analyzed using Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area analysis and Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR). A fixed-concentration VOC stream was continuously fed to the adsorbent to determine the amount of VOC adsorbed in the activated carbon (AC). The desorption amount was calculated by analyzing the flow rate and concentration of the desorbed gas. The effect of acid treatment on the ratio of desorption to adsorption capacity of AC was investigated.

PG-27

CP Ti-WC 복합재 레이저 클래딩 하드페이싱의 미세조직 및 기계적 특성 분석

하정홍*
한국생산기술연구원 스마트정형공정그룹

Analysis of Microstructural and Mechanical Properties of CP Ti-WC Composite Laser Cladding Hardfacing

Jeonghong Ha*
Smart Forming Process Group, Korea Institue of Industrial Technology (KITECH)

상업용 순수 티타늄(Commercially Pure Titanium, CP Ti)은 우수한 내식성, 생체적합성, 비강도(specific strength) 등의 특성으로 인해 항공우주, 의료 임플란트, 화학 플랜트 등 다양한 산업 분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 그러나 낮은 경도와 제한적인 내마모성으로 인해 고하중 또는 마찰이 빈번한 환경에서는 표면 손상과 피로 파손에 취약하다. 이러한 한계를 극복하기 위해 금속 매트릭스 복합재(Metal Matrix Composite, MMC) 기술이 주목받고 있으며, 특히 높은 경도와 강성을 가지는 텅스텐 카바이드(WC)를 첨가하여 기계적 성능을 보완하는 연구가 활발하다. 본 연구에서는 CP Ti(Grade 2) 기판 위에 CP Ti 분말과 WC 분말을 두 개의 분말 호퍼를 통해 동시 공급하는 직접 에너지 융착(Directed Energy Deposition, DED) 기반 레이저 클래딩 하드페이싱 공정을 수행하였다. 레이저 출력, 스캔 속도, 분말 공급량, 혼합 비율 등 주요 공정 변수를 정밀하게 제어하였으며, 특히 체적 기반 물리 모델을 적용하여 희석률(dilution ratio)을 예측하였다. 해당 모델은 CP Ti와 WC 간의 밀도 차이를 고려해 질량 공급량을 체적 비율로 변환하고, 조사 면적 및 용융 깊이에 기반하여 기판 용융량을 산출함으로써 조건별 희석률 변화를 사전에 예측할 수 있도록 구성되었다. 제작된 코팅 시편은 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM/EDS), 전자후방산란회절(EBSD)을 이용하여 미세조직과 강화상 분포를 분석하였다. 비커스 경도 시험 및 볼 온 디스크(Ball-on-Disk) 마모 시험을 통해 기계적 성능을 평가하였으며, WC 함량 증가에 따라 기지 내 상변화 및 강화상 분포가 뚜렷하게 변화하고, 경도와 내마모성이 향상되는 경향을 확인하였다. 본 연구는 CP Ti-WC 복합재 하드페이싱에서 희석률 예측 모델을 활용하여 공정-미세조직-기계적 특성 간의 상관성을 규명한 것으로, 향후 공정 최적화와 고성능 표면 개질 기술 개발에 기초 자료를 제공할 수 있다.

참고문헌

1. Chen, J., et al., “Microstructure and wear resistance of laser-clad Ti–WC composite coatings,” Surf. Coat. Technol., 206, 1915–1922 (2011).

2. Hao, Y., et al., “Laser cladding of titanium matrix composites reinforced by in situ synthesized TiC and WC particles,” Mater. Sci. Eng. A, 528, 3435–3442 (2011).

3. Zhou, S., et al., “Influence of WC content on microstructure and wear resistance of Ti-based composite coatings prepared by laser cladding,” Opt. Laser Technol., 107, 210–218 (2018).

4. Mirzadeh, H. and Najafizadeh, A., “Correlation between processing and martensite in AISI 301,” Mater. Charact., 59, 1650–1654 (2008).

PG-28

Quantitative Evaluation of CO_2 Release from Carbonate-Based Reactions under High-Temperature Hydrothermal Conditions

Ji Sun Lim[1,2], Sung Hyun Kim[1,3], Gun Woo Shin[1,2], Jaehoon Kim[2,4,5], Chul-Jin Lee[3], Hong-shik Lee[1*]

[1]Low-Carbon Transition R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology
[2]School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University
[3]Department of Chemical Engineering, Chung-Ang University
[4]School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University
[5]SKKU Advanced Institute of Nano Technology, Sungkyunkwan University

In water-based CO_2 absorption systems, stable storage and controlled release of absorbed CO_2 are critical to absorbent regeneration efficiency and overall process performance [1]. CO_2 release efficiency directly influences absorbent design and operating conditions optimization, requiring a quantitative understanding of its behavior [2]. High-temperature thermal decomposition and hydrothermal reactions of carbonates are fundamental to understanding CO_2 release mechanisms and provide essential data for designing high-temperature reaction systems. Siriwardane et al. [3] reported that Na_2CO_3 releases CO_2 through thermal decomposition or reaction with water vapor at elevated temperatures, and that both decomposition rate and CO_2 generation increase with temperature. The major reaction mechanisms expected in such high-temperature carbonate reactions are as follows:

$$Na_2CO_3(aq) + H_2O(l) \rightarrow 2NaOH(aq) + CO_2(g)$$

$$2NaHCO_3(aq) \rightarrow Na_2CO_3(aq) + CO_2(g) + H_2O(l)$$

In this study, CO_2 release from carbonates (e.g., Na_2CO_3) reacting with water under high-temperature molten salt conditions was quantified by varying reaction time. Residual carbonate concentrations before and after reaction were analyzed using a potentiometric titrator to determine conversion rates, and CO_2 generation (moles and mass) was calculated as:

$$m_{CO_2}(g) = (C_0 - C_T) \times V \times a \times \frac{M_{CO_2}}{M_{carbonate}}$$

C_0 and C_t are the initial and post-reaction carbonate concentrations (mg/L), V is solution volume (L), M_{CO_2} and $M_{carbonate}$ are molecular weights, and a is the molar ratio coefficient. This method provides a basis for evaluating CO_2 release behavior in high-temperature carbonate reactions and can support CO_2 control strategies in thermochemical systems.

References

1. Peu S.D., Das A., Hossain M.S., Akanda M.A.M., Rahman M., Miah M.N., Das B.K., Islam A.R.M.T., and Salah M.M., "A Comprehensive Review on Recent Advancements in Absorption-Based Post Combustion Carbon Capture Technologies to Obtain a Sustainable Energy Sector with Clean Environment," Sustainability., **15**(7), 5827 (2023).
2. Obi D., Onyekuru S., and Orga A., "Recent Material Advances in Carbon Dioxide (CO_2) Capture from Power Plant Flue Gases: Toward Achieving Net Zero Emissions," Energy Sci. Eng., 13, 980-994 (2025).
3. Siriwardane R.V., Poston J.A., Robinson C., and Simonyi T., "Effect of Additives on Decomposition of Sodium Carbonate: Precombustion CO_2 Capture Sorbent Regeneration," Energy & Fuels., 25, 1284-1293 (2011).

PG-29

Effects of Different Humectants on Binder Properties for Additive Manufacturing of Metal Powders by Binder Jetting Technique

Tran Thi Yen[1], Min A Bae[1,2], and Jae Ho Baek[1 *]

[1]Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan 44413, Republic of Korea, [2]School of Materials Science and Engineering, Pusan University, Busan 46241, Republic of Korea

Abstract

Binder jetting is an additive manufacturing process in which the liquid binder is deposited onto powder layer by layer to form the desired objects. The binder formulation has a significant influence on the printability and qualities of the printed parts. In this study, we focus on investigating the impact of commonly used humectants (e.g., glycerol, D-sorbitol, and 1,4-butanediol), one of the important components of water-based binder system, on the characteristics of binders and the mechanical properties of the green bodies. The humectant included binders were assessed in terms of viscosity, surface tension, evaporation rate, the binding performance toward metal powder via compressive strength of the green parts, and the jetting ability test. The results showed that the presence of humectants in the binder formula slightly increases the viscosity and reduces the surface tension of the liquid binder compared to the binder without humectants. Among all the tested humectants, the green part made with liquid binder containing D-sorbitol shows the highest compressive strength. Although the adhesion capability to metal powder is weaker than that of the reference sample to some extent, the jetting process is observed to be smoother and easier with humectant inclusion in the binder.

PG-30

Cultivation optimization of *Bacillus spp.*: Strain Selection and RSM-based Medium Optimization for Hair-Loss Applications

Kyeongju Kang[1], Hyeonseon Lee[1], Doyeon Kim[2], Jaehoon Cho[1], Woo-Shik Shin[3,*]

[1]Low-carbon Transition R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Cheonan, 31056, Republic of Korea
[2]Green Circulation R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Cheonan, 31056, Republic of Korea
[3]Regional Industrial Innovation Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Cheonan, 31056, Republic of Korea

The objective of this study was to establish an optimized flask cultivation process for Bacillus spp. strains with potential application in hair loss treatment. To this end, a sequential strain screening approach was performed, resulting in the selection of a candidate exhibiting approximately 1.3-fold higher cell growth compared to the parental strain. Subsequent flask culture optimization identified an effective process consisting of an initial 24-h growth phase, followed by an 8-h cell activation stage, and an additional 18–24 h cultivation period to maximize biomass accumulation. Building upon these findings, a response surface methodology (RSM) experiment was conducted to fine-tune the concentrations of glucose, tryptone, yeast extract, and NaCl in a complex medium. This optimization led to the identification of a medium composition that significantly enhanced cell growth. The final process achieved more than a fourfold increase in biomass yield compared to the original baseline conditions. These results demonstrate the feasibility of applying systematic strain selection and medium optimization to develop a robust and scalable Bacillus spp. production platform. Such an approach provides a promising foundation for industrial-scale production of Bacillus-based therapeutics for alopecia treatment, potentially improving the consistency, efficiency, and cost-effectiveness of future commercial applications.

Key words
hair loss treatment, *Bacillus spp*, Response surface methodology, flask culture

Funding
This work was supported by Regional Innovation Leading Company Fostering (R&D) Program (S3452042) funded by the Ministry of SMEs & Startups (South Korea).

PG-31

Optimized Alkyl Ester Derivatives of Protocatechuic Acid Suppress TNF-α and LPS-Mediated Inflammation in HaCaT Keratinocytes

Woo-Shik Shin[1], Dong Young Kang[2], Kyoung-Jin Jang[2*], Jaehoon Cho[3,*]

[1]Regional Industrial Innovation Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Cheonan, 31056, Republic of Korea
[2]Department of Integrative Biological Sciences and Industry, College of Life Science, Sejong University, Seoul 05006, Republic of Korea
[3]Low-carbon Transition R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Cheonan, 31056, Republic of Korea

Abstract

The skin serves as a primary barrier against pathogens and environmental stressors, and dysregulated inflammation contributes to chronic diseases such as psoriasis, atopic dermatitis, and melanoma. Protocatechuic acid (PCA), a natural phenolic compound, has antioxidant and anti-inflammatory properties, yet its therapeutic efficacy remains limited, requiring structural modification. This study investigated the anti-inflammatory efficacy of alkyl ester-conjugated PCA derivatives (PAEs) in TNF-α- and lipopolysaccharide (LPS)-stimulated HaCaT keratinocytes. PAEs were synthesized via Steglich esterification and structurally confirmed by ^{1}H NMR. Cytotoxicity was evaluated using MTT assays, while IL-8 levels were quantified by ELISA. Western blotting and quantitative PCR were used to examine NF-κB and TLR4 signaling and proinflammatory cytokine expression. PAE-5, PAE-6, and PAE-7 significantly suppressed IL-8, IL-6, IL-1β, and TNF-α expression at lower concentrations than unmodified PCA, with minimal cytotoxicity. In contrast, PAE-12 showed reduced efficacy despite higher hydrophobicity, indicating that excessive alkyl chain length impairs bioactivity. Mechanistic studies demonstrated that PAEs attenuated LPS-induced inflammation by inhibiting TLR4-mediated NF-κB activation. These findings highlight that PCA alkyl ester derivatives with optimized alkyl chain lengths are potent, low-toxicity anti-inflammatory candidates. Among them, PAE-5, PAE-6, and PAE-7 are particularly promising as cosmeceutical ingredients for treating inflammatory skin disorders.

References

1. Kakkar, S., and Bais, S., "A Review of Protocatechuic Acid and Its Pharmacological Potential," ISRN Pharmacology, 2014, 952943 (2014).
2. Kaewmool, C., Boonnate, P., and Pannangpetch, P., "Protocatechuic Acid Attenuates LPS-Induced Inflammation in BV2 Microglial Cells via SIRT1/NF-κB Signaling," Inflammopharmacology, 28(6), 1467-1477 (2020).

PG-32

지속 가능한 CMP 공정을 위한 BTA 대체 Slurry 개발

이준희[1], 임지혜[1], 정주현[1], 김정철[1*]
국립한밭대학교 화학생명공학과[1]

Development of BTA Alternative Slurry for Sustainable CMP Process

Junhui Lee[1], Jihye Lim[1], Juhyun Jeong[1], Jeong-Chul Kim[1*]
Department of Chemical and Biological Engineering, Hanbat National University[1]

초록

화학적·기계적 연마(Chemical·Mechanical Polishing, CMP)는 연마 대상 표면에 화학 반응과 기계적 연마를 동시에 적용하여 표면을 평탄화하는 방법이다. CMP 공정은 극도로 높은 평탄도를 얻을 수 있기 때문에 최근 주목받는 Cu 하이브리드 본딩 기술에서 칩의 평탄한 표면을 얻기 위해 빠질 수 없는 공정이다. 한편, CMP 공정에서 필수적으로 사용하는 CMP Slurry에는 다양한 화학 첨가제가 들어간다. 이 중 구리 부식 방지제로 자주 쓰이는 벤조트리아졸 (Benzotriazole, BTA)은 환경 및 인간에게 잠재적인 독성을 나타낸다는 문제점을 가지고 있다[1]. 따라서, 지속 가능한 기술 발전을 위해서는 BTA를 적절하게 대체할 수 있는 물질을 찾아야 한다.

본 연구에서는 BTA를 대체할 수 있는 친환경 구리 부식 방지제를 조사하였다. 그 후 공통으로 사용할 CMP Slurry base를 제조하고, 선정한 부식 방지제들을 각각 첨가하여 여러 종류의 CMP Slurry sample을 만들어 연마 성능 테스트를 진행하였다. 본 연구를 통해 기존 대비 친환경적인 CMP 공정을 진행할 수 있을 것으로 예상하며, 반도체 시장의 지속 가능한 발전에 보탬이 될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1.PAP, Sabolc, et al. ,“Removal of benzotriazole derivatives by biochar: potential environmental applications.”, Environmental Pollution, 334, 122205 (2023).

PG-33

Ammonia adsorption-desorption performance of metal oxide supported $MgCl_2$

HyeokSang Ryu[1,2], HeeSu Kim[1], Jung-Ho Jae[2 *] and Dong-Ha Lim[1 *]
Green Materials & Process R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan, Korea[1]
Division of Chemical and Biomolecular Engineering, Pusan National University, Korea[2]

Magnesium chloride ($MgCl_2$), also known as magnesium halide, is a material that stands out among many NH_3 chemical adsorbents due to its relatively weak adsorption binding force and excellent regeneration performance. It can be used as an economical material for separating ammonia in ammonia decomposition hydrogen processes and Haber–Bosch process. However, $MgCl_2$ has a structure that is highly sensitive to moisture and easily forms hydrates. In addition, the low specific surface area makes ammonia binding difficult, making it difficult to apply in industry.

The aim of this study is to develop an adsorbent based on an oxide support using impregnation, in order to overcome the limitations of halide structures, such as moisture sensitivity and low surface area. $MgCl_2$ was impregnated into oxide supports to solve the problems of insufficient surface area and conversion to hydrate form. Al_2O_3, TiO_2, and ZrO_2 were impregnated and tested to find the optimal material, and their performance was compared. The aim of this comparison is to select the most suitable support material, due to the fact that the performance of the manufactured adsorbents is expected to be different depending on the acid-base ratio of the support surfaces. The developed adsorbents were evaluated for their basic structure and performance using BET, TPD, O2-Chemisorption, XRD, etc., and the most suitable ammonia adsorbent material was selected through breakthrough experiments under rapid pressure swing adsorption (PSA).

Acknowledgements

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government (MOTIE).

References

1. Tokushige, M., Fujisawa, R., Aika, K., and Ryu, J., "Pressure Swing Absorption and Desorption of Ammonia in Calcium Halide Solid Mixtures," ACS Omega, 10, 3709-3717 (2025).
2. Aristizabal-González, C., Muñoz-Senmache, J. C., Prerna, Siepmann, J. I., Tsapatsis, M., and Hernández-Maldonado, A. J., "Ammonia Adsorption at High Temperature and Pressure Using Sodium Containing Aluminosilicates: Selectivity over Nitrogen and Multicycle Working Capacities," Ind. Eng. Chem. Res., 64, 4027-4039 (2025).

청정융합
(포스터발표 I)

2025년 9월 25일(목) 09:00~11:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비

PD-1

리튬 회수 공정 중 발생하는 슬러지를 활용한 지오폴리머 제조

권동혁[1], 설길홍[2], 최궁원[2], 전병훈[2], 안용태[3*]
[1]경기대학교 환경에너지공학과, [2]한양대학교 자원환경공학과, [3]경기대학교 사회에너지시스템공학과

Geopolymer Production Using Sludge Generated from the Lithium Recovery Process

Donghyeok Kwon[1], Kil-hong Seol[2], Kung-Won Choi[2], Byong-Hun Jeon[2], Yongtae Ahn[3*]
[1]Department of Enviroment Energy Engineering, Kyonggi University, [2]Department of Earth Resoures and Environmental Engineering, [3]Department of Civil & Energy System Engineering, Kyonggi University

리튬은 2차 전지와 에너지 저장 장치 산업의 핵심 원소로, 전 세계적인 수요 증가에 따라 리튬 회수 공정이 활발히 확대되고 있다. 이 과정에서 발생하는 부산물인 LS(Lithium Sludge)는 SiO_2, Al_2O_5, CaO, Fe_2O_3 등 지오폴리머 반응의 주요 성분을 함유하고 있으며, 알칼리 활성화 조건에서 결합재로 전환될 잠재력을 지닌다 [1][2]. 지오폴리머 기술은 시멘트를 대체할 수 있는 무소성 친환경 결합재로서, 제조 시 온실가스 배출과 에너지 소비를 현저히 줄일 수 있다[1][2]. 실험에서는 정해진 배합비에 맞춰 WAS(wt 50%)와 FA(wt 50%) 및 alkali solution(A/B 0.3, 0.5, 0.6)을 계량하고, WAS와 binder를 건비빔한 뒤 alkali 용액을 부어 잘 혼합하였다. 이후 배합물을 몰드에 넣고 진동시켜 기포를 최대한 제거하였으며, 시편을 air(23℃, RH40%), oven(70℃)에 7일간 양생하였다. 양생 후 시편에 대해 압축강도 시험을 실시하고, SEM, XRF, 용출 특성 등을 평가하였다. 알칼리 활성화제를 사용하여 제작한 시편의 압축감도 시험 결과를 살펴보면 평균 압축강도는 조건에 따라 3.97 ~ 26.44 MPa 범위를 나타냈다. Oven에 양생한 시편은 24.59 MPa와 26.44 MPa의 높은 값을 기록하여 KS 기준을 충족하고 구조용 경량골재 수준의 성능을 확보하였다, 반면 Air에 양생한 시편은 3.97 MPa로 낮은 성능을 보였는데, 이는 혼합 비율과 양생 조건에 따른 차이로 해석된다. 이러한 결과는 LS의 잠재적인 강도 발현 가능성을 보여주는 지표가 될 수 있다 [3][4]. 무소성 방식은 소성 공정에서 요구되는 900~1100℃의 고온 열처리 단계를 생략함으로써, 에너지 소비를 60~75% 절감할 수 있으며, 이에 따라 CO_2 배출량도 40~60% 감소하는 것으로 보고되어 있다 [5]. 이러한 절감 효과는 알칼리 활성화제를 적용한 사례에서 확인된 강도 수준을 고려할 때, 동일 성능 대비 환경 부담을 크게 감소 시킬 수 있는 가능성을 시사한다.

참고문헌

1. Khair, S. et al., “Evaluating Lithium Slag for Geopolymer Concrete: A Review of Its Properties and Sustainable Construction Applications,” Case Studies in Construction Materials, 20, e02822 (2024).
2. Gou, H. et al., “A Review on Cementitious and Geopolymer Composites with Lithium Slag Incorporation,” Materials, 17(1), 142 (2024).
3. Luo, Q. et al., “Lithium Slag-Based Geopolymer Synthesized with Hybrid Solid Activators,” Construction and Building Materials, 365, 130070 (2023).
4. Li, X. et al., “Review: The Formation, Characteristics, and Resource Utilization of Lithium Slag,” Construction and Building Materials, 406, 134273 (2024).
5. Zhang, H. et al., “Alkali-Fused Lithium Slag as a Substitute for Slag in One-Part Geopolymers: Mechanism and Performance,” Construction and Building Materials, 422, 133953 (2025).

PD-2

Cloning, overexpression, and purification of putative 5-aminolevulinate CoA ligase from *Streptomyces nodosus* subsp. *asukaensis*

Putri Hanna Kristian, Chang Joon Kim
Department of Chemical Engineering and RIGET, Gyeongsang National University

Numerous secondary metabolites exhibit pharmaceutically biological activities and contain the C_5N unit, 2-amino-3-hydroxycyclopent-2-enone. Research has demonstrated that the formation of C_5N and its incorporation into the core structure of antibiotics are facilitated by three key enzymes: cyclizing 5-aminolevulinate synthase, amide synthase and aminolevulinate. It is hypothesized that genes (*AsuD1, D2, and D3*) responsible for these functions are present in the asukamycin biosynthetic gene cluster of *Streptomyces nodosus* subsp. *asukaensis.* [1]. Our primary objective is to elucidate the function of putative novel genes encoding C_5N of asukamycin. This study focused on producing a high yield of recombinant protein by overexpressing *asuD3* (putative ALA-CoA ligase) in *Escherichia coli*. The *AsuD3* was amplified via PCR using the genome of *Streptomyces nodosus* subsp. *asukaensis* as a template. The amplified template was initially cloned to T-blunt vector, followed by transformation into *E. coli* DH5α for plasmid propagation. The authenticity of the cloned gene was verified through sequencing, after which it was subcloned into the pET6xHN-N expression vector using PstI and HindIII restriction sites. The ligated construct was transformed into *Escherichia coli* BL21(DE3) competent cells. Protein expressions were induced with isopropyl β-D-1 thiogalactopyranoside (IPTG), and the effects of different IPTG concentrations (0,1-1,0 mM), incubation temperature (16°C, 28°C, 37°C) and growth media (LB, YTG, TB) and expression levels were analyzed using 12% SDS-PAGE. The purification of the protein was achieved via Ni-NTA affinity chromatography from cell lysate. The results demonstrated that the expression levels varied depending on IPTG concentration, incubation temperature, and growth medium, with optimal expression observed in YTG medium incubated at 16°C induced with 0.1 mM IPTG concentration. The optimally expressed protein was successfully purified, exhibiting molecular weight of approximately 50 kDa.

References

1. M. Petricek, K. Petrickova, L. Havlicek, and J. Felsberg, J. Bacteriol. 188(14), 5113 (2006).

PD-3

광촉매 암모니아 생산율 증가를 위한 아르곤 제트 플라즈마 개질 TiO_2

강태이[1], 고윤서[1], 백승우[1], 김연화[1], 종초은[1,2*], 장 민[1,2]

[1]광운대학교 환경공학과, [2]플라즈마바이오연구센터

Argon jet plasma modification of TiO_2 for increased photocatalytic ammonia production

Tae-I Kang[1], Yunseo Ko[1], Seungwoo Baek[1], Yeonhwa Kim[1], Choe Earn Choong[1,2*] and Min Jang[1,2]

[1]Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University, [2]Plasma Bioscience Research Center, Kwangwoon University

The ammonia production by the Haber-Bosch process poses significant environmental problems, including high carbon dioxide emissions and eutrophication. Alternatively, photocatalytic ammonia production using light and a photocatalyst is more sustainable compared to the conventional Haber-Bosch process. In this study, TiO_2 was modified using an argon (Ar) jet plasma system to enhance photocatalytic ammonia production. As a result, the photocatalytic ammonium production increases with the increase of Ar-jet plasma treatment time on TiO_2. Compared to pristine TiO_2 (1162.4 mg/L/g/h), 30-minute Ar jet plasma-treated TiO_2 (P25/30) achieved 6333.6 mg/L/g/h. However, as the photocatalytic ammonium production performace retarted when the Ar plasma jet treatment exceeded 30 minutes. In the ESR analysis, the unpaired electrons' peak intensity increases with increasing Ar plasma treatment time, indicating the formation of defects via Ar jet plasma treatment on TiO_2. In addition, the unpaired electrons peak signal reduced at 45 min of Ar plasma treatment on TiO_2, revealing that the excess of Ar jet plasma treatment could result in a reduction of defect state and an adverse effect for photocatalytic ammonium production. This study on Ar plasma treatment time demonstrates that an appropriate Ar plasma treatment effectively modulates the electronic and structural properties of TiO_2 to enhance photocatalytic ammonia production. In particular, P25/P30 was identified as the most efficient catalyst, which highlights the importance of controlled plasma treatment in photocatalytic defect engineering.

Reference

1. Swe Jyan Teh, Choe Earn Choong, Eun Ha Choi, Yeomin Yoon, Min Jang, “Ru-doped Aurivillius phase perovskites $Bi_4Ti_3O_{12}$ for boosting photo-redox of N_2 in photocatalytic nitrogen fixation”, *Appl. Surf. Sci.,* **684** 161890 (2024).

2. Yeonhwa Kim, Swe Jyan Teh, Choe Earn Choong, Eun Ha Choi, Yeomin Yoon, Min Jang, “Unveiling the Overlooked Role of Oxygen in Nitrogen Oxidation Reaction for Enhanced Photocatalytic Ammonium Production over TiO_2: Mechanism and Pilot-scale system studies”, Appl. Catal., B (2025)

PD-4

In Situ Formed Sulfide–Mediated Aging of Microplastics and Its Impact on the Removal of Heavy Metals in Anaerobic Digestion

Jihee Kim[1], Kyungjin Cho[2], and Eun-Ju Kim[1*]

[1]Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Republic of Korea, [2]Center for Water Cycle Research, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul 02792, Republic of Korea

Microplastics (MPs) entering wastewater treatment plants accumulate in sludge and are subsequently introduced into anaerobic digesters, a key sludge treatment process. However, little is known about how MPs undergo transformation during anaerobic digestion (AD). This study investigated the mechanism underlying the aging of polystyrene (PS) MPs in AD and its effect on heavy metal adsorption. In the AD batches containing an initial sulfate concentration of 5.1 mM, significant sulfate reduction (96.1 %) was observed, with reduced sulfur species accounting for 74 % of the total sulfur species deposited on the PS surface, as revealed by X-ray photoelectron spectroscopy. A positive correlation between sulfide formation and the selective proliferation of sulfur-reducing bacteria, particularly *Desulfovibrio aminophilus*, indicated the involvement of microorganisms in sulfur aging. Additionally, isothermal titration calorimetry results showed that sulfur-aged PS had higher binding constants for Pb^{2+} and Cu^{2+} compared to pristine PS, due to the presence of sulfur-containing functional groups and a more negative surface charge. These findings provide valuable insights into the fate of MPs during the sludge treatment and their potential environmental impacts.

PD-5

Optimizing Ce/Al Ratio for enhanced catalytic performance in the synergistic coupling of DRM and RWGS

Jong-Hoon Han[1], Beom-Jun Kim[1], Ho-Ryong Park[1], Su-jin Ryu[1], and Hyun-Seog Roh[1*]
Yonsei University[1]

Ce-doped Ni-Mg-Al catalysts (NMCA) were developed to investigate the effect of Ce:Al ratio on the synergistic coupling of dry reforming of methane (DRM) and reverse water-gas shift (RWGS) reactions (SCDR). Our previous studies demonstrated that oxygen storage capacity (OSC) positively influences SCDR performance [1, 2]. NMCA catalysts with varying Ce:Al ratios (0:10, 2:8, 4:6, and 8:2) were characterized by BET, XRD, XPS, H_2-TPR, and Raman spectroscopy to examine catalyst physicochemical properties and catalytic performance. Among the prepared catalysts, NMCA2 exhibited superior catalytic activity. The performance was attributed to the maximized formation of the Ni–O–Ce interface, increasing OSC, and the enhanced Ni reducibility, leading to a large number of active sites. Additionally, the catalyst maintained its performance during a 100 hour stability test at 700 ºC under a gas hourly space velocity (GHSV) of 600,000 mL/g·h.

References

1. Park, H.-R., Kim, B.-J., Ryu, S.-J., Jeon, Y., Lee, S. S. and Roh, H.-S., "Super-dry reforming of methane over surface oxygen mobility enhanced Ni/MgO-Ce/SBA-15 catalysts," *Catal. Today.*, 453, 115257 (2025).
2. Kim, B.-J., Park, H.-R., Ryu, S.-J., Jeon, B.-H. and Roh, H.-S, "CO_2-intensified dry reforming of methane over oxygen-defective Ni-CeO_2 catalysts: Synergistic coupling with reverse water-gas shift reaction," *Chem. Eng. J.*, 505, 159299 (2025).

PD-6

피셔-트롭쉬 합성에서 가솔린 범위 가지형 탄화수소 생산을 위한 코발트 나노입자 담지 제올라이트 나노스폰지 촉매 개발

김진태[a], 배대영[a], 조강희[a]*, 김정철[b]*
Jintae Kim[a], Daeyoung Bae[a], Kanghee Cho[a]*, Jeong-Chul Kim[b]*
[a]인하대학교 화학·화학공학 융합 전공
[b]국립한밭대학교 화학생명공학과

본 연구에서는 제올라이트 구조 유도형 계면활성제를 이용해 균일한 크기(~4 nm)의 메조기공과 얇은 골격 구조를 지니는 제올라이트 베타 나노스펀지를 합성하였다. 합성 겔 내 트리메틸벤젠(TMB) 첨가량을 조절함으로써 메조기공 크기를 최대 12 nm 까지 확장하였다. 이렇게 합성된 제올라이트 베타 나노스펀지에 습윤 함침법을 활용하여 Co 나노입자를 함침하였으며, 메조기공의 구속 효과에 의해 Co 나노입자 크기를 메조기공 직경에 맞게 4, 6, 10, 12 nm 크기로 정밀하게 제어할 수 있었다.

이후, 제올라이트 베타 나노스펀지 담지 Co 촉매를 피셔-트롭쉬 합성에 활용하여 활성도를 평가하였으며, 성능 테스트 반응은 H_2:CO=2:1, 20 bar, 493 K 조건에서 수행하였다. 전환율 및 수율을 전체적으로 비교한 결과, 평균 입자 크기 10 nm 촉매가 7.6/mmol·h^{-1} 전환율 및 최적화된 수율을 달성하였다. 더불어, 동일한 Co 함량임에도 불구하고 Co 입자 크기가 커질수록 CO 전환율이 점진적으로 증가하였으며, 가솔린 범위(C_5 - C_{11}) 탄화수소 선택도에서도 유사한 경향이 관찰되었다. 이는 Co 입자 크기가 클수록, 사슬 성장 확률을 증가시켜 가솔린 범위 탄화수소 생산이 촉진되는 것에서 기인한다.

가솔린 범위 탄화수소 이성질체의 선택도 측면을 살펴보면, 제올라이트 베타 나노스펀지가 다른 지지체 대비, iso-파라핀에 대해 현저히 높은 선택도를 보였다. 이는 베타 나노스펀지의 얇은 골격 구조로 인한 짧은 확산 경로가 가지형 탄화수소 중간체의 과도한 분해(cracking)를 최소화했기 때문이다. 또한, 약한 Brønsted - Lowry 산성점은 탄화수소 이성질체화 과정에서의 수소분해를 억제하여, 생성물 내 가지형 이성질체의 비율을 높이는 데 중요한 역할을 하였다.

이러한 결과를 바탕으로, 제올라이트 베타 나노스펀지가 고옥탄가(RON)의 지속가능한 액체연료 생산에 유망한 촉매로 활용될 가능성이 있으며, 저탄소 배출 교통 연료 응용을 위한 실질적 경로를 제공함을 시사한다.

참고문헌

1. Jo, C., Jung, J., and Ryoo, R., "Mesopore expansion of surfactant-directed nanomorphic zeolites with trimethylbenzene," Micropor Mesopor Mater, 914, 83-89 (2014)

2. Jeong, J., Kim, J., Cho, K., and Kim, J-C., "Fischer-Tropsch synthesis performance of iron Nanocatalyst confined in mesopores of MFI zeolite nanosponge," Fuel, 381, 133673 (2025)

PD-7

Evaluation of Magnesium Silicate as an Efficient Adsorbent for Na^+ Removal in High-Salinity Water Treatment

Kyung Chan Kang[1,*]

[1]*Offshore Plant Resources R&D Center, Korea Institute of Industrial Technology, Busan 46744, Republic of Korea*

[*]Corresponding author, e-mail: kckang@kitech.re.kr

Abstract: The global demand for advanced water treatment technologies has been increasing due to the growing need to manage brine from seawater desalination and high-salinity water resources. Mineral carbonation has gained attention as a representative carbon capture and utilization (CCU) technology, as it enables stable CO_2 sequestration through the formation of carbonate minerals [1]. However, the addition of NaOH to enhance carbonation conversion efficiency generates by-products with high concentrations of Na^+ ions, creating a secondary treatment challenge. In this study, magnesium silicate (Mg_2SiO_3), a porous inorganic material with high surface area, thermal stability, and diverse surface functional groups, was investigated as a potential adsorbent for Na^+ removal from aqueous solutions. Batch adsorption experiments were conducted to evaluate the ion removal efficiency and adsorption characteristics. The experimental results demonstrated that magnesium silicate exhibited a high Na^+ adsorption capacity, confirming its potential to effectively reduce Na^+ concentrations in aqueous solutions. The adsorption performance was attributed to the material's porous structure and active surface sites, which enabled efficient ion exchange and trapping mechanisms. Magnesium silicate shows promise as an efficient adsorbent for treating high-salinity by-products generated during mineral carbonation processes. Its application may provide a sustainable solution for Na^+ management while contributing to the broader utilization of mineral carbonation in achieving carbon neutrality.

Acknowledgements

This work was supported by the Korea Institute of Industrial Technology (Project Number: JA250004)

References

1. Kim, I., Yoo, Y., Son, J., Park, J., Huh, I. S., and Kang, D., "Two-step mineral carbonation using seawater-based industrial wastewater: an eco-friendly carbon capture, utilization, and storage process," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **22**, 333-347 (2020).

PD-8

Process-intensified pretreatment of SCG-derived biocrude oil: Removal of inorganics for sustainable biofuel applications

Chejarla Venkatesh Reddy, Liao Ziqiao, SoonHo Cho, Byong-Hun Jeon*
Department of Earth Resources & Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

Abstract

Fossil fuels currently supply over 85% of global primary energy, with oil, coal, and natural gas contributing 35%, 29%, and 24%, respectively. Spent coffee grounds (SCG), an abundant agro-industrial byproduct and the second-largest global commodity waste after petroleum, account for approximately 40–45 wt% of solid waste in the coffee industry, generating an estimated 6 million tons annually [1]. Fast pyrolysis of SCG has been widely investigated as a route to produce energy-dense liquid fuels. However, the resulting fast pyrolysis bio-oil (FPBO) contains a complex mixture of oxygenated hydrocarbons, heteroatoms (O, N, S), inorganic elements, which present significant challenges for downstream upgrading. This study explores a chemical demulsification approach using acid-catalyzed alkylphenol resins to separate water-in-oil (W/O) emulsions and remove inorganics from SCG-derived FPBO. Process parameters, including pH, demulsifier dosage, water content, temperature, ultrasonic intensity and duration, and centrifugation conditions, were systematically optimized. At pH 1 with a demulsifier dosage of 1000ppm, significant removal of inorganics was achieved: Al (93.05%), Fe (95.79%), Mg (92.83%), Ca (82.37%), Si (64.43%), K (87.90%), and Na (50.9%). Ultrasonic mixing enhanced phase interaction, accelerating metal transfer from the oil to the aqueous phase by 20% within 1 minute. Pretreatment also resulted in a substantial reduction in water content and an improvement in the quality of bio-oil. These findings demonstrate an efficient, scalable method for inorganic removal from bio-crude oil, advancing sustainable biofuels from waste-derived feedstocks.

References

[1] Forcina, A., Petrillo, A., Travaglioni, M., di Chiara, S., & De Felice, F. (2023). A comparative life cycle assessment of different spent coffee ground reuse strategies and a sensitivity analysis for verifying the environmental convenience based on the location of sites. Journal of Cleaner Production, 385, 135727.

Acknowledgments

This study was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grants funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the South Korean government (RS-2023-00255939)

PD-9

Microalgae as Nature's Solution to Phthalate Pollution

Ghulam Mustafa, Aliya Alvi, Muhammad Tariq Zahid, Nikita Yadav, Ramesh Kumar,
Raul Tanpure Sadashive, Deok-Won Kim, Ju HyeokWon, Eunji Lee, and Byong-Hun Jeon*
Department of Earth Resources & Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul

Abstract

Di-n-butyl phthalate (DBP), a widely used plasticizer, is recognized as a persistent environmental pollutant and a potent endocrine-disrupting chemical [1]. In this study, a pure microalgal culture capable of utilizing DBP as the sole carbon and energy source was investigated for its biodegradation potential. Batch experiments were conducted using three promising species *Chlorella vulgaris*, *Chlorella mexicana*, and *Chlorella sorokiniana*. Among them, *C. vulgaris* exhibited the highest DBP removal efficiency (90%), followed by *C. mexicana* (71%) and *C. sorokiniana* (63%) after 14 days at an initial concentration of 0.5 mg L^{-1}. The degradation kinetics for all species followed a first-order reaction model. Based on its superior performance, *C. vulgaris* was selected for further experiments to evaluate the effect of initial DBP concentrations (0.1–5.0 mg L^{-1}) on growth and degradation [2]. Maximum degradation (95%) was achieved at 0.1 mg L^{-1}. DBP removal was quantified using reversed-phase high-performance liquid chromatography (RP-HPLC) after ethyl acetate extraction, and degradation metabolites were identified by gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS). The findings demonstrate that *C. vulgaris* can effectively degrade DBP, offering a green and eco-friendly approach for the bioremediation of phthalate-contaminated environments.

References

1. Lirola, J.R., et al., Di-n-butyl and di-iso-pentyl phthalates and their mixture increase oxidative stress and embryo-larval malformations in zebrafish (Danio rerio). Genetics and Molecular Biology, 2025. **48**(2): p. e20240082.
2. Marcharla, E., et al., Sustainable Approaches for Managing Phthalate Pollution: Navigating Challenges, and Establishing the Future of Environmental Protection. Advanced Sustainable Systems, 2025. **9**(2): p. 2400620.

Acknowledgment

The Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) of the Republic of Korea (RS-2023-00255939) funded this work.

PD-10

Comparative Biochemical Profiling of *Arthrospira platensis* and *Chlorella vulgaris* Under Stress Conditions for Aviation Biofuel Production

Aliya Alvi, Ghulam Mustafa, Nikita Yadav, Ramesh Kumar, JuHyeok Kwon, Hyelim Kwon, Eunji Lee, Deok-Won Kim, Raul Tanpure Sadashive, and Byong-Hun Jeon*

Department of Earth Resources & Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul.

Abstract

The growing demand for sustainable aviation fuels has brought microalgae to the forefront as a promising source of bioenergy [1]. This study evaluates and compares the biochemical productivity of *Arthrospira platensis* (AP) and *Chlorella vulgaris* (CV) cultivated in BG-11 medium under various environmental stress conditions, including CO_2 enrichment, nitrogen deficiency, salinity, and variations in light spectrum. The experimental findings revealed that 0.02% CO_2 supplementation led to a remarkable growth increase in CV by 52.5%, while AP showed a 57.5% increase at 0.04% CO_2. Maximum lipid accumulation was observed in AP (57.5%) under high CO_2 conditions [2]. Fatty acid methyl ester (FAME) analysis indicated that both species primarily produced palmitic acid (C16:0), with CV and AP reaching 52.5% and 57.5% respectively, using the lyophilization technique. Additionally, high proportions of oleic acid (C18:1n-9) and α-linolenic acid (C18:3n-3) were detected, especially in AP, underscoring their suitability for jet fuel applications due to their desirable combustion and cold flow properties. These results highlight the role of CO_2 enrichment and the optimization of nitrogen and salt stress in enhancing lipid and FAME yields, paving the way for microalgae-based sustainable aviation biofuel production.

References

1. Sharma, V., et al., *Microalgal biodiesel: A challenging route toward a sustainable aviation fuel.* Fermentation, 2023. **9**(10): p. 907.
2. Wang, S., et al., *Lipid accumulation and CO2 utilization of two marine oil-rich microalgal strains in response to CO2 aeration.* Acta Oceanologica Sinica, 2018. **37**(2): p. 119-126.

Aknowledgement

This work was funded by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) of the Republic of Korea (RS-2023-00255939).

PD-11

Metaproteomics reveals enzymatic strategies deployed by anaerobic microbiomes to maintain methanogenic process at different lipid content

Rahul Tanpure, Bikram Basak, Swabhiman Mohanty, Mustafa Ghulam,
Deok-Won Kim and Byong-Hun Jeon*
Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763,
Republic of Korea, E-mails: bhjeon@hanyang.ac.kr

Abstract

Anaerobic digestion (AD) is a widely used biological process for converting organic waste into renewable biogas, but lipid-rich substrates can significantly influence system performance and microbial community dynamics [1][2]. Laboratory-scale AD reactors were operated under controlled conditions with and without lipid supplementation, and protein profiles were analyzed through high-resolution mass spectrometry (Nano LC-MS/MS) to unravel functional microbial responses [3]. The relative abundance of proteins associated with archaea, including *Atribacterota*, *Euryarchaeota*, and *Synergistota*, increased in the digester fed with lipids. Functional annotation of the identified methanogenesis-related proteins (MRPs) was present in a variety of methanogens, including most *Candidatus Atribacteria*, *Methanothrix soehngenii*, and *Methanomicrobiales* archaeon indicating that they play a major role in the anaerobic co-digestion metabolic process that produces methane and other metabolites. Metaproteomic data revealed marked shifts in microbial metabolic pathways, including fatty acid degradation enzymes, and key methanogenesis-associated enzymes. These findings provide mechanistic insights into how lipids modulate microbial activity in AD systems, offering guidance for optimizing lipid-rich waste co-digestion while mitigating process inhibition.

Keyword: Anaerobic digestion (AD), Methane, Metaproteomics, Fatty acid degradation

References

1. Ali, A., and Aslan S., “Effect of lipid content on anaerobic digestion process and microbial community: review study,” *Eur. Sci. J.* 8, 197-208 (2022).

2. Na, Z., Wu, C., Zhang, Han, J., Peng, S. Y., Song X., “Impacts of lipids on the performance of anaerobic membrane bioreactors for food wastewater treatment,” *J. Membr. Sci.* 666, 121104 (2023).

3. Payal, C., Holwerda, E. K., Giannone, R. J., Liang, X., Poudel, S., Ellis, J. C., Bomble, Y. J., Hettich, R. L., Lynd, L. R., “Metaproteomics reveals enzymatic strategies deployed by anaerobic microbiomes to maintain lignocellulose deconstruction at high solids,” *Nat. Commun.* 13, 3870 (2022).

Acknowledgment

The Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) of the Republic of Korea (RS-2023-00255939) funded this work.

PD-12

폐기물 유래 흑연질 탄화 질소물 광촉매 활용 대기오염물질 제어 연구

김유관, 이태우, 박종현, 권일한
한양대학교 자원환경공학과

Air Pollution Control Using g-C3N4 Photocatalyst generated from wastes

Youkwan Kim, Taewoo Lee, Jonghyun Park, Eilhann E. Kwon
Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

대기오염물질을 제어하기 위한 기술을 개발하려는 노력은 많은 방식으로 이루어져 왔다. 기존에는 점오염원에서 대량으로 발생하는 대기오염물질을 제어하는 기술이 주로 개발됐으나, 현대 사회에서는 각 사회 구성원의 건강과 행복을 추구하는 추세를 반영하여 비점오염원에서 소량으로 발생하거나 존재하는 오염물질을 제어하기 위한 연구에 대한 수요도 많은 상황이다. 이러한 시대적 상황을 반영하여 규모를 조절하는 것에 있어서 보다 자유로운 기술에 관한 수요가 발생하였다. 다양한 대기오염물질 제어 기술 중 광촉매를 활용한 제어 기술이 규모에서의 제한 사항이 다른 기술에 비해 적은 편이었기 때문에 소규모로 적용이 가능하다는 장점을 충분히 발휘하여 가전이나 다양한 소규모 대기오염물질 제어 장치에 적용하였거나 하기 위하여 기술 고도화를 위한 연구가 진행 중이다. 일반적으로 현재 많이 연구되었거나 적용하고 있는 광촉매는 에너지가 강한 자외선을 주로 활용하는 기술로, 별도의 광원이 필요하고 그에 따른 설비가 필요한 특징이 있었다. 본 연구에서 생성한 광촉매는 가시광선 영역의 빛으로도 대기오염물질을 제어할 수 있는 특징이 있어, 별도의 광원이 아닌 자연광을 활용한 방식으로도 적용이 가능하다는 장점이 있다. 더해서, 폐기물을 탄화시켜 광촉매를 생성하고 해당 과정의 부산물은 대부분 열분해 합성 기체로 이는 에너지원으로 활용할 수 있다. 이처럼 폐기물을 원료로 하여 부산물은 에너지원으로 활용하고 광촉매는 대기오염물질 제어에 활용하는 연구를 하고자 한다.

특별세션(III): [원광대학교 RISE 사업단] 미래형모빌리티 융합기술개발 세미나

(포스터발표 I)

2025년 9월 25일(목) 09:00~11:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비

PS3-1

Evaluation of Bacterial Filtration Performance of Biocompatible Polymers-based Nanofibrous Membranes

Hye Jin U[1], Hee-Kyeong Kim[2], Yoon Han Nam[1], Kyoung Duck Seo[2,3,4], Young-Sam Cho[2,3,4*] and Hyun-Ha Park[2,3,4*]

[1]Department of Mechanical Engineering, Wonkwang University

[2]MECHABIO Group, Wonkwang University

[3]Division of Mechanical Engineering, Wonkwang University

[4]Advanced Bio-Convergence Research Center, Wonkwang University

Nanofiber-based membranes have attracted considerable interest owing to their high surface-area-to-volume ratio, interconnected porous structures, and adjustable physicochemical properties, which make them highly suitable for applications in biomedical engineering and environmental filtration (Tang et al. [1], Fahimirad et al. [2]). In this study, polycaprolactone (PCL), a biocompatible, biodegradable, and non-toxic aliphatic polyester (Nasonova et al. [3]), was employed to fabricate nanofiber membranes for bacterial filtration. The membranes were produced via air-jet spinning with spraying durations ranging from 1 to 15 minutes to control thickness. Bacterial filtration performance was assessed using *Escherichia coli* (*E. coli*) and *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) suspensions prepared in deionized water. The 1-minute-spun membranes achieved filtration efficiencies of 93.421% for *E. coli* and 99.188% for *S. aureus*, while the 15-minute-spun membranes reached approximately 99.999% efficiency for both strains. These findings highlight the excellent potential of air-jet-spun PCL nanofiber membranes as microbial barriers, with prospective applications in face masks, air filtration systems, and bio-protective textiles.

References

1.Tang, Y., Cai, Z., Sun, X., Chong, C., Yan, X., Li, M., and Xu, J., “Electrospun Nanofiber-Based Membranes for Water Treatment,” *Polymers*, 14(10), 2004 (2022).

2.Fahimirad, S., Fahimirad, Z., and Sillanpää, M., “Efficient Removal of Water Bacteria and Viruses Using Electrospun Nanofibers,” *Sci. Total Environ*., 751, 141673 (2021).

3.Nasonova, M. V., Glushkova, T. V., Borisov, V. V., Velikanova, E. A., Burago, A. Y., and Kudryavtseva, Y. A., "Biocompatibility and Structural Features of Biodegradable Polymer Scaffolds," *Bull. Exp. Biol. Med*., 160, 134-140 (2015).

PS3-2

Inhibitory Effects of Diospyros lotus Leaf Extract and Myricitrin on Histamine-Dependent and -Independent Pruritus

Ga-Hyun Kim[1], Jeongeun Bang[1] and Bo-Mi Kim[1*]

[1]Department of Chemical Engineering, Wonkwang University, Iksan-si, Jeollabuk-do, Republic of Korea

Abstract. Pruritus is a distressing symptom associated with various dermatological, systemic and neurological conditions, markedly impairing quality of life. Pruritus arises through histamine-dependent and histamine-independent pathways, involving mediators such as histamine, gastrin-releasing peptide (GRP), interleukin-31 (IL-31) and STAT3 signaling. The present study aimed to investigate the antipruritic effects of Diospyros lotus leaf extract (DLE) and its major constit-uent, myricitrin (MC), on ICR mice using compound 48/80 (histamine-dependent) and chloroquine (histamine-inde-pendent) itch models. Serum levels of histamine and IL-31 were measured by ELISA, and mast cell infiltration was assessed via toluidine blue staining. Furthermore, the expression and activation of GRP receptor (GRPR), IL-31RA and STAT3 in the spinal cord were analyzed using western blotting and immunofluorescence staining. Notably, DLE and MC significantly reduced scratching behavior, serum histamine levels and mast cell infiltration in both models. Immunofluorescence staining and western blot analysis revealed that DLE and MC downregulated GRPR, IL-31 receptor A and phosphorylated STAT3 expression in the spinal cord, indicating modulation of central itch signaling. Additionally, DLE and MC suppressed IL-31 levels in serum and skin tissues. These findings indicated that DLE and MC may alleviate pruritus through multiple mechanisms, including mast cell stabilization, histamine reduction and modulation of central itch pathways. The broad-spectrum antipruritic activity of DLE and MC highlights their potential as natural therapeutic agents for diverse pruritic conditions, offering a safer alternative to synthetic antipruritic drugs. Further research is warranted to validate these findings in clinical settings and to elucidate the molecular mechanisms underlying their efficacy.

PS3-3

Electrochemical Evaluation of Manganese Oxide-Integrated Biomass-Derived Carbon for Supercapacitor Electrodes

Seung Heon Ryu[1], Young Wan Ju[1,2*]

[1]Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Wonkwang University, Iksan, Jeonbuk 54538, Republic of Korea

[2]ICT Fusion Green Energy Research Institute, Wonkwang University, Iksan, Jeonbuk 54538, Republic of Korea

<Abstract>

Carbon materials synthesized from biomass via hydrothermal carbonization are promising candidates for supercapacitor electrodes. Unlike electric double-layer capacitors, contribute significantly to pseudocapacitors. In this study, pyrolysis was conducted using $KMnO_4$ and KOH solutions as activation agents to eliminate volatile compounds and produce porous activated carbon containing manganese monoxide (MnO). Additionally, the potential of the synthesized composite material as a pseudocapacitor was analyzed. Activation improved the pore structure, specific surface area, and distribution of manganese oxide. Electrochemical analysis revealed that the MnO-activated carbon fabricated with both $KMnO_4$ and KOH (AHC-2) exhibited the highest initial discharge capacitance (201.78 F/g). However, the durability of the capacitance against long-term charge-discharge cycling was significantly lower than that of cells using carbon materials. In particular, the performance of cells using the AHC-2 sample as an electrode rapidly declined up to 2,000 cycles and then stabilized for the next 3,000 cycles. Cyclic voltammetry results indicated that the redox reactions induced structural instability in manganese oxide. Therefore, the synthesis of manganese oxide-carbon composite by the penetration method using a solution containing metal ions participating in the activation reaction is efficient and simultaneously yields high specific surface area and metal oxide

PS3-4

Influence of Calcination Temperature on the ORR/OER Activity of SSC Perovskite Nanofibers

Seong-Min Lim[1], Woo-Suck Oh[1], Min-Seok Jeong[1], Young-Wan Ju[1,2,*]

[1]Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Wonkwang University, Iksan, Jeonbuk 54538, Republic of Korea

[2]ICT Fusion Green Energy Research Institute, Wonkwang University, Iksan 54538, Jeonbuk, Republic of Korea

ywju1978@wku.ac.kr(Y.-W.J.)

Energy conversion and storage systems have attention owing to escalating environmental and energy issues. However, the slow kinetics reactions of the oxygen reduction reaction (ORR) and oxygen evolution reaction (OER) hinder their commercialization. Many studies are underway to develop alternatives to precious metal catalysts, which show high ORR and OER activity but are constrained by scarcity and limited durability. In this study, $Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO_3$ (SSC) fibers were synthesized via electrospinning of non-precious metal-based perovskite oxides as a potential substitute for precious metal catalysts. The effects of calcination at various temperatures on the structural properties and electrochemical performance of SSC nanofibers were investigated. Among them, SSC800 hollow fibers exhibited the most promising catalytic performance, attributed to their reduced crystallite size, high specific surface area, abundant oxygen vacancies, and enhanced ORR/OER activity.

PS3-5

소형 소방차용 물탱크의 슬로싱 거동에 대한 수치해석적 연구

김준성[1], 허범기[1], 이상욱[2,*],
원광대학교 기계공학부, *원광대학교 기계공학부

Computational Analysis of Sloshing Behavior in a Water Tank for Compact Fire-fighting Vehicles

Jun Sung Kim[1], Bum Ki Huh[1], Sang Wook Lee[2,*]
[1]Div. Mechanical Engineering (Undergraduate Program), Wonkwang University,
[2]Div. Mechanical Engineering, Wonkwang University

초소형 소방차는 차량 총중량 중 물탱크가 차지하는 비중이 크며, 부분 충전 시 슬로싱(sloshing)으로 인한 주행 안정성 저하, 펌프 흡입 불안정과 탱크, 마운트, 용접부의 반복하중 증가로 인한 피로 파괴등의 현상이 나타날 수 있다. 따라서 슬로싱 현상의 정확한 예측 및 슬로싱에 의한 하중 저감을 위한 탱크 내부의 Baffle 설계등은 물탱크, 연료탱크등의 설계에 있어 매우 중요하다.

본 연구에서는 전산유체역학을 적용하여 Fig. 1에 제시된 초소형 전기소방차용 물탱크의 슬로싱 거동에 대한 연구를 진행하였다. 우선, 시험 및 해석결과가 존재하는 Khezzar et al.[1]의 사각 탱크 실험과 동일 조건의 2차원(2D) 해석을 수행하여 해석기법을 개발 및 검증하고자 한다. 유동장은 비압축성, 비정상, 층류흐름으로 가정하여 uRANS 방정식을 해석하였으며, 자유수면은 VOF(Volume of Fluid)로 추적하였다. 압력-속도 결합은 비정상 유동해석에 있어서 안정적이고 정밀한 결과를 제공하는 PISO 알고리즘을 사용하였다. 사용된 탱크는 가로 560mm 세로 170mm의 크기를 가지며 충전율은 50% 이다. 등가속도 구간으로 1.98s 이동 후 정지하며, 이후 자유 감쇠 반응을 관찰하였다. Khezzar et al.[1]의 자유수면 형상과 우측 벽에서의 수위를 비교하였으며, Fig. 2에는 3.07초에서 물의 거동을 제시하였다.

추후 본 해석 결과의 일치도를 정량 비교한 뒤, ANSYS Fluent의 주파수 해석(FFT)으로 지배 진동수를 도출하여 소형 소방차 차체의 고유진동수(natural frequency)와 대조, 공진 위험 구간을 선별한다. 이를 바탕으로 탱크 내부 보강, 배플(baffle) 설계, 펌프 흡입부 주변 보강, 용접부, 지지 마운트 형상 보강 등 실차 적용 보강 가이드 라인을 제시하고자 한다.



Figure 1. Compact fire car

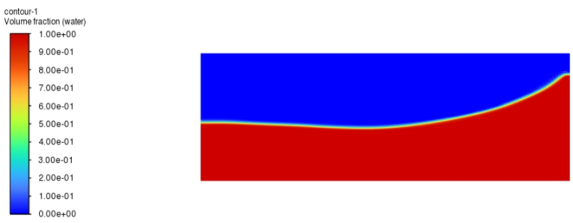


Figure 2. CFD result at t=3.07s

참고문헌

1. Seibi, A. C., Goharzadeh, A., and Khezzar, L. “Water Sloshing in Rectangular Tanks – An Experimental Investigation & Numerical Simulation” *Int. J. Eng.* **3**(2), 174-184 (2009).

후기

본 연구는 교육부 재원으로 한국연구재단의 지역혁신체계 및 교육(RISE) 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

PS3-6

Eco-Friendly Synthesis of Cubic Boron Nitride Nanoparticles using Reactive Nitrogen Species Generated from Nitrogen Thermal Plasma

Se Jin Oh, Han Jun Lee, Seong-Pyo Kang and Tae-Hee Kim*
Department of Chemical Engineering, Wonkwang University

Cubic boron nitride (c-BN) possesses hardness comparable to that of diamond, along with excellent thermal and chemical stability [1]. However, as a thermodynamically metastable material, its synthesis generally requires high-temperature and high-pressure conditions, which limit process control and production efficiency [2]. In this study, a one-step synthesis of c-BN under atmospheric pressure was achieved by utilizing the ultra-high temperature and rapid quenching environment of a direct current (DC) thermal plasma. Unlike conventional approaches, no additional nitrogen source was supplied; instead, nitrogen used as the plasma-forming gas was thermally dissociated in the plasma arc, producing highly reactive nitrogen species such as atomic nitrogen, excited N_2, and nitrogen radicals. These species reacted in situ with vaporized boron from the injected precursors, including amorphous boron and h-BN in micron scale, directly forming boron nitride without the need for additional nitridation agents such as ammonia. To optimize synthesis conditions, key parameters such as the presence of reactor thermal insulation, precursors (such as amorphous boron, h-BN), and hydrogen co-injection were systematically investigated. The synthesized products were analyzed by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and transmission electron microscopy (TEM), confirming the formation of c-BN nanoparticles and h-BN nanotubes [3]. In addition, numerical simulations were also performed to model the temperature distribution and flow dynamics inside the plasma torch and reactor, revealing a central jet temperature exceeding 7,000 K, sufficient for complete boron vaporization and nitrogen dissociation. The combination of high-temperature exposure, reactive nitrogen species generation, and rapid quenching was found to be critical for promoting the cubic crystal phase. Unlike conventional high-pressure synthesis, this process enables scalable, continuous, and eco-friendly production of c-BN under atmospheric conditions, providing a cost-effective alternative for superhard material fabrication.

References

1. J. H. Oh et al., “Facile synthesis of cubic boron nitride nanoparticles from amorphous boron by triple thermal plasma jets at atmospheric pressure”, Adv. Powder Technol., 33(2), 1-8 (2022).
2. E. H. Ko et al., “Synthesis of Cubic Boron Nitride Nanoparticles from Boron Oxide, Melamine and NH_3 by Non-Transferred Ar–N_2 Thermal Plasma”, J. Nanosci. Nanotechnol., 15(11), 8515-8520 (2015).
3. J. H. Kim et al., “Boron nitride nanotubes: synthesis and applications”, Nano Converg., 5(17), 1-13 (2018).

PS3-7

Effect of Electrocatalyst Distribution within Carbon Nanofibers on Electrochemical Performance

Eun-Sae Han[1], Young-Wan Ju[1, 2*]

[1]Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Wonkwang University, Iksan 54538, Republic of Korea

[2]ICT Fusion Green Energy Research Institute, Wonkwang University, Iksan 54538, Jeonbuk, Republic of Korea

Water electrolysis, a carbon-free and eco-friendly technology that produces hydrogen and oxygen through the electrolysis of water, is a key element in the next-generation clean energy supply chain. Metal-carbon composite catalysts exhibit excellent activity and stability in electrochemical reactions and thus have the potential to be widely utilized in various energy conversion and storage devices. Electrospinning is a simple and efficient technique for manufacturing nanofibers from various polymers. In this study, we fabricated carbon nanofiber (CNF) composite catalysts containing ruthenium (Ru) nanoparticles via electrospinning. By applying electrospinning, we controlled the position of Ru nanoparticles within the CNFs and investigated the effect of electrocatalyst distribution on catalytic performance. The electrochemical performance of the fabricated Ru-CNF composite catalysts was evaluated for the oxygen reduction reaction (ORR), oxygen evolution reaction (OER), and hydrogen evolution reaction (HER). Through this, we analyzed the correlation between electrocatalyst position and reaction activity and stability.

공정시스템

(포스터발표 II)

2025년 9월 25일(목) 13:00~15:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비

PH-1

ML-Based Cascade Framework with Genetic Algorithm for CO_2-to-Methanol Catalyst Discovery

Hyunjin Kang[1,2], Hyundo Park[3], Youngjin Kim[4], Hyungtae Cho[5], Jaeho Baek[1*] and Jaewon Lee[6*]

Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology [1]

School of Chemical Engineering, Pusan National University[2]

Department of Chemistry, Northwestern University[3]

Hanwha Totalenergies Petrochemical[4]

Department of Chemical Engineering, Kyung Hee University[5]

Department of Battery Science and Chemical Engineering, Hanyang University[6]

<abstract>

Methanol is a versatile hydrogen carrier, fuel, and platform chemical; hence, the efficiency and sustainability of its production process are pivotal for achieving carbon neutrality. However, most prior studies have focused exclusively on catalytic activity (yield), which has led to frequent performance gaps at the demonstration stage due to insufficient consideration of long-term stability. To address this limitation, we propose an ML-based two-stage cascade framework that jointly considers activity and stability. A literature-curated dataset of 8,795 catalyst entries was standardized to train an NGBoost-based methanol yield predictor (R^2 = 0.888, RMSE = 1.087). The model's predictions were used as the fitness function in a genetic algorithm (GA) to explore the catalyst composition–process-condition space. Shortlisted candidates from this first stage were then re-evaluated by a stability prediction model to account for long-term, time-on-stream durability, yielding an integrated framework with improved overall performance (R^2 = 0.943, RMSE = 0.757). Compared with empirical screening, the proposed approach substantially reduces the number of required experiments while maintaining high predictive confidence. In sum, this framework moves beyond the "activity-only" convention by enabling simultaneous optimization of activity and stability, thereby accelerating the design and operational optimization of CO_2-to-methanol production and embedding industrial applicability from the earliest stages of catalyst discovery..

Keyword: CO_2 Hydrogenation, Machine Learning, High-Throughput Screening, Genetic Algorithm

PH-2

GCMC-Based Construction of a CO_2 and O_2 Adsorption Isotherm and Heat of Adsorption Database for a Large Set of MOFs

안용상[1], 안나현[2], 박준영[1], 백재호[2], 가성빈[3], 조형태[1,*]
[1]경희대학교 화학공학과, [2]한국생산기술연구원 저탄소에너지그룹,
[3]울산대학교 화학공학부

초록

Metal Organic Frameworks(MOFs)는 조절 가능한 기공 구조와 높은 비표면적으로 인해 기체 분리 및 저장에 적합한 흡착제로 주목받고 있다. 본 연구에서는 산업/환경적으로 중요한 O_2 및 CO_2를 대상으로, 283–313 K의 온도와 0.5–15 bar의 압력 조건에서 Grand Canonical Monte Carlo(GCMC) 시뮬레이션을 수행해 MOF의 흡착 성능을 정량적으로 평가하였다. 도출된 흡착량 데이터를 흡착 등온선 모델에 피팅하고, 조건별 최적 모델과 파라미터를 추출해 등온선 파라미터 데이터베이스를 구축하였다. 이후 해당 데이터를 기반으로 Clausius–Clapeyron 관계식을 적용해 등흡착량 조건의 온도–압력 관계로부터 흡착열을 산출하고, 이를 별도 흡착열 데이터베이스로 정리하였다. 구축된 두 데이터베이스는 MOF 흡착 거동을 정량적으로 비교/분석할 수 있는 자료로 기능하며, 향후 공정 설계 및 고속 소재 스크리닝에 활용될 수 있다.

PH-3

폐 PET 열분해를 통한 수소 생산 공정 제안

이수민[1], 최동호[1], 길진우[1], 신창범[2], 이세영[3,4], 백재호[4], 조형태[1,*]
[1]경희대학교 화학공학과, [2]한양대학교 재료화학공학과,
[3]연세대학교 화공생명공학과,
[4]한국생산기술연구원 저탄소에너지그룹,

초록

PET(Polyethylene Terephthalate)는 가볍고 내구성이 뛰어난 특징을 가지고 있어 다양한 용도로 사용되고 있다. PET 소비가 지속적으로 증가함에 따라 폐 PET 발생량도 함께 증가하고 있다. 현재의 처리 방식은 오염 물질의 배출 등으로 인해 환경적 부담을 초래한다. 따라서, 친환경성과 경제성을 동시에 확보할 수 있는 방안으로 폐 PET 열분해 기반 수소 전환 공정을 제안한다. 제안 공정에서 폐 PET는 CO_2를 퍼지가스로 하는 열분해 과정을 거쳐 가스, 오일, Char로 전환된다. 열분해 가스에는 CO, H_2, 메탄, CO_2 등이 포함되어 있어 수소 생산을 위한 전구 물질로써 높은 가치를 지닌다. 이 중 CO_2는 WGS(Water-Gas Shift)반응을 통해 수소 생산 증대에 활용하였다. 열분해 오일 및 Char를 연소하여 발생한 열에너지를 Low-pressure steam(LPS) 생산에 활용하는 공정과 Rankine cycle을 통해 전력을 생산하는 공정을 제안 및 비교하였다. 생산된 LPS는 후단 Carbon Capture and Storage(CCS) process의 열에너지 공급에 사용되었으며, 생산된 전력은 공정 내 자급과 더불어 부가 수익 창출로도 이어진다. 제안 공정에서 연간 수소 생산량은 약 248 ton yr^{-1}로 나타났다. 경제성 평가(Techno-Economic Analysis, TEA)를 수행한 결과 LPS 활용 공정은 Rankine cycle 활용 공정 대비 7% 낮은 Levelized Cost of Hydrogen (LCOH)를 나타내었다. 본 공정들은 열분해 과정에서 배출되는 CO_2를 포집 후 열분해 반응에 재활용할 뿐만 아니라 에너지 자립성을 확보했기 때문에 지속 가능한 공정이라고 보여진다. 따라서, 본 연구에서 제안한 열분해 기반 공정은 폐 PET의 처리와 동시에 고부가가치화가 가능한 유망한 공정이 될 수 있음을 시사한다.

PH-4

신발 폐기물 열분해를 통한 수소 생산 공정 개발

길진우[1], 최동호[1], 백재호[2], 신창범[3], 이재원[3], 조형태[1,*]
[1]경희대학교 화학공학과, [2]한국생산기술연구원 저탄소에너지그룹, [3]한양대학교 재료화학공학과

신발 폐기물은 다양한 플라스틱이 혼합된 복합체로, 재활용이 어렵고 대부분 소각 또는 매립되어 환경 문제를 유발하는 문제점이 있다. 본 연구는 이러한 문제 해결을 위해 CO2 환경에서 신발 폐기물을 열분해하고, 이 과정에서 생성된 합성가스를 수성가스 전환 반응을 통해 수소로 전환하는 새로운 수소 생산 공정을 제안하였다.
본 공정은 폐기물 열분해 공정에 1) 고온 수성가스 전이(HTS), 2) 저온 수성가스 전이(LTS), 3) HTS+LTS 복합 반응으로 구성된 공정을 각각 연결한 세 가지 시나리오로 구성된다. 경제성 분석 결과, 세 공정 모두 투입된 CO의 89% 이상을 수소로 전환하여 회수할 할 수 있었으며, 이 중 LTS 반응공정은 가장 낮은 수소 생산단가(2.04$/kg)를 기록하였다.
본 연구는 재활용이 어려운 복합 플라스틱 폐기물을 자원화하는 동시에, 친환경적인 수소 생산의 공정을 제시한 사례로, 탄소 배출 저감과 자원 순환에 기여할 수 있는 가능성을 제시하였다.

PH-5

Optimizing Plastic Waste Sorting Process with Diversified Sorting Machine Capacity

손준기, 안유찬*
계명대학교

Efficient sorting of plastic waste is essential for enhancing recycling rates and reducing environmental impact. Conventional sorting systems typically rely on fixed-capacity machines, which can lead to operational inefficiencies and suboptimal investment allocation when processing volumes vary[1,2]. This study developed a mixed-integer programming (MIP) model to optimize the configuration of a single-stage plastic sorting process with variable-capacity machines. The model allows capacity selection from 100 kg/h to 1,000 kg/h in 100 kg/h increments at each sorting spot, enabling flexible adaptation to feed rate fluctuations. Seven serially connected sorting spots are modeled, with resin-specific separation and cascading of unsorted material to maintain mass balance. The objective function maximizes daily profit by balancing revenue from sorted plastics against investment and operating costs, including energy consumption linked to machine capacity[3]. A case study demonstrates that variable-capacity configurations can significantly reduce investment costs while maintaining or improving throughput and profitability compared to fixed-capacity systems. These findings suggest that flexible capacity planning can improve the economic and operational efficiency of plastic waste sorting facilities.

1.Nakatani, J., Konno, K., and Moriguchi, Y., *Variability-based optimal design for robust plastic recycling systems*, *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 53–60 (2017).

2.Cheon, J., Son, J., and Ahn, Y., *Economic and environmental factor-integrated optimal model for plastic-waste sorting*, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 139, 162–174 (2024).

3.Huang, S., Luo, J., Leonardi, F., and Lipo, T. A., *A general approach to sizing and power density equations for comparison of electrical machines*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34(1), 92–97 (1998).

PH-6

Economic Evaluation of Byproduct Separation from Electrochemical Glycerol Oxidation and Application of a Heat Exchanger Network

Seohee Park[1], Yuchan Ahn[1*]
Keimyung University[1], Keimyung University[1]

With the recent increase in biodiesel production driven by carbon neutrality policies and efforts to mitigate global warming, an excess supply of glycerol byproducts has emerged, leading to a decline in its market value (Kim et al. [1]). In this study, the separation process of high-value-added compounds (e.g., DHA) and byproducts generated from electrochemical glycerol oxidation was simulated using Aspen Plus, based on experimental data. Subsequently, changes in energy consumption and utility costs before and after applying a heat exchanger network (HEN) to the overall process were analyzed, and the economic performance was comparatively evaluated. In particular, various cases with different voltages and glycerol/Pt molar ratios in the electrochemical reaction stage were simulated to quantitatively assess the impact of reaction condition changes on process efficiency and economic feasibility. This study proposes optimization strategies that can enhance the value of glycerol and improve the sustainability of the biodiesel industry.

References

1. Kim, H. J., Kim, Y., Lee, D., Kim, J.-R., Chae, H.-J., Jeong, S.-Y., Kim, B.-S., Lee, J., Huber, G. W., Byun, J., Kim, S., and Han, J., "Coproducing Value-Added Chemicals and Hydrogen with Electrocatalytic Glycerol Oxidation Technology: Experimental and Techno-Economic Investigations," ACS Sustainable Chem. Eng., 5(8), 6626-6634 (2017).

PH-7

Numerical Evaluation of Cryogenic Heat Exchanger Performance Using LNG Cold Energy for Data Center Cooling Applications

Chae-Young Lim*, Chae-Eun Yeo, Myung-Ok Lee, Seong-Yool Ahn
Energy Environment IT Convergence Group, Institute for Advanced Engineering

This study presents a numerical investigation of the heat transfer and flow characteristics of a cryogenic heat exchanger utilizing LNG cold energy, with a focus on optimizing inlet conditions for efficient application in data center cooling systems. Cold energy generated during the regasification process of LNG is a highly valuable energy source due to its extremely low temperature, and its integration into data centers has the potential to significantly reduce energy consumption and greenhouse gas emissions. Given the continuous thermal load in high-performance computing environments, the adoption of cryogenic heat exchangers offers superior cooling performance and spatial efficiency compared to conventional air or water-based cooling systems.

Key design parameters such as inlet velocity, inlet temperature, and internal turbulence conditions were evaluated through numerical simulations using the SST turbulence model and Navier–Stokes equations. The results revealed that variations in inlet conditions significantly influenced the internal flow structure and thermal performance of the heat exchanger. Specifically, higher inlet velocities improved the average heat transfer coefficient, while elevated inlet temperatures caused localized thermal saturation due to sharp temperature gradients. Even at low flow velocities, strong mixing and abrupt directional changes in the flow led to increased turbulence intensity, highlighting the nonlinear interplay between internal geometry and inlet flow characteristics.

These findings underscore the sensitivity of cryogenic heat exchanger performance to inlet conditions, and suggest that precise control of operational parameters can maximize cooling efficiency in real-world data center environments. The application of LNG cold energy can notably reduce power consumption in energy-intensive data centers and contribute to achieving carbon neutrality.

This study provides a theoretical foundation for evaluating and optimizing cryogenic heat exchangers for data center cooling applications. Future work will focus on experimental validation of the simulation results, analysis under varying thermal loads, and comprehensive evaluation of long-term operational and structural reliability to advance the practical implementation of next-generation cryogenic cooling technologies.

Acknowledgment
본 연구는 과학기술정보통신부(정보통신기획평가원)의 지원을 받아 수행한 과제입니다.
(RS-2023-00233745)

PH-8

Simulation and parameter optimization of PSA system for hydrogen recovery in SMR-based processes

Seungho Lee, Wangyun Won*
Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University

This work presents a computational study of a pressure swing adsorption (PSA) system designed for hydrogen recovery in a steam methane reforming (SMR) process, conducted in collaboration with an industrial partner. A dynamic model for a two-column, four-step PSA cycle was developed to capture the transient behavior of the adsorption process.

The model incorporates the fundamental conservation equations for mass, energy, and momentum, with the Ergun equation applied for pressure drop estimation and the Wakao correlation employed to improve the prediction of heat and mass transfer. The adsorption equilibria for each gas species were described using isotherm data, and the parameters for the extended Langmuir model were determined accordingly. Simulation results provide detailed temporal profiles of temperature, gas composition, adsorption capacity, and interstitial gas velocity within the adsorbent bed. Furthermore, at cyclic steady-state, the purity and recovery of the product stream, as well as the composition of the purge stream, were evaluated.

These findings deliver an in-depth understanding of PSA performance in SMR-derived hydrogen purification and offer valuable guidelines for enhancing large-scale industrial hydrogen separation operations.

References

1. Zhang, Nannan; Hu, Sumeng; Xin, Qianqian. “Optimization of pressure swing adsorption in a three-layered bed for hydrogen purification using machine learning model.” *Scientific Reports* 15 (2025): Article 14193.
2. Yang, T., et al. “Hydrogen Purification Performance of Pressure Swing Adsorption with a Multi-Component Heat and Mass Transfer Model.” *Applied Sciences* 15, no. 10 (2025): 5505
3. Zhang, Runye; Shen, Yuanhui; Tang, Zhongli; Li, Wenbin; Zhang, Donghui. “A Review of Numerical Research on the Pressure Swing Adsorption Process.” *Processes* 10, no. 5 (2022): 812.

PH-9

개인 사정으로 인해 발표가 취소되었습니다.

PH-10

개인 사정으로 인해 발표가 취소되었습니다.

PH-11

Effect of Baffle Design and Motion Dynamics on Boil-Off Gas in Cryogenic Liquid Hydrogen Transport

Jingyeong Im[1], Boram Gu[2*] and Wangyun Won[1]

[1]Depatment of Chemical and Biological Engineering, Korea University, Korea

[2]School of Chemical Engineering, Chonnam National University, Korea

<Instructions for abstract>

Global interest in hydrogen as a clean energy carrier is rising due to its high energy density, storage efficiency, and zero CO_2 emissions. For transportation, hydrogen is commonly stored as a cryogenic liquid to reduce volume, but this process inevitably leads to boil-off gas (BOG) generation, causing hydrogen loss. In this study, three-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were conducted to evaluate BOG generation under various road transportation scenarios and tank designs [1, 2]. The analysis focused on three tanker configurations—unbaffled, solid baffled, and center-holed baffled subjected to both acceleration and deceleration conditions at different magnitudes. The simulations employed a multi-phase process comprising stationary initialization, acceleration or deceleration, and constant-velocity phases to examine the effects of internal geometry and motion dynamics on sloshing behaviour, temperature and pressure distribution, and vapor–liquid interface stability. Preliminary findings indicate that specific baffle designs and motion profiles can significantly influence convective flow patterns and thereby reduce BOG. The outcomes of this work are expected to contribute to the development of optimised cryogenic liquid hydrogen transportation guidelines and tank design strategies aimed at minimising hydrogen loss.

References

1. H. Xie, D. Makarov, S. Kashkarov, V. Molkov., M., CFD Simulations of Hydrogen Tank Fuelling: Sensitivity to Turbulence Model and Grid Resolution, hydrogen, 4, 1001-1021(2023)
2. H. Lv, L. Chen, Z. Zhang, S. Chen, Y. Hou., Numerical study on thermodynamic characteristics of large-scale liquid hydrogen tank with baffles under sloshing conditions, International Journal of Hydrogen Energy, 57, 562-574(2024)

PH-12

블루 메탄올에서 그린 메탄올로의 전환에 맞춘 천연가스의 활용방안 탐색

김태현, 박진우*
동국대학교

본 연구에서는 천연가스를 활용한 경제적이며 지속 가능한 메탄올 생산 방안을 탐색하고자, 수전해 장치, Allam cycle, 그리고 steam methane reforming (SMR)을 결합한 16가지 다양한 메탄올 생산 경로를 제시한다. 그린 메탄올로의 전환을 위한 천연가스 활용 전략으로서, 전력 판매 및 블루 수소 생산을 통해 천연가스의 경제적 활용과 메탄올의 생산 단가 최소화 가능성을 모색하였다. 5종의 전해조 기술(Alkaline, Anion exchange membrane, Proton exchange membrane, Solid oxide-(H_2O), Solid oxide-(H_2O/CO_2))을 Allam 사이클 및 SMR과 조합하여 각 경로의 에너지 효율, 탄소 효율, 탄소세가 고려된 경제성을 정량적으로 비교 분석하였다. 또한, 지속 가능한 미래에서 예상되는 수전해 스택 가격 및 효율, 전기 가격 감소 등을 추가 고려함으로써 메탄올 생산 공정의 경제적 타당성을 확인하였다. 분석 결과, Allam cycle 기반 경로는 -1.0 tCO_2/t_{MeOH} 미만의 탄소 배출량을 기록하며 가장 낮은 탄소 배출 잠재력을 나타냈고, SMR과 H_2O/CO_2 solid oxide electrolyzer (HCCEC)의 조합은 65.1%로 가장 높은 에너지 효율을 보였다. Allam 사이클과 HCCEC를 결합한 경로는 다양한 시나리오에서 가장 높은 경제적 가능성을 나타냈다. 기본 $\$436.4/t_{MeOH}$에서 탄소세가 $\$75/t_{CO2}$ 이상으로 증가할 경우 블루 메탄올 공정보다 낮은 생산 단가를 기록하였다. 또한, 국가별 전력 가격을 고려한 민감도 분석을 통해 지역별 최적 전략도 제안되었다. 결론적으로 본 연구는 동일한 양의 천연가스를 활용한 메탄올 생산에서 경제적 시사점을 제시함으로써, 블루 메탄올 기반 인프라 의존도를 낮추고 그린 메탄올 전환을 가속할 수 있는 새로운 관점을 제공한다.

PH-13

Food waste gasification integrated with CO_2 electrochemical reduction for enhanced hydrogen production

오세빈, 박진우*
동국대학교

본 연구에서는 음식물 쓰레기 가스화 과정에서 발생하는 이산화탄소를 전기화학적으로 환원하여 수소 생산량을 증대시키는 통합 공정을 제안한다. 음식물 쓰레기는 유기물 함량이 높고 전 세계적으로 지속적으로 증가하고 있어, 폐자원 기반 수소 생산의 유망한 원료로 주목된다. 본 공정에서는 음식물 쓰레기를 가스화하여 합성가스를 얻고, 동시에 발생한 CO_2를 포집한 후, 이를 CO_2 전기화학 환원(CO_2ER)을 통해 CO로 전환한다. 생성된 CO는 원래의 합성가스와 혼합되어 수성가스 전환 반응을 거치며, 그 결과 기존 대비 약 1.8배의 수소를 생산할 수 있었다. 에너지 및 경제성 분석 결과, 제안 공정은 에너지 효율 61.60%, 수소 균등화 비용(LCOH) 2.91 $/kg을 기록하여, 기존 공정 대비 각각 7.36%p 향상, 7.4% 비용 절감의 성과를 보였다. 다양한 국가의 음식물 쓰레기 조성을 반영한 시나리오 분석에서도 높은 수소 생산성과 에너지 효율을 유지하였다. 환경적 측면에서는 순산소 연소 기반 CO_2 포집 기술을 도입하여 두 공정 모두 99% 이상의 CO_2 포집률을 달성하였고, 특히 통합 공정은 수소 생산량이 증가했음에도 CO_2 배출량은 현저히 증가하지 않아 환경적 지속 가능성을 유지하였다. 결과적으로 본 연구는 폐기물 기반 바이오수소 생산의 효율성과 확장 가능성을 제시하며, 특히 CO_2ER 통합을 통해 탄소 순환을 강화하고 수소 생산 경제성을 개선하는 유망한 접근임을 보여준다.

PH-14

High Temperature Fuel Cells (HTFCs) Applied for Carbon-Free and Low Carbon Fuels

백소현, 박진우*
동국대학교

본 연구에서는 18MW 규모의 대형 발전을 가능하게 하는 두 종류의 고온 연료 전지 1) 고체 산화물 연료 전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) 2) 용융 탄산염 연료 전지(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) 공정을 설계하였다. SOFC의 경우, 910°C의 셀 작동 온도에서 Cathode 측을 통해 공급된 O_2가 환원되어 O^{2-}가 생성된다. 이는 전해질을 통해 Anode 측으로 운반되며, H_2와 반응하여 H_2O를 생성한다. MCFC의 경우, 650°C의 셀 작동 온도에서 O_2와 CO_2 사이의 전기화학 반응을 통해 CO_3^{2-}가 생성되며, 이와 같은 고유한 반응 메커니즘은 효율적인 탄소 포집 방법을 제공한다. 각각의 연료 전지에 필요한 수소 운반체이자 유망한 무탄소 및 저탄소 연료인 1) 액화 천연가스 2) 암모니아 3) 메탄올을 전지의 외부에서 개질 또는 분해하여 공급 및 비교하는 것이 본 연구의 개요이다. 이러한 여러 종류의 연료 공급에 따라 전지의 작동 성능에 차이가 발생하므로 이를 평가할 수 있는 모델이 필요하며, 본 연구에서는 전지 내 전기화학 반응 관련 파라미터(저항 및 활성화 에너지, 그리고 전지 내 물질의 확산으로 인한 농도 차이)를 고려하여 셀 작동 전압이 계산되는 전기화학적 모델이 제안되었다. 또한, 모델의 신뢰성은 실험 데이터를 이용한 검증을 통해 확보되었다. 공급되는 연료에 따른 셀 작동 전압의 차이는 연료의 공급 유량과 연료 전지의 작동 효율에도 영향을 미칠 수 있다. 액화 천연가스와 암모니아, 그리고 메탄올을 연료로 작동하는 고체 산화물 연료 전지에서 연료의 공급 유량은 각각 214kmol/h, 426kmol/h, 208kmol/h으로 산출되었으며, 전지의 작동 효율은 각각 49.9%, 48.1%, 54.1%로 그 차이를 확인할 수 있었다. 또한, 각 공정의 에너지 흐름과 경제성에 대한 분석이 진행되어 비교되었다.

PH-15

직접 공기 포집과 이산화탄소 전기분해, 가스화 기술을 통합한 지속 가능한 항공유 생산 공정

김도희, 박진우*
동국대학교

전세계적으로 온실가스 배출로 인한 기후 문제에 대응하기 위해 2050년까지 탄소 중립을 달성하는 것이 핵심 목표이다. 그러나 항공 산업에서의 온실가스 배출량은 증가하고 있으며, 지속 가능한 항공유 (SAF)는 이를 해결하기 위한 현실적인 대안으로 여겨지고 있다. 특히, 대표적인 negative emission 기술 중 하나인 직접 공기 포집 (DAC) 기술을 활용하면 원료 공급에 제약이 없다는 점에서 대규모 적용 가능성이 크다. 하지만 DAC 기술의 높은 탄소 포집 비용은 상업화의 주요 장벽이며, 이에 대한 해결 방안이 필요하다. 본 연구에서는 DAC, CO_2 전기분해, 바이오매스 가스화 기술을 통합한 SAF 생산 공정을 제안한다. DAC와 CO_2 전기분해 기술의 통합은 역수성가스전환 반응을 제거할 수 있고, 이는 수소 효율의 향상으로 이어진다. 또한, 바이오매스를 수소 공급원으로 활용하고, CO_2 전기분해 과정에서 발생하는 산소를 가스화제로 사용함으로써 경제성과 환경적 성능을 극대화할 수 있다. 제안된 공정의 성능 분석 결과, 에너지 효율은 54.7%로 나타났으며, SAF의 최소 판매 가격(MFSP)은 $3.38/L로 추정되었다. 만약 탄소세가 $200/t까지 상승하게 된다면 MFSP는 $1.58/L로 감소한다. 전 과정 평가에서는 global warming potential이 -339.7 g CO_2 -eq/MJ SAF로 분석됨에 따라 negative emission을 달성하였다. 불확실성 분석에서는 탄소세가 $0/t에서 $200/t으로 증가하면 MFSP가 SAF의 2050년 추정 비용보다 낮아질 확률은 34.3%까지 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 DAC, CO_2 전기분해, 가스화 기술을 통합한 SAF 생산 전략을 새롭게 제시하며, 또한 기존의 BtL 공정과 PtL 공정과의 성능 비교를 통해 제안한 시스템의 경제적 및 환경적 이점을 입증하였다. 이러한 통합 접근법은 항공 부문의 탈탄소화를 위한 실질적인 경로를 제공하며, 산업의 전환과 전 세계 기후 목표 달성에 기여할 수 있음을 보여준다.

PH-16

Reversible solid oxide cell의 유연한 운전을 통한 저탄소·저비용 Power-to-Methanol 시스템

김윤건, 박진우*
동국대학교

Power-to-Methanol(PtM) 기술은 화학 및 석유화학 산업의 탈탄소화를 실현하기 위한 유망한 대안으로 주목받고 있다. 이는 재생에너지를 기반으로 물을 전기분해해 생성된 수소와 포집된 이산화탄소를 이용해 메탄올을 생산하는 방식으로, 기존 화석연료 기반 생산 방식에 비해 온실가스 배출을 상당히 저감할 수 있다. 하지만, 현재 대부분의 PtM 시스템의 메탄올 생산 단가는 시장 가격 ($300~500/ton)에 비해 현저히 높은 비용을 나타내며, 재생에너지의 간헐성과 변동성으로 인해 에너지 저장 시스템(Energy storage system, ESS)과의 연계가 필연적이기에 시스템 구성의 복잡성을 증가시키는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 PtM 시스템의 메탄올 생산 단가를 획기적으로 절감하고 ESS의 의존도를 최소화하기 위해, 가역 고체 산화물 전지(Reversible solid oxide cell, RSOC)를 기반으로 하는 새로운 형태의 PtM 시스템을 제안하고자 한다. RSOC는 재생에너지 공급 상황에 따라 전기 분해 및 연료 전지 모드를 유연하게 변환함으로써, PtM 시스템의 운영 안정성과 경제적 성능을 향상시킬 수 있다. 제안된 시스템의 기술적 실현성 평가를 위해 심층 에너지 및 경제성 분석이 수행되었다. 분석 결과, 시스템은 전력 변환 효율 65.06%, 전체 에너지 효율 53.41%를 달성하였으며, 메탄올 생산 단가(Levelized cost of methanol, LCOM)는 $725.97/ton으로 기존 그린 수소 기반 메탄올($1,898.12/ton) 대비 61.8%를 절감되었다. 또한, 전력 가격 및 RSOC 스택 가격 변동을 고려한 민감도 분석 결과, 특정 조건에서는 LCOM이 시장 가격 이하로 절감될 수 있는 가능성이 확인되었다. 결론적으로, 제안된 시스템은 기술적·경제적 실현성을 갖춘 저탄소 PtM 솔루션으로, 차세대 재생에너지 연계 메탄올 생산 기술의 유망한 대안으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

PH-17

Biogas-Derived Hydrogen Production Process Design for Hydrogen Turbine

문태현, 박진우*
동국대학교

본 연구에서는 바이오가스를 원료로 수소를 생산하고, 이를 수소 터빈에 활용하는 발전 시스템을 제안한다. 탄소중립 달성을 위한 청정 수소의 활용이 강조되는 가운데, 수소 터빈은 수소 사회로의 전환 과정에서 에너지 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있는 유망한 기술로 주목받고 있다. 수소 터빈 활용을 위한 수소 생산 경로로는 다음의 두 가지 공정이 각각 적용되었다. : 1) Tri-reforming 2) Pyrolysis Tri-Reforming은 기존 수소 생산 공정(SMR, DMR)에 부분 산화 반응을 도입해 반응 열 균형을 개선하고, 높은 수소 수율과 CO_2 저감 효과를 동시에 달성할 수 있는 기술이다. Pyrolysis 공정은 산화제를 사용하지 않고 고온에서 유기물을 열분해하여, 이산화탄소 배출 없이 고순도 수소와 고체 탄소를 동시에 생산한다. 이때 생성되는 고체 탄소인 카본 블랙은 산업적으로 활용 가능한 고부가가치 물질로, 공정의 경제성을 높이는 요소다. 두 공정 모두 화석연료인 천연가스 대신 유기성 폐기물로부터 얻은 재생 가능한 에너지 원료인 바이오가스를 사용함으로써, 온실가스 저감 및 폐기물 자원화 효과를 동시에 기대할 수 있다. 제안된 공정을 적용한 수소 터빈 발전의 균등화 발전 단가(LCOE)는 Tri-Reforming 공정의 경우 $0.155/kWh, Pyrolysis 공정은 $0.191/kWh로, 이는 2024년 기준 한국 청정 수소 포트폴리오 표준(CHPS) 상한 가격인 $0.391/kWh보다 각각 60.4%, 51.4% 낮아 우수한 경제성을 나타내었다. 또한, 탄소세 인상과 탈화석 연료 정책이 강화되는 미래 시나리오에서도 본 공정은 친환경 연료 활용을 통해 경제적 경쟁력을 확보할 수 있는 현실적인 대안으로 평가되었다. 따라서, 본 연구는 바이오가스를 활용한 Tri-Reforming 및 Pyrolysis 공정을 통해 수소를 생산하고 이를 수소 터빈에 적용함으로써, 재생 가능 자원의 고효율 전력화와 탈탄소 발전을 동시에 실현할 수 있는 유망한 기술 경로로 제시될 수 있다.

PH-18

Design and Optimization of CO_2 Capture from Flue Gas Using Single and Blended Amine Absorbents

Bogeon Kim, Jeong-Hoon Sa*

Department of Chemical Engineering (BK21 FOUR), Dong-A University, Busan, Republic of Korea

This study focuses on the design and optimization of a CO_2 capture process from post-combustion flue gas using single or blended amine-based absorbents through process simulation in Aspen HYSYS. Various single and blended amines were simulated to determine the optimal absorbent blending composition and operating conditions for enhanced CO_2 capture performance and energy efficiency. Aspen HYSYS was also employed to conduct an economic analysis of the CO_2 capture system, enabling the assessment of cost-effectiveness under different process configurations. The results provide practical insights for scaling up and implementing amine-based CO_2 capture processes in industrial applications.

감사의 글:

"본 연구는 한국연구재단(RS-2023-00280519), 한국기초과학지원연구원(RS-2024-00404896), 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479), 교육부, 부산광역시, 부산형 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 지원을 받아 수행되었습니다."

PH-19

Evaluating Low-Carbon Hydrogen Pathways for Decarbonizing Petroleum Refinery Hydroprocessing

Khan Muhammad Ansub, Jay Liu*
Pukyong National University, Busan, Republic of Korea.
*E-mail: jayliu@pknu.ac.kr

Hydrogen plays a vital role in producing cleaner fuels within petroleum refineries, yet conventional hydrogen production accounts for approximately 9% of refinery CO_2 emissions. Addressing these emissions is increasingly important, with low-carbon hydrogen sources offering a potential solution for processes such as hydrodesulfurization (HDS) and hydrocracking (HCR). This study evaluates the economic and environmental performance of various low-carbon hydrogen options, focusing on domestic blue hydrogen as well as blue and green hydrogen produced from imported ammonia. Process simulations, life cycle assessments, and techno-economic analyses were utilized to quantify emission reductions and associated costs. Findings indicate that domestic blue hydrogen achieves a CO_2 avoidance cost (CAC) of $100 per tonne for both HDS and HCR, delivering significant reductions in global warming potential compared to conventional hydrogen. In contrast, hydrogen derived from imported ammonia currently faces higher CACs, $300 per tonne for green ammonia and $133 per tonne for blue ammonia, given existing market prices. Domestic blue hydrogen emerges as the most cost-effective approach for reducing refinery emissions at present, while improvements in the economics of imported hydrogen are required for greater competitiveness.

PH-20

Unlocking the Regional Economic Potential of Power-to-Methanol Pathway through Spatial Techno-Economic Mapping

Hira Mahmood, Jay Liu*
Pukyong National University, Busan, Republic of Korea.
*E-mail: jayliu@pknu.ac.kr

The escalating challenge of climate change has accelerated the shift from conventional fossil-based energy and chemical manufacturing toward sustainable alternatives. Among these, Power-to-Methanol (PtM) emerges as a promising solution by converting renewable energy and captured CO2 into e-methanol, a versatile fuel and chemical feedstock. However, the feasibility of PtM process is critically influenced by regional factors such as renewable resource availability, technology maturity and economic factors. This study presents a comprehensive spatial techno-economic of an integrated PtM system for e-methanol synthesis, focusing on solid oxide electrolyzer cell (SOEC). Detailed process simulations were conducted across three countries, Australia (AU), the United States (US), and South Korea (SK), considering solar, wind, and hybrid renewable energy scenarios. The techno-economic analysis incorporates location-specific parameters, such as levelized cost of electricity (LCOE), taxes, and discount rates to estimate capital expenditures (CAPEX), operating costs (OPEX), and minimum methanol selling prices (MMSP). For the US, the MMSP was found to be $1.329/kg for solar-driven systems, $1.332/kg for hybrid, and $1.336/kg for wind. In AU, corresponding values were $1.371/kg, $1.393/kg, and $1.416/kg. SK showed higher MMSPs of $1.967/kg, $2.053/kg, and $2.140/kg. The spatial assessment reveals significant regional variation in economic viability, driven primarily by local renewable electricity cost. These results enable the optimal sit selection for PtM deployment and provide actionable insights for policymakers and industry stakeholders aiming to accelerate cost-effective e-methanol production.

PH-21

An Integrated Anaerobic Digestion and Dry Methane Reforming Process for Sustainable Aviation Fuel Production

Seungeun Kim[1], Jeongheon Kim[1], Inkyu Lee[1*]

[1]Pusan National University

Decarbonization of the aviation sector via carbon capture and electrification is highly constrained, making sustainable aviation fuel (SAF) a promising clean energy alternative. However, the high cost of feedstocks increases production costs of SAF and decreases its economic viability. Food waste, which is predominantly landfilled and emits greenhouse gases, has significant potential for valorization. Thus, the gasification-based Fischer-Tropsch process can convert low-cost waste into SAF [1], making it suitable for the valorization of food waste and reduction of SAF production costs. However, CO_2 produced during gasification is captured, which decreases the carbon conversion efficiency (CCE) [2]. Consequently, it reduces SAF production rate and an increase in levelized cost of fuel (LCOF). Therefore, it is necessary to utilize CO_2 to improve CCE. This study proposes producing biogas and digestate through anaerobic digestion (AD). The digestate is gasified, generating CO_2. The CO_2 is subsequently converted into syngas via dry methane reforming (DMR) with the biogas to enhance carbon conversion efficiency (CCE). The techno-economic analysis showed that the increase in SAF production rate due to higher CCE outweighed the increase in capital costs, reducing the LCOF.

References

1. Tijmensen et al., “Exploration of the possibilities for production of Fischer-Tropsch liquids and power via biomass gasification,” Biomass Bioenergy, 23(2), 129-152 (2002).
2. Murugesan et al., “Food waste valorization via gasification - A review on emerging concepts, prospects and challenges,” Sci. Total Environ., 851, 157955 (2022).

PH-22

4E analysis of synthetic natural gas production process using plastic waste via tar steam reforming and external hydrogen utilization

Doyeong Ahn, Dongyeop Yeom, and Inkyu Lee*
School of Chemical Engineering, Pusan National University

Waste plastics cause severe environmental pollution when landfilled or incinerated, making recycling essential [1]. Chemical recycling offers advantages of producing high value-added products and achieving high recycling rates, and has therefore been extensively studied [2]. Producing synthetic natural gas (SNG) via chemical recycling enables the use of existing natural gas infrastructure and can contribute to energy self-sufficiency in regions with limited fossil fuel resources. However, previous studies on SNG production from waste plastics have limitations, the removal of large quantities of unutilized tar, and the emission of a substantial fraction of the carbon in waste plastics as CO_2 result from low hydrogen fraction. These issues reduce both SNG yield and economic feasibility.

To address these limitations, this study proposes a process introducing tar steam reforming and external hydrogen supply. The conversion rate of waste plastics to SNG increased through tar steam reforming and the introduction of external hydrogen. In addition, the use of external hydrogen enabled the removal of the water–gas shift reactor and CO_2 removal unit, which were utilized to increase the hydrogen fraction. The proposed process achieved approximately 37% higher yield, thereby improving economic feasibility. Furthermore, both energy and exergy efficiencies of the process increased, and an environmental analysis confirmed the environmental benefits of waste plastic recycling through the proposed approach.

References

1. D. Saebea et al, "Gasification of plastic waste for synthesis gas production", Energy Reports, 6 (2020).
2. TT. Le et al, “Comprehensive analysis of waste-to-hydrogen technologies integrated with circular economy principles: Potential and challenges”, International Journal of Hydrogen Energy. (2025).

PH-23

Comprehensive environmental, economic, and uncertainty assessment of sustainable methanol pathways

Hyewon Jeong, Sihwan Park, Inkyu Lee*
Pusan National University

Methanol is a key feedstock for the production of various chemicals and clean fuels, and its production process needs to shift toward renewable resource-based pathways to achieve carbon neutrality [1]. Based on the type of renewable feedstock utilized, sustainable methanol production can be classified into biomass-to-methanol (BtM), which uses biomass, and power-to-methanol (PtM), which uses captured CO_2 and H_2 derived from renewable-powered electrolysis. Recently, the hybrid power-assisted biomass-to-methanol (PBtM) pathway has been proposed, combining biomass gasification from BtM with electrolytic H_2 from PtM to enhance carbon efficiency and cost competitiveness [2, 3]. All three pathways rely on feedstocks such as biomass and renewable electricity, which are major cost drivers with significant price variability. Therefore, it is essential to incorporate uncertainty into long-term economic evaluations.

In this context, this study conducted environmental, economic, and uncertainty assessments for BtM, PtM, and PBtM pathways. Environmental performance was evaluated using carbon efficiency and CO_2 emissions, while economic feasibility was examined through the levelized cost of methanol. Uncertainty analysis of economic parameters was conducted by employing Monte Carlo simulations. The results provide insights into process robustness, thereby offering a basis for selecting sustainable methanol production strategies resilient to policy and market volatility.

References

1. Adnan et al., “Comparative techno-economic and life-cycle assessment of power-to-methanol synthesis pathways,” Appl. Energy, 278, 115614 (2020).
2. Zhang et al., “Techno-economic optimization of biomass-to-methanol with solid-oxide electrolyzer,” Appl. Energy, 258, 114071 (2020).
3. de Fournas et al., “Techno-economic assessment of renewable methanol from biomass gasification and PEM electrolysis for decarbonization of the maritime sector in California,” Energ. Conver. Manage., 257, 115440 (2022).

PH-24

Development of Hydrogen Liquefaction Process with Three-Stage Refrigeration: Focusing on Thermodynamic Perspective

Sihwan Park[1], Duho Kang[1], Minseo Jeong[2], Haksung Kim[2], Moonsuk Choi[2], Inkyu Lee[1,*]

[1]School of Chemical Engineering, Pusan National University

[2]Decarbonization Solution Team, GS Engineering & Construction Corporation

Hydrogen is considered a clean energy carrier, and liquid hydrogen (LH_2) has been gaining attention for large-scale and long-distance transportation. However, hydrogen liquefaction consumes a substantial amount of energy due to the extremely low boiling point of hydrogen, which raises the LH_2 production costs [1]. Therefore, reducing energy consumption is a major concern in developing hydrogen liquefaction processes. In commercial liquefiers, the refrigeration cycle consists of the precooling and main cooling cycles to reduce overall energy consumption [2]. Given that the main cooling cycle is a major contributor to liquefaction energy consumption, this study proposes a process design that can reduce the refrigeration load of the main cooling cycle by introducing a second precooling cycle. Moreover, the second precooling cycle is modified to segment the refrigerant recovery pressure. The optimal operating conditions were determined using a Bayesian optimization algorithm to minimize energy consumption, and the optimized process is analyzed from a thermodynamic perspective.

References

1. Wijayanta et al., “Liquid hydrogen, methylcyclohexane, and ammonia as potential hydrogen storage: Comparison review,” Int. J. Hydrogen Energy, 44(29), 15026-15044 (2019).
2. Bian et al., “Thermodynamic and economic analysis of a novel hydrogen liquefaction process with LNG precooling and dual-pressure Brayton cycle,” Energ. Conver. Manage., 250, 114904 (2021).

PH-25

Utilizing Liquid Hydrogen for the CO_2-to-Olefin Production to Improve Energy, Economic, and Environmental Performance

Duho Kang[1], Sihwan Park[1] and Inkyu Lee[1*]
[1]Pusan National University

Reducing carbon emissions from the chemical industry is one of the most important tasks to mitigate global warming. The olefin production process is a significant contributor to carbon emissions in the chemical industry, necessitating efforts to reduce these emissions. From an environmental perspective, utilizing CO_2 as a feedstock for olefin production is one of the promising technologies for reducing emissions. As this process also utilizes hydrogen as a feedstock, a proper supply of hydrogen should be considered. Among hydrogen carriers, liquid hydrogen (LH_2) is particularly suitable for CO2-to-Olefin (CTO) processes, as it enables the use of high-purity hydrogen. Moreover, the cold energy of LH_2 can be utilized during vaporization for use in olefin separation. Therefore, this study proposes conceptual CTO processes that utilize LH_2 and CO_2 as feedstocks. The cold energy of LH_2 is utilized for power generation and olefin separation to reduce the energy consumption of CTO processes. In addition, two configurations were designed, considering heat supply by hydrogen combustion and electric heating, each affecting the reactor heating strategy, steam production method, and hydrogen consumption. This four-case is designed for energy, economic, and environmental comparison.

References

1. Lee, J.-S., Cherif, A., Yoon, H.-J., Seo, S.-K., Bae, J.-E., Shin, H.-J., Lee, C., Kwon, H. and Lee, C.-J., "Large-scale overseas transportation of hydrogen: Comparative techno-economic and environmental investigation", *Renew. Sust. Energ. Rev*, **165**, 112556 (2022).
2. Terlouw, T., Rosa, L., Bauer, C. and McKenna, R., "Future hydrogen economies imply environmental trade-offs and a supply-demand mismatch", *Nat Commun*, **15**, 7043 (2024).

PH-26

Sustainable Hydrogen Production Process Integrating Waste Plastic Gasification and Carbon Dioxide Electrolysis

Dongyeop Yeom[1], Doyeong Ahn[1] and Inkyu Lee[1*]

[1]School of Chemical Engineering, Pusan National University, 2 Busandaehak-ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

Waste plastics pose a significant environmental threat. Accordingly, research on their valorization into high value chemicals has gained considerable attention. The expanding demand for hydrogen as a clean energy carrier has further stimulated studies on hydrogen production via waste-plastic gasification [1]. However, conventional gasification process is hindered by low energy efficiency and limited hydrogen yield. Additionally, supplying the heat required for gasification by combusting auxiliary fuel with air releases large quantities of CO_2. Amine-based absorption is widely employed for CO_2 capture, yet it entails high energy consumption and operating costs [2]. To overcome these challenges, this study proposes a sustainable hydrogen production process that integrates waste-plastic gasification with CO_2 electrolysis. Carbon monoxide produced in the electrolyzer is fed to the downstream water-gas-shift (WGS) reactor to enhance hydrogen generation. Also, by-product oxygen is utilized for oxy-fuel combustion, simplifying the flue gas to H_2O and CO_2. High purity CO_2 is subsequently recovered through simple steam condensation, thereby improving both economic and environmental performance.

References

1. Al-Qadri, A. A., Ahmed, U., Ahmad, N., Jameel, A. G. A., Zahid, U., & Naqvi., "A review of hydrogen generation through gasification and pyrolysis of waste plastic and tires: Opportunities and challenges." *Int. J. Hydrogen Energy*, 77, 1185-1204 (2024).
2. Ahn, D., Noh, W., Park, J., & Lee, I., "Cryogenic carbon capture as the bridge for integrating hydrogen production and Liquefaction: Enhancing the sustainability of blue hydrogen Production-to-Storage systems." *Chem. Eng,* 504, 158811 (2025).

PH-27

Process Integration of Waste Tire Pyrolysis and CO_2-based Fischer-Tropsch Synthesis for Sustainable Aviation Fuel Production

Jeongheon Kim[1], Hyunju Cho[1], Inkyu Lee[1 *]
[1]Pusan National University

Previous studies on sustainable aviation fuel (SAF) have often overlooked the aromatic content, despite its importance as specified in ASTM D7566. Globally, 1.5 billion tires are produced each year, generating an estimated 17 million tons of used tires. Although a portion of these tires are recycled or recovered, substantial amounts are still landfilled, posing serious environmental and public health risks [1]. Waste tires, however, can yield substantial amounts of aromatic compounds upon pyrolysis [2]. These aromatics have high energy density and can be effectively utilized to meet the aromatic content requirements specified in ASTM D7566 for SAF. In this study, the aromatics derived from waste tire pyrolysis were blended with SAF to satisfy ASTM D7566 specifications. A base case that utilizes syngas for aromatic production was established for comparison. Energy and economic assessments revealed that the waste tire-based process offers significant advantages over the syngas-based route, demonstrating both higher energy efficiency and improved economic performance.

References

1. Dina Czajczyńska, et al. Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review, *Energy*, 134, 1121-1131 (2017).

2. Guohao Zhang, et al. Properties and utilization of waste tire pyrolysis oil: A mini review, Fuel Processing Technology, 211, 106582 (2021).

PH-28

Design of Sustainable Urea Production Process: Integration of Methane-to-Urea with Power-to-Urea

Sebin Park, Seoyeon Cho and Inkyu Lee *

School of Chemical Engineering, Pusan National University, 2 Busandaehak-ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

Urea is the most common fertilizer used in agriculture, as well as in industrial and food sectors. In the conventional urea production process, urea is produced from ammonia and CO_2. Ammonia is synthesized using hydrogen produced via steam methane reforming (SMR), while CO_2 in the raw syngas is captured [1]. However, SMR requires a significant amount of reaction heat supplied by air combustion of fossil fuels, without additionally capturing CO_2 in the flue gas due to the high cost of CO_2 capture process based on chemical absorption. This leads to a key challenge for the conventional urea process, that is, high overall CO_2 emissions. [2]. To address this issue, this study proposes an integrated process of methane-to-urea (MtU) and power-to-urea (PtU). PtU supplies electrolytic hydrogen for urea synthesis, enabling a reduction in MtU capacity and its CO_2 emissions. Additionally, oxy-fuel combustion enables economic CO_2 capture via water condensation using oxygen co-produced by the air separation unit and the water electrolysis cell. A techno-economic analysis was conducted to evaluate the trade-off between the benefits of reduced fuel consumption and lowered CO_2 capture costs, and the additional electrolyzer costs for the PtU system.

References

1. Zhang et al., "Techno-economic comparison of 100% renewable urea production processes." Appl. Energ, 284, 116401 (2021).
2. Mao et al., “Green urea production for sustainable agriculture.” Joule, 8, 1224-1238 (2014).

PH-29

탄소세 시나리오에 따른 그레이, 블루, 그린 암모니아 생산 공정의 기술-경제성 평가

이예진[1], 조서연[1], 이인규[1*]
[1]부산대학교

암모니아는 기초 화학물질로써 다양한 목적으로 사용되며, 최근 수소 경제로의 전환이 촉구되면서 유망한 수소 캐리어로 주목받고 있다. 수소 생산 기술에 따라 암모니아는 화석연료 기반 grey, grey 암모니아 생산공정에서 배출되는 이산화탄소를 포집하는 blue, 신재생 전기 기반 물 전기분해 기술을 사용하는 green 암모니아로 구분할 수 있다 [1]. Grey 암모니아는 화석연료로 인해 많은 이산화탄소를 배출하며, blue, green 암모니아는 이산화탄소 배출량은 낮지만 grey 암모니아에 비해 높은 가격을 가진다 [1]. 본 연구에서는 천연가스 기반 grey, 아민 포집 기반 blue, alkaline electrolysis(AE) 기반 green, solid oxide electrolysis(SOE) 기반 green 암모니아 단가를 비교 및 분석하였다. 또한 blue, green 암모니아 각각에 대해 grey 암모니아와 동등한 가격 경쟁력을 가지기 위해 필요한 탄소세 threhsold를 도출하였다. 분석 결과, grey, blue, AE-green, SOE-green 암모니아의 생산단가는 각각 305 $/ton NH_3, 378 $/ton NH_3, 568 $/ton NH_3, 715 $/ton NH_3으로 나타났다. 탄소세 threshold의 경우 blue, AE-green, SOE-green에 대해 각각 29 $/ton CO_2, 105 $/ton CO_2, 163 $/ton CO_2가 필요한 것으로 나타났다.

참고문헌

[1] Zhang, H., et al. "Techno-economic comparison of green ammonia production processes," *Appl. Energy.*, **259**, 114135 (2020).

PH-30

암모니아 분해 촉매 종류에 따른 공정 최적화 및 기술-경제성 평가

조서연[1], 이예진[1], 이인규*[1]
부산대학교[1]

암모니아는 유망한 수소 운반체로 주목받고 있으며, 수소로 분해되는 단계를 거쳐 최종 사용자에게 전달된다. 암모니아 분해는 다단 촉매 반응으로 이루어지며, 이때 Nickel (Ni) 및 Ruthenium (Ru) 촉매가 적절한 촉매로 평가받고 있다 [1]. Ni 촉매는 Ru 촉매에 비해 촉매 활성이 낮지만 가격이 저렴하고, Ru 촉매는 촉매 비용은 높지만 저온에서도 우수한 반응 활성을 보인다는 장점을 갖는다 [2]. 두 촉매의 이와 같은 잠재성에도 불구하고, 개별 촉매의 특성을 고려한 최적 암모니아 분해 공정을 설계하고 두 공정의 경제성을 비교·평가하는 논의는 여전히 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구는 각 촉매의 반응 활성을 고려한 Ni 및 Ru 기반 최적 공정을 제안하고, 이들에 대한 포괄적인 기술-경제성 평가를 수행하였다. 특히, 공정 내 Ni 및 Ru 촉매의 반응 활성과 가격 간의 trade-off 관계를 면밀하게 분석하였다. 그 결과, Ru 기반 최적 공정이 Ni 기반 최적 공정과 비교하여 촉매 관련 비용이 높음에도 불구하고 열역학 및 경제적 관점에서 더욱 유리하였다.

참고문헌

1. Cho, S., Mun, H., Park, J., Lee, I., “Enhancing the Cost-Competitiveness of Green Ammonia-Based Power Systems: Hybrid Solid Oxide Fuel Cells and Gas Turbines,” *Energy Convers. Manag.*, 325, 119430 (2025).
2. Su, T., Guan, B., Zhou, J., Zheng, C., Guo, J., Chen, J., Zhang, Y., Yuan, Y., Xie, W., Zhou, N., Dang, H., Xu, B., Zhen, H., “Review on Ru-Based and Ni-Based Catalysts for Ammonia Decomposition: Research Status, Reaction Mechanism, and Perspectives,” *ENERG FUEL*, 37 (12), 8099-8127 (2023)

PH-31

혼합 아민의 CO_2 흡수 성능 예측을 위한 도메인 지식 기반 머신러닝 모델 개발

김민재, 주종효[1], 김정환*
연세대학교 화공생명공학과, [1]한국생산기술연구원 친환경재료공정연구그룹

고효율의 습식 이산화탄소 포집 공정을 위해 아민 흡수제의 성능 향상이 요구되며, 특히 재생 에너지 소비를 줄이기 위한 혼합 아민 조성의 최적화가 주목받고 있다.[1] 그러나 혼합 아민 시스템은 화학 반응 메커니즘이 복잡하고 실험 데이터가 부족하여, 기존의 열역학 기반 모델만으로는 설계에 한계가 있다.[2, 3] 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자 혼합 아민의 CO_2 흡수 성능을 예측할 수 있는 인공지능 기반 모델링 프레임워크를 제안한다. 제안된 모델은 두 개의 단일 아민 기반 예측 모델을 통합한 도메인 기반 예측 모델(domain-informed model)로 구성되며, 혼합 아민 조성에 따른 CO_2 용해도(CO_2 loading)를 정량적으로 예측한다. MEA/MDEA, DEA/MDEA, MEA/AMP 세 종류의 혼합 아민 조합에 대해 총 587개의 문헌 데이터를 기반으로 모델을 학습하였으며, R^2 score를 평가지표로 활용하여 예측 정확도를 평가하였다. 제안된 모델은 기존 혼합 아민 예측 모델과 비교하여 평균적으로 향상된 R^2 score를 달성하였으며, 특히 각 혼합 아민 조합에 대해 일관된 성능 개선을 보였다. 이를 통해 본 프레임워크는 혼합 아민 조성 설계 시 복잡한 실험 없이도 CO_2 loading과 같은 기액평형 특성을 정량적으로 예측할 수 있어, 고효율 이산화탄소 흡수제 개발을 가속화하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Patricia Mores, Nicol´as Scenna, and Sergio Mussati. “CO2 capture using monoethanolamine (MEA) aqueous solution: Modeling and optimization of the solvent regeneration and CO2 desorption process”. In: Energy 45.1 (2012), pp. 1042–1058.

2. Ugochukwu E Aronu et al. “Solubility of CO2 in 15, 30, 45 and 60 mass% MEA from 40 to 120 C and model representation using the extended UNIQUAC framework”. In: Chemical Engineering Science 66.24 (2011), pp. 6393–6406.

3. Hans Grensemann and J¨urgen Gmehling. “Performance of a conductor like screening model for real solvents model in comparison to classical group contribution methods”. In: Industrial & engineering chemistry research 44.5 (2005), pp. 1610–1624.

PH-32

상용 리튬이온배터리 바인더의 제조 및 재활용 공정에 관한 기술경제성 평가

김은서[1], 김정동, 김정환[1,*]
연세대학교 화공생명공학과[1]

배터리 산업의 성장과 함께 바인더 소재는 전극 제조 공정의 핵심 구성 요소로서 그 중요성이 증가하고 있다. 특히, 현재 상용 리튬이온배터리 제조에서는 불소계 바인더, 그중에서도 PTFE가 널리 사용되고 있으며, 이들의 제조 및 재활용 과정은 환경적·경제적 측면에서 중요한 고려 요소이다. 본 연구는 PTFE 바인더의 제조 과정과 재활용 과정을 대상으로 공정 모델링을 수행하고, 기술경제성 평가(Techno-Economic Analysis, TEA)를 통해 전주기적(Life Cycle) 경제성을 분석하였다.
분석 범위는 원재료 생산부터 제조 공정, 사용 후 재활용 단계까지를 포함하며, 원재료 생산 비용, 공정 에너지 소비량, 재활용 수율, 처리 비용 등 주요 지표를 산출하였다. 이를 위해 각 공정 단계별 물질·에너지 흐름을 모델링하고, 설비 투자비와 운영비를 반영한 경제성 평가를 수행하였다. 분석 결과, PTFE 바인더의 제조 단계에서 높은 에너지 소비와 초기 원재료 조달 비용이 경제성 저하의 주요 요인으로 나타났다. 본 연구는 PTFE 바인더의 전주기 비용 구조와 경제적 병목 구간을 규명함으로써, 향후 공정 효율화 및 대체 소재 개발의 경제성 검토에 기초 데이터를 제공한다

참고문헌
1. Oh, H. et al. “Development of a feasible and scalable manufacturing method for PTFE-based solvent-free lithium-ion battery electrodes”. Chemical Engineering Journal, **491**, 151957. (2024).
2. Chen, W. et al. “Nondestructive flash cathode recycling”. Nature Communications, **15(1)**, 6250. (2024).
3. Lu, Y. et al. “Dry electrode technology, the rising star in solid-state battery industrialization”. Matter, **5(3)**, 876-898. (2022).

PH-33

재생에너지 불확실성을 고려한 수소 메탄올 동시 생성 공정 개발

이성민[a], 김정동[a], 문일[a], 김정환[a,†]

[a]연세대학교 화공생명공학과

(kjh24@yonsei.ac.kr)

본 연구는 재생에너지의 불확실성과 전력망 사용의 잠재적 제약을 고려하여 신뢰할 수 있는 power-to-dual hydrogen and methanol (PtHM) 공정 설계의 복잡성을 다룬다. 이러한 문제들을 해결하기 위해, 전력망 지원을 고려하고 시계열 재생에너지 프로필의 불확실성이 설계와 최적 규모 결정에 미치는 영향을 파악하는 데이터 기반 최적화 접근법을 제시한다.

기존 방법들과 달리, 이 접근법은 불확실성을 단순히 확률적 범위로만 다루지 않고, 생성적 적대 신경망(GAN)과 t-분산 확률적 이웃 임베딩(t-SNE)을 활용하여 공간 차원에서 재생에너지의 복잡한 패턴을 포착한다. 최적화 과정에서는 생산비용의 평균과 분산을 모두 고려하며, 시스템의 에너지 공급 수준에 대한 신뢰성 분석을 바탕으로 한 확률적 제약조건을 포함한다.

한국 제주도를 사례 연구로 활용하여, 재생에너지 불확실성 하에서 생산비용의 평균과 분산, 그리고 기타 성능 지표들 간의 균형을 달성하는 방법을 보여주며, 유사한 상황에서의 의사결정에 유용한 통찰을 제공한다.

Keywords: Power-to-X, Renewable energy uncertainty, Chemical energy storage

PH-34

친환경 수소 운송과 저장 효율 향상을 위한 LNG—SMR-액화 수소 결합 공정 설계

송경민[1], 변주영[1], 고진[1], 김정환[*]
연세대학교 화공생명공학과[1]

최근 기후 변화로 인한 지구 온난화의 가속화와 탄소 배출 저감을 위한 노력의 일환으로, 2050년 탄소중립(Net-Zero) 달성을 목표로 하는 탈탄소 에너지 산업이 빠르게 발전하고 있다. 그중에서도 수소는 다양한 산업 분야에서의 활용 가능성으로 인해, 친환경 에너지 경제체계 구축을 위한 핵심 에너지원으로 주목받고 있다. 이에 따라 수소 기반의 친환경 에너지망을 구축하기 위해서는 수소의 생산뿐만 아니라, 효율적인 저장 기술 확보 역시 필수적이다. 본 연구에서는 액화천연가스(LNG)의 분리 공정을 기반으로 수소를 생산하고, 이 과정에서 발생하는 냉열을 액화수소 공정에 효과적으로 연계함으로써, 수소의 친환경적 생산과 저장을 동시에 촉진할 수 있는 고효율 통합 공정을 제안한다. 제안된 공정은 먼저 SMR(Steam Methane Reforming) 반응을 통해 LNG로부터 수소를 분리하며, 이후 생성된 수소는 저장을 위해 액화 과정을 거친다. 이때, LNG가 기화되며 방출하는 -5360.55 kJ/kg, -160.54°C의 냉열을 활용하여 수소를 예냉각(pre-cooling)하고, 열적 안정성이 높은 para-수소로의 전환을 유도한다. 해당 전환 공정에서는 $Fe(OH)_3$ 촉매를 사용하여 99.8%의 ortho-para 전환 효율을 달성하였다. 또한 액화수소 공정에서 사용되는 극저온 헬륨 냉매는 재순환 시스템을 통해 엑서지 효율을 향상시켰다.
LNG-SMR-액화수소 통합 공정에 LNG 냉열 재활용 및 헬륨 냉매 재순환 시스템을 도입함으로써, 친환경 수소의 생산과 저장을 동시에 실현하는 에너지 효율적 모델을 구축하였다. 본 연구는 수소 기반 탄소중립 실현을 위한 공정 통합 전략의 기술적 타당성을 제시하며, 향후 친환경 수소 경제 활성화에 기여할 수 있는 시사점을 제공한다

참고문헌

1. Yin, Liang, and Yonglin Ju. "Process optimization and analysis of a novel hydrogen liquefaction cycle." International Journal of Refrigeration 110:219-230 (2020)

2. Gielen, Dolf, Emanuele Taibi, and Raul Miranda. "Hydrogen: A reviewable energy perspective: Report prepared for the 2nd hydrogen energy ministerial meeting in tokyo, japan." (2019).

3. Nnabuife, Somtochukwu Godfrey, et al. "The prospects of hydrogen in achieving net zero emissions by 2050: A critical review." Sustainable Chemistry for Climate Action 2 (2023)

4. Yadav, Sandeep, Srinivas Seethamraju, and Rangan Banerjee. "Cold energy recovery from liquefied natural gas regasification process for data centre cooling and power generation." Energy 283:128481. (2023)

5. Song, Wenhao, et al. "Simulation and Analysis of a Novel Hydrogen Liquefaction Process Based on the Liquid Nitrogen and Helium Joule-Brayton Cycle." ACS omega 10.8 (2025): 8089-8102.

PH-35

혼합 신가스 기반 메탄올 생산 공정의 설계-운영 연계 최적화

최현준, 변주영, 김정동, 김정환*
연세대학교 화공생명공학과

최근 메탄올은 수송 연료, 수소 운반체 및 화학 중간체로의 활용 가능성에 기반하여 차세대 에너지 전환의 핵심 물질로 주목받고 있다. 특히 국제해사기구(IMO)와 유럽연합(EU)의 탄소중립 정책에 따라 메탄올 수요는 2050년까지 4배 이상 증가할 것으로 예상된다 [1]. 그러나 기존 그레이 메탄올은 높은 온실가스 배출량을 가지며, 그린 메탄올은 재생에너지의 간헐성과 높은 생산비용으로 인해 경제성이 낮아 독립적 적용에 한계가 있다 [2]. 이에 본 연구에서는 재생에너지 기반 신가스와 화석연료 기반 신가스를 혼합 활용하는 메탄올 생산 시스템에 대한 설계-운영 연계 최적화 프레임워크를 제안한다. 상위 단계에서는 베이지안 최적화를 통해 저장 용량, 재생에너지 구성비 등 주요 설계변수를 최적화하고, 하위 단계에서는 연간 시간별 운영 시나리오에 대해 혼합정수 비선형계획(MINLP) 기반의 운영계획을 수립하는 이원 최적화(bi-level optimization) 접근법을 적용하였다.실제 지역별 재생에너지 자원 및 전력 가격 시계열 데이터를 활용한 최적화 결과, 덴마크 Syddanmark 지역에서 최고 재생 신가스 비율(40.5%)과 메탄올 생산량(12,782.6 kg/h)을 달성하였으며, 다른 지역 대비 약 13% 높은 생산성과 최저 생산비용을 기록하였다. 모든 대상 지역에서 뚜렷한 계절별 생산량 차이가 관찰되었으며, 겨울철 생산량은 여름철 대비 최대 43.5% 증가하였다. 본 연구는 탄소중립 사회 이행 과정에서 그린 메탄올의 실질적 확산을 위한 경제적이고 유연한 전환 전략을 제시하며, 경제성과 운영 안정성 간의 균형을 고려한 최적 설계 및 운영 방안을 도출하였다.

참고문헌

1. Fasihi, M., and Breyer, C., "Global Production Potential of Green Methanol Based on Variable Renewable Electricity," Energy & Environmental Science, 17(10), 3503-3522 (2024).

2 Sollai, S., Porcu, A., Tola, V., Ferrara, F., and Pettinau, A., "Renewable Methanol Production from Green Hydrogen and Captured CO_2 : A Techno-Economic Assessment," Journal of CO_2 Utilization, 68, 102345 (2023).

PH-36

탄소 포집 및 막 증류 융합을 통한 고효율 리튬 생산 공정의 기술경제적 분석

김민지, 김선우, 김정환*
연세대학교 화공생명공학과

전기차 산업의 급성장과 기술 혁신으로 리튬 수요가 폭발적으로 증가하고 있다. 그러나 현재 상용화된 염호 자연 증발 기반 리튬 생산 방식은 생산 주기가 매우 길고 기후 조건에 크게 의존하는 한계가 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 에너지를 이용한 농축 공정이 개발되고 있으나, 높은 에너지 사용량, 과다한 화학약품 투입, 막대한 폐수 처리 비용 등으로 인해 상업적 한계에 직면해 있다[1]. 본 연구에서는 탄소 포집 및 활용(Carbon Capture Utilization, CCU) 기술과 막 증류(Membrane Distillation, MD)를 통합하여 에너지 효율성과 환경적 지속가능성을 동시에 확보한 리튬 생산 공정을 제안한다. 제안된 공정은 나노여과(Nanofiltration, NF)−MD 기반의 염수 고농축, CCU 연계 리튬 탄산화 반응, 폐수 회수를 위한 MD 단계로 구성된다. NF−MD 고농축 공정은 기존 자연 증발법 대비 약 12배 빠른 속도로 염수를 농축할 수 있으며, CCU를 결합한 리튬 탄산화 단계에서는 농축된 염수 및 폐수를 활용하여 리튬 회수와 동시에 공정 내 화학물질 재생산을 실현한다[2]. 또한, 탄산화 공정 중 발생하는 폐수는 MD 공정을 통해 담수화하여 자원 순환을 극대화하였다. 시뮬레이션 및 기술경제성평가 결과, 본 공정은 기존 자연 농축 기반 공정 대비 리튬 생산 비용을 약 83.6% 절감하는 것으로 나타났다. 본 연구는 차세대 리튬 생산 공정의 경제성과 환경성을 동시에 확보할 수 있는 유망한 기술적 대안을 제시하며, 산업 현장에서의 실용화 가능성을 확인하였다.

참고문헌

1. Park, S. H., Kim, J. H., Moon, S. J., Jung, J. T., Wang, H. H., Ali, A., ... & Lee, Y. M., “Lithium recovery from artificial brine using energy-efficient membrane distillation and nanofiltration”, Journal of Membrane Science, 598, 117683 (2020).

2. Lee, H., Lim, J., & Kim, J., “Novel lithium production process using desalination wastewater and waste heat from natural gas combined cycle”, Energy Conversion and Management, 292, 117396 (2023)

PH-37

바이오전력 공급망 최적화: 텍사스 사례 연구

정세민[1], 김정동[1], 김정환*
연세대학교 화공생명공학과

지속가능한 에너지 전환을 위한 바이오매스 활용은 온실가스 감축에 기여할 수 있는 유망한 대안이다. 그러나 바이오매스는 에너지 밀도가 낮고, 공급지가 지리적으로 분산되어 있어 물류 효율성에 한계가 존재한다. 본 연구는 바이오전력 공급망의 총비용을 최소화하기 위한 최적화 모델을 제안한다. 특히 저밀도·분산형 바이오매스를 고밀도 연료로 전환하는 펠릿화 전처리 위치 선정을 핵심 요소로 설정하고, 도심 폐목재 공급처 - 전처리시설(RDC) - 발전소 - 소비자 간 4단계 네트워크를 구축하였다. 텍사스 주의 실제 GIS 데이터를 기반으로 공급망을 수리적으로 모델링하였으며, 파이썬 기반 Pyomo를 통해 혼합정수선형계획(MILP)을 구현한 후, GLPK 솔버로 최적 해를 도출하였다. 분석 결과, RDC 9개 중 2개를 전략적으로 활성화함으로써 연간 4,184,579달러의 비용 절감이 가능한 것으로 나타났다. 본 연구는 바이오전력 공급망의 효율성과 경제성을 동시에 개선하며, 궁극적으로 온실가스 감축 및 탄소중립 목표 달성에 기여할 수 있다. 더불어, GIS 기반의 공급망 최적화 모델은 향후 재생에너지 시스템 설계 및 국가 차원의 에너지 물류 정책 수립에 실질적인 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Sokhansanj et al., "Large-scale production, harvest and logistics of switchgrass (Panicum virgatum L.) – Current Technology and Envisioning a Mature Technology," *Biofuels Bioprod. Bioref.*, 3(2), 124–141 (2009).

2. Searcy et al. “The relative cost of biomass energy transport,” *Appl Biochem Biotechnol* 137, 639-652 (2007).

3. Ko et al. "Economic, social, and environmental cost optimization of biomass transportation: a regional model for transportation analysis in plant location process," *Renew. Energy*, 132, 1211-1322 (2019).

PH-38

지열발전소의 황화수소 배출을 활용한 수소 생산 시스템의 기술경제성 분석

고진[1], 김유림[1], 김정환[1,*]
연세대학교 화공생명공학과[1]

지열발전은 다른 재생에너지원보다 변동성이 낮고, 화석연료에 비해 온실가스 배출이 적어 지속 가능한 에너지원으로 주목받고 있다. 최근에는 이러한 특성을 바탕으로 지열 전력을 활용해 수소를 생산하려는 시도가 활발해지고 있다. 그러나 지열 유체로 전력을 생산하는 과정에서 황화수소가 다량 배출된다. 이는 환경오염과 설비 부식 문제를 유발할 수 있어 효율적인 처리 및 활용 방안이 필요하다. 본 연구에서는 Fe-Cl 기반 전기화학 반응을 통해 지열 유체 내 황화수소를 수소로 전환하는 통합 시스템을 제안하고, 기존 지열 기반 수소 생산 공정과의 경제성을 비교·분석하였다. 제안된 시스템은 황화수소 처리와 수소 생산을 동시에 수행함으로써 공정 구조를 단순화하고, 경제성을 향상시킬 수 있다. 분석 결과, 시간당 최대 139 kg의 수소를 생산할 수 있으며, 약 99%의 황화수소가 제거되었다. 수소 균등화 생산단가(LCOH)는 3.56 $/kg-H2로 기존 공정보다 우수한 성능을 나타냈다. 제안된 시스템은 지열발전소에서 발생하는 황화수소를 처리함과 동시에 청정 수소를 생산할 수 있어, 배출가스 관리에 새로운 접근법을 제시한다. 더불어 지속 가능한 수소 생산 기술로서 지열자원의 활용 가능성을 높이고, 에너지 시장에서의 경쟁력을 강화할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Hamlehdar, M., Beardsmore, G., and Narsilio, G. A., “Hydrogen production from low-temperature geothermal energy? A review of opportunities, challenges, and mitigating solutions”, Int. J. Hydrogen Energy, 77, 0360-3199 (2024).

2. Huang, H., Shang, J., Yu, Y., and Chung, K. H., “Recovery of hydrogen from hydrogen sulfide by indirect electrolysis process”, Int. J. Hydrogen Energy, 44(11), 0360-3199 (2019).

3. Manfrida, G., Talluri, L., Ungar, P., Zuffi, C., Díaz-Ramírez, M., Leiva, H., Mainar-Toledo, M. D., and Jokull, S., “Exergo-economic and exergo-environmental assessment of two large CHP geothermal power plants”, Geothermics, 113, 0375-6505 (2023).

PH-39

국내 수입 액화수소 분배 공급망의 multi-period 최적화

김영근, 최현준, 권휘웅[1], 김정환*
연세대학교, [1]순천향대학교

전 세계적으로 탄소중립 목표 달성을 위한 청정 연료로의 에너지 전환이 활발히 추진되고 있으며, 그 중에서도 수소는 높은 에너지 밀도와 탄소 배출이 없는 특성으로 이해 미래 에너지원으로 주목받고 있다. 대한민국은 '2050 탄소중립 시나리오' 및 '2030 국가 온실가스 감축 목표 (NDC)'를 통해 전체 수요의 약 80~82%에 해당하는 수소를 해외에서 수입하여 충당할 계획임을 밝힌 바 있다 [1]. 이에 따라, 수입된 액화수소를 국내 각 수요지로 효율적으로 분배하기 위한 공급망 설계와 인프라 구축 최적화가 필수적이다. 본 연구에서는 평택에 액화수소 수입 터미널이 구축되어 있다는 가정하에, 액화수소 하역 과정 중 발생하는 boil-off gas (BOG) 발생량까지 고려한 multi-period 수소 공급망 최적화 모델을 제안한다 [2-4]. 제안된 모델은 대한민국 지역별 연료전지 차량 추정치 데이터를 5년 단위의 시계열로 반영하여 25년에 해당하는 장기적인 수소 공급망 계획 수립이 가능하도록 설계되었다. 터미널에서 하역된 액화수소는 3가지 형태 (100bar 기체수소, 200bar 기체수소, 액화수소) 중 하나로 conditioning 된 후, 각 지역으로 운송된다. 운송 수단으로는 수소 파이프라인, 액체수소 트럭, 기체수소 트럭이 고려된다. 지역으로 이동된 수소는 storage 탱크에 저장되며, 필요시 재액화 또는 재압축을 거쳐 지역 내 수소 충전소로 공급된다. 최적화 과정은 인프라 구축에 필요한 capital 및 operating cost를 통합적으로 고려하며, 총 시스템 비용을 최소화하는 방향으로 진행된다. 분석 결과, 대부분의 수소는 액체 상태로 지역 내 수소 충전소까지 운송되는 경향을 보였으며, BOG는 기체수소 트럭으로 운반되는 것을 관찰할 수 있었다. 또한, 최적화 결과 전체 period에 대한 levelized cost of hydrogen transportation은 2.86$/kg을 얻을 수 있었다. 본 연구에서 제안한 모델은 최적 수소 공급 계획을 multi-period로 보여줌으로써, 장기적인 수소 인프라 구축 및 운영 전략 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Hwang, H., Lee, Y., Kwon, N., Kim, S,. Yoo, Y., and Lee, H.,and Walsh, F. C., "Economic Feasibility Analysis of an Overseas Green Hydrogen Supply Chain," The Korean Hydrogen and New Energy Society, 33(6), 256-269 (2022).

2. Yoon, H., Seo, S., and Lee, C., "Multi-period optimization of hydrogen supply chain utilizing natural gas pipelines and byproduct hydrogen,". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 157, (2022).

3. Xu, W., Li, Y., Xiang, B., Wu, L., Kang, L., and Liu, Y., "Multi-period supply chain design and optimization for modular methanol production driven by renewable energy," Energy Conversion and Management, 319, (2024).

4. Khaligh, V., Ghezelbash, A., Liu, J., Won, W., Koo, J., and Na, J., "Multi-period hydrogen supply chain planning for advancing hydrogen transition roadmaps," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 200, (2024).

PH-40

분자 구조를 이용한 인공지능 기반 CO_2 흡수량 예측 일반화 모델

정재빈[1], 주종효[1], 김정환[1,*]
연세대학교 화공생명공학과[1]

기존에는 아민 용액의 CO_2 흡수 성능을 나타내는 핵심 지표인 CO_2 로딩(mol_{CO2}/mol_{amine})을 예측하기 위해 실험 데이터에 기반한 열역학[1] 또는 인공지능[2] 사용한 예측 모델 개발 연구가 진행되었다. 그러나, 열역학 기반 모델은 수많은 파라미터와 복잡한 수식으로 인해 많은 계산이 필요하며, 인공지능 기반 모델은 특정 시스템에 대해서만 예측할 수 있다는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 상기 한계점을 극복하기 위해, 개별 아민의 분자 특성 및 구조 데이터를 입력 변수로 활용하여 학습되지 않은 미지의 아민에 대해 CO_2 로딩 예측이 가능한 신경망 모델을 구축하였다. 모델의 일반화 성능을 검증하고자 수집된 데이터 중 특정 아민 1종을 의도적으로 배제한 채 모델을 학습시키고 배제된 아민의 CO_2 로딩을 예측하는 실험을 수행하였다. 분자 특성 데이터의 유효성을 평가하기 위해, 구조 데이터를 사용하지 않은 모델과 평균 제곱근 오차(RMSE)를 비교 분석한 결과, 분자 특성 데이터를 활용한 모델의 예측 정확도가 RMSE 기준 약 0.01 감소되었음을 확인하였다. 따라서 분자 구조와 관련된 기술자를 모델 학습에 통합하는 본 연구의 접근 방식은, 향후 고효율 신규 아민을 탐색하고 흡수 공정을 최적화하는 데 중요한 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Rode, D. D. et al. “Prediction of CO2 solubility in aqueous solutions of N, N-Diethyl ethanolamine (DEEA): A modified Kent-Eisenberg model approach”, Journal of Physics Conference Series, **1913**, 012074 (2021)

2. Chen, G. et al. “Artificial neural network models for the prediction of CO2 solubility in aqueous amine solutions”, International Journal of Greenhouse Gas Control, **39**, 174–184 (2015)

PH-41

양자 머신러닝을 통한 윤활유 물성 예측 모델의 일반화 성능 개선

김찬호[1], 주종효[1], 김정환[1,*]
연세대학교 화공생명공학과[1]

윤활유는 많은 장치와 공정의 원활한 운전과 에너지 활용 효율 개선에 필수적인 역할을 한다. 윤활유를 구성하는 레시피는 기유, 패키징 물질, 점도 조정제, 그리고 여러 첨가제로 이루어지며 구성 요소의 조합에 따라 윤활유의 물성이 결정된다. 이에 따라, 특정 물성을 확보하기 위해서는 적절한 레시피의 구성이 진행되어야 한다. 현재 일반적으로 활용되는 샘플 제작 후 물성 측정 방식은 반복적인 실험과 측정에 따른 시간과 비용의 소요가 크다는 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 머신러닝 물성 예측 모델[1][2]로 샘플 제작 및 측정을 대체하려는 시도가 계속되고 있다. 하지만, 윤활유 레시피의 구성 요소가 지닌 막대한 다양성과 자주 쓰이는 재료에 편향된 데이터 불균형 문제로 인해 이러한 머신러닝 예측 모델은 이미 알고 있는 레시피에는 성능이 뛰어나나 새로운 레시피에는 예측 성능이 떨어지는 낮은 일반화 성능의 문제가 존재한다. 본 연구에서는 고전적 머신러닝 대비 높은 일반화 성능을 지닌 양자 신경망(Quantum neural network, QNN)[3][4] 모델을 통해 문제를 해결하였다. 고전적인 Deep neural network(DNN) 모델과 QNN 모델에 대해 총 2,182개의 점도 데이터를 훈련시킨 뒤 측정이 어려운 HTHS 데이터 1,277개에 대해 전이학습을 진행하여 모델을 훈련시켰고, 이를 훈련 과정에서 본적 없는 32개의 신규 데이터와 랜덤 기존 데이터 68개로 구성된 일반화 성능 검증용 신규 데이터셋에 대해 검증하였다. 검증 결과, 상관 계수(R^2) 기준 DNN은 -0.1471로 실질적으로 일반화 성능이 없음이 드러난 반면, QNN은 0.8332의 높은 성능을 일반화 성능을 제시하였다. 따라서, 본 연구에서 제안된 QNN 물성 예측 모델을 공정에 적용한다면 새로운 윤활유 레시피에 대한 효과적인 물성 예측을 통해 시간과 비용 소모를 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Jeong, Soohwan, et al. "A novel graph-based missing values imputation method for industrial lubricant data." Computers in Industry 150 (2023): 103937.

2. Kim, Minseong, et al. "Novel inverse predictive system integrated with industrial lubricant information." Engineering Applications of Artificial Intelligence 142 (2025): 109853.

3. Caro, Matthias C., et al. "Generalization in quantum machine learning from few training data." Nature communications 13.1 (2022): 4919.

4. Hur, Tak, and Daniel K. Park. "Understanding Generalization in Quantum Machine Learning with Margins." arXiv preprint arXiv:2411.06919 (2024).

PH-42

재생에너지의 불확실성을 고려한 AEM 수전해 공정 최적화

이동균[1], 김민수[2], 문일[1], 김정환[1,*]
연세대학교 화공생명공학과[1], Massachusetts Institute of Technology[2]

재생에너지와 결합한 수전해 공정에서 생산된 그린 수소는 높은 에너지 밀도와 탄소 배출이 없는 특성 덕분에 친환경 에너지원으로 평가된다. 기존 수전해 기술들과 비교하여 음이온 교환막 (AEM, Anion Exchange Membrane) 기반 수전해 기술은 저비용 비귀금속 촉매 사용과 비교적 성숙한 스택 조립 공정 등 여러 잠재적 이점으로 인해 유망한 기술로 활발하게 연구가 진행되고 있다[1]. 본 연구는 AEM 수전해 공정을 설계하고 공정 내 운전조건 등의 파라미터를 최적화를 수행한다. AEM 수전해 시스템 설계 시, 낮은 기술 숙련도로 인해 실험실 규모(5cm2의 active area)의 데이터를 기반으로 파라미터 검증 및 공정설계를 하였다[2]. 실험 데이터와의 검증을 통해 신뢰성 높은 AEM 시스템을 개발하고, 재생에너지 전력의 불확실성을 고려하여 운전 조건 및 파라미터 최적화를 수행한다. 신뢰성 있는 AEM 공정 모델을 바탕으로, 재생에너지 전력의 최악의 상황에서도 목표 수소 생산량을 달성하기 위해 공정 변수를 최적화합니다. 이는 이미 상업화 규모로 개발된 알칼라인, 양이온 교환막(PEM) 수전해 기술과 현재 연구개발 중인 AEM 수전해 기술 격차를 줄이는데 기여함을 보여준다. 또한, 재생에너지의 불확실성을 고려하여 안정적으로 그린수소를 생산하는 수전해 시스템 개발에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Liu et al. "Development of advanced anion exchange membrane from the view of the performance of water electrolysis cell," *Journal of Energy Chemistry,* 90, 348 (2024).

2. Kim et al. "Techno-economic analysis of anion exchange membrane electrolysis process for green hydrogen production under uncertainty," *Energy Conversion and Management,* 302, 118134 (2024).

PH-43

파과실험 데이터를 이용한 흡착제 평가를 위한 질량 전달 계수 및 다중 등온 매개변수의 동시 추정

진석환, 진현석, 박재현, 이찬현, 가성빈*
울산대학교 화학공학부

Simultaneous Estimation of Mass Transfer Coefficient and Multi-Isotherm Parameters for Evaluation of Adsorbents from Breakthrough Experimental Data

Seokhwan Jin, Hyeonseok Jin, Jaehyeon Park, Chanhyun Lee, Seongbin Ga*
School of Chemical Engineering, University of Ulsan, 93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan, 44610, Republic of Korea

본 연구에서는 실험으로부터 얻은 파과곡선 데이터를 기반으로, 다성분 등온 매개변수, 물질전달계수 (Mass Transfer Coefficient, MTC), 충진층 공극률(void fraction)을 동시에 추정하는 접근 방식을 제시한다. 흡착제의 동특성을 정량적으로 파악하기 위해서는, 흡착 평형뿐만 아니라 물질전달 및 공극 특성 등 다양한 동적 파라미터의 정확한 추정이 필요하다. 기존의 추정 방식은 대부분 평형 실험 데이터에 의존하거나, 단일 성분 기반의 등온 파라미터를 고정한 상태에서 MTC를 분리 추정하는 형태로 이루어져 왔다. 이러한 방식은 파라미터 간 상호의존성을 충분히 반영하지 못하고, 다성분 혼합 기체 조건에서는 흡착 거동의 실제 변화를 포착하기 어렵다는 한계를 지닌다. 본 연구는 물질수지식, Ergun equation, Linear Driving Force (LDF) 근사식, 다성분 등온 모델을 결합한 동적 모델을 바탕으로, 파과곡선의 실제 거동을 모사함으로써 동적 조건 하에서의 다성분 등온 파라미터, 물질전달계수(Mass Transfer Coefficient, MTC), void fraction을 동시에 정밀하게 추정한다. 이를 위해, 전역 탐색을 위한 Grid Search와 정밀 수렴을 위한 Gradient-based Search를 순차적으로 결합한 하이브리드 추정 전략을 적용하였다. 제안된 방법은 이성분 혼합기체에 대한 실험 데이터를 활용하여 검증하였으며, 시뮬레이션의 파과곡선과 실험 파과곡선 간의 높은 적합도를 보이는 동시에, 타당한 범위의 MTC, Multi-component isotherm parameter, void fraction 값을 효과적으로 도출하였다. 이러한 접근은 흡착제의 동특성 평가 및 물성 비교, 소재 선별을 위한 실용적인 추정 도구로 활용 가능함을 보여준다. 본 연구는 파과곡선 기반의 통합 파라미터 추정법을 제시함으로써, 흡착제 평가 및 동적 시스템 모델링에 있어 실험 기반의 정량 해석 가능성을 크게 확장시킨다.

참고문헌

1. Acharya, Amrutha, et al. "Development of a multicomponent adsorption isotherm equation and its validation by modeling." Langmuir 39.49 (2023): 17862-17878.

2. Ribeiro, Ana M., et al. "A parametric study of layered bed PSA for hydrogen purification." Chemical Engineering Science 63.21 (2008): 5258-5273.

3. Amrutha, et al. "Multi-component adsorption isotherms: review and modeling studies." Environmental processes 10.2 (2023): 38.

4. Ruthven, Douglas M. Principles of adsorption and adsorption processes. John Wiley & Sons, 1984.

5. Yang, Ralph T. Gas separation by adsorption processes. Vol. 1. World Scientific, 1997.

PH-44

Xe/Kr 분리를 위한 양자 금속-유기 골격체의 multiscale high-throughput screening 및 경제성 분석

정민주[1], 진석환[1], 진현석[1], 가성빈[1,*]
[1]울산대학교 화학공학부

Multiscale high-throughput screening and economic analysis of Quantum metal-organic framework for Xe/Kr separation

Minju Jung[1], Seokhwan Jin[1], Hyeonseok Jin[1], Seongbin Ga[1,*]
[1]School of Chemical Engineering, University of Ulsan, 93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan, 44610, Republic of Korea

본 연구는 Xe과 Kr의 고순도 분리를 위한 고부가가치 희귀기체 회수 공정에서 활용 가능한 흡착 소재를 선별하기 위해, multiscale high-throughput screening (HTS) 기반의 계산적 접근법을 적용하였다 [1]. HTS의 일환으로 분자 시뮬레이션과 공정 모델링을 수행하여 metal-organic frameworks (MOFs) 의 분리 성능과 경제성을 통합적으로 평가하고, 흡착·탈착 압력 및 온도 조건을 최적화하였다. 이를 통해 실험 이전 단계에서 고효율 저비용의 흡착 소재 선별과 공정 설계를 위한 정량적 기준을 제시하고자 한다. Quantum MOF (QMOF) 데이터베이스의 20,375개 MOF 중 구조적 특성을 고려하여 4,501개를 선별하고, 네 가지 온도 (273, 298, 323, 348 K) 및 여섯 가지 압력 (0.1, 0.5, 1, 5, 8, 15 bar) 조건에서 grand canonical Monte Carlo (GCMC) 시뮬레이션을 수행하였다. 이어서 pyAPEP 패키지의 isofit 모듈로 등온선 모델을 구축한 뒤, simide 모듈을 활용하여 이상적 PSA 공정 (VSA 및 계단식 PSA 포함) 조건에서 각 소재의 Xe/Kr 분리에 대한 순도 및 회수율을 계산하였다 [2]. 또한, 압축기, 진공 펌프, 열교환기와 같은 공정 요소의 CAPEX 및 OPEX를 고려하여 설정한 목표 분리 비용을 기준으로, 경제성을 확보하기 위한 소재의 가격 상한을 계산하였다. 본 HTS 기반 분석을 통해 분리 성능과 경제성을 종합적으로 고려함으로써 상위 성능을 보이는 10 종의 유망한 후보군을 도출하였으며, 이와 같은 종합적 평가 접근을 통하여 선별된 후보군은 향후 Xe/Kr 분리 공정에 적합한 흡착 소재를 선택하는 과정에서 실험적 합성 또는 구조 분석의 기준이 될 수 있다. 또한, 고효율 저비용 분리 기술 개발을 위한 흡착 소재 선별 및 공정 설계의 기반으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Ga, Seongbin, et al. "Economic analysis with multiscale high-throughput screening for covalent organic framework adsorbents in ammonia-based green hydrogen separation." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 189 (2024): 113989.
2. Ga, Seongbin, et al. "pyAPEP: An all-in-one software package for the automated preparation of adsorption process simulations." *Computer Physics Communications* 291 (2023): 108830.
3. Ga, Seongbin, et al. "Multidisciplinary high-throughput screening of metal–organic framework for ammonia-based green hydrogen production." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 192 (2024): 114275.
4. Yang, Yuting, et al. "Metal-organic frameworks for xenon and krypton separation." *Cell Reports Physical Science* 4.12 (2023).
5. Lin, Wang-qiang, et al. "Multiscale computational screening of metal–organic frameworks for Kr/Xe adsorption separation: A structure–property relationship-based screening strategy." *ACS Applied Materials & Interfaces* 13.15 (2021): 17998-18009.

PH-45

Dynamic Simulation of Cyclic Steady-State Operation in Layered Sorption-Enhanced Water-Gas Shift Reactors: Effect of Bed Structuring and Adsorption Characteristics

Dabin Yang and Seongbin Ga*

School of Chemical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Republic of Korea

Sorption-enhanced water-gas shift (SEWGS) reactors integrate catalytic CO conversion with in situ CO_2 capture, enabling high-purity hydrogen production. This study presents a dynamic simulation framework for SEWGS reactors featuring layered catalyst-sorbent packing, operated under cyclic steady-state (CSS) conditions through a four-step pressure swing cycle. The model tracks both internal species concentrations and adsorption profiles, as well as the temporal variation of outlet gas compositions, allowing for detailed evaluation of hydrogen purification performance under cyclic operation. Unlike conventional models based on mixed beds or steady-state assumptions, the proposed approach captures the complex interplay between reaction kinetics, adsorption behavior, and spatial material configuration across repeated cycles. Simulations at CSS reveal that both hydrogen purity and H_2 yield per mole of CO fed are strongly influenced by multiple design and operational factors—including packing structure, sorbent selectivity, purge gas type, and step durations—each contributing in different ways to reactor performance. A systematic comparison of these parameters demonstrates their combined effects on separation and conversion dynamics within the cyclic process. This work provides (1) a detailed dynamic simulation model for layered-bed SEWGS reactors under cyclic operation, (2) a quantitative evaluation of design variables affecting hydrogen purity and the amount of H_2 produced per mole of CO fed, and (3) practical guidelines for optimizing reactor configuration and operation in integrated hydrogen production systems.

1. Kim, D. H., and Lee, K. Y., "Sorption-enhanced water gas shift reaction by in situ CO_2 capture on an alkali metal salt-promoted MgO–$CaCO_3$ sorbent," *Int. J. Hydrogen Energy*, 41(18), 7636–7645 (2016)

2. Ding, Y., Alpay, E., and Hoadley, A. F. A., "Sorption-enhanced water gas shift reaction for high-purity hydrogen," *Chem. Eng. Sci.*, 56(4), 1231–1239 (2001).

3. Choi, Y., and Stenger, H. G., "Water gas shift reaction kinetics and reactor modeling for fuel cell grade hydrogen," *J. Power Sources*, 124(1), 432–439 (2003).

PH-46

메탄올 합성 반응기의 수학적 모델링 및 반응 속도식 파라미터 추정

Yunju Yu, Minju Jung, Seongbin Ga*
Department of Chemical Engineering, University of Ulsan

<Instructions for abstract>

수소를 메탄올로 전환하여 저장하고 운반하는 기술은 높은 에너지 밀도와 취급 용이성으로 인해 주목받고 있다. 이러한 기술을 실제 공정에 적용하기 위해서는 반응기 수준에서의 정밀한 해석이 필수적이나, 기존 연구들은 대부분 실험실 수준에서 촉매의 활성이나 선택성을 평가하는 데에 그쳐, 실제 공정 조건에서의 반응기 거동이나 촉매 성능을 충분히 고려하지 못하는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 실험실 규모의 실험 데이터를 기반으로, 이를 공정 단위에서 해석할 수 있는 수학적 모델을 개발하였다. 모델은 Packed Bed Reactor(PBR)를 기반으로 하며, 다양한 운전 조건에서 반응기 내 물질 조성의 변화를 예측할 수 있을 뿐만 아니라, 실험 데이터를 활용하여 반응속도식의 파라미터를 정량적으로 추정할 수 있도록 구성되었다. 예측 결과는 상용 시뮬레이션 도구인 Aspen Plus와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다. 그 결과, 본 모델은 생성물 조성 예측에서 높은 일치도를 보였으며, 특정 촉매 특성에 적합한 운전 조건(온도, 압력 등)의 도출은 물론, 후단의 분리 공정 설계까지 고려할 수 있는 기반 분석 도구로 활용될 수 있음을 확인하였다.

References

[1] Nikolaidis, Pavlos, and Andreas Poullikkas. "A comparative overview of hydrogen production processes." Renewable and sustainable energy reviews 67 (2017): 597-611.
[2] Mazloomi, Kaveh, and Chandima Gomes. "Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges." Renewable and sustainable energy reviews 16 (2012): 3024-3033
[3] Xu, Yuankang, et al. "Carbon dioxide enabled hydrogen storage by methanol: Highly selective and efficient catalysis with well-defined heterogeneous catalysts." Coordination Chemistry Reviews 508 (2024): 215775.
[4] Vaquerizo, Luis, et al. "Thermally self-sufficient process for cleaner production of e-methanol by CO_2 hydrogenation." Journal of Cleaner Production 433 (2023): 1398645.
[5] Ye, Jingyun, et al. "Hydrogenation of CO2 for sustainable fuel and chemical production." Science 387.6737 (2025): eadn9388.
[6] Ramanathan, Karthik, and Chander Shekhar Sharma. "Kinetic parameters estimation for three way catalyst modeling." Industrial & Engineering Chemistry Research 50 (2011): 9960-9979.
[7] Portha, Jean-François, et al. "Kinetics of methanol synthesis from carbon dioxide hydrogenation over copper–zinc oxide catalysts." Industrial & Engineering Chemistry Research 56 (2017): 13133–13145.

PH-47

TEAchem: 화학공정의 기술 경제성 분석을 위한 범용 Python 패키지 개발

허준우[1], 가성빈[*]
[1]울산대학교 화학공학부

TEAchem: Development of a General-purpose Python package for Techno-economic analysis of Chemical processes

Junwoo Huh[1], Seongbin Ga[*]
[1]School of Chemical Engineering, University of Ulsan

화학공정의 설계 및 상용화 가능성을 평가하는 데 있어 기술-경제성 분석(Techno-economic analysis, TEA)은 필수적인 도구이다. 그러나 기존 TEA는 엑셀 기반 계산이나 특정 기술에 특화된 구조로 인해 다양한 공정에 유연하게 적용하기 어려운 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 수소 생산, 탄소중립 기술 등 다양한 청정 기술을 포함한 공정 전반에 활용 가능한 Python 기반 범용 TEA 패키지를 개발하였다.
사용자는 공정 흐름에 따라 장비명, 용량, 수량 등을 입력하면 장비구매비용(C_p^0), 자본적 지출(CAPEX), 운영비용(OPEX), 총 연간비용(TAC), 균등화 제품생산비용(LCOP) 등을 자동으로 계산할 수 있으며 주요 변수 변화에 따른 민감도 분석도 수행 가능하다.
패키지의 신뢰성 확보를 위해 메탄올 합성, SMR, WGS 공정을 대상으로 사례 연구를 진행하였고 Aspen Economic Evaluation과의 비교를 통해 정확성과 일관성을 검증하였다.
또한 본 패키지는 분석 결과를 그래프로 출력하고 Excel, CSV, 텍스트, NumPy, Pickle 등의 다양한 형식으로 저장할 수 있어 후속 분석이나 결과 공유에 용이하다. Python의 유연한 구조와 확장성을 바탕으로 본 TEA 도구는 향후 다양한 공정 시뮬레이션 도구나 머신러닝 모델과 연계하여 공정 최적화, 예측 모델링, 자동화된 경제성 평가 등으로의 확장이 가능하다.
특히 연구 초기 단계에서의 기술 선별, 공정 설계 대안 비교, 경제적 타당성 사전 검토 등에 폭넓게 활용될 수 있다. 이는 청정에너지 기술 개발, 공정 시스템 설계, 신기술 상용화 검토 등 다양한 연구 및 산업 현장에서 실질적인 의사결정 도구로 기능할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Turton, R., et al, “Analysis, synthesis, and design of chemical processes”, Pearson Education, (2018).

2. Timmerhaus., et al, “Plant design and economics for chemical engineers”, McGraw-Hill, (2003).

3. Lee, J., et al, “Carbon-free green hydrogen production process with induction heating-based ammonia decomposition reactor”, Chemical Engineering Journal 457, (2023).

4. Lee, J., et al, “Techno-economic analysis of on-site blue hydrogen production based on vacuum pressure adsorption: Practical application to real-world hydrogen refueling stations”, Journal of Environmental Chemical Engineering 11.2, (2023).

PH-48

Hybrid Modeling for Long-term Plant Performance Prediction in Reverse Osmosis Process

Dongkyu Kim, Boram Gu*
School of Chemical Engineering, Chonnam National University

<Instructions for abstract>

Reverse osmosis (RO) is an essential technology for producing high-purity water, but its long-term performance is significantly hindered by fouling. While it's possible to monitor flux decline in real-time, predicting fouling in its early, invisible stages is a major challenge. This study proposes a novel deep hybrid modeling approach to predict fouling by integrating a first-principles model (FPM) with a deep learning model.

This research, based on a process developed by Oh et al. [1], focuses on a reverse osmosis (RO) process designed to separate ammonium acetate, a byproduct of methionine synthesis. We developed a novel hybrid model that combines the predictive power of a deep learning model with the fundamental physical relationships and transport phenomena captured by a first-principles model (FPM). The FPM effectively represents the basic mass transfer dynamics of the RO process, while the deep learning component learns complex, non-linear patterns from historical RO operational data. This integrated approach results in a more robust and accurate simulation of the RO process.

This hybrid model can effectively predict a decline in membrane performance by detecting subtle changes in process variables that happen before visible fouling occurs. By integrating these two models, we achieve a more robust and accurate prediction than either model could provide alone. This enables proactive maintenance and optimized cleaning cycles Future research will utilize the predictions from this hybrid model to implement a real-time optimization strategy, further enhancing operational stability and economic efficiency. The findings will contribute to more intelligent and sustainable water treatment processes.

References

1. Oh, S., Park, W. H., Choi, I.-J., Lee, J., Park, C., Kim, J.-W., and Gu, B., "Recovery of ammonia and acetic acid from amino acid byproduct using an integrated RO and evaporation system: Process simulation, energy analysis, and optimisation," Sep. Purif. Technol., 362(Part 2), 131751 (2025).

PH-49

Surrogate-Based Upscaling of Reverse Osmosis with Spacer-Resolved CFD

Yu-hyeok Jeong and Boram Gu *
School of Chemical Engineering, Chonnam National University, Republic of Korea

Reverse osmosis (RO) is widely deployed for desalination and wastewater treatment, yet its performance is limited by concentration polarization (CP). Channel spacers are inserted to disturb the flow and mitigate CP, but their geometry drives complex hydrodynamics that are difficult to upscale. High-fidelity 3D CFD resolves these effects at the unit level but is computationally prohibitive for full modules, whereas 1D process models are scalable but typically rely on narrow, empirical spacer correlations. We propose a multi-level framework that couples 3D CFD with 1D process modeling via response-surface surrogates. Periodic unit cells representing 20 spacer geometries were simulated over broad operating ranges. For each spacer, CFD outputs (pressure drop, wall shear, mass-transfer coefficient, water flux) were regressed onto operating variables to construct a surrogate mapping inlet to outlet states for a single unit. Cascading this surrogate yields module- and plant-scale predictions at negligible additional cost, while explicitly treating **design variables** as (i) **process size** (number of units/modules) and (ii) **inlet conditions**— feed flow rate and pressure. The CFD indicates spacer-dependent hydrodynamics produce up to ~10% variation in water flux. At larger scales, rankings of spacers by recovery and specific energy consumption invert with process size and inlet conditions; pressure losses grow nonlinearly with scale, and recovery does not increase linearly. These results demonstrate that CFD-informed surrogates are essential for reliable large-scale RO simulation and provide a practical platform for optimization and spacer design across operating windows and plant sizes.

References

[1] Sung, Berrin, Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment: A review, Journal of Environmental Management, 2015.
[2] Haidari, Heijman, Meer, Optimal design of spacers in reverse osmosis, Separation and Purification Technology, 2018.

PH-50

Mathematical Modeling and Simulation of Multi-Stage Hollow Fiber Membrane Contactors for Dissolved Oxygen Removal under Sweep Gas, Vacuum, and Combined Degassing Modes

Sihyeon Lee[1], Boram Gu[1*]

[1]School of Chemical Engineering, Chonnam National University

[*]Corresponding author: boram.gu@jnu.ac.kr

Abstract

Dissolved oxygen (DO) in ultrapure water can cause corrosion, oxidation, and performance degradation in industries such as semiconductor manufacturing, pharmaceuticals, and power generation, creating a strong demand for high-efficiency degassing technologies. Both the use of sweep gas and vacuum pump can be beneficial for enhancing DO removal efficiency but direct quantitative comparisons under identical conditions in multi-stage configurations for a large scale water treatment remain limited, as reported by Tan et al. [1]. In this study, the DO removal performance of three operating modes—sweep gas, vacuum, and combined sweep and vacuum—was compared and analyzed using mathematical modelling for hollow fiber membrane contactors, followed by model validation using experimental data. A comprehensive mathematical model incorporating water vapor permeation, Henry's law, pressure drop, and mass transfer coefficient correlations was developed and implemented in MATLAB. Model validation was performed for single-stage experimental data available in the reference. The developed model was extended to assess a large scale process consisting of multiple series and parallel modules under the vacuum, sweep gas, or combination mode. Simulations were performed to assess flux and DO concentration profiles along the module length, DO removal efficiency and pressure drop for each mode. Under identical conditions, the combined sweep and vacuum mode yields the lowest outlet DO. Multi-stage operation lowers DO further, but gains diminish as pressure drop losses weaken the mass transfer driving force. This analysis serves as a basis for determining optimal operating conditions.

References

1. Tan, X., Capar, G., and Li, K., "Analysis of dissolved oxygen removal in hollow fibre membrane modules: effect of water vapour," J. Membr. Sci., 251(1-2), 111-119 (2005).
2. Li, K., Chua, I., Ng, W. J., and Teo, W. K., "Removal of dissolved oxygen from water using hollow fibre membrane modules," Chem. Eng. Sci., 50(22), 3547-3556 (1995).

PH-51

Thermal conductivity maximisation of thermal interface material with hybrid particle random distribution algorithm

Dong-Gi Lee[1], Boram Gu[1*]

[1]School of Chemical Engineering, Chonnam National University

The rapid growth in electronic vehicles and power densities has heightened concerns over fire hazards arising from insufficient heat dissipation. High-performance heat dissipation materials are therefore essential to maintain efficiency and reliability. Thermal interface materials (TIMs) serve a critical role by reducing thermal resistance between batteries and heat sinks [1]. In this study, we combine the Monte-Carlo simulation with an optimisation to achieve high volume fraction over 70 vol% and conduct heat transfer simulations to determine optimal particle properties to maximise thermal conductivity of matrix. Aluminium nitride (AlN) served as the thermally conductive filler within a silicone resin matrix. Results indicate that increasing the filler volume fraction and decreasing the mean particle size enhance the thermal conductivity of the composite. The simulations further identified optimal particle characteristics that mitigate performance loss and reduce the risk of battery-related thermal hazards.

References

1. Yunpeng Su, Qiangqiang Ma, Ting Liang, Yimin Yao, Zhenjun Jiao, Meng Han, Yunsong Pang, Linlin Ren, Xiaoliang Zeng, Jianbin Xu, and Rong Sun., “Optimization of Effective Thermal Conductivity of Thermal Interface Materials Based on the Genetic Algorithm-Driven Random Thermal Network Model”, *ACS Applied Materials & Interfaces.,* 13 (37), 45050-45058 (2021).

PH-52

Modeling Strategy for Bipolar Membrane Electrodialysis Systems with Acid-Base Equilibrium

Jiun Yun[1], Boram Gu[1 *]

[1]Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea

Bipolar membrane electrodialysis (BMED) is an efficient technology for producing acids and bases. However, unlike simple metal salt systems, modeling organic acid separation is challenging due to the simultaneous occurrence of complex acid-base equilibrium and ion transport phenomena.

In this study, to precisely simulate such organic acid systems, we developed a numerical model based on the Nernst-Planck equation that integrates ion transport and acid-base equilibrium without requiring existing transport number data. The developed model was validated against actual experimental data, securing high predictive accuracy and reliability. Based on the validated model, a sensitivity analysis was performed on the key parameters affecting process efficiency. The analysis revealed that the properties of the anion exchange membrane (AEM) had the most critical impact on system performance. In contrast, the influence of the pump flow rate was negligible, while the channel's geometric structure was also identified as a significant variable. This research provides clear guidance on which parameters to prioritize for the optimization of the BMED process.

PH-53

세라믹 적층제조를 위한 슬롯다이 코팅 공정 안정성 해석 및 기판 젖음성 영향 평가

하정홍*
한국생산기술연구원 스마트정형공정그룹

Analysis of Slot-Die Coating Process Stability and Substrate Wettability Effects for Ceramic Additive Manufacturing

Jeonghong Ha*
Smart Forming Process Group, Korea Institue of Industrial Technology (KITECH)

슬러리 기반 적층제조(Ceramic Additive Manufacturing, AM)는 높은 고체 함량의 세라믹 슬러리를 층별로 적층하여 치밀하고 복잡한 형상의 부품을 제조할 수 있는 장점이 있다[1,2]. 그러나 고점도 슬러리의 점탄성 유동 특성과 기판 표면 젖음성 차이로 인해, 균일하고 결함 없는 층을 안정적으로 형성하는 것은 여전히 공정 안정성과 최종 제품 품질 확보의 주요 과제이다[3]. 본 연구에서는 50 wt% 알루미나 슬러리(점도 34 Pa·s)에 대해 코팅 속도(0.7–2.8 mm/s), 유량(0.6–0.8 mL/min), 코팅 간격(200–400 μm)을 변수로 하여 슬롯다이(slot-die) 코팅의 안정 코팅 윈도우를 체계적으로 분석하였다. 수치해석(Volume-of-Fluid, VOF)과 실험을 병행하였으며, 실험 데이터와 시뮬레이션 결과는 높은 상관성을 보였다.

공정은 overflow, stable, unstable의 세 가지 영역으로 구분되었으며, 유리 기판(정적 접촉각 66.7°)에서는 200 μm 간격에서 가장 넓은 안정 윈도우가 확보되었다. 이 조건에서는 상·하류 메니스커스가 안정적으로 유지되어 공기 유입 없이 균일한 막 두께를 구현할 수 있었다. 반면 건조 알루미나층(정적 접촉각 137°)에서는 젖음성이 크게 저하되어 안정 윈도우가 축소되고, 공기 포집과 막 두께 불균일이 빈번히 발생하였다[4]. 시뮬레이션 분석에 따르면 좁은 코팅 간격은 상류 메니스커스 이동을 억제하고 임계 모세관수(Ca)를 증가시켜 젖음 실패(dynamic wetting failure)의 발생을 지연시켰다[5]. 그러나 과도한 전단 응력(>4.4 kPa)은 입자 응집을 촉진할 수 있으므로, 유량과 속도 조건을 최적화하여 전단 부하를 제어해야 한다.

본 연구는 기판 젖음성, 코팅 간격, 속도 및 유량의 상호 작용이 다층 세라믹 AM에서 코팅 안정성에 미치는 영향을 정량적으로 규명하였으며, 안정적인 다층 코팅 구현을 위한 설계 지침을 제공한다. 이러한 접근은 향후 고체 함량이 더 높은 슬러리, 다양한 표면 조도 및 모세관 특성을 가진 기판 조건까지 확장 적용이 가능하다.

참고문헌

1. Mühler, T. et al., “Slurry-based additive manufacturing of ceramics,” Int. J. Appl. Ceram. Technol., 12, 18–25 (2015).
2. Truxova, V. et al., “Ceramic 3d printing: Comparison of sla and dlp technologies,” MM Sci. J., 2020, 3905–3911 (2020).
3. Ding, X. Liu, J., and Harris, T.A., “A review of the operating limits in slot die coating processes,” AlChE J., 62, 2508–2524 (2016).
4. Redón, R. et al., “Contact angle studies on anodic porous alumina,” Rev. Adv. Mater. Sci., 11, 79–87 (2006).
5. Vandre, E. et al., “Delaying the onset of dynamic wetting failure through meniscus confinement,” J. Fluid Mech., 707, 496–520 (2012).

PH-54

Development of an Innovative Ceramic 3D Printing Method for Clean Technology

J.-H. Ha, J.-H. Choi, J. W. Ko[1*]

[1]*Korea Institute of Industrial Technology, Republic of Korea*
**jwko@kitech.re.kr*

ABSTRACT

With the rapid advancement of 3D printing equipment and material technologies, interest in its industrial applications has significantly increased. While metal and polymer-based 3D printing technologies are transitioning from the rapid prototyping phase to rapid manufacturing, photopolymer-based ceramic 3D printing technologies (such as SLA and DLP) still face critical challenges. These challenges primarily stem from the high content of photocurable polymers in the slurry, which can lead to defects (e.g., pores, cavities, voids) during the debinding and sintering processes. In severe cases, the printed green body may collapse or lose its shape entirely.

This study introduces a novel ceramic 3D printing material-process-device system that eliminates the use of photocurable polymers. A ceramic slurry with low polymer content (~1 wt%) was developed using alginic acid, a naturally-derived polymer. An additive manufacturing process and a corresponding 3D printing system tailored for this slurry were also developed. The research particularly focused on the 3D printing of transition metal oxides (e.g., Al_2O_3, ZnO, CeO_2, MnO_2), which are widely used as catalysts, high-temperature materials, and electronic components.

Compared to conventional ceramic slurries containing more than 30 wt% of synthetic polymers, the proposed slurry uses only about 1 wt% of alginic acid. To form 3D structures, a Selective Reaction Hardening (SRH) process was applied, where crosslinking between alginic acid's carboxyl groups and divalent/trivalent metal ions (Al^{3+}, Zn^{2+}, Ce^{3+}, Mn^{2+}, etc.) induces hydrogel formation. This layer-wise process enables the realization of complex 3D shapes. During debinding and sintering, the metal ions used for gelation convert into identical transition metal oxides present in the slurry, promoting interparticle bonding and resulting in dense ceramic parts. This approach significantly improves the dimensional stability of printed objects and allows for high ceramic solid loading (over 50 wt%).

Based on this foundational research—including slurry formulation, hardening and lamination mechanisms, and a stepwise additive manufacturing process (slurry application, drying, curing)—an integrated 3D printing system was developed. This system demonstrates strong potential for industrial application of eco-friendly ceramic additive manufacturing.

KEYWORDS

Selective reaction hardening, Inkjet, Slurry, 3D Printing, Additive manufacturing

PH-55

흡착제의 상용 가능성 평가를 위한 PSA 공정 기반 MACO (Maximum Adsorbent Cost) 분석

안나현[1], 윤승관[1], 이재원[2], 조형태[3], 백재호[1*], 가성빈[4*]
한국생산기술연구원[1], 한양대학교(ERICA)[2], 경희대학교[3], 울산대학교[4]

Economic Feasibility of MOF Adsorbents in PSA: A MACO(Maximum Adsorbent Cost)-Based Approach

Nahyeon An[1], Seunggwan Yun[1], Jaewon Lee[2], Hyungtae Cho[3], Jaeho Beak[1*], Seongbin Ga[4*]
Korea Institute of Industrial Technology[1], Hanyang University(ERICA)[2], Kyunghee University[3], University of Ulsan[4]

바이오가스 업그레이딩을 통해 생산되는 바이오메탄은 화석연료를 대체할 수 있는 재생 가능 에너지원으로 주목받고 있다[1]. 바이오가스를 업그레이드하기 위한 다양한 기술 중에서 흡착 기반 공정은 이산화탄소와 메탄의 분리에 효과적이며, 높은 에너지 효율성과 선택도로 인해 활발히 연구되고 있다[2]. 특히 Pressure Swing Adsorption (PSA) 공정은 장치 구성의 단순성과 연속 운전이 가능하다는 장점으로 인해 상용화 가능성이 높다. 이에 따라 다양한 흡착제 소재가 개발되고 있으며, 이 중에서도 금속-유기 골격체(Metal‐Organic Frameworks, MOFs)는 우수한 성능으로 주목받고 있다. 그러나 대부분의 기존 연구는 분자 스케일에서의 물성 기반 스크리닝에 집중되어 있으며, 산업 공정에서의 실제 성능이나 경제적 타당성을 정량적으로 평가한 사례는 부족한 실정이다[3].

본 연구에서는 흡착제의 분리 성능뿐만 아니라 상용화 가능성을 경제성 관점에서 정량적으로 평가하기 위한 지표로 최대 흡착제 단가(MACO, Maximum Adsorbent Cost)를 새롭게 제안하였다. MACO는 특정 흡착제를 상업 공정에 적용했을 때, 바이오메탄을 시장가격 수준의 단가로 생산할 수 있도록 허용되는 흡착제 비용의 상한선을 의미한다. 이를 위해 흡착제 특성에 따라 PSA 공정 시뮬레이션을 수행하고, 제품 생산량 및 에너지 소비량 등을 바탕으로 공정 단가를 산출한 뒤, 이를 역산하여 MACO를 계산하였다. MACO가 큰 흡착제는 상대적으로 높은 가격임에도 공정 성능이 우수하여, 여전히 경쟁력 있는 단가로 바이오가스를 업그레이드할 수 있는 가능성을 의미한다. 또한 실제 흡착제 단가가 MACO보다 낮을 경우, 시장가격보다 더 저렴하게 바이오메탄을 생산할 수 있음을 시사한다.

본 연구에서는 CoRE MOF 데이터베이스에 포함된 12,020개의 MOF를 대상으로 MACO를 산정하고, 주어진 경제성 기준을 만족하는 흡착제를 선별하였다. 그 결과, 초기 물성 기반 스크리닝에서 우수한 성능을 보였던 일부 MOF는 MACO 기준을 충족하지 못해 제외되었으며, 반면 생산성과 경제성을 균형 있게 만족하는 MOF 후보군이 도출되었다. 특히 최종 선정된 일부 MOF는 상용 공정과 비교해도 경쟁력 있는 수준의 경제성을 확보할 수 있어, 실제 적용 가능성이 높은 것으로 판단된다.

본 연구는 고성능 소재 선별에 있어 단순한 물성 중심의 평가를 넘어, 공정 운전 조건과 경제성을 통합적으로 고려한 새로운 스크리닝 프레임워크를 제안하였다. 이는 향후 다양한 소재 기반 공정 개발 및 상용화를 위한 실용적 평가 기준으로 확장 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Rapier, Robert. "Global energy trends: insights from the 2023 statistical review of world energy." Forbes. Erişim 20 (2023).

2. Kohlheb, Norbert, et al. "Environmental-economic assessment of the pressure swing adsorption biogas upgrading technology." BioEnergy Research 14.3 (2021): 901-909.

3. Tao, Y. R., G. H. Zhang, and H. J. Xu. "Grand canonical Monte Carlo (GCMC) study on adsorption performance of metal organic frameworks (MOFs) for carbon capture." Sustainable Materials and Technologies 32 (2022): e00383.

PH-56

석유화학 폐촉매로부터 메탄올 회수를 위한 증류공정

정창훈[1], 강성진[2], 이만식[1,3]
[1]한국생산기술연구원 저탄소에너지그룹, [2]한국폴리텍대학 석유화학공정과, [3]부산대학교 탄소중립기후변화학과 수소미래에너지융합전공

Distillation process for methanol recovery from petrochemical spent catalysts

Chang-Hoon Jeong[1], Sung-Jin Kang[2], Man Sig Lee[1,3]
[1]Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)
[2]Department of Petrochemical Processing, Korea Polytechnics University
[3]Major of PNU-KITECH Hydrogen and Next Energy Convergence, Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University

본 연구에서는 석유화학 공정에서 배출되는 폐촉매로부터 메탄올을 회수하기 위한 증류공정을 모사하였으며, 원료투입단, Reflux ratio, Condenser의 Mass & Heat Balance 등의 다양한 공정 변수를 적용하여 운전 조건을 최적화 하였다. 원료물질의 경우, 1 – 13단 범위에서 2.59 kg/h 미만의 유량을 나타내었으며 14 – 69단 범위에서는 2.59 kg/h의 유량을 유지하였다. 그러나 Reboiler의 열량은 8 – 63단에서 가장 낮은 열량(27,223 kcal/h)를 나타내어 가장 적합하다. Reflux ratio는 20.0 이상으로 설계되면 목표하는 메탄올 순도 및 유량을 달성할 수 있다. 그러나 Column의 내부 직경을 고려하여 40.5로 산정하였다. 또한, 기화된 메탄올을 액상으로 회수하기 위한 Condenser의 조건을 최적화하였다. 그 결과, Condenser Water Supply (CWS) 유량은 1,500 kg/h이며 35 ℃의 온도로 공급하는 것이 Condenser의 최종 조건으로 도출되었다.

ACKNOWLEDGMENT
This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) grant funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT, Korea) (RS-2023-00304763).

PH-57

Comparative techno-environmental Study on SFW pyrolysis integration with hydrogen and methanol production

이세영[1,2], 백재호[1], 조형태[3,†], 이재원[4,†]

[1]한국생산기술연구원, [2]연세대학교, [3]경희대학교, [4]한양대학교

(jwlee11@hanyang.ac.kr[†])

The COVID-19 pandemic has led to a surge in mask consumption, resulting in $468 million worth of spent filter waste (SFW) in 2021, with amounts expected to double within a decade. Since HEPA filters are non-recyclable, their incineration releases hazardous gases, raising environmental concerns. This study explores CO2-assisted pyrolysis of SFW, which increases CO yield by 60%. Utilizing these findings, we developed three process models: Waste-to-Hydrogen (WtH), Waste-to-Methanol (WtM), and an optimized WtM (P) that incorporates a single PSA unit to separate CO2 following pre-reforming of CH4 and light hydrocarbons. Unlike conventional WtM systems that require energy-intensive compression for syngas purification, WtM (P) simplifies gas separation while preserving the H2/CO ratio. Furthermore, employing renewable energy sources (wind, solar, hydro) minimizes greenhouse gas emissions. Among the modeled processes, WtM (P) exhibited superior performance in both economic and environmental assessments. This research proposes a novel chemical recycling route for SFW, offering a sustainable alternative to traditional incineration practices.

Keywords: Spent filter waste (SFW), CO_2-assisted Pyrolysis, Steam Methane Reforming (SMR), Methanol synthesis, TEA&LCA

PH-58

LSTM-Transformer Autoencoder-Based Anomaly Detection to Improve Process Safety

권혁인 [1], 신창범 [1], 안용상 [2], 권혁원 [3], 고태언 [1], 이현지 [1], 심유리 [1], 백재호 [3], 이재원 [1†]

한양대학교 ERICA[1]

경희대학교 [2]

한국생산기술연구원 [3]

(jwlee11@hanyang.ac.kr)

화학공정은 복잡하고 동적인 다중 시스템의 결합으로 인해 공정 전반의 안정성과 지속가능성이 위협받고 있으며, 이는 에너지 낭비, 자원 손실, 환경 오염 등으로 직결될 수 있다. 특히 기존의 통계 기반 또는 데이터 기반 이상 탐지 기법들은 공정을 정적이거나 단순한 동적 시스템으로 가정하기 때문에, 실제 산업 현장의 비선형적이고 고차원적인 특성을 충분히 반영하지 못하는 한계점을 가진다. 이에 본 연구에서는 공정 안정성을 확보하기 위한 핵심 기술로서, 새로운 이상탐지 모델인 LSTM Encoder-Transformer Decoder (LETD)를 제안한다. 본 모델은 LSTM 인코더를 통해 공정 시계열의 동적 변화를 효과적으로 인식하며, Transformer 기반 디코더의 멀티헤드 어텐션 구조를 통해 장기적인 시간 의존성과 중요 정보를 병렬적으로 학습함으로써 정밀한 재구성을 수행한다. 이상 탐지는 재구성 오차 기반의 모니터링 통계량을 통해 수행되며, 이를 통해 공정의 비정상 상태를 조기에 감지하고 신속한 제어가 가능해진다. Tennessee Eastman (TE) 벤치마크 공정에 적용한 결과, FAR(False Alarm Rate)은 0.028 (기존모델)에서 0.022으로 개선되었으며, FDR(Fault Detection Rate)은 0.812 (기존모델)에서 0.846으로 성능이 향상됨을 확인하였다. 제안된 LETD 모델은 자원 낭비를 최소화하고 불필요한 에너지 소비 및 환경적 리스크를 현저히 감소시킬 수 있는 이상 탐지 솔루션임이 입증되었다.

Keywords: 기계학습, 공정 모니터링, 공정 이상탐지

PH-59

Green Methanol Production via CO_2-Assisted Blended Textile Waste Pyrolysis and biogas Steam Methane Reforming Process

신창범[1], 고태언[1], 권혁인[1], 심유리[1], 이현지[1], 박준영[2], 안용상[2], 이세영[3], 백재호[3], 이재원[1†]

한양대학교 ERICA[1], 경희대학교[2], 한국생산기술연구원[3]

(jwlee11@hanyang.ac.kr)

메탄올은 기존 화석연료(휘발유, 디젤) 대비 이산화탄소(CO_2) 배출량이 적으며, 상온 상압에서 액체상태로 존재해 저장과 운송이 쉬워 기존의 연료 인프라와 호환성이 높아 대체 연료로 주목받고 있다. 특히 재생 가능한 자원(바이오매스, 폐기물, 탄소 포집 등)으로 생산되는 '청정 메탄올'은 기존 연료보다 탄소 배출을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 본 연구는 이산화탄소 분위기에서 폐섬유를 원료로 열분해한 합성가스에 포함된 일산화 탄소와 바이오 가스 개질을 통해 생산된 수소와 이산화 탄소를 이용해 메탄올을 생산공정을 설계하였다. 메탄올 생산 시 많은 양의 수소가 필요하기 때문에 폐섬유 열분해 및 바이오가스 스팀개질 통합공정을 활용하였다. 열분해 및 스팀개질 시 발생한 이산화 탄소 가스는 가압 냉각 과정을 거쳐 저장하였다. 본 연구에서 제시하는 공정이 기존 소각 및 연소 처리 방식을 대체할 경우, 궁극적으로 탄소 중립을 넘어 네거티브 탄소배출에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 폐기물의 재활용 가능성을 제시하고, 그린 메탄올 생산을 통한 탄소 중립 실현에 기여할 것으로 기대된다.

Keywords: 공정설계, 청정메탄올, 열분해, 폐기물자원화,

PH-60

A Study on Optimizing Scrubber Design to Reduce Channeling in Microbubble Scrubbers

고태언[1], 신창범[1], 권혁인[1], 심유리[1], 이현지[1], 길진우[2], 백재호[3], 이재원[1†]

[1]한양대학교ERICA, [2]경희대학교, [3]한국생산기술연구원

(jwlee11@hanyang.ac.kr)

마이크로-버블을 활용한 스크러버는 Nox, Sox 등 대기오염물질과의 물의 접촉 면적을 극대화하여 오염물질 저감에 효과적임이 검증되었다. 그러나 마이크로-버블 생성을 위해 버블캡 트레이로 공기를 공급할 때 적절하지 못한 버블캡 트레이 설계로 인해 불균일한 유동 분포인 채널링 현상이 발생하며, 이는 마이크로-버블의 크기가 커지거나 각 위치에서 서로 균질하지 않게 하여 스크러버의 효율을 저하시킨다. 따라서 본 연구에서는 유체전산모사를 기반으로 다상유동 및 난류 모델을 적용하였으며, 스크러버의 성능 향상을 위해 채널링 현상을 최소화하는 데 중점을 두었다. 다양한 사례연구를 위해 스크러버 트레이 위 버블캡을 방사형, 십자형, 나선형, 집중형, 분산형으로 배치하여 각 경우의 유동 분포를 분석하였다. 그 결과, 시뮬레이션을 통해 유해물질 저감 효율을 크게 증가시키기 위한 최적화된 버블캡 배치를 도출하였다. 본 연구 결과는 마이크로버블 스크러버의 성능을 개선하는데 활용될 수 있으며, 향후 마이크로-버블 기반 스크러버 시스템 설계 및 제작에 중요한 기초 자료를 제공하여 관련 산업 기술 발전에 크게 기여할 것으로 기대된다.

Keywords: 마이크로버블, 스크러버, 전산유체역학

PH-61

Optimal Serpentine Mini-Channel Design for EV Batteries

이현지 [1], 신창범 [1], 고태언 [1], 권혁인 [1], 심유리 [1], 백재호 [2], 이재원 [1*]

한양대학교 [1]

한국생산기술연구원 [2]

(jwlee11@hanyang.ac.kr)

전기자동차(Electric Vehicle, EV) 기술이 발전함에 따라, 파우치형 리튬 이온 배터리 모듈의 열 관리 시스템은 차량 주행 중 또는 고속 충전 중 발생할 수 있는 열폭주(Thermal Runaway)나 콜드스타트(Cold-Start)를 방지하고, 배터리 수명 및 시스템 신뢰성 향상에 중요한 역할을 한다. 특히 배터리 셀 내의 국부적인 고온 발생은 배터리 성능 저하와 안전 문제로 이어질 수 있기 때문에, 이를 효과적으로 제어할 수 있는 정밀한 열 관리 설계가 요구된다. 이에 본 연구에서는 전산유체역학을 활용하여 다양한 채널 형상이 배터리 모듈 내부 열 분포 및 냉각 성능에 미치는 영향을 분석하고 최적의 Serpentine Mini-Channel 설계안을 도출하고자 한다. 배터리 모듈 내부에 수냉식 Serpentine Mini-Channel Heat Sink (SMCHS)를 구성하고, 기존의 단순 serpentine 형상에서 확장하여, 수평 또는 수직 방향으로 다중 입·출구를 갖는 채널 배열을 적용하였다. 본 연구를 통해 냉각수 흐름 저항을 최소화하고, 냉각 효율을 극대화하며, 셀 간 열 편차를 최소화하는 형상을 도출하였다. 이는 향후 충·방전 시 배터리 셀 열 집중 완화와 에너지 효율 향상에 기여할 것으로 기대된다.

Keywords: Electric Vehicle, Battery Thermal Management System, Serpentine Mini-Channel Heat Sink, Lithium Ion Battery

수소 및 재생에너지

(포스터발표 II)

2025년 9월 25일(목) 13:00~15:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비

PA-1

Sustainable Production of Bio-Methanol via CO_2-assisted Pyrolysis of Biomass: Techno-economic Analysis

박준영[1], 최동호[1], 안용상[1], 이세영[2,3], 백재호[3], 권일한[4,*], 이재원[5,*], 조형태[1,*]
[1]경희대학교 화학공학과, [2]연세대학교 화공생명공학과,
[3]한국생산기술연구원 저탄소에너지그룹, [4]한양대학교 자원환경공학과,
[5]한양대학교 재료화학공학과

초록

지구온난화 등 환경 문제가 심화되면서, 화석 연료를 대체할 지속 가능한 에너지원으로 바이오매스가 주목받고 있다. 본 연구는 바이오매스 열분해에 기반한 바이오메탄올 생산 공정을 제안한다. 선행 연구를 통해 CO_2를 반응 매개체로 활용할 경우 합성가스 생산이 촉진됨을 확인하였으나, 공정단위의 면밀한 분석이 추가로 요구된다. 따라서 본 연구에서는 선행연구 결과를 바탕으로 아카시아 톱밥을 바이오메탄올로 전환하는 세 가지 공정을 개발하였다: (A) N_2 분위기 열분해, (B) CO_2 분위기 열분해, (C) CO_2 분위기 열분해와 바이오가스 습식 개질 공정 통합. 모든 공정에는 부산물 연소 과정에서 발생하는 CO_2를 포집, 저장하는 단계가 포함되며, 폐열 회수를 통한 열 통합이 수행되었다. 공정 (B), (C)의 바이오메탄올 생산량은 공정(A) 대비 각각 12%, 221% 증가하였다. 이에 따라, 메탄올의 균등화 생산 비용은 각각 756, 668, 466 USD/톤으로 산출되었으며, 특히 공정(C)는 화석연료 기반 메탄올 생산 비용(400 USD/톤)에 근접한 수준이다. 본 연구에서 제안한 통합 공정은 탄소중립 실현에 기여하는 효과적인 전략으로서, 지속가능하고 경제적인 바이오메탄올 생산의 가능성을 입증하였다.

PA-2

Optimization of precipitant dropwise addition time in co-precipitated Ni-$Ce_{0.8}Zr_{0.2}O_2$ catalyst for dry reforming of methane

Geon-Hyeong Lee, Hyun-Seok Kang, Jung-Hoon Lee, Dong-Seong Kim, Hyun-Seog Roh[1] *, and Yeol-Lim Lee*

Department of Chemical Engineering Keimyung University, 1095 Dalgubeol-daero, Dalseo-gu, Daegu, 42601, Republic of Korea, [1]Department of Environmental and Energy Engineering, Yonsei University, 1 Yonseidae-gil, Wonju, Gangwon 26493, Republic of Korea

The precipitant addition strategy in co-precipitation affects the physicochemical properties of the catalyst. Kim et al. [1] reported that the precipitant titration time is directly related to the dispersion of active metal by controlling the nuclei growth and nucleation growth rate. Jang et al. [2] reported that both the dispersion of Ni and oxygen storage capacity (OSC) are important to the catalytic performance for the dry reforming of methane. However, excessive OSC could generate undue Ce^{3+} ions, which cover the surface Ni species, so-called 'Ce covering effect', reported by M. Li and A.C. van Veen [3].

We aimed to observe the change in physicochemical properties of catalysts according to the dropwise addition time of the precipitant (15 wt% KOH solution) while preparing 15 wt% Ni-$Ce_{0.8}Zr_{0.2}O_2$ catalyst by the co-precipitation method for the dry reforming of methane (DRM) reaction. The precipitant was added to the precursor solution with different dropwise addition times (total injection time: 0 (Direct), 5, 10, 20 min), and each catalyst was named NCZ 0, NCZ 5, NCZ 10, and NCZ 20.

The OSC value, Ce^{3+}/Ce^{4+} ratio, and O_V/O_L ratio of the catalyst increase when the dropwise addition time increases by inducing more distortion of the supports. This phenomenon is also observed in the peak shifting of the Raman spectra at 460 cm^{-1}, indicating the symmetric vibrations of the CeO_2 fluorite structure. In the case of Ni^0 dispersion, the NCZ 0 exhibited high dispersion (2.3 %) due to the large amount of initially dispersed Ni^0, which resulted from the increased nucleation caused by the shortest dropwise addition time of the precipitant. However, NCZ 10 showed the same values of Ni^0 dispersion as NCZ 0 owing to appropriate distortion, which induces the re-dispersion of Ni species and low Ce covering effect. Interestingly, when comparing NCZ 0 and 10, although they showed the same dispersion, there was a significant difference in CH_4 conversion. This is due to the low OSC of NCZ 0, showing the importance of OSC, which not only affects stability but also its activity.

References

1. K.J. Kim, G.R. Hong, S.Y. Ahn, B.J. Kim, Y.L. Lee and H.S. Roh, Catalysis Today, 425, 114336 (2024)
2. W.J. Jang, H.M. Kim, J.O. Shim, S.Y. Ahn, K.W. Jeon, H.S. Na, Y.L. Lee, D.W. Jeong, J.W. Bae, I.W. Nah, H.S. Roh, Green Chemistry, 20.7, 1621-1633 (2018)
3. M. Li and A.C. van Veen, Applied Catalysis B: Environmental, 237, 641-648 (2018)

PA-3

메탄 열분해를 위한 촉매 유동층 반응기 설계

박동규[1], 유현정[1], 류재홍[1]*
[1]고등기술연구원

Design of a Catalytic Fluidized Bed Reactor for Methane Pyrolysis

Dong Kyoo Park[1], Hyun Jung Yu[1], Jae-Hong Ryu[1]*
[1]Institute for Advanced Engineering

Abstract

최근 글로벌 기후변화의 영향으로 탄소중립과 청정수소의 중요성이 대두되고 있으며, 이러한 이유로 청정수소의 대량 생산기술 개발이 요구되는 상황이다. 최근까지 그린수소와 블루수소는 각각 생산단가가 높고 이산화탄소 포집·처리 등 후처리 공정에 따른 효율 저하 등의 한계를 갖고 있다. 이에 반해 청록수소는 블루수소와 마찬가지로 천연가스를 기반으로 하지만 훨씬 발전된 생산기술로 평가된다. 청록수소의 제조는 천연가스(메탄) 등 탄소와 수소로만 구성된 원료를 열분해해 고순도 수소를 생산하는 공정으로 원료의 탄소는 고체 형태의 부산물로 회수할 수 있다. 이를 통해 기존 수전해 방식의 청정수소 생산기술에 비해 에너지 소모를 1/3 미만으로 줄일 수 있으며, 신재생에너지를 활용할 경우 이산화탄소 배출을 0으로 줄일 수 있다. 이와 같이 에너지 사용량이 낮고 탄소를 고체 형태로 회수할 수 있어서 재생에너지 공급 및 CCS(Carbon Capture and Storage)에 대한 제약이 적어 단기간 내에 대량의 청정수소를 공급할 수 있는 기술이다.

본 연구에서는 메탄 열분해 반응을 위한 촉매 유동층 반응기 설계를 위한 촉매 모사 입자 3종과 반응을 통해 생선된 고체탄소 모사 입자 1종의 최소유동화 속도 및 이송 속도 등 유동화 특성과 고체탄소 회수 장비의 입자 회수 특성에 대하여 고찰하였다. 결과적으로 촉매 유동층 반응기에서 고체탄소의 회수와 촉매 비산손실을 최소화하는 설계인자를 도출하였으며, 본 연구결과는 상용 청록수소 생산 공정 개발을 위한 설계 및 최적화를 위한 자료로 활용할 예정이다.

사사

본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 신재생에너지 핵심기술개발사업으로 지원받아 수행한 연구 성과입니다. (No. 202400459131)

PA-4

통합 플라즈마-촉매 공정을 적용한 청록수소 생산의 기술경제성 평가

정재형[1], 이진희[1], 박동규[1], 박수남[1], 류재홍[1]*
[1]고등기술연구원, 41718 경기도 용인시 처인구 백암면 고안로 51번길 175-28

Techno-Economic Assessment of a Turquoise Hydrogen Production System Using Integrated Plasma-Catalyst Reactors

Jae Hyung Jung[1], Jin Hee Lee[1], Dong Kyoo Park[1], Soo Nam Park[1], Jae-Hong Ryu[1]*
[1]Institute for Advanced Engineering (IAE), Go an-ro 51, Gyeonggi-Do 41718, KOREA

Abstract

기존의 플라즈마 기반 수소 생산 공정은 고온 반응 환경을 외부 에너지원 없이 제공할 수 있어 탄소 배출이 없다는 장점을 지닌다. 그러나, 플라즈마 장치 특유의 높은 전력 소비와 장치 구축 비용으로 인해, 상업적 관점에서의 경제성 확보에는 여전히 큰 한계가 존재한다.

이에 본 연구에서는 플라즈마 반응기와 촉매 반응부를 통합한 새로운 청록수소 생산 공정을 제안하고, 해당 공정의 공정 모사 시뮬레이션 결과를 바탕으로 기술경제성 분석(TEA)을 수행하였다. 물질수지는 Aspen Plus 기반의 반응기 모델링을 통해 확보하였으며, 이를 통해 수소 생산량, 반응 효율, 에너지 소비량 등의 핵심 지표를 산정하였다. 공정의 경제성 평가는 CEPCI 보정값(798.8, 2024년 기준)을 적용한 운전비용(OPEX) 기반으로 수행되었으며, 전력 사용량과 반응물 소비를 고려한 연간 운전비용을 통해 수소 생산단가(LCOH)를 산출하였다.

그 결과, 일일 10 kg 수준의 수소를 생산하는 소규모 시스템에서는 전력 소비 및 자본비 증가로 인해 LCOH가 기존 대규모 플라즈마 공정보다 높은 것으로 나타났으며, 이는 소규모 수소 생산의 경제성 확보에 있어 주요한 장애 요인이 됨을 시사한다. 본 분석 결과는 청록수소 기반 수소 생산 기술의 실증화 및 상용화에 있어 초기 단계의 설계 지침과 방향성을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 이수용, 김종환, and 이영덕, "다양한 청록수소 생산 공정에 대한 경제성 분석," 한국수소및신에너지학회논문집, 34(3), 256-266 (2023).

PA-5

Methane Pyrolysis for Turquoise Hydrogen Production Using Ni-YSZ Catalysts via HASI Method

Jin Hee Lee[1], Jae Hyung Jung[1], Soo Nam Park[1], Dong Kyu Park[1], Hyun Jung Yoo[1], Jae Hong Ryu[1*]
[1]Institute of Advanced Engineering, Clean Energy Conversion Center, Low Carbon Energy Division

Methane pyrolysis for turquoise hydrogen production is an environmentally friendly approach compared to traditional steam methane reforming or water electrolysis, with no CO_2 emissions and the by-product solid carbon utilizable for carbon composite manufacturing and recycling. Notably, plasma-assisted methane pyrolysis enables low-temperature, high-efficiency reactions, reducing energy consumption and enhancing catalyst stability. In this study, Ni-supported YSZ catalysts for turquoise hydrogen production through unreacted methane pyrolysis after plasma reaction were synthesized and evaluated using the Hydrate-Assisted Solid-State Impregnation (HASI) method in a fluidized bed reactor. HASI employs solvent-free impregnation, leveraging the low melting point of $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ at 40°C to transform into a solution, facilitating efficient Ni dispersion. YSZ beads (surface area 5–20 m^2/g, porosity <20%) with low porosity were pre-treated with 2M HNO_3 at 40°C for 90 minutes to induce surface defects and hydroxyl groups, achieving 5–10 wt% Ni loading after heat treatment. SEM-EDS, BET, and TPR analyses confirmed Ni particle sizes of 5–20 nm and active sites, with fluidized bed tests at 600–800°C yielding stable performance. Future research will focus on catalyst synthesis and performance evaluation using 0.5–1 mm γ–alumina, mass production methods, long-term stability, and catalyst performance assessment in plasma-coupled systems for turquoise hydrogen commercialization.

Keywords: Methane pyrolysis, turquoise hydrogen, HASI, Ni-YSZ catalyst, fluidized bed, plasma, solid carbon

Acknowlegment: This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 202400459131)

PA-6

혼합 경질올레핀 기반 지속가능항공유 생산을 위한 Ni/ASA와 MFI 제올라이트 이중층 촉매 연구

정주현, 손수빈, 이준상, 김정철*
국립한밭대학교 화학생명공학과

Production of Sustainable Aviation Fuel from Mixed Light Olefins over Ni/ASA and MFI Zeolite Dual-Bed Catalysts

Juhyun Jeong, Subin Son, Junsang Lee, Jeong-Chul Kim*
Department of Chemical and Biological Engineering, Hanbat National University

전 세계적으로 탄소중립 달성을 위해 항공 부문의 온실가스 배출 규제가 강화되자, 기존 화석연료를 대체할 지속가능항공유(Sustainable Aviation Fuel, SAF)의 양산이 시급한 과제로 떠오르고 있다. 다양한 SAF 생산 경로 중, Alcohol-to-Jet (ATJ) 공정은 다른 공정에 비해 높은 수율로 인해 유망한 공정으로 평가받고 있다. ATJ 공정의 일부인 Methanol-to-Olefin (MTO) 공정의 생성물은 단일 성분의 올레핀이 아닌 에틸렌(C_2), 프로필렌(C_3), 부틸렌(C_4) 등 다양한 경질 올레핀(C_2 - C_4)이 혼합된 형태로 생성된다. 그러나, 산업적 활용도가 높은 혼합 경질올레핀을 고부가가치 액상연료로 직접 전환하는 연구사례는 드물며, 기존 보고된 연구는 단일 올레핀 전환에 집중되어 있다[1]. 따라서, 본 연구에서는 혼합 경질올레핀을 원료로 사용하여 SAF (C_8 - C_{15}) 전구체를 제조하기 위한 최적의 촉매 개발을 목표로 하였다. 이 과정에서 촉매를 통한 올레핀 올리고머화는 두 단계를 거쳐 진행되며, 먼저 초기 반응물은 Ni과 같은 전이금속 활성점에서 사슬이 성장한다. 이어서 산 촉매의 Brønsted 산점을 통해 사슬 성장 및 이성질화 반응이 일어나며, 이는 옥탄가 및 선택도 향상을 돕는다. 이중층(Dual-bed) 형태의 고정층 반응기 시스템으로 이러한 반응 메커니즘을 적용하여 반응을 진행하였다. 본 연구에 사용된 지지체인 비정질 실리카-알루미나(Amorphous Silica-Alumina, ASA)는 올레핀 올리고머화 반응에서 높은 활성과 안정성을 보여 효과적인 촉매 지지체로 알려져 있다[2]. 따라서, 반응기 상단에는 Ni이 담지된 ASA (Ni/ASA) 촉매를 충진하여 C_2 - C_4 올레핀의 올리고머화를 유도하였다. 또한, 반응기 하단에는 강한 산점과 형상선택성을 갖는 MFI 촉매를 배치하여 상단에서 생성된 올리고머들의 추가적인 반응을 진행하였다. 제안된 Ni/ASA와 MFI 이중층 촉매 시스템은 단일 Ni/ASA 촉매층과 비교하여 혼합 경질올레핀에 대해 높은 전환율 및 선택도를 보였다. 또한, 다양한 산 특성을 갖는 MFI 촉매를 사용하였으며, 이를 통해 MFI의 산 특성이 생성물 분포에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구 결과는 MTO 공정으로부터 생성된 혼합 경질올레핀으로 고부가가치의 액상연료를 생산하는 효율적인 통합 공정의 운용 가능성을 제시하며, 이는 다양한 올레핀 공급원으로부터 탄소중립 달성을 위한 SAF 제조 공정의 기초 연구가 될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Fuchs, C. et al., "Synthesis of sustainable aviation fuels via (co-)oligomerization of light olefins," *Fuel*, **382**, 133680 (2025).

2. Betz, M. et al., "Production of hydrocarbon fuels by heterogeneously catalyzed oligomerization of ethylene: Tuning of the product distribution," *Biomass Bioenergy*, **166**, 106595 (2022).

PA-7

Computational Fluid Dynamics Study on Multi-Stage Hydrogen Compression Process

Suhyeon Son, Bogeon Kim, Jeong-Hoon Sa*

Department of Chemical Engineering (BK21 FOUR), Dong-A University, Busan, Republic of Korea

Hydrogen energy plays a crucial role in achieving carbon neutrality. However, the deployment of hydrogen refueling stations remains limited, and the process of compressing hydrogen to high pressures presents significant technical challenges. Diaphragm compressors, which are commonly used for hydrogen refueling, suffer from limited durability and are unsuitable for sustained high-pressure operation. Conversely, hydraulic piston compressors, while capable of high-pressure compression, can induce vibrations and potential gas leakage. To address these limitations, this study proposes a multi-stage hydrogen compression system, modeled and analyzed using Computational Fluid Dynamics (CFD). In this system, a diaphragm compressor is used in the initial stage to accommodate high volumetric flow at medium pressure, while a hydraulic piston compressor is deployed in the subsequent stage to achieve stable compression at high pressure. Through detailed CFD-based modeling, flow behavior (velocity and pressure) and thermal characteristics within the compressor were analyzed to derive optimal operating conditions. Furthermore, a polytropic compression model was applied to quantify the energy required for each stage, enabling a comparative analysis of power consumption between diaphragm and piston compressors. By integrating CFD simulation and energy evaluation, this study aims to develop an energy-efficient hydrogen compression strategy, ultimately contributing to the advancement of carbon-neutral hydrogen infrastructure.

References

1. Mohammadi-Amin, M., Jahangiri, A. R., and Bustanchy, M., “Thermodynamic modeling, CFD analysis and parametric study of a near-isothermal reciprocating compressor,” Therm. Sci. Eng. Prog. 19100624 (2020).

감사의 글:

“본 연구는 한국연구재단(RS-2023-00280519), 한국기초과학지원연구원(RS-2024-00404896), 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479), 교육부, 부산광역시, 부산형 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 지원을 받아 수행되었습니다.”

PA-8

다양한 버섯폐배지들의 촉매 열분해

박영권[1*], 장현준[1], 황세진[1]
[1]*서울시립대학교 환경공학부*

Study on catalytic pyrolysis of various kinds of mushroom substrate

Young-Kwon Park[1*], Hyun Jun Jang[1], Sejin Hwang[1]
[1]*School of environmental engineering, University of Seoul*

농업 부산물은 국내외에서 발생량이 많음에도 불구하고 대부분 저부가가치 방식으로 처리되고 있는 대표적인 미이용 바이오매스 자원이다. 농업 부산물 가운데 특히 버섯 폐배지는 버섯 재배 과정 후 생성되는 배지와 일부 균사체가 혼재된 부산물로, 그 발생 규모가 농업 부산물 중에서도 매우 큰 비중을 차지한다. 버섯 폐배지는 현재 퇴비나 비료로 사용되고 있지만, 버섯 재배량 증가에 따라 폐배지 발생량도 증가하여 더욱 효율적인 처리방식이 필요하다. 버섯배지는 다량의 유기물과 무기 성분이 공존하는 복합적인 특성을 가지고 있어, 단순 농업적 활용을 넘어 에너지 및 화학 원료로의 전환 가능성이 높은 자원으로 평가된다. 특히 열화학적 전환 기술 중 하나인 촉매 열분해는 폐배지를 효율적으로 분해하여 가연성 가스, 액상유분, 고형 잔류물 등으로 전환할 수 있으며, 이를 통해 재생에너지 생산과 화학 원료 회수가 가능하다. 본 연구에서는 micro pyrolyzer와 GC/MS를 결합한 Py-GC/MS를 이용하여 버섯 재배 후 발생하는 폐배지를 대상으로 촉매 열분해 반응 특성을 규명하였다.

This study was supported by the Ministry of the Environment's waste resource energy recycling professional training project (YL-WE-22-001).

PA-9

Optimizing HER at MoS_2 interfaces via Ni_3S_2 Facet Engineering

Jeong Min Woo[1,2] and Seok Ki Kim[1,2*]

[1]Department of Chemical Engineering, Ajou University, 206 Worldcup-ro, Suwon 16499, Korea

[2]Department of Energy Systems Research, Ajou University, 206 Worldcup-ro, Suwon 16499, Korea

We elucidate the facet-dependent hydrogen evolution reaction (HER) activity at Ni_3S_2/MoS_2 heterointerfaces using density functional theory (DFT). With PBE-GGA slab models, the hydrogen adsorption free energy (ΔG_H^*) is 0.085 eV for the $Ni_3S_2(100)/MoS_2$ interface—close to the thermoneutral optimum—whereas $Ni_3S_2(110)/MoS_2$ yields 0.208 eV, indicating a less favorable descriptor. For the (100) interface, Ni-top active sites enable efficient electron transfer and a balanced adsorption–desorption profile, while the (110) interface features S-rich sites that hinder H_2 release. Bader charge analysis and projected density of states (PDOS) further show enhanced Ni d-band contributions near the Fermi level at the (100) interface, beneficial for HER. These results demonstrate that facet engineering can tune interfacial electronic structure and active-site character to optimize HER performance. We highlight crystal-facet/interfacial engineering as a key design variable for MoS_2-coated nickel sulfide catalysts and provide a rationale for maximizing exposure of the (100) facet via directional growth or facet-selective synthesis.

References

1. Zheng, Z., Su, T., Shi, J., Tong, R., Xiao, H., Zhang, Q., Zhang, Y., Wang, Z., Li, Q., and Wang, X., "Boosting the electrocatalytic activity of amorphous molybdenum sulfide nanoflakes via nickel sulfide decoration," *Nanoscale*, 11, 22971-22979 (2019).

2. Wu, A., Gu, Y., Xie, Y., Tian, C., Yan, H., Wang, D., Zhang, X., Cai, Z., and Fu, H., "Effective electrocatalytic hydrogen evolution in neutral medium based on 2D MoP/MoS_2 heterostructure nanosheets," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 25986-25995 (2019).

PA-10

Ab Initio Study on the Synergistic Effects of Boron Doping on ORR Performance and Stability in PtNi

Hyun Wook Hwang[1,2] and Seok Ki Kim[1,2*]

[1]Department of Chemical Engineering, Ajou University, 206 Worldcup-ro, Suwon 16499, Korea

[2]Department of Energy Systems Research, Ajou University, 206 Worldcup-ro, Suwon 16499, Korea

Although the oxygen reduction reaction (ORR) is crucial for next-generation fuel cells, platinum-based catalysts suffer from large overpotential and poor stability. In this study, we investigated the structural and electronic properties of intermetallic PtNi and boron-doped $PtNiB_{0.25}$ using density functional theory (DFT).

Both catalysts exhibit a well-ordered arrangement of Pt and Ni atoms. Upon Ni leaching, the top layers of Pt/PtNi and $Pt/PtNiB_{0.25}$ become pure Pt. Ordered incorporation of Ni into a Pt surface induces 5.5% compressive strain. With boron doping, $PtNiB_{0.25}$ exhibits 2% tensile strain, while $PtNiB_{0.5}$ shows 5% tensile strain.

On ordered PtNi surfaces, Ni serves as the primary active site and binds intermediates more strongly than Pt, directly increasing the overpotential. Increasing tensile strain further strengthens intermediate adsorption. In Pt/PtNi structures with a pure Pt first layer, catalytic activity is higher than that of pure Pt but decreases as tensile strain increases. $Pt/PtNi_{2.0}$, which has a similar tensile strain to $PtNiB_{0.25}$, shows a higher overpotential than Pt/PtNi, suggesting that from a strain perspective, boron doping could appear to reduce activity. However, $Pt/PtNiB_{0.25}$ exhibits the highest catalytic activity with an overpotential of 0.76 V.

Boron doping reduces the adsorption strength of intermediates, with oxygen showing the most significant decrease. Both Pt/PtNi and $Pt/PtNiB_{0.25}$ exhibit a 0.5 eV downshift in the d-band center compared to Pt, which weakens intermediate adsorption by reducing the overlap between metal d-states and the antibonding states of the adsorbates. This electronic modification offsets the negative effects of tensile strain. Ni leaching from the first atomic layer of $PtNiB_{0.25}$ leads to the formation of a core–shell structure with a pure Pt surface. Incorporation of boron into interstitial sites increases atomic migration barriers, inhibits Ni dissolution, promotes a Pt-rich surface, and enhances structural stability. These findings confirm that the superior ORR performance of $PtNiB_{0.25}$ originates from a boron-induced ligand effect combined with improved structural robustness.

PA-11

Microwave Synthesis Strategy for Enhancing the Selectivity of HEA Catalysts in Acetylene Hydrogenation

김석기*, 이하늘
아주대학교

Introduction

The selective hydrogenation of acetylene is essential for polymer-grade ethylene production to prevent catalyst deactivation and ensure product purity. In this process, the key is to remove acetylene impurities while suppressing ethylene over-hydrogenation and oligomerization. Although Pd-based catalysts exhibit excellent activity, they face limitations such as high cost and over-hydrogenation. Therefore, the development of highly active non-precious metal-based catalysts is required.

Experimental Methods

In this study, high-entropy alloy nanoparticles (HEA-NPs) composed of various non-precious metals, including Ni and Cu, were supported on carbon nanotubes (CNTs) and synthesized at high temperatures within seconds by microwave heating. The synthesis procedure involved the addition of metal precursors to a CNT suspension, followed by mixing, ultrasonication, drying, and microwave irradiation (700 W) under an Ar atmosphere for several seconds.

Results and Discussion

The synthesis parameters, including the sample loading, dispersion, and heating time, were optimized to minimize particle agglomeration. Evaluation of the catalytic performance revealed that the synthesized HEA catalysts exhibited higher ethylene selectivity than those prepared by conventional wet impregnation. This improvement is attributed to the synergistic effects of the diverse metal compositions and the enhanced nanoparticle dispersion achieved through microwave synthesis.

Conclusion

This study presents a HEA catalyst synthesis strategy with strong potential to replace Pd-based catalysts. The proposed microwave-based synthesis method enables the rapid fabrication and precise control of metal compositions, contributing to cost reduction and performance enhancement in acetylene hydrogenation processes.

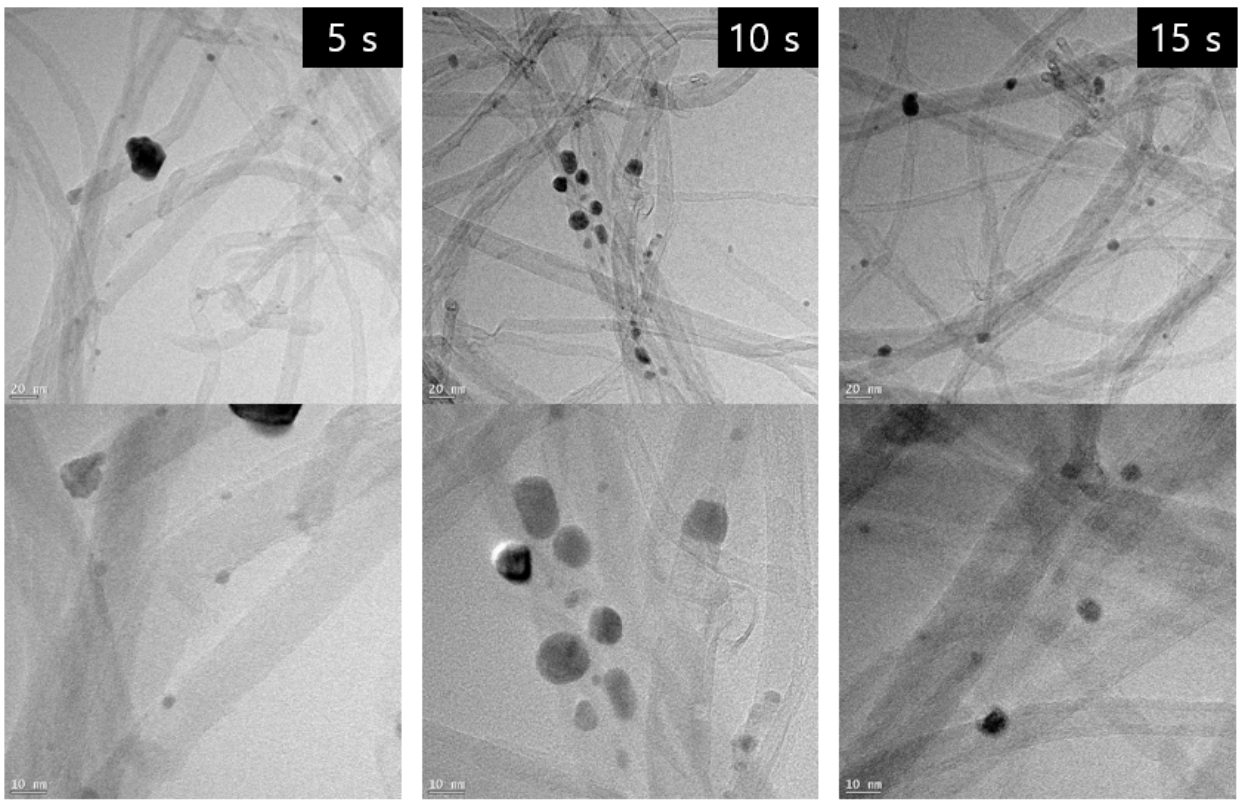


Figure 1. TEM images of 1 wt% Pd/CNT catalysts synthesized by microwave heating for different durations

PA-12

DFT 기반 Au(111), AuOH(111), CuO(OH)(111) 표면에서의 Glucose 말단 산화 경로 비교

황지영, 김석기*

아주대학교 화학공학과

초록

본 연구에서는 Au(111), AuOH(111), CuO(OH)(111) 표면에서 glucose 말단의 alcohol기와 aldehyde기 산화 가능성과 반응 경로를 DFT 계산으로 비교하였다. 각 경로의 요구 전자 수와 활성화 장벽, 표면 특성이 반응 선택성에 미치는 영향을 분석한 결과, Au(111)에서는 aldehyde 우선 산화가 에너지적으로 유리하고, alcohol 우선 경로는 높은 장벽으로 제한되었다. AuOH(111)에서는 aldehyde 산화 후 alcohol 산화가 가능하여 glucaric acid 생성이 촉진되었으며, 이는 표면 OH와 수소 결합으로 생성물 탈착이 용이해진 것으로 분석하였다. CuO(111)에서는 두 산화 반응 모두 불리하고, 높은 OH 밀도에 따른 강한 수소 결합으로 인해 이러한 결과가 나온 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 촉매 표면의 전자 구조와 OH 종의 표면 밀도가 바이오매스 전환 반응에서의 산화 선택성과 생성물 분포를 지배하는 핵심 인자임을 시사하며, 이는 차세대 청정 수소 생산 및 재생에너지 기반 고성능 촉매 설계에 있어 중요한 기초 자료를 제공한다.

PA-13

Condition Tuning for Selective Acetylene Hydrogenation over Pd Catalysts

Ji Young Lee[1,2] and Seok Ki Kim[1,2*]

[1]Department of Chemical Engineering, Ajou University, 206 Worldcup-ro, Suwon 16499, Korea

[2]Department of Energy Systems Research, Ajou University, 206 Worldcup-ro, Suwon 16499, Korea

Selective hydrogenation of acetylene is essential for ethylene purification, and achieving high conversion and selectivity requires careful tuning of process variables. This study systematically evaluates the effects of Pd loading, reaction temperature, acid treatment of the support, and feed-gas composition. These factors modulate the thermodynamics and kinetics of adsorption and activation at the catalyst surface; notably, precise temperature control suppresses over-hydrogenation. Variation in Pd loading governs active-site dispersion and electronic structure, thereby tuning the activity–selectivity trade-off. While acid treatment can improve metal dispersion, it may also remove beneficial surface species and alter support morphology, with concomitant performance penalties. Overall, the results identify a set of conditions that enhance activity and durability while suppressing deactivation via green oil and coke, and they inform practical design principles for Pd-based catalysts and industrial process optimization.

PA-14

혼합 알케인 탄화수소 수증기 개질 반응: Ni계 촉매의 담체 영향

김민주, 공지현, 권재민, 장원준[1,2]
아주대학교 환경공학과, [1]아주대학교 환경안전공학과, [2]아주대학교 에너지시스템학과

Steam Reforming of Mixed Alkane Hydrocarbons: Effects of Supports on Ni-Based Catalysts

Min-Ju Kim, Ji-Hyeon Gong, Jae-Min Kwon, Won-Jun Jang[1,2]
Department of Environmental Engineering, Ajou University,
[1]Department of Environmental and safety Engineering, Ajou University,
[2]Department of Energy Systems Research, Ajou University

본 연구에서는 폐플라스틱 열분해 후 생성되는 알케인계 탄화수소(CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10})를 원료로 하여 수소를 생산하기 위한 수증기 개질 반응에 Ni 기반 촉매를 적용하였다. 촉매는 Ni 담지량 15 wt.%로 고정하고, 담체로는 CeO_2, ZrO_2, Al_2O_3, SiO_2를 선택하여 함침법으로 제조하였다. 반응은 크래킹 반응 및 탄소 침적을 최소화하는 조건 (650 ~ 850 °C, H_2O/C = 7.0, GHSV = 451,184 mL/h·g_{cat})에서 수행되었으며, 각 탄화수소의 전환율 (CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10})과 수소 몰수를 분석하여 촉매 성능을 비교하였다.
촉매의 물리화학적 특성은 H_2-TPR, BET, H_2-Chemisorption, TGA 분석을 통해 평가하였으며, 이를 촉매의 반응 결과와 연계하여 분석하였다. 그 결과, 15% Ni/CeO_2는 높은 환원성 및 산소저장능력, 15% Ni/Al_2O_3 촉매는 높은 비표면적 및 분산도로 인해 C2 - C4 탄화수소에 대해 전 온도 영역에서 거의 100%의 전환율을 보였고, CH_4 전환율도 온도 상승에 따라 향상되었다. 반면, 15% Ni/ZrO_2 및 15% Ni/SiO_2 촉매는 크래킹 반응이 수증기 개질 반응보다 우세하게 나타나 CH_4 전환율이 음의 값을 나타냈다. 수소 몰수 측면에서도 CeO_2 및 Al_2O_3 담체를 사용한 촉매가 우수한 결과를 보였다.

참고문헌

1. Lee, Y.-H., Kim, J.-E., Gong, J.-H., Jeon, K.-W., Yoon, C.-H., and Jang, W.-J., "Thermodynamic Analysis of Alkane Steam Reforming for Hydrogen Production," J. Korea Soc. Waste Manag., 38(5), 1-10 (2021).

2. Jang, W.-J., Shim, J.-O., Kim, H.-M., Yoo, S.-Y., and Roh, H.-S., "A review on dry reforming of methane in aspect of catalytic properties," Catal. Today, 324, 15-26 (2019).

3. Kim, J.-E., Jeon, K.-W., Yoon, C.-H., and Jang, W.-J., "A study of thermodynamic equilibrium analysis and optimized reaction conditions for combined steam reforming of biogas," J. Korea Soc. Waste Manag., 37(8), 521-530 (2020).

PA-15

폐플라스틱 유래 합성가스로부터 나프타 생산을 위한 Fischer-Tropsch 촉매 반응

권재민[1], 공지현[1], 김민주[1], 장원준[1,2,3,*]
[1]아주대학교 환경공학과, [2]아주대학교 환경안전공학과,
[3]아주대학교 에너지시스템학과

Fischer-Tropsch Catalytic Reaction for Naphtha Production Using Syngas from Waste Plastics

Jae-Min Kwon[1], Ji-Hyeon Gong[1], Min-Ju Kim[1], Won-Jun Jang[1,2,3,*]
[1]Department of Environmental Engineering, Ajou University,
[2]Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University,
[3]Department of Energy Systems Research, Ajou University

본 연구에서는 폐플라스틱 유래 합성가스로부터 나프타를 생산하기 위해 다양한 K 담지량을 가진 촉매를 사용하여 Fischer-Tropsch 반응을 수행하였다. 반응 가스로는 폐플라스틱 유래 합성가스에 포함된 CO, CO_2, H_2를 1:1:5의 비율로 고정하여 사용하였으며, 우수한 CO 및 CO_2 전환율과 높은 C_5^+ 탄화수소 선택도를 달성하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 FeZnAl 촉매를 공침법으로 제조한 후, K를 0, 5, 10, 15, 20 wt%로 함침하여 촉매를 제작하였다. 제조된 촉매의 성능을 평가하기 위해 300 ℃에서 50시간 동안 Fischer-Tropsch 반응을 수행하였다. 또한 ICP-OES, XRF, BET, H_2-TPR, CO_2-TPD 분석 기법을 활용하여 촉매의 물리화학적 특성을 분석하였다. K가 담지될수록 BET 표면적과 기공 부피는 감소했지만 기공 크기와 촉매의 염기성은 증가하는 경향을 보였다. Fischer-Tropsch 반응 결과, K 담지량이 적은 촉매일수록 50시간 동안 비활성화 없이 CO 전환율을 유지하였다. 특히 5KFeZnAl 촉매가 가장 높은 C_5^+ 탄화수소 선택도를 나타냈다. 따라서 제조된 촉매 중 폐플라스틱 유래 합성가스로부터 나프타를 생산하기 위한 Fischer-Tropsch 반응에 가장 적합한 촉매는 5KFeZnAl로 판단된다.

참고문헌

1. Nasriddino et al.[1], “Effect of Co, Cu, and Zn on FeAlK catalysts in CO_2 hydrogenation to C_{5+} hydrocarbons”, *Catal. Sci. Technol.,* **12**(3), 906-915 (2022).

PA-16

Semantic segmentation mask generation for wildfire images using independent HSV color ranges

Jeong Kyu Kim[1], Jeonghwan Kim[2], Jongseok Kang[3], Tae-Eung Sung[4,*]

[1]Department of Computer Science, Yonsei University, Wonju 26493, Republic of Korea, [2]Division of Data Analysis, Busan-Ulsan-Gyeongnam Branch, Korea Institute of Science and Technology Information, Busan, 48059, Republic of Korea, [3]Division of Data Analysis, Korea Institute of Science and Technology Information, Seoul, 02456, Republic of Korea, [4]Division of Software, Yonsei University, Wonju 26493, Republic of Korea

([*]Email address: hanencia@hanencia.pe.kr)

In this study, we set independent ranges for wildfires in the HSV color space and investigated a method to extract semantic segmentation masks. To achieve it, the study was conducted as follows. First, two types of fire segmentation datasets were prepared. Among these, the FLAME (Fire Luminosity Airborne-based Machine learning Evaluation) dataset by Shamsoshoara et al. (2020), which includes both RGB images and binary masks, was used to train the U-Net model. Additionally, 1,000 images extracted from wildfire videos collected from the internet were input into the trained model to predict masks. We then overlaid the predicted masks with the RGB images to convert them into a masked RGB image. From these 1,000 images, we independently extracted the Hue (H), Saturation (S), and Value (V) values of each pixel, calculated the mean and standard deviation, and used these statistics to define ranges.

Acknowledgement

This work was supported by the Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology and funded by the Korean government (Ministry of Trade, Industry, and Energy, Ministry of Science and ICT, Ministry of the Interior and Safety, National Fire Agency, Project Title: Development of gas hydrate extinguishing agent and fire suppression technology for inaccessible fires, Project Number: 2760000002).

References

1. Shamsoshoara, A., Afghah, F., Razi, A., Zheng, L., Fulé, P.Z., & Blasch, E. (2020). The FLAME dataset: Aerial Imagery Pile burn detection using drones (UAVs). IEEE DataPort. https://dx.doi.org/10.21227/krde-h753.
2. B. Lee, N. Yamanakkanavar, and J. Y. Choi, "Automatic segmentation of brain MRI using a novel patch-wise U-net deep architecture," PLoS One, vol. 15, no. 8, p. e0236493, 2020. [Online] Available: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236493

PA-17

Physics-Informed Neural Network 기반 폐배터리 전구체 회수 공정 결정화 모델링

박경근, 김정동, 김정환*
연세대학교 화공생명공학과

최근 전기차와 휴대용 기기의 보급으로 리튬 이온 배터리에 대한 수요가 급격히 증가함에 따라, 폐배터리로부터 유가 금속을을 회수하기 위한 재활용 기술에 대한 관심이 높아지고 있다.[1] 그중 NCM 전구체는 폐배터리로부터 결정화 공정을 통해 회수할 수 있으며, NCM 배터리 제조에 직접적으로 활용할 수 있어 자원 순환성 측면에서 큰 이점을 제공한다.[2] 그러나 해당 공정은 pH, 슬러리 조성, 운전 조건 등 공정 조건에 따라 전구체 회수율, 입자 크기 분포 등이 달라지기 때문에, 안정적인 품질 확보 및 공정 최적화를 위해 정밀한 모델링이 필수적이다.[3] 본 연구에서는 실험 데이터를 기반으로, 핵생성, 성장, 응집 반응을 반영한 입자 크기 분포 계산 모델을 만들었다. 또한 기존 모델을 보완하고 다양한 공정 조건에서도 예측 성능을 유지하기 위해 물리 법칙을 손실 함수에 반영하여 학습하는 Physics-Informed Neural Network(PINN)를 도입하였다. 기존 모델로부터 생성된 데이터를 인코딩하여 학습을 진행하였으며, 학습된 모델은 다양한 공정 조건에서 일관된 예측 성능을 보였으며, 입자 크기 분포 거동을 정량적으로 설명할 수 있는 데이터 효율적인 접근법을 제시한다. 이러한 결과는 NCM 전구체 회수 공정 제어에의 적용이 가능하며, 이를 통해 고순도, 고수율, 그리고 목표 입자 분포를 갖는 전구체 생산에 기여할 수 있음을 보여준다.

참고문헌
[1] Ma, X., Meng, Z., Bellonia, M.V. et al. “The evolution of lithium-ion battery recycling”. Nat. Rev. Clean Technol. 1, 75–94 (2025).

[2] Kim, Sunwoo, Jeongdong Kim, and Junghwan Kim. "Design and operation optimization of a novel closed-loop NCM precursor resynthesis from spent LIB assisted by roasting and wastewater electrolysis." Chemical Engineering Journal 504 158699 (2025).

[3] Kim, Jeongdong, et al. "Optimal operation guidelines for direct recovery of high-purity precursor from spent lithium-ion batteries: hybrid operation model of population balance equation and data-driven classifier." Applied Crystallography 57.6 (2024).

PA-18

수전해 기술별 경제성 분석을 통한 2050년 한국 그린수소 가격 전망

김동현, 김유림, 김정환*
연세대학교 화공생명공학과

한국은 2050년까지 연간 총 수소 수요 2,790만 톤 중 300만 톤을 그린수소로 공급하고, 생산 단가를 2,500원/kgH_2으로 낮추는 것을 목표로 설정하였다. 이는 2020년 기준 약 1만 원/kg에 달했던 국내 그린수소 생산비용에 비해 약 75% 이상의 비용 절감을 요구하는 수치이다. 본 연구에서는 ALK, PEM, SOEC 등 주요 수전해 기술을 사용해 태양광 및 온/오프쇼어 풍력을 연계한 다양한 시나리오에 따라 2020~2050년 경제성을 분석했다. 수전해 시스템의 투자비, 효율, 시스템 수명, 스케일 효과 등 기술별 세부 스펙을 바탕으로 경제성 평가 결과, 최적의 시나리오일 때 2050년 ALK, PEM, SOEC 모두에서 약 4,000원/kgH_2 수준까지 생산단가 하락이 예상된다. 기술 및 에너지 가격 변동성에 따라 각 시나리오마다 편차가 존재하며, 현실적인 그린수소 가격이 목표치에 달성할 수 없음을 확인했고 달성하기 위해서는 1,882~4,039원/kgH_2의 절감이 필요함을 확인했다. 민감도 분석 결과 재생에너지 전력 비용, 시스템 효율, 장치비가 경제성에 큰 영향을 끼침을 확인했다. 목표 가격을 달성하기 위해서는 최대 시스템 효율을 가정할 경우 재생에너지 전력 비용을 최소 70% 이상 절감해야 하는 것으로 분석되었다. 2050년 아시아, 태평양 지역의 재생 에너지 인증서 가격은 0.011$/MWh로 예상된다. 이는 재생에너지 전체 전력비의 15~17% 절감 효과를 보이며, 그린수소 목표 가격 달성에 긍정적으로 작용할 전망이다. 수전해 효율 측면에서는 전해조 기술 개발 및 효율 향상, 시스템 집적화와 열관리, 전력 전자 기술 고도화가 단가 절감에 필수적임을 확인하였다. 향후 정책적 지원, 인센티브, 재생에너지 인프라 확대, 수전해 장치의 국산화 및 대규모 상용화 등이 병행될 때 2050년 목표 가격에 도달할 수 있으며, 수소경제의 대규모 전환을 견인할 기반이 마련될 것으로 평가한다.

참고문헌

1. Kim, M et al. Techno-economic analysis of anion exchange membrane electrolysis process for green hydrogen production under uncertainty. Energy Convers. Manag. 2024, 302, 118134

2. Lee, K; Lim, D. Establishment and Operation of a Mid- to Long-Term Levelized Cost of Electricity (LCOE) Forecasting System for Expanding Renewable Energy Supply (2/5). Korea Energy Economics Institute Basic Research Report 2021, 21-24.

3. Gupta, M. REC Prices Set To Plummet: A 76% Decline By 2050 Driven By Renewable Energy Growth In Asia Pacific – Report. SolarQuarter 2024.

PA-19

AI 기반 광촉매 수소 생산을 위한 촉매 설계: 기술 경제 및 지역 최적화

변주영, 김정환*
연세대학교 화공생명공학과

광촉매 기반 수소 생산은 태양광을 직접 활용하여 물을 분해함으로써 수소를 생성하는 기술로, 낮은 에너지 투입과 온실가스 배출 저감 측면에서 주목받고 있는 청정 수소 생산 방식이다. 특히 외부 전력 공급 없이 광에너지만으로 반응이 가능하다는 점에서 지속가능성과 기술적 잠재력이 크다[1]. 그러나 현재까지 보고된 대부분의 광촉매 시스템은 수소 발생률이 낮고, 반응 안정성이 떨어져 실용화 단계로 이어지기 어렵다는 한계가 있다 [2]. 아울러 광촉매 조합별 성능을 실험적으로 검증하기 위해서는 많은 시간과 자원이 소요되며, 이러한 실험 기반 접근만으로는 수천 가지 조합을 빠르게 평가하고 최적 설계를 도출하기 어렵다 [3]. 또한, 촉매의 선택과 조합이 수소 생산 효율뿐만 아니라 시스템 전체의 경제성에도 큰 영향을 미치기 때문에, 단순한 성능 비교를 넘어 경제적 타당성을 고려한 통합적 최적화 접근이 필요하다 [4]. 본 연구는 이러한 배경을 바탕으로, 촉매 성능과 수소 균등화 생산비용(LCOH)을 동시에 고려하는 AI 기반 설계 프레임워크를 개발하였으며, 지역별 환경 조건까지 반영하여 실제 적용 가능성이 높은 수소 생산 시스템을 탐색하였다. 총 1,440개의 광촉매 - 공촉매 - 희생제 조합을 대상으로, 실험 데이터를 기반으로 학습된 머신러닝 모델을 통해 수소 발생률을 예측하고, 이를 바탕으로 LCOH를 계산하였다. 또한 다양한 기후 및 자원 조건을 대표하는 지역들을 선정하여, 환경 요인이 시스템 경제성에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 일부 조합은 경쟁력 있는 LCOH를 달성하였으며, 담수 가용성이 수소 생산 비용에 가장 큰 영향을 미치는 변수로 나타났다. 본 연구는 AI 기반 방법론을 통해 현실 적용 가능한 촉매 시스템을 효율적으로 탐색할 수 있는 경로를 제시하며, 지역 맞춤형 광촉매 수소 생산 시스템 설계에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. C. Acar, I. Dincer, G.F. Naterer, Review of photocatalytic water-splitting methods for sustainable hydrogen production, Int. J. Energy Res. 40 (2016) 1449–1473.

2. M. Wang, L. Zhang, M. Huang, Q. Zhang, X. Zhao, Y. He, S. Lin, J. Pan, H. Zhu, One-step synthesis of a hierarchical self-supported WS2 film for efficient electrocatalytic hydrogen evolution, J. Mater. Chem. A 7 (2019) 22405–22411.

3. T. Toyao, Z. Maeno, S. Takakusagi, T. Kamachi, I. Takigawa, K. Shimizu, Machine Learning for Catalysis Informatics: Recent Applications and Prospects, ACS Catal. 10 (2020) 2260–2297.

4. Z. Shams Ghamsari, H. Bashiri, Hydrogen production through photoreforming of methanol by Cu(s)/TiO2 nanocatalyst: Optimization and simulation, Surfaces and Interfaces 21 (2020) 100709.

PA-20

CFD Modeling of Hollow Fiber Membrane Contactors for Oxygen Removal in Ultrapure Water Systems

Ariyan Zare Ghadi, Boram Gu*

School of Chemical Engineering, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Republic of Korea

Ultrapure water production requires the removal of trace amounts of dissolved oxygen [1,2]. Hollow-fiber membrane contactors (HFMCs) offer a compact and efficient solution for achieving this [3,4]. The current study develops a computational fluid dynamics (CFD) model to examine oxygen removal in HFMCs over a range of gas and liquid velocities and for different fiber counts and packing densities. In the simulations, oxygen-bearing water enters the shell side through circular distributors along a central pipe, while nitrogen is supplied to the fiber lumens as sweep gas. Oxygen diffuses across the hydrophobic membrane and is transported within the fiber wall via a user-defined function (UDF) that introduces source terms in the governing equations. The results show that increasing liquid velocity lowers removal efficiency due to reduced residence time, whereas higher sweep-gas velocity enhances removal by increasing the transmembrane driving force. Denser fiber packing and higher fibers further improves performance by enlarging interfacial areas and limiting bypassing.

References

1. Zhang X, Yang Y, Ngo HH, Guo W, Wen H, Wang X, et al. A critical review on challenges and trend of ultrapure water production process. Sci. Total Environ., 785,147254 (2021).
2. Chen H, Lu Z, Cheng Y, Drioli E, Wang Z, Zhang F, et al. Development and emerging application of membrane degassing technology. Adv. Membr., 3, 100076 (2023).
3. Sengupta A, Peterson PA, Miller BD, Schneider J, Fulk CW. Large-scale application of membrane contactors for gas transfer from or to ultrapure water. Sep. Purif. Technol., 14(1), 189 (1998).
4. Tan X, Capar G, Li K. Analysis of dissolved oxygen removal in hollow fibre membrane modules: effect of water vapour, J Memb Sci., 251(1), 111 (2005)

PA-21

Molecular Passivation of Perovskites for Stable and Efficient Solar Cells

Ashique Kotta[1,2], Abdullah[1,2] and Hyung Kee Seo[1,2*]

[1]Future Energy Convergence Core Center, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea, [2]School of Chemical Engineering, Clean Energy Research Center, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea

We report the enhanced performance of triple-cation perovskite solar cells ($Cs_{0.175}FA_{0.750}MA_{0.075}Pb(I_{0.880}Br_{0.120})_3$) through the incorporation of the chemical additive 2-(4-carboxyphenyl)imidazo[4,5-f][1,10]phenanthroline (IPB) as a passivating agent. The additive was synthesized and thoroughly characterized. Pristine perovskite and additive-incorporated films were prepared with varying IPB concentrations (0.25–1.00 mM) and investigated using UV–Vis, PL, NMR, IR, FE-SEM, and XPS to elucidate the interactions between perovskite precursors and the additive. Among the tested concentrations, 0.75 mM IPB provided the most effective passivation, leading to reduced defect density, enlarged grain size with fewer grain boundaries, suppression of non-radiative recombination, and improved charge transport. Devices with the structure ITO/NiOx/Perovskite (pristine or optimized)/PCBM/ZnO/Ag were fabricated, and their photovoltaic performance was evaluated. The optimized device with 0.75 mM IPB achieved a superior power conversion efficiency (PCE) of 20.3%, compared to pristine devices.

PA-22

Organic Additive-Driven Interface Modulation and Crystallization Control for Enhanced and Stable Perovskite Solar Cells

Abdullah[1], Ashique Kotta[1] and Hyung Kee Seo[1*]

[1]Future Energy Convergence Core Center, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea, [2]School of Chemical Engineering, Clean Energy Research Center, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea

Integrating organic molecular additives into methylammonium lead iodide ($CH_3NH_3PbI_3$) has become a promising approach to enhance the performance and stability of perovskite solar cells (PSCs). By incorporating organic molecule additives, the surface structure, defect passivation, and moisture resistance of $CH_3NH_3PbI_3$ can be effectively tailored by influencing its chemical environment and crystallization processes. In this study, we investigate the impact of a molecular additive on the interface, performance, and stability of p-i-n structured PSCs using the HTFCN molecule, which contains multifunctional nitrile (C≡N) and fluorine (F) groups. The additive functional groups (C≡N and F) strongly interact with the perovskite cations (Pb^{2+} and I^-), enhancing perovskite morphology and surface crystallinity. This leads to lower trap densities and increased charge carrier densities. As a result, the optimized devices achieve power conversion efficiency (PCE) of 20.27% compared to the pristine devices (PCE of 16.60%). The optimized devices also exhibited remarkable thermal stability and retained 93% of the initial PCE for 30 days under relative humidity of 35% compared to the control devices.

PA-23

석탄 복합발전 기반 수소·암모니아·메탄올 혼소 공정의 경제성 및 환경성 비교

오정재[1], 임민석[1], 김인혜[1], 조성현[1,2,*]
[1]전북대학교 화학공학부, 반도체·화학공학부, 54896 전북 전주시 덕진구 백제대로 567
[2]전북대학교 청정에너지연구센터, 54896 전북 전주시 덕진구 백제대로 567

Techno-economic and environmental comparison of hydrogen, ammonia, and methanol co-firing in coal-based combined-cycle power plants

Jeongjae Oh[1], Minsuk Im[1], Inhye Kim[1], Sunghyun Cho[1,2,*]
[1]School of Chemical Engineering, School of Semiconductor and Chemical Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Korea
[2]Clean Energy Research Center, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Korea

전력 부문의 탈탄소화 요구가 커지는 가운데에서도 석탄 기반 기저전원의 급격한 대체에는 기술과 비용, 계통 안정성의 제약이 크다. 석탄이 여전히 큰 연료 사용량과 이산화탄소 배출량을 차지하는 현실에서, 석탄 가스화 복합발전의 배출 저감 잠재력을 실제로 확보하려면 저탄소 연료 혼소의 적용성이 경제성과 환경성, 운전 측면을 함께 고려한 틀에서 검증되어야 한다. 그러나 지금까지의 논의는 연료별 부분 지표에 머무르거나 경계 설정이 서로 달라 비교 가능성이 낮았고, 연료 가격 변동과 탄소 가격 변화가 결과에 미치는 영향도 충분히 정리되어 있지 않았다.
본 연구에서는 석탄 가스화 복합발전을 대상으로 수소, 암모니아, 메탄올의 단독 또는 혼합 조합과 여러 단계의 혼소 비율을 아우르는 시나리오를 구성하고, 통일된 분석 경계에서 발전 단가, 생애주기 온실가스 배출, 질소산화물과 황산화물 등 대기오염물질 배출, 물 사용량을 정량 비교한다. 더불어 연료 가격, 탄소 가격, 설비 이용률, 설비 개조 범위와 같은 핵심 변수를 민감도 분석으로 검토하여, 목표 혼소 비율과 연료 선택에 필요한 경제와 환경의 교환 관계와 임계 조건을 도출한다. 본 연구를 통해 시나리오 설계와 초기 비교 결과를 제공하고 석탄 가스화 복합발전의 실용적 저탄소화 경로를 설정하는 데 기초 자료를 제공하고자 한다

PA-24

La-Fe계 산소전달입자 매체순환-산화탈수소화용 촉매 연구

조수민, 이연지, 조민규, 백승훈, 김향동, 신지현, 손정민*
전북대학교 자원·에너지공학과

A Study on La-Fe based Oxygen Carrier for Chemical Looping Dry Reforming of Methane

Sumin Cho, YeonJi Lee, Min-Gyu Jo, Seung Hun Baek, Hyang-Dong Kim, Jihyeon Shin, Jung Min Sohn*
Department of Mineral Resources & Energy Engineering, Jeonbuk National University

탄소중립 달성을 위한 다양한 탄소포집, 활용 및 저장 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 수소는 연소 중 탄소 배출이 없어, 화석연료를 대체할 수 있는 청정연료로 각광 받고 있다. 이산화탄소를 활용하여 수소를 생산하는 대표적인 반응인 메탄건식개질 반응은 이론상 H_2/CO가 1:1로 생산되는 특징을 가지고 있다. 메탄올(H_2/CO = 2) 등 액상 유기 수소운반체 생산을 위해 수소를 추가 주입해야한다. 매체순환공정과 메탄건식개질반응이 결합된 매체순환-메탄건식개질 공정은 산화반응기와 환원 반응기로 분리된 공정이다. 공정이 분리됨에 따라 산화반응기에서는 일산화탄소와 환원반응기에서 수소를 분리하여 생산할 수 있어, 원하는 H_2/CO 를 조절할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 매체순환 건식개질에 적용가능한 La-Fe 계열 산소전달입자를 합성하여 사용하였다. 제조한 촉매는 다양한 분석 통하여 성능을 평가하였으며, 새로운 산소전달입자 후보로써 제시하였다.

PA-25

코발트 도핑 FeNi/니켈폼 전극의 알칼리 수전해 특성 연구

송채희[1], Lan Nguyen[1], Kannan Krishnan[1], Mohan Kumar[1], 목영선[1*]

[1]제주대학교 화학공학과

*교신저자: smokie@jejunu.ac.kr

화석 연료 사용으로 인한 이산화탄소 배출 증가와 기후 변화 문제에 대응하기 위해 청정 에너지원인 그린 수소에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 알칼리 수전해는 그린 수소를 생산할 수 있는 효율적인 방법으로 주목받고 있으며, 이에 적합한 고성능 전극 개발이 필수적이다.
본 연구에서는 FeNi 합금을 기반으로 코발트를 1-4% 범위에서 도핑한 니켈폼 전극(FeNi-Co/NF)을 수열합성법과 열처리를 통해 제조하였다. FeNi 합금은 본래 높은 촉매 활성을 가지고 있으나, 코발트 도핑을 통해 전자 구조를 조절하고 활성점을 증가시켜 수소 발생 반응(HER) 및 산소 발생 반응(OER)의 효율을 향상시켰다.
전기화학적 분석 결과, 코발트 도핑 농도에 따라 과전압이 감소하고 전류밀도 및 장기 안정성이 향상되었다. 본 연구 결과는 FeNi-Co/NF 전극이 고효율 알칼리 수전해를 위한 유망한 촉매임을 시사한다.

PA-26

Porous Metal Oxide-Functionalized Silica Adsorbents with High Palletisation Feasibility for Industrial Removal of Residual Ammonia

May Zaw Win, Ji Hye Park[1], Wathone Oo, Thu Zar San and Kwang Bok Yi[1*]

Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Republic of Korea

[1]Department of Chemical Engineering Education, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Republic of Korea

Efficient removal of residual ammonia (NH_3) from hydrogen (H_2) fuel streams produced via NH_3 cracking is essential for fuel cell applications. This study reports the development of high-affinity, regenerable adsorbents in both powder and pellet forms, based on transition metal oxide-functionalized mesoporous silica. Functionalized silica was synthesized via a modified Stober sol-gel method, employing various metal chloride salts (Cu, Fe, Mn, Zr). Cetrimonium chloride (CTAC) served as a morphology-directing agent, while triethanolamine facilitated metal coordination. A novel template removal strategy was introduced, combining low-temperature oxidative calcination (~ 350 °C) with ethanolic reflux treatment. This approach significantly increased surface area (by ~ 100 m^2/g) and enriched surface functionalities through redox interactions between ethanol and metal oxides. Manganese oxide-functionalized silica powder outperformed other metal-functionalized variants, exhibiting the highest NH_3 adsorption capacity (~2 mmol/g) for 1000 ppm NH_3 under vacuum-temperature swing adsorption (VTSA) at a mild regeneration temperature of 80 °C. This enhanced performance was attributed to a high density of oxygen vacancies created by well-dispersed Mn^{2+} species, which were structured nanoscale particles (25-35 nm). The optimized Mn-SiO_2 adsorbent was successfully scaled up to 250 g/batch and pelletized via extrusion using boehmite as a binder, polyacrylic acid as a porogen, and nitric acid as a plasticizer. The resulting pellets maintained a comparable NH_3 uptake (~1.5 mmol/g) after impregnation with 5 wt% $CaCl_2$, confirming performance parity with the powder form. This work establishes a scalable, efficient strategy for fabricating transitional metal oxide-silica composite as high-performance adsorbents for trace NH_3 removal in hydrogen energy systems.

PA-27

N-도핑된 탄소 코팅층을 적용한 다공성 이종 금속 산화물 복합 마이크로스피어의 설계 및 리튬 이차전지의 음극소재로의 활용

백지훈[1], 조중상[1*]
[1]충북대학교 공업화학과

본 연구에서는 리튬이온전지의 고성능 음극소재를 구현하기 위해, 이종 금속 산화물로 구성된 다공성 복합 마이크로스피어에 균일한 N-도핑 탄소 코팅을 적용한 설계 전략을 도입하였다. 본 구조체는 MOF 전구체, 금속 전구체 염, 폴리비닐피롤리돈(PVP), 폴리스티렌(PS) 나노비드를 포함한 용액을 스프레이 열분해(spray pyrolysis) 공정을 통해 제조하였으며, 이후 폴리도파민(PDA) 코팅과 탄화 과정을 거쳐 합성하였다. 제조된 마이크로스피어는 균일하게 분산된 초미세 금속 산화물 나노입자로 구성된 연속적인 메조다공성 구조를 가지며, PS 나노비드의 열분해를 통해 형성된 다량의 상호연결 기공과 MOF 유래의 유기 골격은 입자 응집을 효과적으로 억제한다. 또한 PDA로부터 유래된 균일한 N-도핑 탄소층은 전기전도도와 기계적 안정성을 향상시켜, 충·방전 과정에서 금속 산화물의 부피 팽창을 완화하고 전하 전달을 촉진한다. 최적화된 N-도핑 탄소 코팅층을 가진 복합 마이크로스피어는 높은 가역용량, 우수한 율속 특성, 장기적인 사이클 안정성을 나타냈으며, 특히 5.0 A g^{-1}의 전류밀도에서 300사이클 후에도 397 mA h g^{-1}의 용량을 유지하여 86%의 용량 유지율을 보였다. 또한 10.0 A g^{-1}의 높은 전류밀도에서도 184 mA h g^{-1}의 방전 용량을 달성하였다.

PA-28

금속-유기 골격체 유래 주석 기반 다중 음이온 화합물/질소 도핑 탄소 복합 나노섬유 합성 및 리튬 이차전지 음극 소재로의 적용

염혜원, 조중상*
충북대학교 공업화학과

리튬은 가장 낮은 표준 환원 전위(-3.04 V *vs.* SHE)와 작은 이온 반경 (0.76 Å), 낮은 원자량 등의 특성으로 인해 고에너지 밀도 및 고속 충·방전 특성을 갖는 에너지 저장 장치 구현에 유리하다. 따라서 리튬은 고성능 전자기기부터 대규모 전력망 저장 시스템, 전기차용 전지(LIB) 등 다양한 에너지 저장 분야에서 핵심 소재로 활용되고 있다. 그러나 고용량, 고출력, 및 장수명 특성을 요구하는 전지의 수요가 지속적으로 증가함에 따라, 차세대 전극 소재 발굴 및 개발, 그리고 제조 공정 효율성 증대를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 고성능 차세대 음극 소재로서, 금속-유기 골격체(metal-organic frameworks, MOFs)의 높은 비표면적과 기공 특성과 Kirkendall 확산 메커니즘을 결합한 주석 기반 다중 음이온 화합물/질소 도핑 탄소 복합 나노섬유를 개발하고, 이들의 리튬 저장 특성을 평가하였다. 주석 기반 다중 음이온 화합물은 리튬 이온과의 전환 및 합금화 반응을 통해 높은 용량을 제공하며, 상이한 음이온을 포함한 화합물의 헤테로 계면이 빠른 이온 확산을 촉진한다. 또한, 1차원 나노섬유 구조는 큰 종횡비를 통해 소재 간 접촉면적을 증가시키며, 전하 이동이 용이한 전도성 네트워크를 형성한다. 섬유를 구성하는 질소 도핑된 탄소 매트릭스는 효율적인 전자 이동 경로를 제공하여 소재 전반의 전기전도도를 향상시키고, Kirkendall 확산 메커니즘이 적용된 MOF 기반 다공 및 중공형 나노구조는 전해질의 침투 및 리튬 이온의 빠른 이동을 촉진시켜 전지의 고속 충방전 성능을 향상시킨다. 그 결과, 합성된 소재는 1.0 A/g의 전류 밀도에서 500 사이클 후 601 mAh/g의 방전용량 및 93.8 %의 용량 유지율을 달성하였고, 10 A/g의 높은 전류 밀도에서도 247 mAh/g의 우수한 출력 특성을 나타내었다.

PA-29

극저온 조건에서 고망간강의 인장 거동 분석

하정홍*
한국생산기술연구원 스마트정형공정그룹

Tensile Behavior Analysis of High-Manganese Steel at Cryogenic Temperatures

Jeonghong Ha*
Smart Forming Process Group, Korea Institue of Industrial Technology (KITECH)

극저온 환경에서 운용되는 구조재료는 LNG 저장탱크, 극지 항만 구조물, 우주 탐사용 장치 등 다양한 분야에서 활용되며, 이때 재료는 극한 조건에서도 충분한 강도와 인성을 동시에 확보해야 한다. 고망간강(high-Mn steel)은 면심입방격자(FCC) 구조를 가지며, 기지 조직 내에서 상변태(transformation)와 쌍정 변형(twinning) 메커니즘이 활성화되어, 영하 250°C(약 20 K) 이하의 극저온에서도 우수한 인성 및 파괴 저항성을 발휘한다. 특히 이러한 특성은 기존 니켈강이나 오스테나이트계 스테인리스강 대비 가격 경쟁력과 성능 안정성 측면에서 장점이 있다. 본 연구에서는 15 K의 극저온 조건에서 변형률 속도를 변화시키며 고망간강 인장시험을 수행하였다. 변형 거동 분석을 위해 디지털 이미지 상관(Digital Image Correlation, DIC) 기법을 적용하여 serration 현상을 시험 중 실시간으로 추적·정량화하였다. 이를 통해 각 변형률 속도 조건에서의 serration 발생 초기 위치, 변형 집중(localized strain) 영역의 전파 양상, 그리고 응력-변형률 곡선 상의 불연속 패턴을 비교·분석하였다. 시험 중 획득한 DIC 전단 변형률 분포 영상은, 변형이 국부적으로 집중되는 시점과 해당 영역이 확산되는 과정을 시각적으로 제시하여 serration의 발달 메커니즘을 명확히 규명하는 근거를 제공하였다. 추가로, 인장시험 후 파단면 및 변형 영역에 대한 미세조직 관찰을 주사전자현미경(SEM)과 전자후방산란회절(EBSD) 장비로 수행하였다. SEM 분석에서는 파단면의 연성-취성 혼합 파괴 양상을, EBSD 분석에서는 변형 집적 영역에서의 결정방위분포(Orientation Distribution Function)와 결정립 변형 정도(Kernel Average Misorientation)를 확인하였다. 이를 통해 변형률 속도에 따른 미세조직 변화와 serration 거동 간의 상관관계를 정립하였다. 이러한 결과는 극저온 환경에서 고망간강의 변형 메커니즘을 이해하고, 변형률 속도 민감성(strain rate sensitivity)을 기반으로 한 재료 설계 및 가공 조건 최적화에 기여할 수 있다.

참고문헌

1. Allain, S., et al., “Correlations between the calculated stacking fault energy and the plasticity mechanisms in Fe–Mn–C alloys,” Mater. Sci. Eng. A, 387–389, 158–162 (2004).

2. Lee, S. J., et al., “Cryogenic tensile behavior of high-manganese austenitic steels,” Scr. Mater., 101, 20–23 (2015).

3. Kim, H. S., et al., “Influence of strain rate on mechanical properties and deformation behavior of high-Mn steels at cryogenic temperatures,” Mater. Charact., 144, 457–467 (2018).

PA-30

제조 공정에 따른 316L 스테인리스강의 미세조직 특성과 수소취성 저항성 비교 분석

하정홍*
한국생산기술연구원 스마트정형공정그룹

Comparative Analysis of Microstructural Characteristics and Hydrogen Embrittlement Resistance of SUS 316L Stainless Steel Fabricated by Different Manufacturing Processes

Jeonghong Ha*
Smart Forming Process Group, Korea Institue of Industrial Technology (KITECH)

수소취성(Hydrogen Embrittlement, HE)은 금속 재료가 수소 환경에 노출될 때 연성과 인성이 급격히 저하되는 현상으로, 수소 저장·운송용 구조재의 안전성과 신뢰성을 위협하는 주요 문제이다. 특히 오스테나이트계 스테인리스강은 우수한 내식성과 인성을 바탕으로 다양한 극한 환경에서 사용되지만, 제조 공정에 따라 미세조직 및 상 구성에 차이가 발생하며, 이는 수소취성 거동에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 서로 다른 제조 공정을 통해 제작된 SUS 316L 시편의 미세조직 차이와 수소취성 저항성을 체계적으로 비교하였다. 시험편은 Powder Bed Fusion (PBF), Directed Energy Deposition (DED), 그리고 상용 압연(As-Rolled, AR) 방식으로 제조하였다. 각 시편에 대해 수소가 없는 조건(uncharged)과 in-situ 전해 수소 장입 조건에서 저속 변형 속도 인장시험(Slow Strain Rate Test, SSRT)을 수행하였다. 수소취성 저항성은 수소취성 지수(Hydrogen Embrittlement Index, HEI)를 산정하여 정량화하였으며, 연신율 감소 및 단면 수축률 감소 정도를 비교 분석하였다. SEM 관찰 결과, PBF 시편은 적층 제조 특유의 세립화된 균질 미세조직을 유지하며, 수소 환경에서도 오스테나이트 상이 안정적으로 보존되어 낮은 HEI와 높은 연신율을 나타냈다. DED 시편은 주상정 성장과 용융풀 경계부의 미세 편석이 관찰되었으며, 수소 환경에서 표면 균열이 국부적으로 형성되었으나 상변태는 발생하지 않았다. 반면, AR 시편에서는 가공 변형에 의한 잔류 응력과 더불어 α'-마르텐사이트(α'-martensite) 상변태가 발생하여 연성 저하와 HEI 상승이 뚜렷하게 확인되었다. 이러한 결과는 제조 공정이 미세조직 안정성과 수소취성 저항성에 미치는 영향을 명확히 보여주며, 특히 PBF와 같은 적층 제조 공정이 수소취성에 대한 저항성을 향상시킬 수 있는 효과적인 접근임을 제시한다. 본 연구는 수소 에너지 인프라용 구조재 설계 및 제조 공정 최적화에 있어 중요한 기초 자료를 제공한다.

참고문헌

1. Oriani, R. A., “Hydrogen embrittlement of steels,” Annu. Rev. Mater. Sci., 8, 327–357 (1978).

2. Park, J. M., et al., “Effect of microstructure on hydrogen embrittlement of austenitic stainless steels fabricated by additive manufacturing,” Addit. Manuf., 36, 101569 (2020).

3. Han, G., et al., “Hydrogen embrittlement behavior of 316L stainless steel produced by powder bed fusion,” Mater. Sci. Eng. A, 788, 139627 (2020).

4. Mirzadeh, H. and Najafizadeh, A., “Correlation between processing and martensite in AISI 301,” Mater. Charact., 59, 1650–1654 (2008).

PA-31

스테인리스강 Laser-Arc Hybrid Welding(LAHW) 용접부의 초저온 충격 인성 평가

박재한[1], 박정열[1], 지창욱[#1]

Low cryogenic Impact Toughness Evaluation of Stainless Steel Welds Fabricated by Laser-Arc Hybrid Welding (LAHW)

J. H. Park[1], J. Y. Park[1], C. W. Ji[#1]

한국생산기술연구원 울산기술실용화본부 스마트정형공정그룹[1]

Key Words: Austenitic Stainless Steel, 304L, 316L, Laser-Arc Hybrid Welding, Low cryogenic, Impact Toughness, Liquid Hydrogen Tank

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)의 온실가스 저감 정책에 따라 해양 산업에서는 화석연료 기반 추진 시스템을 대체할 수 있는 친환경 연료 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 그 중 액화수소(LH_2)는 연소 시 이산화탄소 대신 물만 배출하고, 암모니아 대비 NOx 발생이 극히 적어 환경 규제 대응이 유리하다. 또한 무게당 에너지 밀도(120 MJ/kg)가 높고 연료전지 직접 활용이 가능하여 시스템 효율 측면에서도 경쟁력이 크다. 그러나 액화수소는 20 K 이하의 초저온 상태에서 저장되어야 하므로, 저장 시스템 재료는 극저온 환경에서 기계적 안정성과 신뢰성을 확보해야 한다. 특히 용접부 건전성 확보가 핵심이며, 현재 널리 사용되는 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding) 및 FCAW(Flux Core Arc Welding) 공정은 다층 용접이 불가피해 생산성에 한계가 있다. 또한 NIST 2230 및 NIST 2196 보고서에 따르면, J-integral을 통해 20 K 충격시험을 완전히 대체하는 데는 한계가 있음이 제시되었다. 본 연구에서는 대표적인 초저온용 재료인 오스테나이트계 스테인리스강 304L과 316L을 대상으로 Laser-Arc Hybrid Welding(LAHW) 공정을 적용하여 One-pass 용접부를 제작하였다. 용접 조건은 소재 간 동일한 입열량으로 설정하였으며, 용가재는 AWS D1.6 규격을 참고하여 선정하였다. 제작된 용접부는 미세조직 분석을 통해 소재 간 차이를 평가하였고, 상온·77 K·20 K에서 충격시험을 수행하여 충격 인성을 검증하였다. 추가적으로 EBSD를 활용해 초저온에서의 변형 메커니즘과 조직학적 특성을 심층 분석하였다.

후기

이 논문(또는 저서, 특허)은(는) 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 과학기술사업화진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임('학연협력플랫폼구축 시범사업' RS-2023-00304763).

발표자, 교신저자[#](cwji@kitech.re.kr)

PA-32

Small Data-Driven Machine Learning for Catalyst Screening toward Selective Hydrogenation of Furfural

Ye Eun Kim[1], Hyeonjun Choi[2], Yong-Hee Lee[1,2], Junghwan Kim[2] and Man Sig Lee[2*]

[1]Low Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Republic of Korea

[2]Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University, Republic of Korea

Furfural (FF), a versatile biomass-derived platform molecule, undergoes hydrogenation to yield valuable products such as furfuryl alcohol (FAL) and tetrahydrofurfuryl alcohol (THFAL). FA serves as a key intermediate for resins, solvents and fine chemicals, while THFAL is a promising green solvent with industrial relevance. Although furfural hydrogenation is highly active under mild conditions, controlling product selectivity remains a critical challenge. Most catalyst design studies have focused on maximizing overall conversion. In this work, we apply a machine learning approach to accelerate the discovery of catalysts that selectively produce FAL or THFAL in batch-type furfural hydrogenation. A dataset comprising 801 entries was extracted from 42 published papers performed in batch reactor. This dataset was composed of four groups; preparation method for catalyst, catalyst post-treatment, catalyst characterization, and activity conditions. Machine learning models employed were CatBoost and XGBoost. We found that key contributing features for THFAL yield from the datasets. In addition, we propose the predicted superior catalyst composition to produce THFAL.

References

1. Roh, J., Park, H., Kwon, H., Joo, C., Moon, I., Cho, H., Ro, I., and Kim, J., “Interpretable machine learning framework for catalyst performance prediction and validation with dry reforming of methane”, *Appl. Catal. B Environ*., **343**, 123454 (2024).

PA-33

머신 러닝 기반 공정 데이터 보간을 통한 실시간 제품 조성 예측 모델 개발

권혁원[1], 조형태[2], 이재원[3,*], 백재호[1,*]
한국생산기술연구원[1], 경희대학교[2], 한양대학교[3]

Real-Time Prediction of Product Composition using Machine Learning and Interpolation of Process Data

Hyukwon Kwon[1], Hyungtae Cho[2], Jaewon Lee[3], JaeHo Beak[1,*]
Korea Institute of Industrial Technology[1], Kyunghee University[2], Hanyang University(ERICA)[3]

화학 공정에서 제품 조성의 정확한 측정은 품질 확보 및 효율적인 공정 운전에 핵심적인 요소이다. 그러나 제품의 조성을 측정하기 위한 하드 센서는 장치의 유지 및 보수가 어려워 실시간 측정에 활용하지 못하는 한계가 있다. 본 연구에서는 공정에서 수집된 데이터 및 머신 러닝 기법을 활용하여 제품 조성 예측 모델을 개발하였다. 공정에서 수집된 데이터는 실시간으로 측정된 공정 운전 데이터와 일정한 주기마다 제품 샘플을 채취하여 조성을 측정한 샘플링 데이터가 있다. 이로 인해 예측된 제품 조성들 간 시간 간격이 매우 길어, 정확하게 조성을 예측하더라도 실시간 공정 제어에 활용하기에 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해, 샘플링 데이터의 보간 알고리즘을 활용하여 연속적으로 조성을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 활용하여 제품의 조성을 예측하였으며, 이후, 예측 값을 기반으로 공정 변수와 연계하여 최적의 제어 조건을 도출하였다.

Keywords: Naphtha splitter, Machine learning, model, Data interpolation

PA-34

효율적인 화학적 순환 메탄 건식 개질을 위한 MgO 생성 제어 및 환원성 향상

Jong Hwi Park[1], Sung Wan Kwon[1], Ji Hoon Kim[1], Ryun Na Kim[1], Da Hin Kim[2], Whi Dong Kim[1*]

[1]Korea Institute of Industrial Technology(KITECH), Cheonan 31056, Republic of Korea

[2]University of Seoul 163 Seoulsiripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul 02504 Korea

메탄 건식 개질(DRM)은 CH_4와 CO_2를 합성가스로 전환하는 핵심 기술입니다. 기존의 고체 촉매 공정의 대안으로, 본 연구에서는 용융금속 내에서 금속-산화물 산화환원 쌍을 이용하는 화학적 순환(chemical looping) 기반의 DRM 공정을 제안합니다. CO_2에 대한 반응성이 뛰어난 Mg와 같은 활성 금속은 높은 전환 효율을 보장하지만, 동시에 열역학적으로 매우 안정한 산화물(MgO)을 형성하여 메탄과의 후속 환원 단계에 큰 어려움을 야기하는 상충 관계를 가집니다. 따라서, 안정한 산화물의 환원 단계가 전체 순환 공정의 속도 결정 단계가 되며, 본 연구는 이 한계를 극복하는 데 초점을 맞춥니다.

본 연구는 MgO의 환원 반응성이 그것의 '생성 이력(formation history)'에 의해 결정된다는 가설에서 출발합니다. 이를 규명하기 위해, CO_2와의 반응 온도를 제어하여 물리화학적 특성이 상이한 MgO를 체계적으로 합성하였습니다. 이후, 생성된 MgO의 형상 및 표면 특성과 메탄에 대한 환원 반응성 간의 상관관계를 분석했습니다.

실험 결과, 상대적으로 낮은 온도에서 생성된 MgO가 높은 비표면적과 특정 결정면을 가짐으로써 현저히 향상된 환원 성능을 보임을 규명했습니다. 이는 산화 단계의 공정 변수 제어를 통해 환원 단계의 속도론적 성능을 극대화할 수 있음을 시사합니다. 본 연구는 금속 산화물의 생성 이력 제어가 전체 화학적 순환 공정의 효율을 결정하는 핵심 설계 인자임을 제시하며, 이를 통해 고효율 DRM 공정 개발의 새로운 전략을 제공합니다.

PA-35

pH-Dependent Synthesis of Ru/Al_2O_3 Catalysts for Toluene Hydrogenation

Seonju Park[1], Ye Eun Kim[1] and Man Sig Lee[1,2*]

[1]Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Republic of Korea

[2]Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

Abstract. Liquid organic hydrogen carrier (LOHC) technology offers a sustainable approach for liquid-phase hydrogen storage. Among various potential carriers, toluene is widely regarded as a promising candidate due to its favorable physicochemical properties, high hydrogen capacity, and cost-effectiveness. Ruthenium-based catalysts, known for their high activity in aromatic ring hydrogenation, are considered especially suitable for toluene hydrogenation. Herein, we investigated the effect of pH (3.5 to 10.5) during synthesis on the performance of ruthenium alumina (Ru/Al_2O_3) catalysts prepared via an impregnation–chemical reduction method. Ruthenium(III) nitrosyl nitrate ($Ru(NO)(NO_3)_3$) was employed in this study. The properties of the synthesized Ru/Al_2O_3 catalysts were characterized by N_2 adsorption-desorption isotherms, temperature programmed desorption and X-ray diffraction. By modulating the pH, the adsorption behavior of Ru ions could be controlled, which in turn was found to significantly influence the subsequent toluene hydrogenation reaction.

PA-36

알카라인 수전해의 부하변동 제어를 위한 온도와 압력에 따른 시스템 운전 영향성 평가

양아윤[1,2], 이용운[1*]
한국생산기술연구원 지속가능기술연구소[1], 건국대학교 화학공학부[2]

Evaluation of the Effects of Temperature and Pressure on System Operation for Load Variation Control in Alkaline Water Electrolysis

Ahyun Yang[1,2], Yongwoon Lee[1*]
Korea Institute of Industrial Technology[1]
Konkuk University[2]

그린 수소는 신재생에너지원과 연계하여 수소를 생산하는 기술로써 신재생에너지원의 간헐성 극복을 위해 수소 생산 시스템의 안정적인 부하 변동 운전 기술이 필요하다. 수소 생산 시스템 중 알카라인 수전해(AWE)는 작동 온도와 압력의 변화를 통해 1차 부하 변동 제어가 가능하며 두 변수의 제어에 따른 수소 생산량 및 부하 변동 대응 영향성 평가와 관련된 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 압력과 온도의 변화에 따른 알카라인 수전해 시스템의 운전과 상관관계 조사했으며 10-90%의 부하변동 조건에서 수소 생산 특성 및 시스템 운영 특성을 분석했다. 부하별 수소 생산량을 동일하게 유지한 후 1차로 압력 조절을 통해 부하 대응을 위한 영향을 분석하였다. 2차로 온도 제어 조건을 고려하여 해석을 수행하여 압력과 온도를 동시 제어해서 부하 변동 가능 범위를 모색하였다.

알카라인 수전해 시스템은 스택(Stack), 열교환기(Heat exchanger), 기수분리기(Separator), 냉각기(Cooler), 응축기(Gas condenser), 펌프(pump) 등으로 구성된다. 본 연구에서 알카라인 수전해의 모델링은 수치해석과 공정해석을 동시에 수행하였다. 수전해 시스템의 해석은 정상상태 조건으로 수행되었다. 수전해 시스템의 스택은 C++ 기반의 전기화학 모델을 통해 셀 전압, 패러데이 효율, 수소/산소 생산량, 물 소비량을 계산하였다. BOP 해석은 상용 해석 Tool인 Aspen+를 통해 공정해석을 수행하였다. 공정해석은 각각의 BOP 시스템의 Heat & Mass balance를 기반으로 물질의 온도, 압력과 전력 소모량을 계산했다. 스택의 성능은 부하 조건(10% - 90%)에서 온도 범위(60 - 85°C)와 압력 범위(1 - 30 bar)에 따라 전지 전압, 전류 밀도, 패러데이 효율, 수소 생산량을 지표로 평가하였다. 연구 결과, 압력이 낮아지고 온도가 높아질수록 전류 밀도와 수소 생산량이 모두 향상되었다. 저부하 조건에서는 수소 생산량이 압력과 온도 변화에 더 민감하게 반응했으나, 고부하 조건에서는 이러한 민감도가 감소하였다. 또한 스택 성능에는 압력 제어보다 온도 제어가 더 큰 영향을 미쳤다. 한편, BOP 시스템의 전력 소모는 10% 부하에서 스택 입력 전력의 23%를 차지했으며, 90% 부하에서는 9.2%로 감소하였다.

결론적으로 본 연구에서는 알카라인 수전해 시스템의 운전 제어는 변동성이 빠른 압력을 1차 제어하고 변동성이 비교적 느린 온도를 2차로 제어하기 위한 목적으로 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 도출된 부하 조건 별 온도와 압력에 따른 알카라인 수전해의 스택 및 BOP의 운전 특성 분석 결과를 기반으로 향후 부하 변동 조건 혹은 스택의 가동 조건과 같이 부하가 변하는 동적 모델의 기초자료로 활용이 가능하다. 부하 변동 조건에서 온도 및 압력의 조절을 통해 수소생산량 및 에너지 사용량의 변화를 최소화 할 수 있는 시스템의 설계 및 운영의 기초 자료로 확장할 수 있다.

PA-37

액상 유기 수소 운반체 수소화 반응에서 활성금속(M= Pt, Pd, Rh, Ru, Ir)에 따른 Al_2O_3기반 촉매의 활성 비교

이용희[1,2], 김정환[2], 이만식[1,3*]
[1]한국생산기술연구원 저탄소에너지그룹, [2]연세대학교 화공생명공학과, [3]부산대학교 탄소중립기후변화학과

Comparative Study of Active Metals (M = Pt, Pd, Rh, Ru, Ir) on Al_2O_3-Based Catalysts for the Hydrogenation of Liquid Organic Hydrogen Carriers

Yong-Hee Lee[1,2], Junghwan Kim[2], Man Sig Lee[1,3*]
[1]Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Republic of Korea
[2]Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University
[3]Major of PNU-KITECH Hydrogen and Next Energy Convergence, Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University

액상 유기 수소 운반체(Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC)는 대규모 수소 저장·운송을 위한 유망한 기술로, 특히 톨루엔은 높은 수소 저장 용량(6.1 wt%), 상온·대기압에서의 액상 상태 유지, 기존 인프라 활용 가능성, 우수한 가역성으로 상용화 가능성이 가장 높은 액상 유기 운반체로 평가된다. 액상 유기 수소 운반체의 수소화 반응은 수소저장 및 운송에 있어 에너지 효율과 경제성을 결정짓는 핵심 단계이며, 촉매의 활성, 선택성, 내구성은 공정 성능에 직접적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 Al_2O_3 지지체를 기반으로 활성금속(Pt, Pd, Rh, Ru, Ir)을 습식 함침법으로 담지하여 촉매를 제조하였으며, BET, XRD, H_2 -TPR, TPD분석을 통해 촉매의 물리·화학적 특성을 규명하였다. 다양한 반응조건(100 ~ 150 °C, 20 ~ 30 bar H_2)에서 수행한 톨루엔 수소화 반응에서 Pt/Al_2O_3 촉매가 가장 높은 전환율과 선택도를 나타내었으며, 이는 Pt의 우수한 H_2 해리 능력과 톨루엔 π-결합과의 강한 상호작용에 기인한 결과로 판단된다. 본 연구는 톨루엔 기반 LOHC 시스템에서 Pt 촉매의 우수성을 입증하였으며, 향후 고효율 액상 유기 수소 운반체 개발에 기여할 것으로 기대된다.

사사

This study has been conducted with the support of the Korea Institute of Industrial Technology as “Hydrogen industry core technology development and customized technology support (KITECH UR-25-0065)”. Also, This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) grant funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT, Korea) (RS-2023-00304763).

PA-38

Effect of solvent on the coating uniformity and catalytic performance of egg-shell Pd@Al_2O_3 catalysts for selective hydrogenation

Phuong Nam Nguyen[1,2], Ye Eun Kim[1], Inkyu Lee[2] and Man Sig Lee[1,3*]

[1]Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Republic of Korea

[2]School of Chemical Engineering, Pusan National University, Republic of Korea

[3]Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

Keywords: egg-shell catalysts, toluene hydrogenation, hydrophobic solvents, alumina pellet.

Abstract. Egg-shell catalysts, where active components are selectively deposited onto the exterior of a support pellet, are particularly effective for reactions limited by mass transfer or those operating at high space velocities. In this study, egg-shell catalysts were prepared by leveraging the immiscibility between a pre-occupied hydrophobic solvent and a hydrophilic aqueous precursor solution [1]. The pores of the γ-alumina pellets were first filled with one of several solvents, such as 1-nonanol; ethylene glycol; propylene glycol; dipropylene glycol; tripropylene glycol; 1,3-butanediol; 1,4-butanediol; 1,5-pentanediol, nonane or cyclohexane. This pre-occupied solvent acts as a barrier to retard the diffusion of the subsequently introduced aqueous palladium precursor solution, while it is proposed that the hydroxyl groups of the alcohol solvents may also serve as transient anchoring points for the palladium precursor at the liquid-liquid interface. Following thermal treatment and reduction, the active metal particles are confined to the outer shell of the pellet. When evaluated in the batch hydrogenation of toluene, the egg-shell catalysts are expected to exhibit higher conversion than catalysts with a uniform metal distribution. This enhanced performance is attributed to the effective utilization of the active components, which are readily accessible on the outer surface, thereby mitigating intra-particle diffusion limitations.

References

1. Jang et al., "Facile Preparation of Egg-Shell-Type Pellet Catalysts Using Immiscibility Between Hydrophobic Solvent and Hydrophilic Solution: Enhancement of Catalytic Activity Due to Position Control of Metallic Nickel Inside Alumina Pellet," *Applied Catalysis A: General*, 530, 211-216 (2017).

PA-39

Effect of reducing agent on the surface properties of Pd/C for benzaldehyde hydrogenation

Anna Hwang[1,2], Ye Eun Kim[1], Jungho Jae[2,3], Man Sig Lee[1,2*]

[1]Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Republic of Korea

[2]Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

[3]School of Chemical Engineering, Pusan National University, Republic of Korea

To improve the activity and selectivity of palladium (Pd) catalysts for hydrogenation, various parameters such as metal type, support, particle size, and metal dispersion can be adjusted. Among them surface properties like particle size and metal dispersion can be controlled by reducing agent. Pd/C catalysts are widely used in fine chemicals and petrochemical processes, but they are often reported to have low selectivity. This work deals with the relation of surface properties and catalytic performance. Pd species were deposited on carbon support via the electrostatic adsorption method and then reduced by four kinds of the liquid-phase reducing agents including formalin, formic acid, L-ascorbic acid, glucose. The mole ratio of reducing agent to Pd was kept constant to determine the effect of the type of reducing agent on the surface properties. The hydrogenation activity and selectivity of catalysts will be evaluated to determine how surface properties affected by the reducing agent types influences catalytic performance.

PA-40

Alkali and Alkaline Earth Metal Promoted Ru/Al_2O_3 Catalysts for Toluene Hydrogenation

Hayoon Park[1,2], Chang-Hoon Jeong[1], Jungho Jae[2] and Man Sig Lee[1,2*]

[1]Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Republic of Korea

[2]Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

In this study, the performance of Ru/Al_2O_3 catalyst was improved for toluene hydrogenation reaction. Catalytic performance is affected by various factors such as the active metal, surface modification of support, and the addition of promoters. Since metals act as active sites in catalytic reactions, controlling their particle size and enhancing their dispersion are important. It has been reported that the addition of alkali and alkaline earth metal dopants can control the size of the active metal and prevent the agglomeration of metal particles. Therefore, the performances of the Ru/Al_2O_3 catalyst were compared by supporting alkali (Na, K, Cs) and alkaline earth metals (Ba, Ca). Prior to catalyst preparation, alumina supports promoted with various alkali and alkaline earth metals were prepared through impregnation method. 1 wt% Ru/Al_2O_3 catalysts were prepared through deposition-precipitation method, and catalytic activity was evaluated through toluene hydrogenation. As a reasult, the catalysts promoted with alkali and alkaline erath metals exhibited enhanced catalytic activity.

References

1. Yeoh-Lim Lee et al., "Effect of alkali and alkaline earth metal on Co/CeO_2 catalyst for the water-gas shift reaction of waste derived synthesis gas," *Applied Catalysis A: General*, **551**, 63-70 (2018)
2. Muhammad Naeem Younis et al., "Alkali and Alkaline Earth Metals (K, Ca, Sr) Promoted Cu/SiO_2 Catalyst for Hydrogenation of Methyl Acetate to Ethanol," *Catalysts*, **13**(2), 450 (2023)

PA-41

Optimization of Low-Temperature Water-Gas Shift Reaction over Cu-Zn-Al Catalysts through Controlled Preparation Parameters

Minsang Jo[1,2], Jungho Jae[2], Hee Soo Kim[1*] and Dong-Ha Lim[1,2*]

[1]Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Republic of Korea

[2]Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

The water–gas shift reaction (WGSR) is recognized as a key process in hydrogen production, as it effectively decreases carbon monoxide concentration while enhancing hydrogen yield. Among the various catalysts investigated, non-noble metal Cu–Zn–Al catalysts have attracted considerable attention in low-temperature WGSR owing to their cost efficiency, structural stability, and excellent catalytic activity. The purpose of this study is to elucidate the influence of preparation parameters on the physicochemical properties and catalytic performance of Cu–Zn–Al catalysts, thereby providing insights into the rational design and optimization of efficient low-temperature WGSR catalysts.

The objective of this study was to improve the low-temperature WGS performance of Cu–Zn–Al catalysts by optimizing synthesis parameters, including precipitation pH, aging time, and precipitation method. The catalysts were prepared via a co-precipitation method, and their physicochemical properties were characterized using BET, XRD, H_2-TPR. Catalytic performance was evaluated in a fixed-bed reactor using simulated synthesis gas derived from the effluent of steam methane reforming (SMR) under a gas hourly space velocity (GHSV) of 10,000 h^{-1}.

The catalysts synthesized under optimized conditions exhibited superior CO conversion compared to other samples, which is attributed to the increased dispersion and uniform particle size of the active copper species. This improvement is considered a result of the effective control over nucleation and growth during the catalyst synthesis process. The findings demonstrate that precise regulation of synthesis parameters, including pH, aging time, and precipitation method, can significantly enhance low-temperature WGS activity, providing valuable guidance for the design of efficient catalysts for high-purity hydrogen production from fossil fuel reforming and their potential industrial application.

References

Shim, J.-O., "An important parameter for synthesis of Al_2O_3 supported Cu-Zn catalysts in low-temperature water-gas shift reaction under practical reaction condition," *Int. J. Hydrogen Energy*, **44**, 14853-14860 (2019).

Acknowledgment

This study has been conducted with the support of the KITECH as "Development of eco-friendly production system technology for total periodic resource cycle (KITECH EO-250002)".

PA-42

Synthesis of Highly Active Low-Iridium OER Catalysts via a Simple Reducing Agent-Assisted Wet alloying Process

Seong Ji Kim[1,2], Jin Ho Lee[2], Oi Lun Li[1], Dong-Ha Lim[1,2,*], Hee Soo Kim[2,*]

[1]Department of Carbon Neutrality and Climate Change, KITECH & Pusan National University

[2]Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology

Clean hydrogen fuel, produced via electrochemical water splitting, has attracted significant attention as a sustainable and environmentally friendly alternative to fossil fuels. Despite the promise of water splitting as a sustainable energy conversion strategy, its overall efficiency is significantly hindered by the sluggish kinetics of the oxygen evolution reaction (OER). This reaction involves a complex four-electron transfer pathway and necessitates a relatively high overpotential. Accordingly, the rational design and development of highly active, durable, and cost-effective OER electrocatalysts are imperative to enhance the efficiency and practical applicability of water-splitting technologies.

In this study, Ir-based ternary alloy electrocatalysts (IrNiCo) were synthesized via a simple wet-chemical reduction method employing $NaBH_4$ as a reducing agent. The incorporation of transition metals Ni and Co enabled precise modulation of the electronic structure of Ir, thereby optimizing the adsorption and desorption kinetics of key intermediates in the oxygen evolution reaction (OER). Consequently, the IrNiCo alloy demonstrated significantly enhanced electrocatalytic performance in 1 M KOH compared to conventional Ir-based catalysts, while simultaneously achieving a substantial reduction in Ir utilization.

The findings of this study demonstrate the effectiveness of a facile synthesis strategy for designing high-performance and cost-efficient OER electrocatalysts, offering a promising alternative to conventional commercial IrO_2-based catalysts. This approach not only enables a substantial reduction in noble metal usage but also establishes a foundation for the development of economically viable and technologically advanced water-splitting systems, thereby broadening the prospects for sustainable hydrogen production.

Reference

1. Jianrui Fan Lv, "Iridium-Based Multimetallic porous Hollow Nanocrystals for Efficient Overall-Water-Splitting Catalysis ", *Adv. Mater.*, **29**, 1703798 (2017).

Acknowledgment

This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes(COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT). (RS-2023-00304763)

PA-43

저온 암모니아 분해 성능 향상을 위한 비귀금속 CeO_2-CoFe 층상 이중산화물 촉매 개발 및 특성 연구

이수언, Thien An Le, 김영민, 이유진, 김정랑, 김태완, 정광은, 채호정*
한국화학연구원

기후 위기의 심각성과 탈탄소화 필요성에 대한 인식이 높아짐에 따라, 재생에너지를 활용해 생산되는 그린 수소는 화석연료를 대체할 수 있는 유망한 무탄소에너지원으로 인식되고 있다[1]. 그러나 재생에너지 생산의 지역편중 및 간헐성 문제를 해결하는 관점에서, 수소를 재생에너지 저장 및 운송 매개체로 활용하는 것은 안전성과 비용 효율성의 한계로 제약을 받는다. 이에 비해 암모니아는 높은 수소 함량과 구축된 인프라를 바탕으로 유력한 무탄소 수소 운반체로 주목받고 있다[2]. 이때 암모니아 분해는 저장된 수소를 추출하기 위해 필수적이나, 이에 대한 상용화된 기술은 아직 확보되지 않았다. 따라서, 그린 수소 에너지로의 전환을 위해서는 저온에서 높은 효율을 구현할 수 있는 경제적인 암모니아 촉매의 개발이 요구된다. 본 연구에서는 비귀금속 기반 암모니아 분해 촉매로써 세륨이 도입된 CoFe 층상 이중수산화물을 전구체로 합성하고 열처리를 통해 세륨 산화물(CeO_2)이 결합된 CoFe 층상 이중산화물을 합성하였다[3]. Ce 도입 조절을 통해 CeO_2-CoFe 층상 이중산화물의 구조적, 전자적, 표면 특성 등 촉매 특성에 미치는 영향을 규명하고 저온에서의 암모니아 분해 촉매 성능을 개선하였다. 이를 통해 암모니아를 수소 운반체로 활용하기 위해 온화한 조건에서 높은 성능을 구현할 수 있는 저비용 비귀금속 기반 촉매 개발 가능성을 모색하였다.

References

1. White, C.M., Steeper, R.R., and Lutz, A.E., “The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review”, *Int. J. Hydrog. Energy.*, **31**, 1292–1305 (2006).

2. Ishimoto, Y., Voldsund, M., Nekså, P., Roussanaly, S., Berstad, D., and Gardarsdottir, S.O., “Large-scale production and transport of hydrogen from Norway to Europe and Japan: Value chain analysis and comparison of liquid hydrogen and ammonia as energy carriers”, *Int. J. Hydrog. Energy.*, **45**, 32865–32883, 2020.

3. Lee, S.-U., Le T. A., Kim, Y., Lee, Y.-J., Kim, J.-R., Kim,T.-W., Jeong, K.-E., and Chae, H.-J., “CeO_2-conjugated CoFe layered double oxides as efficient non-noble metal catalysts for NH_3-decomposition enabling carbon-free hydrogen production", *Chem. Eng. J.*, **500**, 156986 (2024).

PA-44

암모니아 분해 Scale-Up을 위한 비귀금속계 성형 촉매 개발

심기동[1], 권성민[1,2], 김영민[1], 임영환[1*], 채호정[1*]
[1]한국화학연구원 수소C1가스연구센터, [2]고려대학교 화공생명공학과

Shaped Non-Noble Metal Catalysts for the Scale-Up of Ammonia Decomposition

Gi Dong Sim[1], Sung Min Kwon[1,2], Youngmin Kim[1], Younghwan Im[1*], Ho-Jeong Chae[1*]
[1]Hydrogen & C1 Gas Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology
[2]Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University

암모니아는 액체수소에 비해 단위 부피당 수소 저장 밀도가 약 1.7배로 높은 수소 저장 용량을 가지고 있으며, 기존 인프라를 활용한 저장 및 운송이 가능하여 수소 캐리어로 주목받고 있다. 암모니아를 수소로 활용하기 위해서는 암모니아를 분해하는 과정이 필요하다. 암모니아 분해반응 (Ammonia decomposition)에 사용되는 촉매는 상용화를 위해 경제성 및 고성능이 요구되며, 이를 위한 촉매 개발이 진행되고 있다. 그중 비귀금속에 해당하는 Ni은 암모니아 분해 촉매에서 사용되는 귀금속인 Ru보다 낮은 가격으로 촉매 상용화에 적합하다. 촉매를 실제 공정에 적용하기 위해서는 분말 형태가 아닌 비드, 펠렛, 코팅, 등의 형태로의 성형 과정이 필요하다. 본 연구에서는 Ni을 활용한 분말 촉매를 통해 상용화를 위한 촉매 개발을 진행하였다. 벤치 규모 반응을 통한 scale-up 과정에서 촉매는 펠렛 성형 방법과 3 mm bead Al_2O_3를 사용한 비드 코팅 방법으로 제조하였다. 성형된 촉매는 WHSV = 3,000 mL/g_{cat}·h, 300~600 ºC 조건에서 암모니아 분해 활성을 비교했으며, 촉매의 마모율 및 물리적 내구성은 강도 측정을 통해 촉매 성형 방법에 따른 영향을 확인하였다.

Keywords: Ammonia decomposition, Hydrogen production, bead catalyst, pellet catalyst

PA-45

전기화 반응기를 통한 암모니아 기반 수소 생산

고유진[1], 김승은[1], 김민식[1], 임영환[1,] 김영민[1], ,채호정[1*]
[1]한국화학연구원 수소C1가스연구센터

Hydrogen Production from Ammonia via an Electrified Reactor

You Jin Go[1], Seungeun Kim[1], Min Sik Kim[1], Younghwan Im[1], Youngmin Kim[1], Ho-Jeong Chae[1*]
[1]Hydrogen & C1 Gas Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology

수소는 앞으로 다가올 청정 미래의 유망한 에너지로 각광을 받음으로써 그의 저장 및 운반 매개체인 암모니아도 높은 관심을 얻고 있다. 수소를 생산하는 방법 중에서도 암모니아 분해(NH_3 decomposition) 반응은 이산화탄소를 배출하지 않고도 필요한 시점에 바로 수소를 공급할 수 있는 장점이 있다. 기존 열 반응기는 열전달 과정에서 에너지 손실이 발생하여 효율이 감소하기에 원하는 지점에서 열을 발생시킬 수 있는 전기화 반응기로 에너지 효율을 극대화시키는 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 본 연구에서는 이러한 이유로 전기화 반응기(Electrified Reactor)를 통해 암모니아를 분해하여 수소를 생산한다. 전기에너지를 열원으로 사용하여 가동되는 전기화 반응기는 최소한의 전력으로 운영되도록 설계되었다. 또한, 효율적인 수소 생산을 목적으로 시스템 구성 및 실험이 진행되었다. 반응기에 직접 전기를 공급함으로써 에너지 손실을 최소화하였으며, 줄-히팅(Joule-Heating)을 기반으로 상온에서 최대 반응 온도인 500℃ 이상까지 도달하는 것을 확인하였다. 다양한 범위의 전력을 공급하여 각 단계에서의 최대 효율을 얻음으로써 전기화 반응기 최적화에 대한 가능성을 평가할 수 있다.

참고문헌

1. Lucentini, I., Garcia, X., Vendrell, X., and Llorca, J., "Review of the Decomposition of Ammonia to Generate Hydrogen," Ind. Eng. Chem. Res., 60, 18560-18611 (2021).

2. Ponikvar, Ž., Likozar, B., and Gyergyek, S., "Electrification of Catalytic Ammonia Production and Decomposition Reactions: From Resistance, Induction, and Dielectric Reactor Heating to Electrolysis," ACS Appl. Energy Mater., 5, 5457-5472 (2022).

3. Zheng L., Ambrosetti M., and Tronconi E., "Joule-Heated Catalytic Reactors toward Decarbonization and Process Intensification: A Review," ACS Eng. Au, 4, 4-21 (2024).

PA-46

수소 캐리어로서 저압 암모니아 합성 촉매 성능 향상을 위한 세리아 기반 복합산화물 지지체 연구

최진아[1,2], 이수언[1], 김태완[1], 김영민[1], 강기혁[1], 박선영[1], 문준혁[2], 채호정[1*]
한국화학연구원[1], 고려대학교[2]

암모니아(NH_3)는 높은 수소 함량(17.6 wt%)과 부피당 에너지 밀도, 상온·상압에서의 안정성 덕분에 차세대 수소 운반체로 주목받고 있다. 이는 액체 상태로 비교적 낮은 압력에서 저장·운송이 가능하며, 연소 또는 분해 시 이산화탄소를 배출하지 않고 수소와 질소로 전환할 수 있다는 장점이 있다. 현재 상용화된 하버–보슈(Haber–Bosch) 공정은 철 기반 촉매를 이용하여 고온(400–500 °C), 고압(100–300 bar) 조건에서 질소와 수소를 반응시켜 암모니아를 생산하며, 이 과정은 전 세계 이산화탄소 배출량의 약 1%를 차지하는 것으로 보고된다. 따라서 재생에너지원 기반의 '그린 수소'를 효율적으로 운반하기 위해서는 저온·저압 조건에서도 높은 활성을 유지할 수 있는 촉매의 개발이 필수적이다(Chen et al. [1]). 본 연구에서는 저압 반응 조건에서 높은 암모니아 합성 성능을 도출하기 위해, 대표적인 Ru/CeO_2 촉매와 CeO_2 기반 복합산화물 촉매의 특성을 비교·분석하였다(Javaid and Nanba [2], Wang et al. [3]). 이를 통해 저압 암모니아 합성 효율 향상을 위한 촉매 설계 방향을 제시하고자 한다.

References

1. Chen, H.-Y., Chen, S.-Y., Reyes, Y. I. A., et al., "Promotion effects in ammonia synthesis over ruthenium catalysts: A review", *EnergyChem*, **6**, 100140 (2024).
2. Javaid, R., and Nanba, T., "Efficient Ru/MgO–CeO_2 catalyst for ammonia synthesis as a hydrogen and energy carrier", *Int. J. Hydrog. Energy.*, **48**, 11214-11224 (2023).
3. Wang, X., Ni, J., Lin, B., Wang, R., Lin, J., and Wei, K., "Highly efficient Ru/MgO–CeO_2 catalyst for ammonia synthesis", *Catal. Commun.*, **12**, 251-254 (2010).

PA-47

수소추출을 위한 저비용 고효율의 암모니아 분해 촉매 개발

권성민[1,2], 심기동[1], 김영민[1], 임영환[1*], 채호정[1*]
[1]한국화학연구원 수소C1가스연구센터, [2]고려대학교 화공생명공학과

Low-cost and high performance NH_3 decomposition catalyst for H_2 production

Sung Min Kwon[1,2], Gi Dong Sim[1], Youngmin Kim[1], Younghwan Im[1*], Ho-Jeong Chae[1*]
[1]Hydrogen & C1 Gas Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology
[2]Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University

지정학적인 이유로 우리나라의 경우 해외로부터 수소를 공급받기 위해서는 선박을 통한 수입으로 제한된다. 이러한 이유로 수소 캐리어로써 암모니아 가스는 수소 함량이 높고 수소와 질소로 전환 시 탄소 배출이 없다는 점, 그리고 생산, 운송, 및 저장 관련한 인프라가 구축되어 있다는 점에서 유망한 수소 캐리어로써 주목받고 있다.
현재까지 암모니아 분해 촉매에 있어 가장 높은 효율을 가지는 촉매는 루테늄(Ru) 촉매로 알려져 있다. Ru은 NH_3 분해 반응에서 가장 활성이 높은 금속으로 알려져 있다. 하지만, 귀금속류인 Ru은 원료의 높은 비용과 입자 크기 및 형상에 따른 상이한 촉매 활성으로 인하여 저함량, 고분산의 촉매가 요구된다. 이에 따라 본 연구는 저함량의 Ru을 고분산 담지를 하기 위한 합성법을 적용하여 높은 활성을 나타내는 상용화 촉매를 제조하고, 그 성능을 WHSV = 6,000 $mL/g_{cat}{\cdot}h$, 300~600 ℃ 조건에서 암모니아 분해 활성을 평가하였다.

Keywords: Ammonia decomposition, Hydrogen production, bead catalyst

PA-48

메조기공 도입 및 Ni 분산 최적화를 통한 제올라이트 기반 에틸렌 올리고머화 촉매 설계 및 지속가능항공유 생산 향상

손수빈, 이준상, 정주현, 김정철*
국립한밭대학교 화학생명공학과

넷제로(Net zero) 정책이 본격 추진됨에 따라 CO_2 배출 비중이 높은 항공 부문의 탈탄소화가 시급한 과제로 대두되고 있으며, 이를 위해 지속가능항공유(Sustainable Aviation Fuel, SAF)가 현실적인 대체연료로 주목받고 있다. SAF 생산 경로 중 Fischer-Tropsch 합성, 알코올 전환, 올레핀 중합 등이 있으며, 특히 올레핀 중합은 에틸렌·프로필렌을 C_8–C_{15} 액상 탄화수소로 전환할 수 있어 고부가가치 연료 생산에 적합하다. 그러나 이 반응의 선택성과 수율은 촉매의 금속-산성 균형, 금속 입자 크기, 안정성에 크게 의존하므로 최적화가 요구된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 니켈(Ni) 기반 제올라이트 촉매를 개발하여 C_8–C_{15} 액상 탄화수소의 높은 선택성을 구현하고자 한다. 특히 Ni은 에틸렌 이량체화(dimerization) 및 올리고머화(oligomerization)에 높은 활성을 보여 본 촉매의 핵심 금속으로 활용된다. 먼저, 다양한 Si/Al 비율을 갖는 MFI 및 Beta 계열 제올라이트를 산처리하여 메조기공을 도입하였다. TEM 관찰을 통해 메조기공의 형성과 그 분포를 일부 영역에서 확인되었으며, BET 분석결과 메조기공이 도입된 시료는 외부 표면적과 전체 기공 부피가 증가한 것으로 나타났다. 이러한 구조적 변화는 브뢴스테드 산점이 위치한 내부 기공 부위에 대한 접근성을 실질적으로 향상시키는 것으로 해석된다. 이후, 해당 제올라이트 담지체에 이온교환법과 함침법을 각각 적용하여 Ni 기반 촉매를 제조하였다. TEM, XPS 분석을 통해 메조기공이 도입된 시료에서 Ni이 균일하게 분산되고 입자 크기가 감소하는 경향을 보였다. 또한, 피리딘-FTIR 분석에서 산 강도와 산점 분포가 조절되어 반응성 향상에 유리한 특성을 나타냈다. 제조된 촉매를 고정층 반응기에서 에틸렌 올리고머화 반응에 적용한 결과, 메조기공 도입과 최적 Si/Al 비율을 동시에 갖춘 촉매는 높은 전환율과 함께 C_8–C_{15} 범위의 탄화수소 선택성이 향상되었다. 이러한 성능 향상은 메조구조 형성으로 인한 확산 저항 완화 활성 부위 접근성 증가로 중간 생성물이 빠르게 이동하며 선택적인 C-C 결합 형성이 가능해졌기 때문이다. 또한, 메조기공은 금속 입자의 응집을 억제하여 Ni의 균일한 분산과 적정 입자 크기를 유지시키고, 이는 올레핀의 활성화와 반응 경로 제어를 촉진하여 과도한 분해와 불필요한 고분자량 올리고머 생성을 억제한다. 더불어, Si/Al 비율 조절을 통해 브뢴스테드 산점의 밀도와 강도를 최적화함으로써 올레핀 중합 및 분지화 반응 경로를 제어하고, 과도한 부반응을 억제함으로써 최적의 C_8–C_{15} 선택성을 구현하였다. 이러한 구조적·산성도·금속 분산의 상호 보완적 효과가 반응성과 선택성 향상에 핵심적으로 기여한 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 메조기공 도입과 산 특성 및 금속 분산의 동시 최적화가 에틸렌 올리고머화 촉매 설계에 효과적인 전략임을 제시한다. 더 나아가, SAF 생산에 최적화된 제올라이트 기반 촉매 설계 지침을 마련함으로써 친환경 항공연료 상용화 기술 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Olivier-Bourbigou, H., Breuil, P. A. R., Magna, L., Michel, T., Fernandez Espada Pastor, M., and Delcroix, D., "**Nickel Catalyzed Olefin Oligomerization and Dimerization,**" *Chem. Rev.*, **120**(15), 7919-7983 (2020).

PA-49

수소 생산 기지의 이산화탄소 포집 후 고순도 탄산 칼슘 생산기술 개발

김경덕*, 김인재, 박성수
대전광역시 유성구 대덕대로 1227, 한국가스기술공사 신에너지연구원

Development of System for Calcium Carbonate Production using Carbon Dioxide from Hydrogen Production Plant

Kyungduk Kim, InJae Kim, SungSoo Park
Energy Research Center, 1227, Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 34007, Korea

요약

현재 세계 각국이 수소사회로의 전환에 노력을 다하고 있으나 수소 생산의 95% 이상은 화석연료를 개질하여 수소를 생산하고 있다. 이는 수소 1kg(그레이 수소)을 생산하면 이산화탄소는 7~10kg이 발생하고 있어서 이 문제를 시급히 해결할 필요성이 있다. 재생에너지를 활요한 그린수소는 경제성과 효율성의 문제를 극복하고 상용화되기까지는 상당한 기간이 필요하므로 2021년 정부는 청정수소에 블루수소를 포함시켰다. 대한민국의 청정수소 범주에 들기 위해서는 수소 1kg를 생산할 때 발생하는 온실가스 배출량이 4kg CO2 이하일 경우 '청정수소'로 인증하고 있다.

한국가스기술공사는 현재 완주 수소 생산 시설 단지를 구축하여 현재 메탄 개질을 통한 수소를 생산하고 있다. 수소 생산시 함께 배출되는 이산화탄소의 양이 약 8 톤이므로 생산된 수소가 청정수소가 되기 위해서는 이 문제를 시급히 해결할 필요성이 있다. 청정수소 생산과 2050 탄소 중립 달성을 위해서는 블루수소의 확산이 필요하므로 이에 메탄 개질의 수소생산시설에서 배출되는 이산화탄소를 포집하고 이산화탄소 셔틀 기술을 이용한 CCU 기술을 개발 하였다.

본 연구 과제에서 개발하는 기술의 개념은 경제성 확보와 환경 편익 증진에 중점을 두고 있으며 수산화나트륨 (NaOH)을 포집 매개체로 활용하여, 이를 산화칼슘 (CaOH) 슬러리에 이산화탄소를 전달하여 탄산칼슘 고체와 탄산 이온 사이의 화학반응에 의해 고순도 탄산칼슘을 제조하면서 동시에 수산화나트륨을 재생, 재활용하는 개념이다

참고문헌

1. Claudia, R., Luis, R., Ricardo, R. C. Claudio S. and Jorge, A., Sustainable and Negative Carbon Footprint Solid-Based NaOH Technology for CO2 Capture., ACS Sust. Chem. and Engin., 19003-19012 (2020).

2. A Carbon-Neutral CO2 Capture, Conversion, and Utilization Cycle with Low-Temperature Regeneration of Sodium Hydroxide, JACS 140, 16873-16876 (2018).

자원순환

(포스터발표 II)

2025년 9월 25일(목) 13:00~15:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비

PF-1

소수성 분리막 기반 폐수내 고농도 암모니아 회수공정 최적화 연구

차재훈, 윤다은[1], 정우진[1], 이인규[1], 장순웅[1*]
경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, [1]경기대학교 사회에너지시스템공학과

The Statistical Optimization of Ammonia recovery process by hydrophobic membrane

Jaehun Cha, Daeun Yoon[1], Woojin Chung[1], Ingyu Lee[1], Soonwoong Chang[1*]
Department of Environmental Energy Engineering, Graduate school of Kyonggi University
[1]Department of Civil & Energy system Engineering, Kyonggi University

산업현장에서 발생량이 증가하고 있는 고농도 암모니아 함유 폐수에서 암모니아를 회수하는 것은 폐수처리 뿐 아니라 에너지 관리측면에서도 큰 이점을 가지고 있다. 특히 소수성 분리막을 이용한 막 증류공정은 기존 공정 대비 소요 부지면적 및 에너지 소모가 적은 강점을 가지고 있어 기술에 대한 관심이 커지고 있다. 소수성 분리막을 이용한 암모니아 회수기술의 실증화를 위해서는 막 젖음 현상 및 막 단사문제의 해결과 암모니아 직접회수 형태의 공정 구성에 대한 해결책마련이 필요하다. 이에 본 연구에서는 단사 및 막 젖음 저항성이 높은 분리막을 개발하고 이를 이용한 공정 성능 최적화 연구를 수행하고자 하였다. 암모니아 물질 전달 계수를 바탕으로 반응표면 실험법(RSM)의 하나인 BBD(Box-Behnken Design)를 적용하여 공정 성능에 영향일 줄 수 있는 주요 운전 매개변수를 모델링하고 최적화 하였다. 실험 결과 얻어진 모델은 높은 결정계수 값(R^2 = 99.5)을 나타냈으며 스윕가스 및 압력에 의한 영향이 가장 크게 나타났다. 음압과 스윕가스의 복합공정을 이용한 가스 직접회수 공정에서 황산 흡수 공정 이상의 물질 전달 계수를 얻을 수 있었으며 실험을 통해 모델의 유효성과 신뢰성을 검증하였다.

참고문헌

1. Yoon, et al. "Membrane degassing with the combination of sweep gas and vacuum pressure for ammonia removal." Environmental Science Water Research & Technology, 467 (2023)

2. Yuan Hu, et al. "Ammonia recovery via direct contact membrane distillation: Modeling and performance optimization." Journal of Environmental Management, 365 (2024)

사사

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)과 산업통상자원부(MOTIE)의 연구과제 “수요맞춤형 물관리 시설 수요자원화 기술개발 및 실증(과제번호 : RS-2025-02307821)” 지원에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

PF-2

열-알칼리 전처리를 통한 PLA와 음폐수의 공동 혐기성 소화 최적화 및 메탄 수율 평가

김남규, 임동재[1], 장순웅[2], 정우진[2*]
경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, [1]경기대학교 토목공학과, [2]경기대학교 사회에너지시스템공학과

Optimization of Anaerobic Co-Digestion of PLA and Food Wastewater through Thermal-Alkaline Pretreatment and Evaluation of Methane Yield

Namkyu Kim, Dongjae Yim[1], Soonwoong Chang[2], Woojin Chung[2*]
Department of Environmental Engineering, Graduate school of Kyonggi University
[1]Civil Engineering, Kyonggi University
[2]Department of Civil and Energy System Engineering System, Kyonggi University

바이오플라스틱 사용량은 지속적으로 증가하고 있으며 2026년 750만 톤에 이를 것으로 예측되고 있다. 그중 Polylactic Acid(PLA)는 20.7%로 가장 큰 비중을 차지하고 있는데 국내에서 발생되는 PLA는 주로 소각을 통해 처리되어 친환경 소재의 장점을 살리지 못하고 있다. 혐기성 소화는 폐기물 처리와 함께 에너지 생산이 가능한 장점을 가지고 있으나, PLA는 중온조건에서 생분해도가 낮아 고온소화 또는 긴 HRT의 적용이 필요하며, PLA 가수분해 산물인 젖산은 메탄발효를 지연시켜 과다 투입 시 공정 안정성을 저해할 수 있는 문제점을 가지고 있다. 이에 본 연구는 PLA의 소화효율 개선을 위한 열화학적 가수분해 조건을 최적화하고, PLA를 이용한 혐기성 소화에서 OLR에 따른 공정 저해 정도를 분석하고자 하였다

열화학적 가수분해 공정의 최적화를 위해 Box-Behnken법을 적용하여 KOH 농도(2 M, 4 M, 6 M), 온도(30 ℃, 60 ℃, 90 ℃), 시간(3 시간, 13.5 시간 , 24 시간)을 독립 변수로 최적화 모델을 산출하였다. 가용화된 PLA와 음폐수를 기질로 혼합 중량비 0:100, 5:95, 10:90, 30:70 (w/w %) 조건에서 Biochemical Methane Potential test를 통해 유기물 부하율에 따른 공정 저해 정도를 평가하였으며 이를 통해 최적 가스 발생량 확보를 위한 적정 투입비를 산정하였다.

참고문헌

1. Benn, Nicholas, and Daniel Zitomer. "Pretreatment and anaerobic co-digestion of selected PHB and PLA bioplastics." Frontiers in Environmental Science 5, 93 (2018).
2. Vasmara, C., et al. "Alkali, thermal, or thermo-alkali pre-treatment to improve the anaerobic digestion of poly (lactic acid)?." Water Research 258, 121744 (2024).

사사

본 연구는 농촌진흥청연구과제 '환경부하 저감형 생분해성 수지 코팅비료 개발(과제번호: PJ01711402)' 지원에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

PF-3

폐 플라스틱 빨대(PLA)와 커피 찌꺼기(CF)의 공수열 액화 반응 연구

강주원[1], 차재원[1], 정승묵[1], 전혜린[2], 이도연[2*]
[1]국립한밭대학교 환경공학과 [2]국립한밭대학교 건설환경공학과

A Study on the Co-Hydrothermal Liquefaction of Waste PLA Straws and Spent Coffee Grounds

Juwon Kang[1,] Jaewon Cha[1], Seungmook Jung[1], Hyerin Jeon[2], Doyeon Lee[2*]
[1]Department of and Environmental Engineering, Hanbat National University
[2]Department of Civil and Envioronmental Engineering, Hanbat National University

폴리젖산(PLA)은 생분해성 플라스틱으로 일회용 제품 및 3D 프린팅 소재 등 다양한 분야에 활용되고 있으나, 현재의 재활용 체계에서는 대부분 소각 처리되고 있어 환경적 문제가 제기되고 있다. 이와 유사하게, 커피 소비량이 많은 국내에서는 커피 찌꺼기(CF)가 다량 발생하지만, 대부분 일반 생활폐기물로 처리되어 자원으로서의 활용이 미미한 실정이다. 본 연구는 이러한 두 가지 폐자원을 대상으로 공수열 액화(Co-HTL)를 적용하여 hydro-oil로 전환하는 가능성을 평가하고자 하였다.
실험은 아임계 수열 조건(240 - 300°C) 하에서 진행되었으며, PLA와 커피 찌꺼기의 혼합비(1:0, 3:1, 1:1, 1:3, 0:1)와 함께, 아세톤을 공동용매로 첨가한 조건에서도 각각 반응을 수행하였다. 이를 통해 반응 온도, 원료 혼합비, 공동용매 사용 유무가 hydro-oil의 수율 및 특성에 미치는 영향과 GC-MS, FT-IR, 원소분석 등을 통하여 오일의 특성을 분석하였다. 특히, PLA와 커피 찌꺼기 간의 혼합 반응을 통해 나타나는 상호작용이나 시너지 효과의 존재 여부를 고찰하였다.
본 연구는 폐 PLA와 바이오매스를 동시에 활용하는 열화학적 처리 기술의 적용 가능성을 평가하고, hydro-oil 생산 조건 최적화에 기초자료를 제공하는 데 목적이 있다. 특히, 반응 온도와 혼합비, 공동용매 사용 여부에 따른 수열액화 공정 특성을 체계적으로 분석하였다. 그 결과, 혼합비 변화에 따른 오일 수율이 28%에서 최대 63%까지 크게 향상되는 것을 확인하였으며, 이는 폐기물 바이오매스와 생분해성 플라스틱의 공동 활용이 htdro-oil 생산 효율을 높이는 데 긍정적인 영향을 미침을 시사한다. 이러한 연구 결과는 폐기물 기반의 지속가능한 연료 생산 기술 개발에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

사사: This research was supported by the National Research Foundation (NRF) of Korea grant funded by the Korean Government (MSIT) (RS-2025-00556963)

PF-4

괭생이모자반과 커피 찌꺼기의 공동 수열탄화를 통한 고품질 하이드로차 생산 가능성 연구

차재원[1], 강주원[1], 정승묵[1], 전혜린[1], 이도연[2*]
[1]국립한밭대학교 환경공학과 [2]국립한밭대학교 건설환경공학과

Study on the Potential for High-Quality Hydrochar Production via Co-Hydrothermal Carbonization of Sargassum horneri and Spent Coffee Grounds

Jaewon Cha[1], Juwon Kang[1], Seungmook Jung[1], Hyerin Jeon[1], Doyeon Lee[2]
[1]Department of and Environmental Engineering, Hanbat National University
[2]Department of Civil and Envioronmental Engineering, Hanbat National University

본 연구는 국내 식음료 산업에서 다량 발생하는 커피 찌꺼기와, 해양 생태계 교란·어업 피해·해안 악취 등 심각한 환경 문제를 유발하는 해중림 폐자원인 괭생이모자반을 대상으로 공동 수열탄화(Co-Hydrothermal Carbonization, Co-HTC) 실험을 수행하였다. 수열탄화(Hydrothermal Carbonization, HTC)는 고수분 함량의 바이오매스를 고온·고압의 수열 조건에서 처리하여 고부가가치 고체연료(hydrochar)를 생산하는 친환경 열화학 전환 기술로, 별도의 건조 공정이 필요 없다는 장점이 있다. 본 연구에서는 원료 혼합비를 1:0, 0:1, 1:1, 1:3, 3:1로 설정하고, 반응 온도 범위를 180~260℃로 조정하였으며, 목표 온도 도달 후 반응시간을 30분으로 고정하였다. 생성물의 수율과 hydrochar 특성 변화를 평가하기 위해 원소분석(Elemental Analysis), 적외선분광분석(FT-IR), 열중량분석(TGA) 등의 분석 기법을 적용하였다. 괭생이모자반과 유기성 폐기물인 커피찌꺼기의 자원화 가능성 제시 및 해양 생태계 보호 및 폐자원의 에너지화에 기여할 수 있는 기초 데이터를 확보하였으며, 혼합 원료 간의 상호작용이 hydrochar의 구조 및 연료 특성에 미치는 영향을 분석함으로써 원료 최적화 방향을 제시하였다. 실험 결과, 괭생이모자반의 무기성분과 커피 찌꺼기의 높은 탄소 함량이 상호 보완적으로 작용하여 hydrochar의 연료 품질이 향상됨을 확인하였다. 또한 혼합 원료 간 상호작용이 탄화물의 구조 및 연소 특성에 미치는 영향을 규명함으로써, 폐자원 활용 효율 극대화를 위한 원료 배합 최적화 방향을 제시하였다. 본 연구에서 얻은 데이터는 해중림 폐자원과 유기성 폐자원의 융합 활용 가능성을 뒷받침하는 기초 자료로서, 해중림 환경 보전 및 폐자원 기반의 연료화 생산 기술 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

사사: This research was supported by the National Research Foundation (NRF) of Korea grant funded by the Korean Government (MSIT) (RS-2025-00556963)

PF-5

광산 폐기물을 활용한 이종 촉매 개발 및 활성 평가

김수림[1] · 이제찬[1,2†]

[1]건설환경공학부, 성균관대학교 · [2]글로벌스마트시티융합전공, 성균관대학교

Environmental and Health Implications of Construction and Demolition Waste: A Data-Driven Framework for Sustainable Waste Management

SoolimKim[1] · JechanLee[1,2†]

[1]School of Civil, Architectural Engineering and Landscape Architecture, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Republic of Korea · [2]Department of Global Smart City, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Republic of Korea

키워드(Key words) : 광산 폐기물,이종 촉매, 개질 반응, 폐수처리, 환경 정화, 자원순환

광산 활동은 심각한 환경 문제를 초래하는 막대한 양의 폐기물을 발생시키며, 이에 따라 효과적인 폐기물 관리 전략의 시급성이 강조되고 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 광산 폐기물을 활용한 이종 촉매 개발 가능성을 평가하였다. 광미, 황화물 함유 물질, 광석 잔사, 제련 부산물 등은 Mg, Fe, Al 등의 금속 및 금속 산화물을 다량 함유하고 있어 촉매 활성점 또는 지지체로서의 잠재력을 지닌다. 이를 검증하기 위해 광산 폐기물의 물리·화학적 특성을 분석하고, 전처리 및 기능화 공정을 적용하여 촉매를 제조하였다. 제조된 촉매는 건식 및 습식 개질, 폐수처리, 환경 정화, 및 기타 화학 전환 반응에서의 반응 성능을 평가하였다. 실험 결과, 광산 폐기물 기반 촉매는 높은 활성과 선택성을 나타냈으며, 반응 종류에 따라 다양한 활성종을 생성하여 오염물질 제거율과 전환율을 크게 향상시켰다. 또한, 촉매의 재사용 가능성과 안정성을 확인하였으며, 향후 촉매 구조 최적화, 불순물 제어, 반응 조건 정밀화가 연구의 주요 과제로 제시된다. 본 연구는 광산 폐기물의 고부가가치 자원화 및 지속가능한 촉매 기술 개발에 기여할 수 있다.

사사: This paper was supported by SKKU Academic Research Support Program(Samsung Research Fund), Sungkyunkwan University, 2024

- This work is financially supported by Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT) as「Innovative Talent Education Program for Smart City」

Jechan Lee, Tel: 031-290-7512, E-mail: jechanlee@skku.edu

PF-6

지속 가능한 건설을 위한 친환경 소재와 혁신적 건축 기법의 결합

김승원[1], 장희은[2], 이제찬[1,2]*
성균관대학교 글로벌스마트시티융합[1], 성균관대학교 건설환경공학부[2]

Integrating Green Materials and Advanced Construction Techniques Toward Sustainable Building

Seung Won Kim[1], Heeeun Chang[2], Jechan Lee[1,2]*
Department of Global Smart City Sungkyunkwan University[1], School of Civil, Architectural Engineering, and Landscape Architecture, Sungkyunkwan University[2]

초록

전 세계 탄소 배출의 큰 비중을 차지하는 건설 산업에서 탄소 감축의 필요성이 갈수록 강조되고 있다. 이러한 흐름 속에서, 지속 가능한 건설을 실현하기 위한 방안으로 3D 프린팅 및 조립식 건축 등 친환경 공법의 현장 적용이 활발히 이루어지고 있다. 더불어, 바이오매스 기반 자재나 자기복원 기능을 갖춘 신소재들은 폐기물 발생 감소, 유지관리 비용 절감 등 환경적·경제적 측면에서 높은 효용성을 지닌다. 특히 이러한 소재들을 3D 프린팅 및 조립식 건설과 같은 첨단 공법과 결합하면 더욱 시너지를 낼 수 있으나, 이에 대한 연구는 아직 초기 단계에 머물러 있다. 건설 및 해체 폐기물, 플라스틱, 유리, 플라이애시 등 다양한 폐자원으로부터 유래한 친환경 자재들은 이러한 첨단 건설 기술에 폭넓게 적용 가능하며, 그 가능성은 점차 확대되고 있다. 본 연구에서는 이러한 지속 가능한 건설 자재와 공법의 유형, 상호 연계성, 적용 사례 등을 포괄적으로 다루며, 각각의 환경적·경제적 효과에 대한 평가도 함께 수행하였다. 선행연구 분석 결과, 바이오매스 및 자기치유형 소재는 건축 자재로서 우수한 성능을 보여주었고, 3D 프린팅 및 조립식 건축 방식은 전통적인 건설 공정 대비 환경성과 경제성이 뛰어남을 확인할 수 있었다. 따라서, 향후 지속 가능한 건설을 촉진하기 위해서는 이러한 자재와 시공 기술 간의 유기적 연계를 위한 표준화가 필요하다는 결론에 도달하였다.

사사

This paper was supported by SKKU Academic Research Support Program(Samsung Research Fund), Sungkyunkwan University, 2024

This work is financially supported by Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT) as 「Innovative Talent Education Program for Smart City」

PF-7

HZSM-11 촉매를 이용한 폴리프로필렌 폐기물의 연료범위 탄화수소 전환 공정

임삼열[1], 이제찬[1,2*]
[1]성균관대학교 글로벌스마트시티융합전공, [2]성균관대학교 건설환경공학부

HZSM-11-Catalyzed Process for Converting Polypropylene Waste into Fuel-Range Hydrocarbons

Sam Yeol Lim[1], Jechan Lee[1,2*]
[1]Department of Global Smart City, Sungkyunkwan University
[2]School of School of Civil, Architectural Engineering, and Landscape Architecture, Sungkyunkwan University

초록(Abstract)
이 연구에서는 실제 폴리프로필렌(PP) 폐기물에 HZSM-11 촉매를 적용한 열분해 공정을 통해, 연료 및 정밀화학 제품의 원료로 활용 가능한 경질 탄화수소(C_1 - C_{12})의 생산을 증진하는 방안을 모색하였다. HZSM-11이 포함된 촉매 열분해는 특히 고온에서 기체 및 액상 생성물의 수율을 크게 높이는 한편, 왁스류(C > 20) 및 고형 잔사의 생성을 억제하는 효과를 보였다. 또한, 열분해 생성물 중 C_3 - C_{12} 탄화수소의 선택도 역시 촉매 사용에 의해 뚜렷하게 향상되었다. 가장 높은 경질 탄화수소 수율은 700 °C에서 약 40 중량%로 확인되었다. 반응 과정에서 7.9 중량% 수준의 코크가 촉매 표면에 축적되었음에도 불구하고, 해당 촉매는 재생 과정을 거친 후 최대 3회까지 반복 사용이 가능한 것으로 나타났다. 본 실험 결과는 HZSM-11이 폴리올레핀계 폐플라스틱을 고부가가치 탄화수소 자원으로 전환하는 데 유망한 촉매임을 시사한다.

키워드(Keyword): 자원순환, 폐기물 업사이클링, 폐플라스틱, 촉매 열분해, 경질 탄화수소

사사(Acknowledgement)
- This paper was supported by SKKU Academic Research Support Program(Samsung Research Fund), Sungkyunkwan University, 2024
- This work is financially supported by Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT) as 「Innovative Talent Education Program for Smart City」

PF-8

아산화질소를 산화제로 활용한 이종 촉매 기반 온실가스 고부가가치화

이선호[1], 안진영[1], 이제찬[1,2*]
[1]성균관대학교 글로벌스마트시티융합전공, [2]성균관대학교 건설환경공학부

Greenhouse Gas Valorization through Heterogeneous Catalysis Using Nitrous Oxide as the Oxidant

Seonho Lee[1], Jinyeong An[1], Jechan Lee[1,2*]
[1]Department of Global Smart City, Sungkyunkwan University, [2]School of Civil, Architectural Engineering and Landscape Architecture, Sungkyunkwan University

초록
본 연구는 메탄, 에탄, 벤젠 등 다양한 탄화수소를 메탄올, 스티렌, 페놀, 카르보닐 화합물 등 고부가가치 화합물로 전환하는 산화제로서 아산화질소(N_2O)를 활용한 불균일 촉매 반응을 다루었다. N_2O는 높은 지구온난화지수(GWP)를 가지는 온실가스이지만, 산소 해리의 에너지적 유리함과 과산화를 회피하는 특성으로 인해 선택적 산화 반응에서 유효한 산소 원자 공급원으로 활용될 수 있다. 이러한 특성을 바탕으로, N_2O와 반응물의 전환율을 향상시키고 목표 생성물 선택성을 높이기 위해 반응성 산소종 생성을 촉진하고 불필요한 추가 산화를 억제하는 촉매 설계 전략이 제시되었다. 특히 금속 함량 조절, 지지체 구조 개질, 제조 공정 조건 최적화 등을 통해 촉매의 상(phase), 표면적, 산도(acidity)를 제어하는 다양한 접근이 보고되었다. 산소화물(methanol, dimethyl ether 등), 탄화수소(에틸렌, 프로필렌 등), 고리 화합물(페놀, 스티렌 등) 등 생성물 군별로 조건·촉매 조성·처리 방법에 따른 수율과 선택성이 비교되었으며, 특정 촉매 조성에서 목표 생성물 선택성이 두드러지게 향상되는 경향이 관찰되었다. 이러한 결과들은 N_2O 기반 불균일 촉매 산화 공정의 반응 효율을 개선할 수 있는 설계 방향을 제시하며, 향후 실용화 가능성 제고를 위한 연구 전략 수립에 기여할 것으로 기대된다.

사사
This paper was supported by SKKU Academic Research Support Program (Samsung Research Fund), Sungkyunkwan University, 2024. This work is financially supported by Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT) as 「Innovative Talent Education Program for Smart City」

PF-9

자동차 폐기물 폴리카보네이트(PC)의 기계적 재활용 한계를 해결하는 화학적 모노머 회수 전략

허성욱[1] · 이제찬[1,2,*]

[1]성균관대학교 글로벌스마트시티융합전공 · [2]성균관대학교 건설환경공학부

Mechanical Recycling Limitations and Chemical Monomer Recovery Strategy of End-of-Life Automotive Polycarbonate

SeongukHeo[1] · JechanLee[1,2,*]

[1]Department of Global Smart City, Sungkyunkwan University · [2]School of Civil, Arthictectural Engineering, and Landscape Architecture, Sungkyunkwan University

키워드(Key words) : Polycarbonate, Automotive waste, Mechanical recycling, Chemical recycling, Monomer recovery, Pyrolysis

지속적인 지구온난화와 자원 고갈 문제로 인해 유럽을 중심으로 재생원료 사용 의무화와 같은 엄격한 환경 규제가 강화되고 있다. 자동차 산업에서 사용되는 폴리카보네이트(PC) 소재는 우수한 기계적·광학적 특성으로 널리 활용되나, 폐기 후 기계적 재활용(신재, 1차, 2차, 3차)을 반복할수록 분자량 감소와 구조적 손상으로 인해 물성이 저하된다. 본 연구에서는 3차 기계적 재활용 이후 재료적 성능 저하로 더 이상 기계적 재활용이 불가능한 PC 폐기물을 대상으로, 화학적 재활용을 통한 모노머 회수 가능성을 평가하였다. 이를 위해 신재와 각 재활용 단계별 시편에 대해 기초물성시험을 수행하였다. 향후 촉매를 도입한 조건에서의 분해 반응 최적화를 통해 모노머 회수 수율 고도화를 목표로 한다. 본 연구는 자동차 폐기물 PC의 전환 공정을 기계적-화학적 재활용 연계 전략으로 확장함으로써, 순환경제 달성과 환경규제 대응에 기여할 수 있는 기반을 마련한다.

사사: 본 논문은 2024년 성균관대학교 성균관대학교 학술연구지원사업(삼성연구기금)의 지원을 받아 수행되었습니다. 본 연구는 국토교통부의 「스마트시티 혁신인재 양성사업」의 지원을 받아 수행되었습니다.

PF-10

Applicability Study of Magnesium Silicate for Acid Value Control in Used Cooking Oil

류영복
한국생산기술연구원 울산본부

Applicability Study of Magnesium Silicate for Acid Value Control in Used Cooking Oil

Young Bok Ryu
Ulsan Division, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)

Efficient resource utilization continues to attract attention in the context of climate change response and growing environmental awareness. Cooking oil, when reused repeatedly, undergoes oxidation and rancidity, resulting in reduced quality and a shortened service life. The removal of rancidity-inducing substances can extend the usable life of cooking oil, thereby improving resource efficiency. In this study, used cooking oil collected in Uzbekistan was treated with a specially designed magnesium silicate to remove rancidity-causing substances, and changes in acid value were analyzed to evaluate its applicability. Furthermore, the current technological landscape and relevant regulations in Uzbekistan were reviewed to explore the potential for market entry in the region.

This study has been conducted with the support of KITECH (JE-25-0010)

PF-11

플라스틱 열분해 데이터의 AI 활용을 위한 표준화 및 DB 구축

김형진[1], 최수현[1], 김종수[1], 정수화[1*]
[1]한국생산기술연구원 저탄소배출제어연구부문, 31056, 충남 천안시 서북구 입장면 양대기로길 89

Development of a Standardized Database for AI Applications in Plastic Pyrolysis

Hyeongjin Kim[1], Su-hyeon Choi[1], Jong-Su Kim[1], Soo-Hwa Jeong[1*]
[1]Low-carbon emission control R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology

플라스틱의 열화학적 전환 공정 중 하나인 열분해는 고온·무산소 조건에서 고분자 물질을 환원·분해하여 기체, 액체, 고체 부산물을 생성할 수 있는 공정이며, 연료로써 재활용, 온실가스 감축이 가능하다는 점에서 국내 및 해외 기업의 지속적인 투자와 관심을 받고 있다. 또한, 2050 탄소중립 시나리오에 따르면 온실 가스 배출량 부분에서 2018년 1,710만 톤 CO2eq에서 2050년 440만 톤 CO2eq로 감축할 예정이다. 대한 석유협회에 따르면 이는 약 매년 약 90-100만 톤의 폐기물을 열분해를 통하여 처리해야하며, 2021년 기준 폐플라스틱 열분해를 통해 생산된 양이 8,617톤임이므로 2050년까지 관련 시장 규모는 약 35-40배 가량 증가할 것이라 보고하였다. 현재까지 국내에서 폐플라스틱을 이용하여 열분해유를 제조하는 분야는 중소기업을 중심으로 이루어져 왔으며 대부분 연속식 열분해가 아닌 로타리 킬른이나 고정층 시스템과 같은 회분식 열분해 방식으로 운전이 되고 있다. 국외 열분해 반응기의 경우, Plastic Energy社는 stirred-tank 방식으로 연속적으로 1톤의 플라스틱 폐기물로 약 850리터의 열분해 오일을 생산 가능하다고 보고하였다.
본 연구에서는 국내 플라스틱 열분해 공정의 효율성 극대화와 생성물 품질 향상을 지원하기 위해, 기존 문헌들에서 얻은 공정 전후의 원료 특성 분석 및 생성물의 수율 등을 분석하고자 한다. 더불어, 실제 PE, PP, 그리고 PS의 실험데이터와의 비교 분석을 통해, 고신뢰 실험데이터를 구축하고, AI 모델 입력용 데이터 및 KoMap 등록용 데이터를 제공하는 역할을 수행하는 것을 목표로 한다.

키워드 가상공학플랫폼, AI, 플라스틱, 열분해

사사

본 연구는 산업통상자원부 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 소재부품산업기술개발기반구축사업(No. RS-2025-1902973)의 일환으로 수행되었습니다.

PF-12

폐타이어 열분해 촤의 비표면적 증대를 위한 물리적·화학적 활성화 연구

윤주형[1,2], 이다경[1], 김종수[1], 김창용[3], 주용태[3], 정수화[1*]
[1]한국생산기술연구원 저탄소배출제어연구부문, [2]한양대학교 자원환경공학과,
[3]현대자동차 남양연구소 샤시고분자재료개발팀

Enhancement of Specific Surface Area of Waste Tire Pyrolysis Char via Physical and Chemical Activation

Joo-Hyeong Yoon[1,2], Da-Kyoung Lee[1], Jong-Su Kim[1], Chang-Yong Kim[3], Yong-Tae Joo[3], Soo-Hwa Jeong[1*]

[1]Low-Carbon Emission Control R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology
[2]Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University
[3]Chassis Polymer Materials Development Team, Hyundai Motor Company

초 록

폐타이어의 적정 처리와 자원화는 환경적·경제적 측면에서 중요한 과제로 부각되고 있다. 특히 열분해 공정 후 생성되는 고형 잔류물인 폐타이어 열분해촤(CBp)는 다공성 구조를 가지지 않지만, 활성화를 통해 다공성 구조로 전환되어 고부가가치 소재로 활용될 수 있는 잠재력을 지닌다. 본 연구는 CBp를 활성탄 대체 소재로 활용하기 위한 활성화 실험을 수행하였다. 주요 목적은 물리적 및 화학적 활성화 방법을 통해 CBp의 비표면적을 증진시키고, 그 활용 가능성을 평가하는 데 있다. 물리적 활성화는 900°C에서 스팀을 주입하여 진행하였고, 화학적 활성화는 KOH를 전처리제로 사용한 후 고온 열처리를 통해 수행하였다. 각 조건에서 활성화된 시료의 비표면적, 기공 구조 및 미세구조 변화는 BET 분석 등을 통해 비교 분석하였다. 본 연구는 폐타이어 부산물을 고부가가치 흡착재로 전환하기 위한 기반 자료를 제공하며, 자원 순환 및 환경 문제 해결에 기여할 수 있다.

핵심단어

카본블랙, 활성탄, 활성화, 스팀, KOH

사 사

본 결과물은 현대자동차 재원으로, 샤시고분자재료개발팀의 기초연구과제 지원을 받아 연구되었습니다 (No. ROMS25025947000).

PF-13

고순도 카본블랙 생산을 위한 폐타이어 열분해 촤의 2단계 정제 연구

이다경[1,2], 윤주형[1], 김종수[1], 주용태[3], 김창용[3], 정수화[1*]
[1]한국생산기술연구원 저탄소배출제어연구부문, [2]서울시립대학교 환경공학과, [3]현대자동차 남양연구소 샤시고분자재료개발팀

Two-Step Acid Purification of Waste Tire Pyrolysis Char for High-Purity Carbon Black Production

Da-Kyoung Lee[1,2], Joo-Hyeong Yoon[1], Jong-Su Kim[1], Yong-Tae Joo[3], Chang-Yong Kim[3], Soo-Hwa Jeong[1*]

[1]Low-Carbon Emission Control R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology
[2]Department of Environmental Engineering, University of Seoul
[3]Chasis Polymer Materials Development Team, Hyundai Motor Company

초 록

Pyrolytic carbon black(CBp)은 폐타이어 열분해 공정에서 생성되는 고체 부산물로, 높은 탄소 함량을 바탕으로 카본블랙의 대체제로 활용 가능성이 높은 소재이다. 그러나 폐타이어 유래 물질인 만큼 아연(Zn), 황(S), 규소(Si), 칼슘(Ca) 등의 무기 불순물이 다량 포함되어 있어 정제가 필수적이다. 정제 과정은 폐타이어 타입에 따른 CBp를 대상으로 염산(HCl)을 이용한 1차 정제 그리고 불산(HF)을 사용하여 2차 정제를 하였다. 본 연구에서는 CBp의 황 및 주요 금속과 이산화규소(SiO_2)를 제거하는 2단계 산처리 공정을 통해 고순도 재생카본블랙(rCB)을 회수하였다. 정제 처리 전후의 CBp는 ICP-OES, TGA, EA를 사용하여 금속 및 무기물 함량, 탄소 함량을 분석했다. 그리고 회분(Ash)은 ASTM D1506 방법으로 분석하여, CBp의 회분 감량을 비교하였다. 따라서 이번 연구를 통해 CBp의 불순물을 효과적으로 제거하고, 고순도의 rCB를 회수함으로써 폐타이어 열분해 부산물의 자원화 및 카본블랙 대체재로의 활용 가능성을 제시하였다.

핵심단어

폐타이어, pyrolytic carbon black, 카본블랙, 정제

사 사

본 결과물은 현대자동차 재원으로, 샤시고분자재료개발팀의 기초연구과제 지원을 받아 연구되었습니다 (No. ROMS25025947000).

PF-14

Study on the Recovery of Vinylene Carbonate(VC) Additive from the Electrolyte of Lithium Ion Waste Battery

Sungjin Kang[1*] and Hayoon Park[2,3]

[1]Korea Polytechnics University

[2]Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Republic of Korea

[3]Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

The lithium-ion battery recycling market is segmented into automotive and non-automotive markets based on end use. The automotive market is projected to grow from USD 10.014 billion in 2025 to USD 12.071 billion in 2030, at a compound annual growth rate (CAGR) of 3.8%. The non-automotive market is projected to grow from USD 2.155 billion in 2025 to USD 6.015 billion in 2030, at a CAGR of 22.8%. Lithium-ion batteries generate electricity through a chemical reaction in which lithium ions move between the positive and negative electrodes. The electrolyte acts as a passageway for the lithium ions between the positive and negative electrodes, while the separator separates them. The four components of a lithium-ion battery are generally cathode, anode, electrolyte, and separator. Vinylene carbonate (VC) is a key additive in lithium-ion battery electrolytes. When added to the electrolyte, it forms a thin protective film on the surface of the electrolyte, improving ionic conductivity and increasing battery stability, thereby extending the lifespan of lithium-ion batteries. LFP (Li-FePO4) batteries use more electrolyte than ternary batteries and require higher concentrations of electrolyte additives. With the recent expansion in demand for LFP batteries, the vinylene carbonate (VC) market is attracting attention. According to QYResearch analysis, the global market size of electronic-grade vinylene carbonate (VC) for battery electrolyte additives is projected to reach USD 760 million in 2023 and grow at a CAGR of 16.7% (2024-2030) to reach USD 2.5 billion in 2030. Therefore, the purpose of this study is to design and establish a distillation process system to recover vinylene carbonate (VC), which is used as an electrolyte additive from waste lithium-ion batteries, with a purity of 99.99% or higher and reuse it as a raw material for manufacturing lithium-ion batteries.

References

1. W. Xu, J. Wang, F. Ding, X. Chen, E. Nasybulin, Y. Zhang and J.-G. Zhang, Lithium metal anodes for rechargeable batteries, Energy Environmental Science 7, 513-537, (2014).

PF-15

Cu CMP 폐슬러리에서 SiO_2 연마입자 회수 및 표면 개질을 통한 재활용 가능성 평가

임지혜[1], 이준희[1], 정주현[1], 김정철[1*]
국립한밭대학교 화학생명공학과[1]

Recycling Potential of SiO_2 Abrasive Particles Recovered and Surface-Modified from Waste Cu CMP Slurry

Jihye Lim[1], Junhui Lee[1], Juhyun Jeong[1], Jeong-Chul Kim[1*]
Department of Chemical and Biological Engineering, Hanbat National University[1]

반도체 소자의 고집적화 및 미세화가 가속화됨에 따라, 웨이퍼 표면의 미세 요철 제거와 평탄도 확보 공정의 중요성이 한층 부각되고 있다. 화학적 기계적 연마 공정(Chemical Mechanical Polishing, CMP)은 이러한 요구를 충족하는 핵심 기술로, 수십 나노미터 크기의 연마 입자와 금속 이온, 산화제, 분산제 등 다양한 화학 첨가제를 포함한 연마 슬러리를 사용한다. 그러나, CMP 공정 후 발생하는 폐슬러리는 고순도 연마 입자와 유해 화학물질을 함유하여 환경오염과 자원 손실을 초래하며, 특히 Cu CMP 슬러리의 경우 연마 입자의 입도 및 표면 특성이 변형되어 단순 회수만으로 초기 성능을 유지하기 어렵다.

본 연구에서는 Cu CMP 폐슬러리로부터 SiO_2 연마 입자를 회수하고, 산처리 및 실란화를 거쳐 입도분포, 형태, 표면전하 등 물리·화학적 특성을 분석하였으며, 표면 개질 전후의 특성 변화를 비교하였다. 또한 CMP 모사 실험을 통해 연마 성능을 검증하고, 표면 개질의 효과와 한계를 규명하였다. 본 연구는 CMP 폐슬러리 재활용을 위한 기초 데이터를 제공하며, 반도체 제조에서 지속가능한 자원순환 공정 설계의 가능성을 제시한다.

PF-16

Carbon Emission Mitigation from the Pyrolysis of Invasive Biomass

Gitae Moon[1], Taewoo Lee[1] and Eilhann E. Kwon[1*]

[1]Department of Earth Resources & Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

Abstract

Pyrolysis is a thermochemical strategy for converting lignocellulosic biomass into biofuels[1]; however, the process is inherently energy-intensive, limiting its environmental benefits. Herein, we report a CO_2-cofed pyrolysis pathway using the kudzu vine, an invasive species, to mitigate process-related CO_2 emissions while exploiting the redox activity of CO_2. Above 490 ˚C, the introduction of CO_2 altered the syngas composition by enhancing CO production, indicating its homogeneous redox interaction with pyrolytic volatiles derived from kudzu vine. To further promote CO_2 reactivity, a Ni-based catalytic bed was incorporated, with system performance evaluated at 500, 600, and 700 ˚C. This catalytic configuration increased the CO yield via CO_2 reduction. Optimization at 700 ˚C with varying CO_2 concentrations revealed a convergence in the net CO_2 emissions at 50 vol.%, corresponding to a net reduction of 2.96 g CO_2 per gram of kudzu vine. These findings advance the development of carbon-negative pyrolysis systems and highlight the potential of CO_2 as a reactive agent for sustainable biofuel production.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government (MSIT) (No. RS-2023-00219667).

PF-17

Recycling of cathode materials from spent LFP batteries through ultrasonication reaction

Hye-Lim Kwon[1], Kung-Won Choi[1], Ju-Hyeok Kwon[1], Kil-Hong Seol[1], and Bong-Hun Jeon[1*]

[1] Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Republic of Korea

Abstract

As the adoption of EVs continues to accelerate, directly driving the demand for electric vehicle batteries, the global market for lithium-ion batteries (LIBs) is projected to rise from 5 million sales in 2015 to approximately 180 million in 2025 [1]. Among various LIBs, lithium iron phosphate (LFP) batteries are expanding rapidly due to their cost competitiveness and high safety, highlighting the growing need for effective recycling of spent LFP cathodes. In this study, the recycling of cathode materials from spent LFP batteries was studied using an ultrasonication process. To optimize ultrasonic separation, ultrasonication experiments were conducted with varying reaction times (5, 8, 10, 15, and 20 min) and power levels (20, 24, and 28 W). As a result, the delamination efficiency of $FePO_4$ from Al increased with longer reaction times and higher power levels. The delamination efficiency reached 95.8% at a reaction time of 15 min and 91.2% at a power level of 28 W. However, higher reaction times and power levels also promoted the leaching of Al, Fe, Li, and other elements. To mitigate such leaching effects and further refine the process conditions, additional experiments will be conducted with more detailed variations in solid–liquid ratios, and repetitive trials will be performed to minimize errors associated with material degradation. These findings provide a basis for developing environmentally friendly and scalable recycling processes for LFP cathodes.

Keywords: Spent lithium-ion battery; Al delamination; Recycling; Ultrasonication; Eco-friendly

Acknowledgement

This work was supported by the Technology Innovation Program (202500000001307, Development of Environment friendly recycling process and manufacturing of high quality material using spent lithium iron phosphate battery) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea)

References

1. Ning, P., Meng, Q., Dong, P., Duan, J., Xu, M., Lin, Y., Zhang, Y., "Recycling of cathode material from spent lithium ion batteries using an ultrasound-assisted DL-malic acid leaching system", Waste Management, 103, 52–60 (2020).

특별세션(IV): (다부처) 화재 능동대응을 위한 소화탄 개발 및 활용 기술 심포지엄

(포스터발표 II)

2025년 9월 25일(목) 13:00~15:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비

PS4-1

소화탄 화재 현장 적용 시 고층빌딩의 강화유리 파공에 대한 연구

노희종
㈜대동계측

A Study on the Destruction of Tempered glass in High-rise Buildings When Applying Fire Grenade to Fire Sites

Heejong Noh
Daedong Instruments Co.,Ltd

최근 재개발, 재건축 등으로 고층건물이 많이 들어서면서 주거지역의 밀집화, 고층화, 인구 과밀화로 고층건물 화재 위험성도 점차 높아지고 있다. 이에 소방차로는 대응하기 어려운 고층건물의 화재진압을 위해 드론을 활용한 기술이 개발되고 있으며, 화재진압 및 인명구조를 신속하게 도와 화재현장의 초기 대응을 지원하고 있다. 사람이 접근하기 곤란하거나 위험해 육안으로 확인하기 어려운 현장의 상황 파악과 정보수집 혹은 구호물품 전달 등 여러 가지 용도로 유용하게 사용할 수 있으나 아직까지는 활용하지 못하는 영역도 꽤 있는 만큼 연구가 더 필요한 실정이다.

그중에서도 건물 내부의 화재진압이나 인명구조를 함에 있어 건물의 유리창으로 인해 화재대응에 방해를 받을 수 있다. 따라서 고층건물의 유리창을 파괴하는 작업을 먼저 수행할 필요가 있으며, 이때 드론을 활용하고자 한다. 본 연구에서는 드론 부착용 파공탄을 개발하고, 연속발사장치를 제작하기 위하여 부산지역 고층빌딩에 적용된 강화유리의 종류를 표본조사 하였고, 11개 중 3개가 강화유리, 8개가 복층유리로 설치된 것을 확인하였다. 이를 통해 확인된 유리를 대상으로 강화유리 파공 테스트를 진행하고 있으며, 강화유리 8, 10, 12mm에 대한 테스트를 완료하였다.

본 연구를 통해 드론을 활용한 고층빌딩의 화재대응 시 강화유리를 깰 수 있는 파공탄을 총탄형으로 개발하였고, 드론 부착용 파공탄 연속발사 시스템을 제작하기 위하여 스프링식, 액화이산화탄소식, 압축공기식에 대한 연구를 진행하였다. 드론 운영의 안정성과 효율성을 확보하기 위해 압축공기식의 발사장치 형태를 가장 적합한 것으로 제시하고, 이로써 향후 고층빌딩 화재현장의 신속한 대응을 목적으로 드론을 적용하는 연구에 기여할 것을 기대한다.

참고문헌

1. Pletcher, D., and Walsh, F. C., Industrial Electrochemistry, 2nd ed., Chapman and Hall, London, 256-269 (2001).

2. Williams, A. C., Panagiotopolous, M. K., and Kenneth, H., "Supercritical Fluid Extraction," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **39**(10), 4657-4665 (2003).

3. Berube, M. R., "Synthesis of Gel Membrane for Heavy Metals Removal," Ph.D. Dissertation, University of Rochester, New York, (2005).

4. Toomey, J. E., Jr., and Cluger, M. O., "Non-toxic spray paint," U.S. Patent No. 4,589,968 (2006).

* 저자가 두 명인 경우: Kim and Lee[1], 세 명 이상인 경우: Kim et al.[1]

감사의 글:

"본 연구는 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479)의 지원을 받아 수행되었습니다."

PS4-2

AI 학습용 화재 이미지 데이터 처리 방안 연구

박진현[1], 류인원[1], 이우형[1], 오재민[1], 진병삼[1]
[1]㈜미소테크

Research on Fire Image Data Processing for AI Learning

Jinhyeon Park[1], Inwon Ryu[1], WooHyung Lee[1], Jaemin Oh[1], Byoungsam Jin[1]
[1]Misotech Co., Ltd.

최근 산불 및 고층 빌딩 화재의 빈도와 규모가 증가함에 따라, 화재 대응을 위한 인공지능(AI) 기술의 중요성이 부각되고 있다. 본 연구는 화재 영상에서 불머리를 정밀 감지하고, 이를 기반으로 화재 확산 경로를 시뮬레이션하기 위한 AI 학습용 데이터 처리 방안을 제안한다. 연구는 총 3단계로 구성된다. 첫째, 산불 및 고층 건물 화재 관련 영상을 인터넷 등 다양한 온라인 매체에서 수집하여 동영상에서 프레임의 이미지를 추출한다. 둘째, 의미적 분할(semantic segmentation)을 활용한 화재 이미지의 정밀 어노테이션(annotation)작업을 수행한다. 셋째, 추출된 이미지를 Deblurring과 초점이동 등 데이터 증강 기법을 적용하여 데이터의 다양성과 품질을 확보하고, 그레이스케일(grayscale) 변환, Mask 변환 등 AI 학습용 이미지 데이터를 제작한다. 특히, DeblurGANv2 기반 Deblurring 기법과 CRF(Conditional Random Field) 기반 후처리 기술을 도입하여 화재 영상의 원시 이미지와 Mask 데이터의 품질을 향상 시킨다. 이를 통해 불머리 형상의 정밀 감지와 멀티클래스 Mask 데이터의 이원화 처리를 위한 기초 데이터를 구축하고자 하며, 궁극적으로는 정밀 어노테이션 기반의 지능형 화재 대응 모델 개발 및 상용화를 위한 최적의 학습 환경을 설계하는 데 기여하고자 한다. 본 연구는 대형 산불 및 특수환경화재 등의 대응체계 고도화 및 국가 재난 대응 기술 선진화에 기여할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Arbelaez, Pablo, et al. "Contour detection and hierarchical image segmentation." IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, (2011).

2. Roozbeh Mottaghi, Xianjie Chen, Xiaobai Liu, Nam-Gyu Cho, Seong-Whan Lee, Sanja Fidler, Raquel Urtasun, Alan Yuille. CVPR, (2014).

3. Choi, H. S., Jeon, M., Song, K., and Kang, M. Semantic fire segmentation model based on convolutional neural network for outdoor image. Fire Technol., 1-15, (2021).

4. Bochkov, V. S., and Kataeva, L. Y. WUUNET: Advanced fully convolutional neural network for multiclass fire segmentation. Symmetry, 13(1), 98, (2021).

5. Ghali, R., Akhloufi, M. A., Jmal, M., Souidene Mseddi, W., and Attia, R. Wildfire segmentation using deep vision transformers. Remote Sensing, 13(17), 3527, (2021).

감사의 글:

"본 연구는 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행되었으며, 대한민국 정부(산업통상자원부, 행정안전부, 과학기술정보통신부, 소방청, 과제명: 난접근성 화재 대응을 위한 가스하이드레이트 소화탄 및 화재 진압 기술개발, 과제번호: 2760000002, RS-2023-00255479)의 연구비 지원을 받았습니다."

PS4-3

차량용 소화탄 투척장치의 개발 현황

이병채[1], 최종원[1]
[1](주)에스엔

Current Development of a Vehicle-Mounted Fire Extinguisher Launcher

Byoung-Chae Lee[1], Jongwon Choi[1]
[1]SN Co., Ltd.

본 연구에서는 (주)에스엔에서 개발 중인 전자기식 발사기술 기반 차량용 소화탄 투척장치의 개발 현황을 소개한다. 본 장치는 차량에서 원거리 화재 진압을 가능하게 하여, 기존 소화 활동의 한계를 보완하고자 한다. 본 연구에서 개발의 최종 목표는 80m 이상의 투척 거리와 ±5m 이내의 투척 정확도를 확보하는 것이며, 미래에는 기술고도화를 통해 더 먼 거리에서 더 큰 용량의 소화탄을 다수, 반복적으로 투척할 수 있도록 한다.

현재 진행 중인 난접근성 화재 대응 과제 3차년도에서는 다중 소화탄 자동 공급(feeding) 시스템을 설계·제작하고 있으며, 조준 장치 및 통합 운영시스템을 병행 개발하여 장치의 편의성과 운용 효율성을 향상시키고 있다. 또한, 고출력의 특성상 투척 과정에서 순간적으로 발생하는 충격, 진동, 열 등을 시스템 내 모니터링 센서를 적용하여 발사 상태와 장치 이상 여부를 실시간으로 감시하고, 안전성과 신뢰성을 확보하고 있다.

본 연구를 통해 제안하는 차량용 소화탄 투척장치는 난접근성 화재 현장에서의 신속하고 효율적인 대응 수단으로 활용될 수 있으며, 향후 다양한 환경과 규모의 화재 진압 분야에 적용 가능성이 기대된다.

감사의 글:
"본 연구는 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479)의 지원을 받아 수행되었습니다."

PS4-4

가스하이드레이트 소화탄의 난접근성 화재 현장적용을 위한 매뉴얼 개발에 관한 연구

이규창, 구우회[2], 손혜정[2], 박상진[2], 조성준[1*]
(재)경남테크노파크, [1](재)경남테크노파크, [2](재)부산테크노파크

A Study on Developing Manual for Application of Gas-hydrate Extinguishing Agent to Inaccessible Fires

Kyuchang Lee, Woohoi Ku[2], Hyejeong Sohn[2], Sangjin Park[2], Sungjun Cho[1*]
Gyeongnam Technopark, [1]Gyeongnam Technopark, [2]Busan Technopark

대표적인 난접근성 화재인 초고층 빌딩 및 산불화재는 화재발생 시, 피해규모가 크고 2차 피해 발생 가능성이 높고 화재진압에 어려움이 많다. 초고층 건물 화재는 화재 하중의 증가, 화재 발생 인자의 다양화, 건물 높이 및 구조에 따른 급속 화재 확대, 건물 높이로 인한 화재진압 전술 제한, 복잡한 내부 구조로 인한 화점 파악 제한, 무창층 및 강화유리 사용으로 인한 배연의 제한, 비산물의 위험, 방수한 물이 하층으로 흘러 수손 피해 발생, 재실자 피난의 어려움 등으로 화재 진압이 어렵다. 대표적인 초고층 화재는 대연각 호텔 화재(1971년), 부산 해운대 우신골든스위트 화재(2010년), 울산 남구 아르누보르 아파트 화재 등이 있다. 산불화재는 연평균 약 550건 이상의 산불이 발생하여 6,500ha(여의도 면적의 22배)의 산림이 소실되고 있으며, 최근에는 기후변화 등의 원인으로 전 세계적으로 초대형 산불 발생 빈도는 연간 기하급수적으로 증가하고 있는 추세이다. 산불화재는 지형적 제약으로 인한 진압 장비 및 인력 접근의 어려움, 바람, 기후 등 자연 환경으로 인한 예측이 어려운 확산속도 및 방향, 수원지 부족 및 화재진압용 물 운반, 공급의 어려움, 야간진화의 어려움, 나무 및 낙엽 등 다양하고 불규칙한 연료 등의 이유로 화재 진압이 어렵다. 대표적인 산불화재는 고성(속초) 산불(2019년), 부산 아홉산 숲 산불(2022년), 경남 산청 산불(2025년) 등이 있다.

초고층 건물 및 산불화재와 같은 난접근성 화재는 복합적인 위험 요소를 지닌 특수화재로 체계적인 대응 전략 부재시 진압 효율성 저하, 진화 인력의 안전 위협, 피해규모의 확대로 직결되므로 각 화재 유형의 특성을 심층적으로 분석하고 이를 바탕으로 효율적인 화재 진압 방안, 인명 구조 및 대피 전략, 다수 유관 기관과의 협력체계를 포괄하는 표준화된 진압 매뉴얼 개발이 요구된다.

본 연구에서는 가스하이드레이트 소화탄을 적용한 난접근성 화재 대응 매뉴얼 개발을 진행하고 있으며, 이를 위해 부산지역의 초고층 건물 및 부산경남지역의 산을 대상으로 하여 기본현황, 주요설비, 및 재난진압 지휘체계 등을 분석하였고 시나리오 기반 초고층 빌딩 및 산불화재 대응 매뉴얼 초안을 개발하였다. 향후, 개발 중인 가스하이드레이트 소화탄 사양, 성능 등을 반영하여 표준화된 난접근성 화재 진압 매뉴얼을 개발할 계획이다.

참고문헌

1. Jung, K, O., Kim, D. J., “A Study on the Improvement of Safety Management by Analyzing the Current Status and Response System of Forest Fire Accidents,“ Journal of the Society of Disaster Information, 18(3), 457-469 (2022)
2. Kim, Y, S., Lee, Y. J., Chang, I. H., “An Impact Analysis and Prediction of Disaster on Forest Fire,“ Journal of the Chosun Natural Science, 13(1), 34-40 (2020)
3. Code of practice for fire precautions in buildings 1.4.99, (2022)
4. Korea Forest Service, ”2022 Forest Fire Statistics Book“, (2022)
5. Hyun, E, M., Ahn, K. H., Lee, J. E., Kim, Y. S., “Improvement of Standard by Analyzing Evacuation Plans of Domestic High-rise Buildings - Focused on Domestic and Foreign Buildings Laws and Case Analysis -,“ KIEAE Journal, 19(3), 53-62 (2019)
6. Choi, T. Y., "(A) study on the fire suppression & evacuation of high-rise buildings considering the characteristics of fire risk,“ Ph.D. Dissertation, University of Seoul, (2014).

감사의 글:

"본 연구는 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479)의 지원을 받아 수행되었습니다."

PS4-5

Experimental study on the CF_3I gas hydrate as potential clean fire extinguishing agent

Jonghwan Lee[1], Yebom Shin[1], Seung Uk Hwang[1], Sang-Gyu Cho[1,2], Ju Dong Lee[2], and Jeong-Hoon Sa[1 *]

Department of Chemical Engineering (BK21 FOUR), Dong-A University, Busan, Republic of Korea

[2]Offshore Plant Resources R&D Center, Korea Institute of Industrial Technology, Busan, Republic of Korea

Gas hydrate-based fire extinguishing agents offer an environmentally friendly solution capable of simultaneously cooling and extinguishing fires. This study focuses on CF_3I, a promising clean agent with a low global warming potential (GWP ≈ 0.4) [1], significantly lower than that of CO_2 (GWP = 1), and zero ozone depletion potential (ODP ≈ 0). With a low minimum extinguishing concentration of 2.9%, CF_3I enables effective fire suppression using minimal gas. We investigated the potential of CF_3I hydrate as a clean suppressant. Thermodynamic measurements showed that CF_3I hydrate forms under mild conditions (279.35 K, atmospheric pressure). Although pure CF_3I hydrate showed a relatively low formation rate (~20% conversion), the addition of kinetic promoters such as L-tryptophan and SDS significantly enhanced the conversion to nearly 100%. XRD confirmed the formation of structure II hydrate, and in-situ Raman spectroscopy indicated CF_3I encapsulation in the large cages. Lab-scale flame tests demonstrated that CF_3I hydrate extinguished flames more rapidly than ice and HFC-125 hydrates and showed potential to prevent re-ignition, a key limitation of conventional ammonium phosphate suppressants. These results suggest that CF_3I hydrate can be easily stored and used as an efficient, clean fire suppression agent.

References

1. Jae-Duck Kim, Jong-Sung Lim, Youn-Woo Lee, and Youn-Yong Lee., T. of Korean Institute of Fire Sci & Eng. Vol. 15, No. 1, (2001)

감사의 글

본 연구는 한국연구재단(RS-2023-00280519), 한국기초과학지원연구원(RS-2024-00404896), 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479), 교육부, 부산광역시, 부산형 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 지원을 받아 수행되었습니다.

PS4-6

Thermodynamic study of HFC-125 + CO_2 mixed hydrate for high-efficiency fire extinguishing applications

Yebom Shin, Jonghwan Lee, Jeong-Hoon Sa*

Department of Chemical Engineering (BK21 FOUR), Dong-A University, Busan, Republic of Korea

Clathrate hydrates are solid crystalline structures composed of hydrogen-bonded water molecules that encage guest gases. When hydrates contain fire extinguishing gas as guest molecules, they offeran eco-friendly method for fire suppression by cooling and displacing oxygen. HFC-125 is a promising fire suppressant due to its low extinguishing concentration and negligible ozone depletion potential (ODP). However, HFC-125 occupies only the large cages of structure II (sII) hydrates, leaving the small cages empty and reducing overall storage efficiency. In this study, thermodynamic phase equilibrium experiments were conducted on HFC-125 + CO_2 mixed gas hydrates to investigate the occupancy of CO_2 in the small cages of the sII structure. Dissociation enthalpies were determined using the Clausius–Clapeyron equation, and structural characterization was performed using powder X-ray diffraction (PXRD). PXRD results confirmed the preservation of the sII lattice structure and demonstrated enhanced cage occupancy without structural transformation. The present findings support the potential of HFC-125 + CO_2 mixed hydrates as high-efficiency fire extinguishing agents, combining improved gas storage capacity with environmental sustainability.

References

1. Han, J., Lee, J., Burla, S.-K., Chung, S., and Lee, J.-D., “Exploring the Potential of HFC-125a Hydrate or Innovative Fire Suppression: A Gas Hydrate Technology Approach” Energy Fuels 38, 6238-6250 (2024).

2. Choi, W., Lee, Y., Mok, J., Lee, S., Lee, J.-D., Seo, Y., “Thermodynamic and kinetic influences of NaCl on HFC-125a hydrates and their significance in gas hydrate-based desalination” Chemical Engineering Journal 358, 598-605 (2019).

감사의 글:

“본 연구는 한국연구재단(RS-2023-00280519), 한국기초과학지원연구원(RS-2024-00404896), 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479), 교육부, 부산광역시, 부산형 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 지원을 받아 수행되었습니다.”

PS4-7

니트로셀룰로스로 캡슐화된 $Al/Bi_2O_3/NaN_3$ 기반 고에너지 복합체 분말의 점화, 연소 및 가스발생 특성

김호성[1], 차정근[1], 바시르 압둘[2], 런치파[2], 김수형[1,2,3*]
[1]부산대학교 에너지융합기술연구소, [2]부산대학교 나노융합기술학과, [3]부산대학교 나노에너지공학과

Ignition, Combustion, and Gas Generation Characteristics of $Al/Bi_2O_3/NaN_3$-Based Energetic Composite Powders Encapsulated with Nitrocellulose Polymer

Ho Sung Kim[1], Jung Gun Cha[1], Abdul Basyir[2], Qifa Ren[2], Soo Hyung Kim[1,2,3*]
[1]Research Center of Energy Convergence Technology, Pusan National University
[2]Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University,
[3]Department of Nanoenergy Engineering, Pusan National University

본 연구에서는 금속 연료로써 알루미늄(Al) 나노입자, 산화제로써 산화 비스무트(Bi_2O_3) 나노입자, 그리고 가스 발생제로서 아지드화나트륨(NaN_3)을 사용하여 고에너지 복합체 분말을 합성하였다. 에어로졸 분무건조 공정을 통해 $Al/Bi_2O_3/NaN_3$ 고에너지 복합체는 니트로셀룰로스(Nitrocellulose, NC) 기반의 폴리머로 캡슐화 코팅되었다. 제조된 NC 캡슐화된 $Al/Bi_2O_3/NaN_3$ 복합체는 다양한 분석 방법을 통하여 물리적, 화학적, 열적 특성을 측정 및 평가하였다. 특히, NC 캡슐화가 $Al/Bi_2O_3/NaN_3$ 복합체의 기계적 충격, 마찰, 정전기 방전에 대한 민감도 저감 효과에 미치는 영향을 분석하였으며, 장시간 공기 노출에 따른 노화 특성도 평가하였다. 그 결과, 캡슐화된 고에너지 복합체는 취급 및 저장 안정성이 매우 우수함을 확인할 수 있었다. 최종적으로 제조된 $NC/Al/Bi_2O_3/NaN_3$ 기반 고에너지 복합체 분말의 응용가능성을 확인하기 위해 소화약제(제1인산암모늄, $NH_4H_2PO_4$)가 충진된 구형의 투척식 소화탄 내부에 $NC/Al/Bi_2O_3/NaN_3$ 기반 고에너지 복합체 분말을 주입하고 화재 상황에서의 소화 성능을 평가하였다. 화재 진화 시험 결과 고에너지 복합체는 점화 시 폭발하면서 빠르게 고압과 다량의 가스를 생성하였고, 이로 인해 고에너지 복합체를 감싸고 있던 건조분말 소화약제가 효과적으로 비산됨을 관찰할 수 있었다. 그 결과 화염이 빠르고 효과적으로 진화되엇으며, 이는 실제 화재 진압 응용 등에 충분히 활용 가능할 것으로 보인다.

PS4-8

Surface-Modified Flowable HFC-125a Gas Hydrate Powders with Improved Dispersibility

Kyubeom Lee[1], Eun-Hye Jang[1], Yujeong Jeong[1], and Sungwook Chung[1*]

[1]School of Chemical Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Republic of Korea

([*]Email address: sungwook.chung@pusan.ac.kr)

Gas hydrates are crystalline inclusion compounds in which low-molecular-weight gases are encapsulated within hydrogen-bonded water cages under high-pressure, low-temperature conditions. Beyond their established roles in gas storage, transportation, and CO_2 sequestration, recent studies have identified their potential as eco-friendly fire suppression media. In particular, HFC-125a (CF_3CHF_2) hydrates can encapsulate 50–120 times their gas volume, enabling rapid heat absorption during dissociation and swift gas release to extinguish flames and prevent re-ignition.

However, residual surface moisture and interparticle friction often lead to agglomeration, compromising powder flowability and limiting dispersion efficiency—key factors for extinguisher and grenade-type applications. In this study, we investigated surface modification of HFC-125a hydrate powders using selected additives to inhibit agglomeration, enhance particle dispersibility, and maintain a fine, flowable form. Particle morphology, flowability, and dispersion characteristics were systematically analyzed. The results demonstrate that surface-modified HFC-125a hydrates exhibit superior dispersion and improved fire suppression performance compared to untreated powders, highlighting their potential as next-generation, flowable gas hydrate extinguishing agents.

References

1. Han, J., Lee, J., Burla, S. K., Chung, S., Lee, J., “Exploring the potential of HFC-125a hydrate for innovative fire suppression: A gas hydrate technology approach”, *ACS Energy Fuels*, **38**, 6238-6250 (2024).

감사의 글:

"본 연구는 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479)의 지원을 받아 수행되었습니다."

PS4-9

Molecular Dynamics Underlying the Regulation of a Gas Hydrate by Amylose

Jaeyoung Kim, Kiduk Kim and Joonkyung Jang*

Department of Nanoenergy Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

When mixed with a gas under a high pressure, a liquid water forms crystalline cavities that can host gas molecules [1,2]. The resulting gas hydrate can be an important energy resource but also causes a blockage of a pipeline in the ocean [3,4]. Given regulation of a gas hydrate is often desired, starch has been considered as a biodegradable inhibitor of a gas hydrate [5-7]. The molecular mechanism behind the regulation is not fully understood currently. By using all-atom molecular dynamics simulation, we examine whether and how an amylose (main component of starch additive regulates a methane hydrate at the molecule level. The amylose additive regulates a methane hydrate through the hydrogen bonds with a nucleating seed of hydrate.

References

1. Sloan, Jr. ED., “Fundamental principles and applications of natural gas hydrates”, *Nat.,* **426**(6964), 353-59 (2003).
2. Sloan, Jr. ED., Koh, CA., “Clathrate hydrates of natural gases”, CRC press, (2007).
3. Kelland, MA., “History of the development of low dosage hydrate inhibitors”, *Energ. Fuels*, **20**(3), 825-47 (2006).
4. Hammersch midt E. “Formation of gas hydrates in natural gas transmission lines”. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **26**(8), 851-55, (1934).
5. Lee JD, Wu H, Englezos P. “Cationic starches as gas hydrate kinetic inhibitors”. *Chem. Eng. Sci.*, **62**(23), 6548-55, (2007).
6. Talaghat MR. Enhancement of the performance of modified starch as a kinetic hydrate inhibitor in the presence of polyoxides for simple gas hydrate formation in a flow mini-loop apparatus. *J. Nat. Gas Sci. Eng.,* **18**, 7-12 (2014).
7. Babakhani SM, Alamdari A. Effect of maize starch on methane hydrate formation/dissociation rates and stability. *J. of Nat. Gas Sci. & Eng.*, **26,** 1-5, (2015).

PS4-10

Gas Hydrate Nucleation Mechanism Study by Molecular Dynamics and Forward Flux Sampling

Kiduk Kim, Jaeyoung Kim and Joonkyung Jang*

Department of Nanoenergy Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

Gas hydrates, crystalline structures composed of gas molecules encaged within hydrogen-bonded water networks, represent a transformative energy resource with significant potential for gas storage, transportation, and carbon sequestration technologies. Understanding the formation of the different hydrate polymorphs, required for improved control of crystallization, is hampered by limited experimental resolution [1]. The molecular-level mechanisms governing hydrate nucleation remain poorly understood due to the rare event and complex multi-step processes involved in crystal formation. This study employs forward flux sampling (FFS) methodology[2] to systematically investigate the nucleation pathways of gas hydrates under various thermodynamic conditions. Integration of effective order parameters with FFS allows explicitly computing hydrate nucleation rates and obtaining an ensemble of nucleation trajectories under conditions where spontaneous hydrate nucleation becomes too slow to occur in direct simulation[3]. Our approach overcomes the limitations of direct molecular dynamics by generating large ensembles of unbiased nucleation trajectories, enabling comprehensive analysis of competing formation mechanisms.

References

1. Arjun; Berendsen, T. A.; Bolhuis, P. G. Unbiased Atomistic Insight in the Competing Nucleation Mechanisms of Methane Hydrates. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 116(39), 19305–19310 (2019).
2. Allen, R. J.; Frenkel, D.; Wolde, P. R. ten. Simulating Rare Events in Equilibrium or Nonequilibrium Stochastic Systems. *J. Chem. Phys.*, 124(2), 024102 (2006).
3. Bi, Y.; Li, T. Probing Methane Hydrate Nucleation through the Forward Flux Sampling Method. J. *Phys. Chem. B*, 118(47), 13324–13332 (2014).

PS4-11

고기능성 Gas Hydrate 소화약제 생산, 저장, 수송시스템의 IoT기반 실시간 원격관리 시스템에 관한 연구

이창우, 안영준
주식회사 유니온 기술연구소 연구소장, 선임연구원

A Study on IoT-based real-time remote management system for high-functionality gas hydrate extinguishing agent production, storage, and transportation system

Chang Woo Lee, Young Jun Ahn
R&D Department of UNION Co., Ltd.

지구온난화가 가속됨에 따라 세계 곳곳에서 이상기후와 이로 인한 환경재난이 발생하고 있다. 산불화재의 발생과 대형화, 장기화가 큰 문제가 되고 있고 도시의 고층빌딩, 전기차와 ESS 설비의 화재, 대형선박과 해양플랜트에서 발생하는 화재와 같이 접근하기 힘들고 빠른 시간내에 소화하기 힘든 상황들이 많이 발생하고 있다. 이러한 상황에 대응하기 위하여 2023년부터 국가 주도로 “난접근성 화재 대응을 위한 가스하이드레이트 소화탄 및 화재 진압 기술 개발”이 진행되고 있으며 2027년까지 개발기술을 완료하고 현장에 적용할 계획이다. 현재 많이 사용되고 있는 할로겐화합물 소화약제는 소화력은 우수하나 오존층 파괴, 지구온난화 등의 환경문제로 몬트리올 의정서에 의해 생산 및 사용을 중단하고 있다. 그러나, 청정소화약제라고 할 수 있는 HFC 계열의 소화약제를 일정한 압력과 온도를 가함으로써 가스하이드레이트 형상으로 소화가스를 압축하여 고기능성의 소화약제로 만들고 이를 소화탄으로 개발하는 것은 매우 효과적인 개발 방식으로 평가된다. 선행연구 결과에 따르면, HFC-23 Hydrate, HFC-125 Hydrate, HFC-134a Hydrates는 대기압 또는 1~2기압, 0~5℃의 조건에서 청정소화가스를 하이드레이트로 압축 고형화하여 보관이 가능하다.
본 과제에서는 대기압 및 상온 1℃에서 하이드레이트 형상을 유지하는 HFC-134a Hydrate 펠릿을 생산하는 과정과 이를 저장하고 소화탄의 제작공장까지 수송할 때 소화약제의 상태가 안전하게 유지되는지를 원격으로 모니터링하는 시스템을 연구하였다. 가스하이드레이트 소화약제는 압력과 온도관리가 잠시라도 실패하게 되면 소화약제로써의 성능이 70% 이상 감소하기 때문에 생산, 저장, 수송 단계에서의 온도, 압력의 실시간 모니터링이 중요하다. 본 연구에서는 가스하이드레이트 소화약제 생산, 저장, 수송의 전 단계를 원격으로 실시간 모니터링하는 IoT 기반의 온도, 압력, GPS, 통신모듈 센서를 개발하였다. 낮은 주파수를 사용하여 전파 도달 거리가 길어 산악 지역에서도 넓은 지역을 커버할 수 있는 3G 통신모듈을 적용하였고 Wifi 모듈을 추가 부착하여 5G, 6G, 저궤도 위성 통신 중계기와 연동할 수 있게 개발하였다. 또한, 실시간으로 모니터링되는 데이터를 호스팅웹과 클라우드서버를 통해 기록 보관될 수 있도록 UI 개발과 백업용 UPS 적용 데이터 서버 시스템을 구축하였다.

사 사
본 연구는 다부처공동사업(산업통상자원부, 소방청, 과학기술정보통신부, 행정안전부) “난접근성 화재 대응을 위한 가스하이드레이트 소화탄 및 화재 진압 기술 개발”의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다(과제번호:RS-2023-00255479).

PS4-12

HFC-125a 가스하이드레이트 소화탄 저장설비 구축에 관한 연구

이진우[1], 서성덕[2], 전창수[2], 정재욱[1], 이주동[2,*]
[1]카토즈(주) 연구소, [2]한국생산기술연구원 해양플랜트기자재R&D센터
(*E-mail address : julee@kitech.re.kr)

가스 하이드레이트는 수소결합으로 형성된 물 분자 격자에 가스 분자가 충진된 높은 압력과 물의 어는점보다 높은 온도에서 형성되는 결정체로써, 할로겐가스를 포함한 가스 하이드레이트는 화재 진압용 소화약제로 사용할 경우 여러 가지 장점이 있음을 여러 실험을 통해 확인할 수 있었다. 가스하이드레이트 내 객체 분자로 저장된 할로겐가스는 가스하이드레이트가 해리되면서 열을 흡수하므로 뛰어난 냉각 효과를 발휘하였고, 가스 형태의 소화 방식과 비교하였을 때 바람이나 주변 환경의 영향을 적게 받으며 화재를 진압할 수 있었으며, 분해 과정에서 상대적으로 오랜 시간 할로겐가스가 방출되므로 재발화 방지와 장기적인 소화 효과를 얻을 수 있었다. 이렇게 할로겐가스로 채워진 가스하이드레이트 소화약제를 알맞은 때와 장소에 활용하기 위해서는 적절한 저장설비가 필수적인데 가스하이드레이트는 구조를 유지한 채로 존재하기 위해서는 높은 압력과 낮은 온도 조건이 필요하기 때문이며, 객체 가스로 사용된 펜타플루오로에탄(HFC-125a)의 경우 상대적으로 낮은 압력 조건에서 형성되어 −10℃의 조건에서도 가압하지 않고 장기간 보관할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 오존층을 파괴하지 않는 할로겐가스인 HFC-125a가 채워진 가스하이드레이트의 수송 및 보관 설비를 구축하기 위해 다양한 열유체 해석 결과를 얻었으며, 이동식 & 고정식 저장장치 제작에 따른 구성요소를 검토하여 화재 진압에 활용할 수 있는 시스템을 구축하고자 하였다.

References

1. Sloan, E. D., Koh, C. A., Clathrate hydrates of natural gases. CRC press, (2007)
2. Ripmeester, J. A., Davidson, D. W., “Some New Clathrate Hydrates. *Molecular Crystals and Liquid Crystals,* 43(3-4), 189-195, (1977)
3. Truong-Lam, H. S., Seo, S. D., Jeon, C., Lee, G.-p., Lee, J. D., “A gas hydrate process for high-salinity water and wastewater purification.” *Desalination,* 529, 115651, (2022)
4. Wang, Y., Zou, G., Liu, C., Gao, Y., “Comparison of fire extinguishing performance of four halon substitutes and Halon 1301”, *J. Fire Sci.*, 39(5), 370-399, (2021)
5. Burla, S. K.; Pinnelli, P. S. R., “Experimental evidence on the prolonged stability of CO_2 hydrates in the self-preservation region.” *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering,* 7, 100335, (2023)
6. Han, J.; Lee, J., Burla, S. K., Chung, S., Lee, J. D., “Exploring the Potential of HFC-125a Hydrate for Innovative Fire Suppression: A Gas Hydrate Technology Approach”, *Energy Fuels,* 38(7), 6238−6250 (2024)
7. Burla, S. K., Han, J., Seo, S. D., Cho, S. G., Hong, S., Lee, J., Jeon, C., Sharma, S. K., Lee, J. D., “Gas Hydrate Fire Extinguishers: A Novel Approach for Class B Fire Suppression” *Energy Fuels,* 39(30), 14738−14751 (2025)

Acknowledgement
"본 연구는 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479)의 지원을 받아 수행되었습니다.“

PS4-13

환경에 따른 가스 하이드레이트 소화탄 낙하 특성분석

남현우[1], 박경필[2], 조성민[1]*
[1]한국과학기술원, [2]연세대학교

Analysis of Environment-Dependent Drop Dynamics of Gas-Hydrate Grenades

Hyeon Woo Nam[1], Gyeong Phil Park[2], Sung Min Jo[1]*
[1]Korea Advanced Institute of Science and Technology, [2]Yonsei University

본 연구에서는 OpenFOAM의 비정렬 중첩 격자 기능과 6자유도(6-DOF) 운동 라이브러리를 활용하여 소화탄의 자유낙하 거동을 수치적으로 해석하였다 [1]. 최근 산불과 같은 난접근성 화재의 증가로 인해 공중 투하가 가능한 소화탄에 대한 관심이 높아지고 있으며, 성공적인 임무 수행을 위해서는 낙하 위치와 자세 안정성 확보가 필수적이다. 본 연구의 목적은 측풍 환경에서 소화탄의 형상별 낙하 특성과 안정성을 정량적으로 평가하고, 이를 통해 형상 개선의 효과를 규명하는 것이다. 이를 위해, 물체 거동에 따른 격자 재생성 없이 격자계 간 상대 운동을 모사할 수 있는 중첩 격자 기법과 강체의 6자유도 운동 해석을 적용하여 실제 낙하 거동을 재현하였다. OpenFOAM v2306의 overSimpleFoam을 사용하여 3차원 중첩 격자의 비압축성 정상 유동 초기 해를 계산하고, overPimpleDyMFoam을 통해 자유낙하 시 소화탄의 6자유도 운동과 비압축성 과도 해석을 수행하였다. 계산에는 k-ω SST 난류모델을 적용하였으며, 초기 고도 100 m 조건에서의 대기 밀도와 점도를 반영하였다. 이러한 수치해석을 통해 측풍 속도 5 m/s 및 10 m/s 조건에서 기본 형상과 개선 형상의 공력 특성, 낙하 위치 및 자세 변화를 비교·분석하였다. 본 연구를 통해 소화탄의 공력 특성을 반영한 안정적이고 정밀한 투하 전략에 기여할 수 있을 것이다.

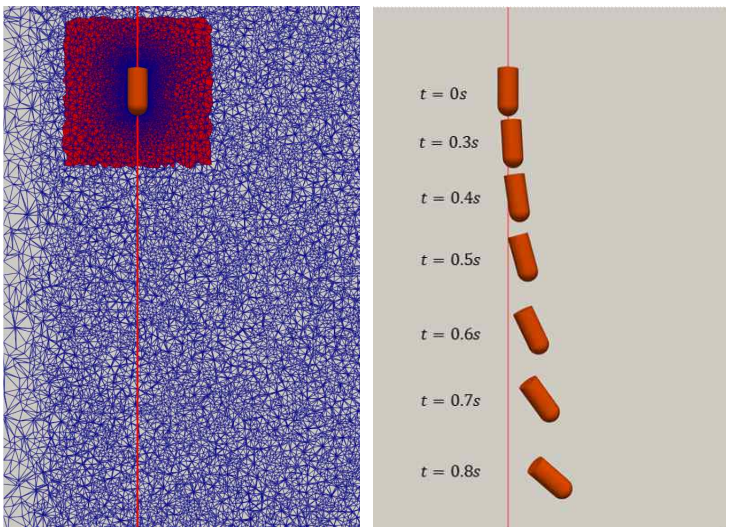


Fig. 1 (a) Overset mesh configuration (b) 6-DOF simulation results (Basic geometry)

참고문헌

1. Weller, H., G., Tabor, G., Jasak, H., and Fureby, C., A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques, Computers in Physics, 12(6), 620-631 (1998).

PS4-14

Parameter Optimization of DenseCRF for Fire Semantic Segmentation: A Comparative Analysis of Preprocessing and Postprocessing Strategies

Jeonghwan Kim[1], Jeong Kyu Kim[2], Tae-Eung Sung[3], Jongseok Kang[4,*]

[1]Division of Data Analysis, Busan-Ulsan-Gyeongnam Branch, Korea Institute of Science and Technology Information, Busan, 48059, Republic of Korea, [2]Department of Computer Science, Yonsei University, Wonju 26493, Republic of Korea, [3]Division of Software, Yonsei University, Wonju 26493, Republic of Korea, [4]Division of Data Analysis, Korea Institute of Science and Technology Information, Seoul, 02456, Republic of Korea

([*]Email address: jeonghwankim@kisti.re.kr)

The purpose of this study is to derive optimal DenseCRF parameters for binary masks used in fire semantic segmentation and analyze their effects. To achieve this, the following methodology is applied. First, key DenseCRF parameters, including unary potential, pairwise Gaussian, and bilateral pairwise terms, are systematically tuned and evaluated under conditions relevant to a fire estimate/response system for wildfire. Second, four scenarios combining the presence or absence of DenseCRF preprocessing and postprocessing are established for U-Net training, and the quality of predictions in each scenario is compared. Through these experiments, the study aims to provide quantitative and qualitative insights into the effectiveness of DenseCRF preprocessing and postprocessing for improving fire segmentation accuracy.

Acknowledgement

This work was supported by the Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology and funded by the Korean government (Ministry of Trade, Industry, and Energy, Ministry of Science and ICT, Ministry of the Interior and Safety, National Fire Agency, Project Title: Development of gas hydrate extinguishing agent and fire suppression technology for inaccessible fires, Project Number: 2760000036).

References

1. Krähenbühl, P., Koltun, V., 2011. Efficient inference in fully connected CRFs with Gaussian edge potentials, in: Adv. Neural Inf. Process. Syst. 24, Granada, Spain, 109–117. https://arxiv.org/abs/1210.5644. (Accessed Jul 27, 2025).
2. B. Lee, N. Yamanakkanavar, and J. Y. Choi, "Automatic segmentation of brain MRI using a novel patch-wise U-net deep architecture," PLoS One, vol. 15, no. 8, p. e0236493, 2020. [Online] Available: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236493

PS4-15

난접근성 화재진압용 소화가스 기반 가스하이드레이트 소화약제의 개발 및 화재 진압 실험

조상규[1,2], 홍소희[1,3], 서성덕[1], Burla Sai Kiran[1], Subhash Kumar Sharma[1], 전창수[1], 이주동[1*]
한국생산기술연구원 해양플랜트기자재R&D센터[1], 동아대학교[2], 부경대학교[3]

고층 건물 화재, 터널 화재, 산불 등과 같이 접근이 어려운 환경에서 발생하는 대형 화재는 점차 빈도와 피해 규모가 증가하고 있다. 이러한 난접근성 화재에 효과적으로 대응하기 위해서는, 기존 소화 방식의 한계를 극복할 수 있는 새로운 소화 기술이 필요하다.

본 연구에서는 가스하이드레이트를 이용한 신규 소화약제 개발에 주목하였다. 특히, HFC-125와 같은 소화가스를 기반으로 형성된 하이드레이트는 비교적 낮은 압력에서도 안정적으로 생성되며, 물과 소화가스를 고체 상태로 안전하게 저장할 수 있는 장점을 가진다. 하이드레이트는 열에 의해 분해되면서 소화가스와 물을 동시에 방출하고, 주변의 열을 흡수하여 소화에 유리한 환경을 조성한다.

이를 기반으로, 본 연구에서는 HFC-125 하이드레이트를 이용한 실제 화재 진압 실험을 수행하였다. 실험 결과, 고온 조건에서도 하이드레이트가 효과적으로 분해되며, 소화가스의 방출과 수분의 냉각 효과가 함께 작용하여 신속하고 안정적인 화재 진압 성능을 확인할 수 있었다.

본 연구는 하이드레이트 기반 소화약제의 실효성과 응용 가능성을 실험적으로 입증한 사례로서, 향후 드론이나 발사형 장비와의 융합을 통해 난접근성 화재 대응 기술로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

사사의 글
본 연구는 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479)와 한국생산기술연구원(해수담수/수전해를 이용한 그린수소 생산시스템 및 핵심부품 개발, 과제번호: JA250004)의 지원으로 수행되었습니다.

특별세션(V): 가스하이드레이트 응용 및 청정기술

(포스터발표 II)

2025년 9월 25일(목) 13:00~15:00
휘닉스 아일랜드 제주 B동 2층 로비

PS5-1

Scalable Continuous Hydrate System for Natural Gas Storage and Transportation

Chan Hyoung Lee, Kan Jeenmuang, Sai Kiran Burla[1], Sang-Gyu Cho[1],
Ju Dong Lee[1*], and Praveen Linga[*]
Department of Chemical and Biomolecular Engineering National University of Singapore
[1*]Offshore Plant Resources R&D Center Korea Institute of Industrial Technology

Abstract:

Solidified natural gas (SNG), derived from gas hydrates, offers a promising alternative to conventional natural gas logistics methods, enabling safer and more energy-efficient transportation and storage. However, large-scale commercial implementation remains limited by technical barriers in continuous processing, which includes hydrate formation, depressurizing, dewatering, pelleting, and storage. By integrating key SNG processing steps into a single workflow, this study introduces a scalable continuous reactor system for the production and pelletization of sII hydrates in the presence of 1,3-dioxolane (DIOX) as a dual function promoter. The reactor adopts a low-conversion slurry-state hydrate strategy for continuous transfer to the pelletizer without depressurization, producing high-capacity gas storage hydrate pellets under moderate operating conditions. Methane hydrate formation was successfully achieved under the lowest-ever driving force of 281.2 K and 1.5 MPa (ΔP = 0.7 MPa and ΔT = 3.6 K), with a CH_4 uptake reaching 2.59 v/v within 10 minutes, sufficient to initiate pelletization and form compact pellets with a gas storage capacity of 65.47 v/v. Twelve pellets were produced within 165 minutes, averaging 13.75 minutes per pellet, corresponding to a projected production rate of 3 kg/day. The pellets collectively stored 16.97 g of CH_4, yielding a methane storage capacity of 0.15 kg/day with the present experimental setup. Pelletizing pressure was found to positively influence both gas uptake and density, with a linear correlation observed. Raman spectroscopy confirmed CH_4 occupancy in the small cages and DIOX in large cages of the sII hydrate structure. This continuous hydrate production and pelletization system demonstrates strong potential for pilot-scale deployment, representing a significant advancement in SNG technology for natural gas storage.

PS5-2

Exploring Phase Behavior of CO_2 Hydrates under Simulated Deep-Sea Conditions with Steel Slag Additives for Marine Sequestration

Jiseong Lee, Siyoon Jeong and Jeonghoon Sa *

Department of Chemical Engineering, Dong-A University, South Korea

<Instructions for abstract>

Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) has emerged as a key strategy in long-term carbon mitigation efforts. Among the various approaches, the sequestration of CO_2 in the form of clathrate hydrates under deep-sea conditions has attracted considerable attention due to the thermodynamic stability of hydrates at high pressures and low temperatures. However, incomplete hydrate formation under certain environmental conditions may result in the unintended release of CO_2 back into the ocean or atmosphere.

To address this issue, this study conducted phase equilibrium measurements of CO_2 hydrates under conditions simulating the deep-sea environment. Four different aqueous media were investigated: deionized water, NaCl solution (3.407 wt%), deep seawater sampled from 2,000 meters in the East Sea, and artificial seawater formulated according to ASTM D1141-98 standards.

Additionally, to evaluate the potential of steel slag as a hydrate nucleation promoter, experiments were performed by incorporating 1 wt% and 10 wt% of steel slag into artificial seawater. The effects of slag addition on the hydrate phase boundary and formation behavior were systematically analyzed.

The findings of this research offer insights into both the stability and formation kinetics of CO_2 hydrates in marine environments, and contribute foundational knowledge for enhancing the safety and effectiveness of future deep-sea carbon storage technologies.

References

1. Liu, T., Liu, Y., Li, X., Li, Y., Wang, S., and Li, X., *Energy Fuels*, **36**, 7321–7336 (2022).
2. Wang, P., Liu, Y., Zhang, Z., Zhao, J., and Song, Y., *Energy Technology*, **9**, 2100004 (2021).

감사의 글:

"본 연구는 한국연구재단(RS-2023-00280519), 한국기초과학지원연구원(RS-2024-00404896), 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479), 교육부, 부산광역시, 부산형 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 지원을 받아 수행되었습니다."

PS5-3

Magnetic and thermo-responsive imidazolium-based ionic liquids as kinetic promoters for gas hydrate formation

Jonghwan Lee, Yeonsu Cho, Hyo Kang and Jeong-Hoon Sa*

Department of Chemical Engineering (BK21 FOUR), Dong-A University, Busan, Republic of Korea

The role of ionic liquids (ILs) in gas hydrate formation depends on their cations and anions. Here, we synthesized imidazolium-based ILs with varying alkyl chain lengths of cations ($[C_4MIM]^+$, $[C_8MIM]^+$, $[C_{12}MIM]^+$) and different anions ($[Cl]^-$ or $[FeCl_4]^-$) to systematically investigate their effects on CH4 hydrate formation. Among the tested samples, $[C_{12}MIM][FeCl_4]$ greatly enhanced both the nucleation and growth of CH_4 hydrate formation, with the growth rate during the initial 1 h being 6 times faster compared to the system with no additives. Visual observations and contact angle data indicated that ionic liquids containing $[C_{12}MIM]^+$ cation act like surfactants. Additionally, in situ Raman spectroscopy was employed to analyze the effect of ionic liquids on the hydrogen bond network of water molecules in the aqueous phase. It was observed that the presence of $[Cl]^-$ weakens the hydrogen bond network, whereas $[FeCl_4]^-$ strengthens it, facilitating the rearrangement of water molecules in a manner favorable for hydrate formation. The $[C_nMIM][FeCl_4]$ used in hydrate formation can be readily recovered by phase separation upon heating above the lower critical solution temperature. The recovered samples were characterized using the FT-NMR and UV-Vis spectroscopy. The use of recoverable ILs would have potential to be used for hydrate-based applications with enhanced hydrate formation kinetics.

PS5-4

Synergistic Effects of Silica Nanoparticles and Span 80 on Hydrate Dispersion in Multiphase Flow Systems

Suhyeon Son, Jeong-Hoon Sa*

Department of Chemical Engineering (BK21 FOUR), Dong-A University

In oil and gas production systems, gas hydrates can form under high-pressure and low-temperature conditions when sufficient water is present in multiphase pipelines. If not properly managed, these hydrates may lead to severe flow assurance issues such as pipeline blockages. This study investigates the impact of adding silica nanoparticles to Span 80, a widely used anti-agglomerant, to enhance hydrate dispersion and transportability under multiphase flow conditions. Hydrate formation was simulated in a rock-flow cell using synthetic natural gas and a water–mineral oil emulsion. Internal hydrate morphology was analyzed through camera-based imaging, and a flow risk index was quantified. To elucidate the underlying mechanisms of improved anti-agglomeration performance, microscopic analysis, dynamic light scattering (DLS), and rheological measurements were conducted. Additionally, hydrate inhibition performance was assessed by measuring water conversion and gas uptake. These findings provide valuable insights into the design of more effective anti-agglomerant systems for flow assurance in subsea production environments.

PS5-5

Synthesis of Clathrate-Silica gel Composite for Enhanced Formation Kinetics and Storage Capacity

Siyoon Jeong, Jiseong Lee, Jeong-Hoon Sa*
Department of Chemical Engineering (BK21 FOUR), Dong-A University, Busan, Republic of Korea

Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technology offers a sustainable pathway for mitigating atmospheric CO_2 emissions. In this study, we investigated the synthesis of CO_2 clathrate hydrate–silica composites for carbon dioxide ocean storage. Mesoporous silica gel was employed as a porous medium to promote rapid hydrate formation and improve storage capacity. The use of nano-sized pores significantly increased the gas–liquid interfacial area, facilitating faster clathrate hydrate formation. To optimize the synthesis process, key parameters such as particle size, pore diameter, water saturation level, promoter concentration, and temperature–pressure conditions were systematically varied. The effect of eco-friendly kinetic promoters including L-tryptophan and L-methionine was examined at different concentrations (100–1500 ppm) to assess their impact on hydrate formation kinetics. Additionally, the effect of water saturation levels ranging from 60% to 210% was investigated. Experimental results revealed that the use of silica gel with smaller particle size and larger pore diameter can better improve CO_2 uptake and hydrate conversion. Water saturation levels of 80% and 120% were found to be superior in terms of storage capacity. In addition, the use of higher concentrations of L-tryptophan and L-methionine effectively promoted hydrate formation, particularly at under-saturated conditions. These findings provide design insights for improving hydrate formation efficiency and storage capacity.

참고문헌

1. Kang et al., “Phase Behavior of CO_2 and CH_4 Hydrate in Porous Media”, Engineering and Technology., 9, 183-188 (2007).

감사의 글:

“본 연구는 한국연구재단(RS-2023-00280519, RS-2024-00465859), 한국기초과학지원연구원(RS-2024-00404896), 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479), 교육부, 부산광역시, 부산형 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 지원을 받아 수행되었습니다.”

PS5-6

NaCl-governed guest selectivity in $CH_4 + CO_2$ hydrates: Thermodynamic and kinetic insights for hydrate-based CO_2 sequestration

Sungwoo Kim[1], Minseo Park[2], Junghoon Mok[3], and Yongwon Seo[1,2,*]

[1]*Department of Civil, Urban, Earth, and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 44919, Republic of Korea*

[2]*Graduate School of Carbon Neutrality, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 44919, Republic of Korea*

[3]*Department of Civil and Energy System Engineering, Kyonggi University, Suwon-si, Gyeonggi-do 16227, Republic of Korea*

While replacing CH_4 with CO_2 in natural gas hydrates enables simultaneous carbon storage and energy recovery, the process may be accompanied by secondary hydrate formation during guest replacement in marine sediments. The presence of NaCl in marine environments can alter guest inclusion behavior during hydrate formation compared to systems with pure water. In this study, to elucidate NaCl-governed guest selectivity in $CH_4 + CO_2$ hydrates, three-phase equilibria for a CH_4 (50%) + CO_2 (50%) mixture were measured in pure water and in 3.5 and 5.0 wt % NaCl solutions. These measurements were complemented by continuous gas uptake and composition monitoring using *in-situ* gas chromatography, and structural analyses of hydrate samples using powder X-ray diffraction with Rietveld refinement and ^{13}C Nuclear Magnetic Resonance spectroscopy. The presence of salinity shifted the equilibrium conditions toward higher pressures and substantially reduced the water-to-hydrate conversion. However, the CO_2 fraction in the hydrate increased significantly from 55 % in pure water to 67 % in 5.0 wt% NaCl solution. This enhancement in CO_2 incorporation was attributed to a salt-induced reduction in the thermodynamic driving force, which terminated hydrate growth earlier, favoring CO_2-rich compositions and exhibiting greater kinetic selectivity. Cage-specific quantification revealed that CO_2 occupancy increased with salinity, particularly in large $5^{12}6^2$ cages, while the overall cage occupancy remained largely unchanged. Although NaCl inhibited the extent of hydrate conversion, it promoted preferential CO_2 incorporation, resulting in hydrates markedly enriched in CO_2. These findings provide critical insights into the enclathration behavior of CH_4 and CO_2 under saline conditions.

References

1. Lim, J., Choi, W., Mok, J., and Seo, Y. Clathrate-based CO_2 capture from CO_2-rich natural gas and biogas. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2018;6(4):5627-35.
2. He, ZJ., Gupta, KM., Linga, P., and Jiang, JW. Molecular insights into the nucleation and growth of CH_4 and CO_2 mixed hydrates from microsecond simulations. *J. Phys. Chem. C.* 2016;120(44):25225-36.

PS5-7

Crystallographic and Thermodynamic Analysis of Krypton (Kr) – Tetra-n-butylammonium Chloride (TBAC) Semi-Clathrate Systems

Junkyu Lim[1], Joonseop Lee[2], and Yongwon Seo[1,3*]

[1]Department of Civil, Urban, Earth, and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan 44919, Republic of Korea, [2]Green Chemical Engineering System Research Department, HD Korea Shipbuilding & Offshore Engineering Co., Ltd., Seongnam-si, Gyeonggi-do13553, Republic of Korea, [3]Graduate School of Carbon Neutrality, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan 44919, Republic of Korea

Tetra-n-butylammonium chloride (TBAC) semi-clathrates have attracted attention as promising materials for gas storage and separation owing to their tunable stability and structural adaptability. While TBAC semi-clathrates are generally regarded as structurally invariant, previous investigations have shown that the (Xe + TBAC) system undergoes structural transitions [1]. Building on this insight, the present work examined krypton (Kr) + TBAC semi-clathrate systems to elucidate their phase behavior and structural changes. Phase equilibrium measurements, powder X-ray diffraction (PXRD), and differential scanning calorimetry (DSC) were performed for TBAC concentrations of 1.0 and 3.3 mol%. In the 3.3 mol% system, a distinct change in the equilibrium line slope indicated a pressure-driven phase transition, whereas no such transition was observed at 1.0 mol%. PXRD analysis revealed that Kr encapsulation transformed the 1.0 mol% system from the tetragonal (TS-I) to orthorhombic (HS-I) structure, while the 3.3 mol% system exhibited TS-I/HS-I coexistence under high pressure. Rietveld refinement of the PXRD patterns provided gas occupancy estimates for each structure, indicating that HS-I can accommodate more gas than TS-I. DSC measurements corroborated the structural assignments through the presence of dual dissociation peaks. The stability boundaries of TS-I and HS-I were determined by integrating PXRD, DSC, and phase equilibrium data. Collectively, these results advance the understanding of semi-clathrate phase behavior and provide valuable guidance for optimizing gas storage performance through structure control.

References

1. Lim, J., Lee, J. and Seo, Y., “Abnormal structural transformation of tetra-n-butyl ammonium chloride+ Xe clathrates and its significance for clathrate-based Xe capture and storage”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 24(48), 29451-29460 (2022).

PS5-8

가스하이드레이트 결정법을 이용한 연속식 수처리 공정 설계 및 구현

조상규[1,2], 홍소희[1,3], 서성덕[1], Burla Sai Kiran[1], Subhash Kumar Sharma[1], 전창수[1], 이주동[1*]
한국생산기술연구원 해양플랜트기자재R&D센터[1], 동아대학교[2], 부경대학교[3]

기후변화로 인한 가뭄 현상과 산업 폐수의 증가로 인해 전 세계적으로 수질오염과 담수 부족 문제가 심화되고 있다. 특히 방사성 폐액이나 고농도 오염수를 포함한 특수 폐수의 경우, 기존 수처리 공정으로는 고비용·고에너지 소모 및 이차 폐기물 발생 등의 문제로 인해 효과적인 처리가 어렵다.

이에 따라 최근에는 가스하이드레이트 결정화 원리를 활용한 수처리 기술이 새로운 대안으로 주목받고 있다. 가스하이드레이트 수처리 공정은 게스트 가스와 순수한 물만으로 이루어진 고체 결정을 폐액으로부터 분리하는 방식으로, 단일 공정만으로도 높은 수처리 효율을 달성할 수 있으며, 전통적인 증류나 막 분리법에 비해 에너지 소비가 낮고 공정이 간단하다는 장점이 있다.
그러나 기존의 하이드레이트 기반 수처리 기술은 대부분 batch type 반응기를 사용하고 있어, 실질적인 연속 처리 및 대량 운전에 어려움이 있었다. 이에 본 연구에서는 하이드레이트 생성과 수분리 과정을 연속적으로 수행할 수 있는 새로운 공정 시스템을 설계하고, 이를 실제로 구현하였다.

개발된 연속식 공정은 하이드레이트의 형성과 해리, 불순물 제거 과정을 지속적으로 수행할 수 있도록 구성되었으며, 핵종 제거를 포함한 고농도 오염수 처리 실험을 통해 높은 수처리 효율과 안정적인 연속 운전 가능성을 검증하였다. 본 기술은 저에너지·저폐기물 기반의 친환경 수처리 시스템으로서, 향후 산업 폐수 및 방사성 폐액의 처리에 효과적인 솔루션을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

사사의 글
본 연구는 한국산업기술기획평가원(과제 번호: 2760000002, RS-2023-00255479)와 한국생산기술연구원(해수담수/수전해를 이용한 그린수소 생산시스템 및 핵심부품 개발, 과제번호: JA250004)의 지원으로 수행되었습니다.

PS5-9

Desalination Process System Using Hydrate Crystallization Method

Sohee Hong[1,2], Sang-Gyu Cho[1,3], Seong Deok Seo[1], Changsu Jeon[1], Ju Dong Lee[1*]

[1]Offshore Plant Resources R&D Center, Korea Institute of Industrial Technology,

[2]Pukyong National University, [3]Dong-A University

The importance of seawater desalination technology is increasing worldwide. Conventional methods such as distillation and reverse osmosis are widely utilized, but they face limitations such as high energy consumption, membrane fouling, and maintenance costs. As an alternative, gas hydrate-based desalination technology has been gaining attention.

Gas hydrates are crystalline structures in which low-molecular-weight gases combine with water molecules under low-temperature and high-pressure conditions to form solid hydrates. By leveraging this property, salts can be naturally excluded during the desalination process. This study aims to elucidate the key mechanisms for the practical implementation of hydrate-based desalination and to propose new directions for developing more efficient processes.

Acknowledgements

This work was supported by the Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology (Project Numbers: 2760000002, RS-2023-00255479) and the Korea Institute of Industrial Technology (Project Number: JA250004)

PS5-10

Crystallization Dynamics in Hydrogen-Bonded Systems: A Comparative Study of Ice and Gas Hydrates under Isotopic Substitution

Subhash Kumar Sharma, Seong Deok Seo, Sai Kiran Burla, Sang-Gyu Cho, Sohee Hong, Changsu Jeon, Ju Dong Lee*

Offshore Plant Resources R&D Center, Korea Institute of Industrial Technology, Busan 46744, Republic of Korea.

*Corresponding author, e-mail: julee@kitech.re.kr

Abstract: Crystallization in hydrogen-bonded systems is governed by a complex interplay of molecular ordering, solvent dynamics, and thermodynamic constraints. Here, we present a comparative experimental investigation of nucleation and growth in ice and clathrate hydrates using H_2O, D_2O, and equimolar H_2O-D_2O mixtures to reveal isotope-dependent mechanisms of phase emergence. Time-resolved optical and thermal measurements resolve key distinctions in induction time distributions, growth front morphology, and nucleation localization between structurally similar yet kinetically divergent systems. Whereas ice crystallization proceeds via direct hydrogen-bond network rearrangement with faceted and dendritic morphologies, hydrate nucleation exhibits multi-step pathways involving guest-induced water pre-ordering and anisotropic cage propagation. Isotopic substitution alters hydrogen-bond lifetimes and network coherence, with D_2O systems exhibiting delayed nucleation but increased structural order, implicating vibrational effects in modulating activation barriers. Mixed-isotope systems reveal intermediate kinetics and lattice heterogeneity suggestive of cooperative isotope–solvent coupling. Thermodynamic mapping across pressure–temperature–time domains highlight isotopic shifts in stability windows and latent heat signatures, underscoring the entropic sensitivity of hydrogen-bonded lattice formation. These findings expose critical limitations of classical nucleation theory in multicomponent aqueous systems and motivate a unified crystallization framework integrating molecular pre-ordering, guest–host interactions, and vibrational isotope effects. Our results offer a new mechanistic foundation for directing crystallization in energy-relevant materials and hydrogen-bonded condensed matter.

Acknowledgements

This work was supported by the Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology (Project Numbers: 2760000002, RS-2023-00255479) and the Korea Institute of Industrial Technology (Project Number: JA250004).

PS5-11

A Study on the Thermodynamic Properties of Gas Hydrates Considering Flow Assurance

Jiyu Park[1, 2], Seungmin Lee[1*]

[1]*Offshore Plant Resources R&D Center, Korea Institute of Industrial Technology, Busan 46744, Republic of Korea*

[2]*Changwon National University, Changwon 51140, Republic of Korea*

[*]Corresponding author, e-mail: leesm0506@kitech.re.kr

Abstract: Recently, due to extreme climatic phenomena, the importance of developing Carbon Capture and Storage (CCS) technology, which captures and stores CO2, has been rapidly increasing. A flow assurance issue that can occur during the CCS process is Gas Hydrate Plugging. Gas hydrates are solid crystalline compounds formed when low-molecular-weight gases combine with water molecules under low-temperature and high-pressure conditions. Since the thermodynamic conditions within pipelines are conducive to hydrate formation, these can form inside pipelines, impeding flow and ultimately blocking fluid movement [1]. In this study, a fundamental investigation was conducted on CO2 hydrate formation and dissociation, considering the influence of formation water present in pipelines connected to the reservoir. Thermodynamic stability conditions were presented for gas hydrates that can occur under various pressure and temperature conditions during CO2 geological storage, as well as the effects of water content and salts. Furthermore, using a high-pressure micro differential scanning calorimeter (HP-μDSC), the dissociation heat of hydrates was analyzed under non-isothermal conditions to measure various calorimetric changes of CO2 hydrates due to the influence of saline solution and water content. These results are considered to provide fundamental data for the flow assurance of CO2 geological storage.

Acknowledgements

This work was supported by the Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology (Project Numbers: 2760000002, RS-2023-00255479).

References

1. Sloan, E. D., Koh, C. A., Sum, A. K., Ballard, A. L., Creek, J., Eaton, M., Lachance, J., McMullen, N., Palermo, T., Shoup, G., and Talley, L., “Natural Gas Hydrates in Flow Assurance”, *Gulf Professional Publishing* (2010).

PS5-12

Feasibility of Hydrate-Based Desalination and Mineral Carbonation for Produced Water and Groundwater Treatment in Uzbekistan

Kyung Chan Kang[1,*]

[1]*Offshore Plant Resources R&D Center, Korea Institute of Industrial Technology, Busan 46744, Republic of Korea*

[*]Corresponding author, e-mail: kckang@kitech.re.kr

Abstract: Uzbekistan, although endowed with diverse mineral resources, faces growing water scarcity due to its arid desert climate, rapid desertification, and increasing demand for secure water supplies. In this context, high-salinity groundwater and produced water from oil and gas fields are emerging as unconventional yet valuable sources for both water and critical mineral recovery. Produced water typically contains hydrocarbons, organic matter, and high concentrations of Total Dissolved Solids (TDS), including strategic metals such as lithium, strontium, magnesium, manganese, chromium, and rubidium. Gas hydrate-based desalination, a crystallization process in which water molecules form solid hydrate lattices that exclude impurities, provides a promising approach for treating high-salinity water containing complex contaminants [1]. In parallel, mineral carbonation, achieved through chemical reactions between CO_2 and divalent cations (e.g., Ca^{2+}, Mg^{2+}, Sr^{2+}, Li^{+}), produces stable carbonates while enabling metal recovery and contributing to CO_2 reduction [2]. By integrating these two approaches, it becomes feasible to establish a sustainable treatment system that simultaneously secures clean water, recovers valuable minerals, and mitigates greenhouse gas emissions. This feasibility study investigates the potential for developing an integrated process combining gas hydrate crystallization and mineral carbonation for high-salinity water treatment in Uzbekistan. The proposed approach addresses critical regional challenges, including water scarcity, environmental sustainability, and resource security, while offering a pathway toward innovative applications in the treatment of high-mineral groundwater and produced water from oil and gas fields.

Acknowledgements

This work was supported by the Korea Institute of Industrial Technology (Project Number: JA250004)

References

1. Seo, S.D., Truong-Lam, H.S., Jeon, C., Han, J., Kang, K.C., Lee, S., and Lee, J.D., "Simultaneous removal of multi-nuclide (Sr^{2+}, Co^{2+}, Cs^{+}, and I^{-}) from aquatic environments using a hydrate-based water purification process," *Journal of Hazardous Materials*., **462**, 132700 (2024).
2. Zhang, X., Liu, H., Patel, P., and Wang, S., "Environmental impacts of carbon capture and utilization by mineral carbonation: A systematic literature review and meta life cycle assessment," *Journal of Cleaner Production*, **332**, 130067 (2022).

PS5-13

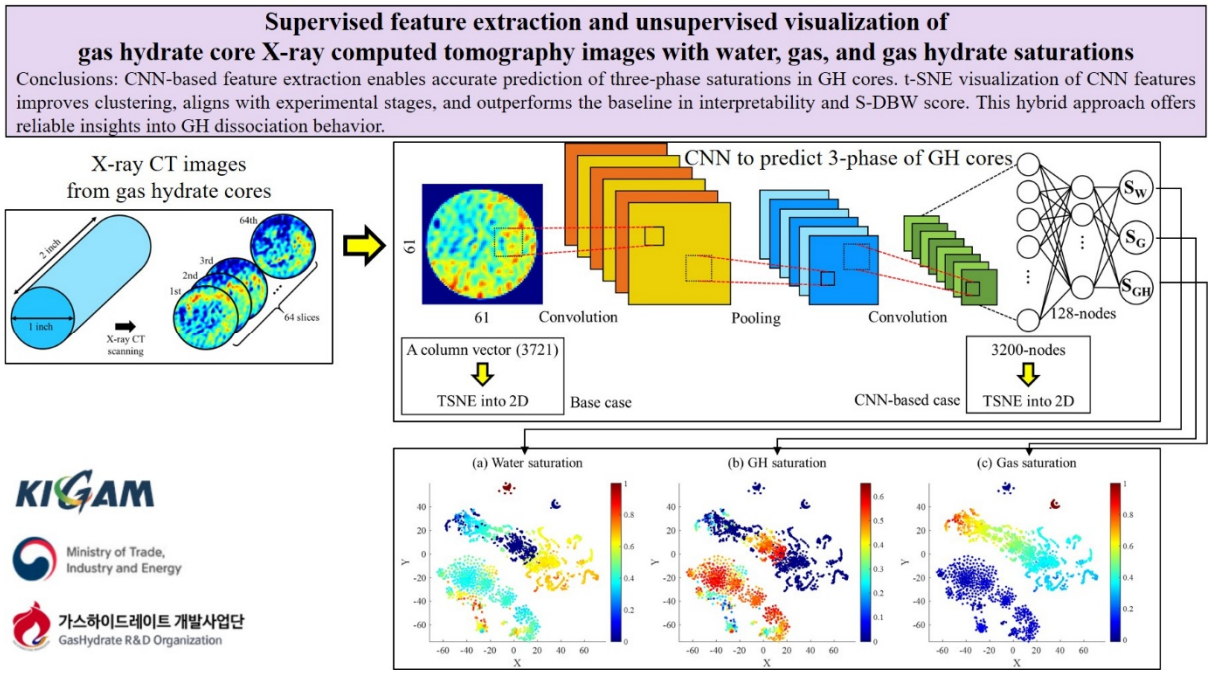
Supervised Feature Extraction and Unsupervised Visualization of X-ray CT Images for Gas Hydrate Analysis in the Ulleung Basin

Sungil Kim[1*], Youngjun Hong[2], Minhui Lee[3], Jaehyoung Lee[1], Taewoong Ahn[1] and Kyungbook Lee[4,5]

[1]Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, [2]GM Factory, [3]GEOLAB Co., Ltd.,

[4]Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, [5]Yellow Sea Institute of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

Gas hydrate (GH) is a promising energy resource in the Ulleung Basin of South Korea, yet its commercial development is hindered by technical challenges. This study proposes a hybrid deep learning framework that combines supervised learning-based feature extraction using a convolutional neural network (CNN) with unsupervised visualization via t-distributed stochastic neighbor embedding (t-SNE). The CNN model was trained to predict three-phase saturations (gas, water, and GH) from X-ray computed tomography (CT) images of laboratory-scale GH core experiments. Physically consistent saturation labels were derived using a material balance equation considering phase densities. The CNN's flattened node features were visualized with t-SNE to reveal clustering behaviors that aligned well with the physical processes of GH formation and dissociation. Compared to direct t-SNE of original CT images, CNN-based features showed improved cluster compactness and separation, as quantified by a 37.5% reduction in the average of simplified Davies–Bouldin and within-cluster scatter (S-DBW) value and 56.0% reduction in its standard deviation—where lower S-DBW values indicate better-defined and more distinct clusters. The method also demonstrated robustness across varying t-SNE perplexity values. This integrated approach enhances the interpretability of GH core behavior under depressurization and is extendable to other geoscience domains involving complex multiphase imaging.



청정에너지 및 미래산업을 선도하는

주식회사 엠오티



Electric Vehicle



Energy Storage System



Robot

자동화 설비



(주)엠오티는 청정에너지 및 미래 핵심산업에 필수적인
고성능 · 고품질 이차전지 자동화설비 제조기업의 리더로서
EV용 배터리 · 부품 조립설비는 물론 ESS용 고용량 LFP배터리, 고성능
Robot용 전고체 및 원통형 46Ø 배터리 조립설비를 선도하고 있습니다.

Mecca Operation Technology

MOT
주식회사 엠오티

한국청정기술학회 2025년도 30 주년기념

추계 총회 및 학술대회 초록집

2025 THE KOREAN SOCIETY OF CLEAN TECHNOLOGY FALL CONFERENCE (**30th Anniversary**)