

# 한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회 초록집

2026 THE KOREAN SOCIETY OF CLEAN TECHNOLOGY SPRING CONFERENCE

에너지 산업에서의 청정기술 역할과 패러다임 변화

Clean Technologies in the Energy Industry:  
Driving a Paradigm Shift Toward a Sustainable Future

2026년 3월 18일(수) ~ 20일(금)  
부산 BEXCO 제2전시장 3층



주 최 : 한국청정기술학회

후 원 : (주)와인테크놀로지  
Win Technology Adhesive Tape

KZ 고려아연

충북대학교  
IR-NRM 기업소도  
차세대 이차전지 소재  
선도 연구센터

KITECH  
한국생산기술연구원

KRICT  
한국화학연구원

ONH RECYTECH

JTP 제주테크노파크  
JEJU TECHNOPARK

KITECH-PNU HYDROGEN INDUSTRY UNI-CORE  
생기원-부산대 학연협력플랫폼 사업단

원광대학교  
RISE사업단

RISE  
중부대학교 지역혁신융합대학원소재/제조기술사업단

KIGAM

RIMS 중소조선연구원

YOUNG IN  
Chromoss

UOT EMERSON  
@aspentech

TAEYOUNG  
태영건설

MIRAE  
ULTRASONIC

enis  
Energy Conversion & Storage Solution

한양  
UNIVERSITY

KGU  
광기대학교  
KANGGI UNIVERSITY

EnTeCs

CNS INT  
Carbon Negative Solution

KIMM 한국기계연구원  
KOREAN INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

# 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 에너지를 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

# PNU-KITECH 융합대학원: 수소 경제를 이끌 미래 에너지 전문 인력 양성 탄소중립기후변화학과 수소미래에너지융합전공

## 왜 지금 '수소 미래 에너지' 인가?



연간 2조 5,000억 달러  
규모의 글로벌 시장  
전 세계적으로 약 3,000만 개의  
신규 일자리 창출이 기대됩니다.



시급한 과제: 고급 기술을  
이끌 전문 인력 부족  
원천 기술 개발과 상용화를 위한  
석·박사급 인재 양성이 절실합니다.



동남권, 약 600여개 수소 기업이  
밀집한 산업의 중심

전국 평균보다 높은 매출액을 기록하며  
성장 잠재력이 매우 큼니다.

## Program Roadmap: 2년 완성, 실무형 인재 양성 로드맵

학·연 협력 기반의 시너지

3대 핵심 분야  
전문가 양성 트랙



한국생산기술연구원과 부산대학교  
두 곳에서 이루어지는  
입체적 교육(현장 연구·실습)  
시스템 제공



1년차  
(기초·심화)

2년차  
(실무 논문 연구)

대학과 연구원의 시너지:  
학·연 공동 연구

2년 완성, 현장 중심 교육 로드맵

부산대학교와 한국생산기술연구원의  
인프라를 활용한 공동 프로젝트를 수행합니다.

## 하단 정보

탄소 중립의 꿈, PNU-KITECH 수소미래에너지융합전공에서 현실이 됩니다.



2026년 2월,  
부산대학교 대학원 모집 예정



2027년 3월,  
부산대학교 계약학과 운영 예정



QR 코드  
스마트폰으로 스캔하여  
학과 모집요강 및 교육과정  
정보를 확인하세요.

## 센터소개

### 센터명

기업수요 대응 차세대 이차전지 소재  
선도연구센터

### 센터 목표

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

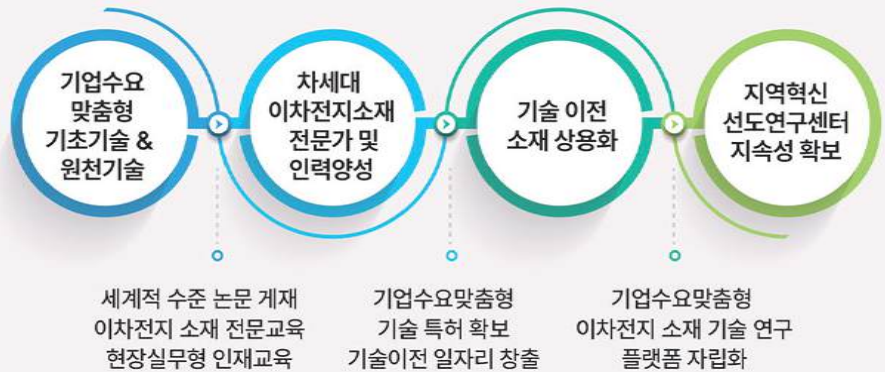


- 센터장 | 충북대학교 화학공학과 정상문 교수
- 사업기간 | 2023. 07. 01. ~ 2030. 02. 28. (7년)
- 총사업비 | 107억원(현금기준)
- 지원기관 | 과학기술정보통신부 NRF 한국연구재단
- 주관연구기관 | 충북대학교
- 참여기업 | EcoPro SM CSIM 더블유씨피(주) Puree chem EasyChem
- 참여지자체 | 충청북도 청주시

## 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



### 기업 수요

- 에코프로비엠, 이지켄, CSIM, 더블유씨피, 퓨리켄
- 기업수요맞춤형 연구 주제 공동 기획 및 실행
  - 이차전지 기업 차세대 연구 R&D 전문 인력 수급



### 지역산업 생태계

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



### 연구 특화

- 한국원자력연구원, 한국전자기술연구원, 충북테크노파크, 한국기초과학지원연구원
- 고도 분석 장비 활용을 통한 기술 개발 원천성 확보 계획 구체화



### 국제공동 연구


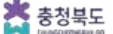

- 이탈리아 La Sapienza
- 미국 PNNL
- 독일 HIU

## 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/>

# 충북 RISE 차세대이차전지 공동연구센터

## 사업소개

- ▶ 사업 기간 2025 ~ 2029년 (5년)
- ▶ 주관 대학 충북대학교 (조중상 교수) 
- ▶ 참여 대학 한국교통대학교, 청주대학교, 건국대학교, 중원대학교
- ▶ 참여지자체  충청북도  청주시
- ▶ 사업 개요 충북 차세대이차전지 기술 산업화를 위한 지산학연 협력 R&D

## 단위과제 비전 및 목표



## [G3] 차세대 이차전지 특화 배터리관리시스템 및 고장진단 기술 연구



## 추진내용



## [G4] 디지털 전환(DX) 기반 차세대 이차전지 진주기 순환경제 기술 및 플랫폼 개발



## [G1] 차세대 이차전지용 전해질/전극 소재 개발 및 고도 분석



## □ 거버넌스 구축 및 타 대학 연계-협업 활동, 지산학연 협력 및 대학 내외 추진체계

## [G2] 차세대 이차전지 설계/해석/제조/평가 전 공정 고도화 및 상용화 가속 기술 개발



# 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<sub>2</sub>O/NO<sub>x</sub> 촉매 개발

N<sub>2</sub>O / NO<sub>x</sub> reduction catalyst

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

(2세부) N<sub>2</sub>O/NO<sub>x</sub> 저감 후처리 제어 시스템 개발

De-NO<sub>x</sub> System

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

(3세부) 하이브리드 전력 통합 관리시스템 개발

에너지 관리시스템(EMS)  
CO<sub>2</sub> Emission 예측  
운항주기 EMS 알고리즘  
HILS 검증

(총괄→3세부) 플랫폼을 통한 연료량 예측  
(3세부→총괄) CO<sub>2</sub> Emission, 전력관리모델

**외부 데이터**

- 장비데이터
- 실선 데이터
- 기상 데이터

**플랫폼**

플랫폼 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, Tiberio, DBMS

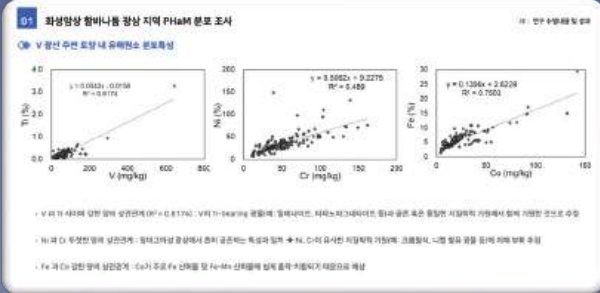
**사용자**

- 항해사
- HMM ONE, CMA CGM, Hapag-Lloyd 선주사
- 조선소/기자재 업체

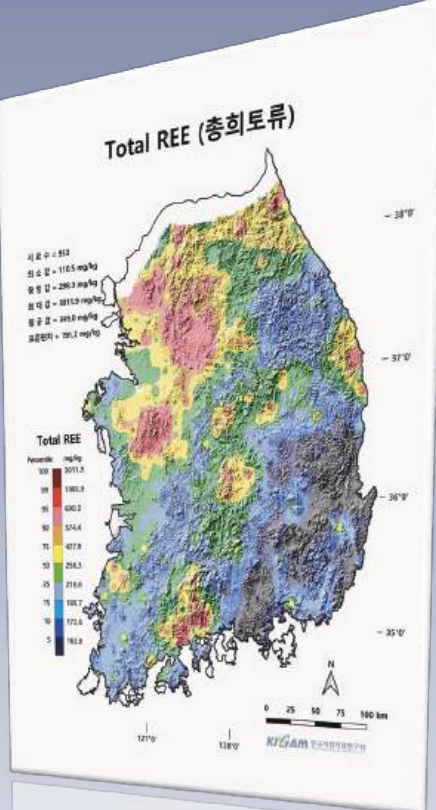
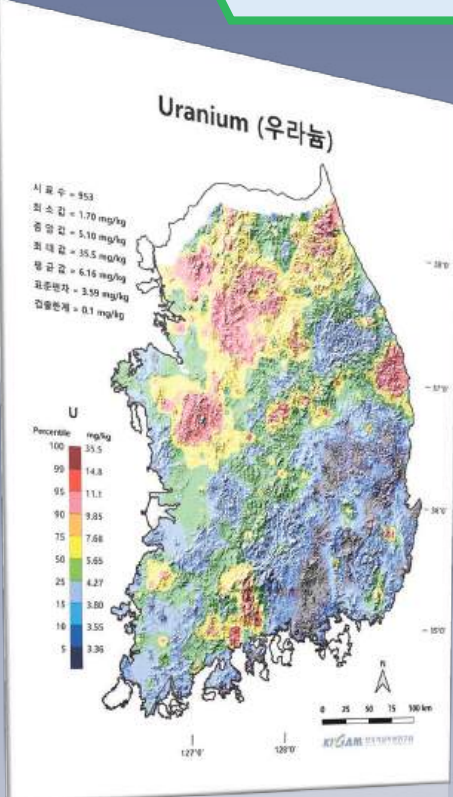
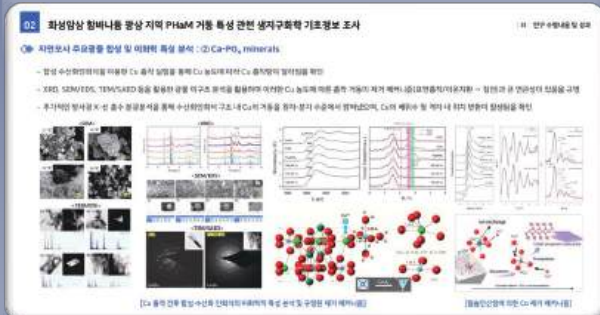
# 전국 지구화학도 정보제공

한국지질자원연구원 환경지질연구센터

잠재적 유해물질 관리기술 / 지구화학도 활용 희토류 부존 유망지



전국 희토류 저밀도  
지구화학도 작성  
희토류 부존 유망지 발굴



PHaM 오염특성 조사  
지구화학적 거동조사  
환경관리기술 개발

[2025-2030 기본사업]

함바나뎀 광상 개발에 수반되는 잠재적 유해물질 관리기술 개발

# 건설의 한계를 넘어선 Life Value Creator

경계없는 생각이 한계없는 미래를 만듭니다.

**TAEYOUNG**

태영건설

## 주택사업

고객을 생각하는 데시앙의 디자인으로  
앞선 주거문화를 선도하다

## 개발사업

주거, 상업, 업무시설 및 도시에 이르기까지  
새로운 라이프스타일을 창조하다

## 레저사업

종합리조트부터 레이싱 서킷까지  
국내 레저문화의 가치를 높이다

## 건축사업

앞선 설계와 첨단 시공능력으로  
건축미학과 가치를 창조하다

## 물사업

독보적인 수처리 기술로  
친환경 미래를 만들다

## 환경/플랜트사업

뛰어난 역량과 앞선 기술력으로  
최고의 실적을 보유하다

## 토목사업

탁월한 기술력과 노하우로  
국가 기간산업 발전에 기여하다

※본 홍보물에 사용된 CG 및 이미지는 모든 소비자의 이해를 돕기 위해 넣은 것으로 실제와는 다를 수 있습니다.

Life Value Creator

**TAEYOUNG**

Design, Detail, **DESIGN**



토양사업을 넘어 2050 탄소 중립의 미래, (주)에니스가 앞장서겠습니다

# 글로벌 넷-제로를 선도하고자 합니다

대한민국 NDC 10% 목표로 2025년 7월 첫발을 내딛습니다



## 토양정화

- ✓ 국내최대 반입시설 보유(17만톤)
- ✓ 국내 최대 도시 정비사업 실적 보유
- ✓ 토양오염 및 정화 종합컨설팅

## 기후테크

- ✓ 탄소포집 시설 보유
- ✓ CCUS 전문기업
- ✓ Net-Zero 선도기업





**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

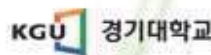
**고객 맞춤 서비스**

자체 개발·생산 기반의  
경제적이고 효율적인  
맞춤형 서비스 제공

# 미세조류를 이용한 탄소저감형 바이오항공유 업그레이드용 바이오오일 생산 통합시스템 개발

주관연구책임자 **박명수** 엔텍스(주)

참여기관연구책임자 **홍수열** ((주) 씨엔에스아이엔티), **전병훈** (한양대학교)  
**정우진** (경기대학교), **최상규** (한국기계연구원)



**(주)씨엔에스아이엔티**

CO<sub>2</sub> 저감형 미세조류 바이오매스 대량 생산 공정 및 시스템 개발

**한양대학교 산학협력단**

바이오항공유 업그레이드용 정제기술 개발 및 액상 부산물 활용 Biotertilizer 가용화 연구



**엔텍스(주)**

저에너지 소비형 연속식 하이브리드 수열액화 공정 개발 및 생산 공정 통합관리 시스템 구축

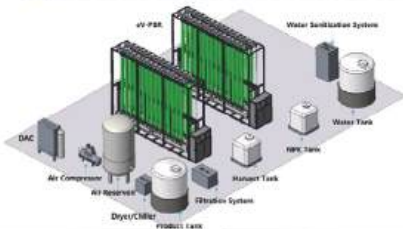
**한국기계연구원**

수열액화설비 유동 해석 모델 개발 및 반응 특성 동시 분석

**경기대학교 산학협력단**

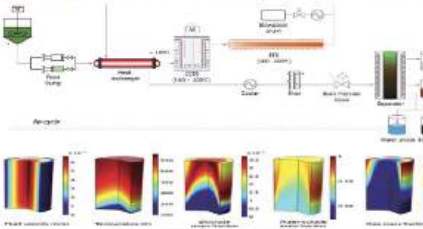
수열액화 공정 연구 및 부산 하이드로차 활용 제제 개발

**01** CO<sub>2</sub> 저감형 미세조류 대량생산 및 공급 시스템



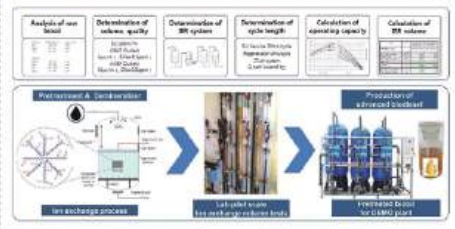
연속형 미세조류 대량 배양기술 및 CO<sub>2</sub> 재활용 기술

**02** 바이오 원유 생산을 위한 연속식 하이브리드 수열액화 공정 최적화



저에너지소비형 연속식 하이브리드 수열액화 공정 최적화

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

1997년 설립한 이래 20여년간 Sonochemistry 분야를 개척하고 있는 미래초음파기술과 (주)에이소닉은 전자·화학·바이오·환경분야의 파트너입니다.

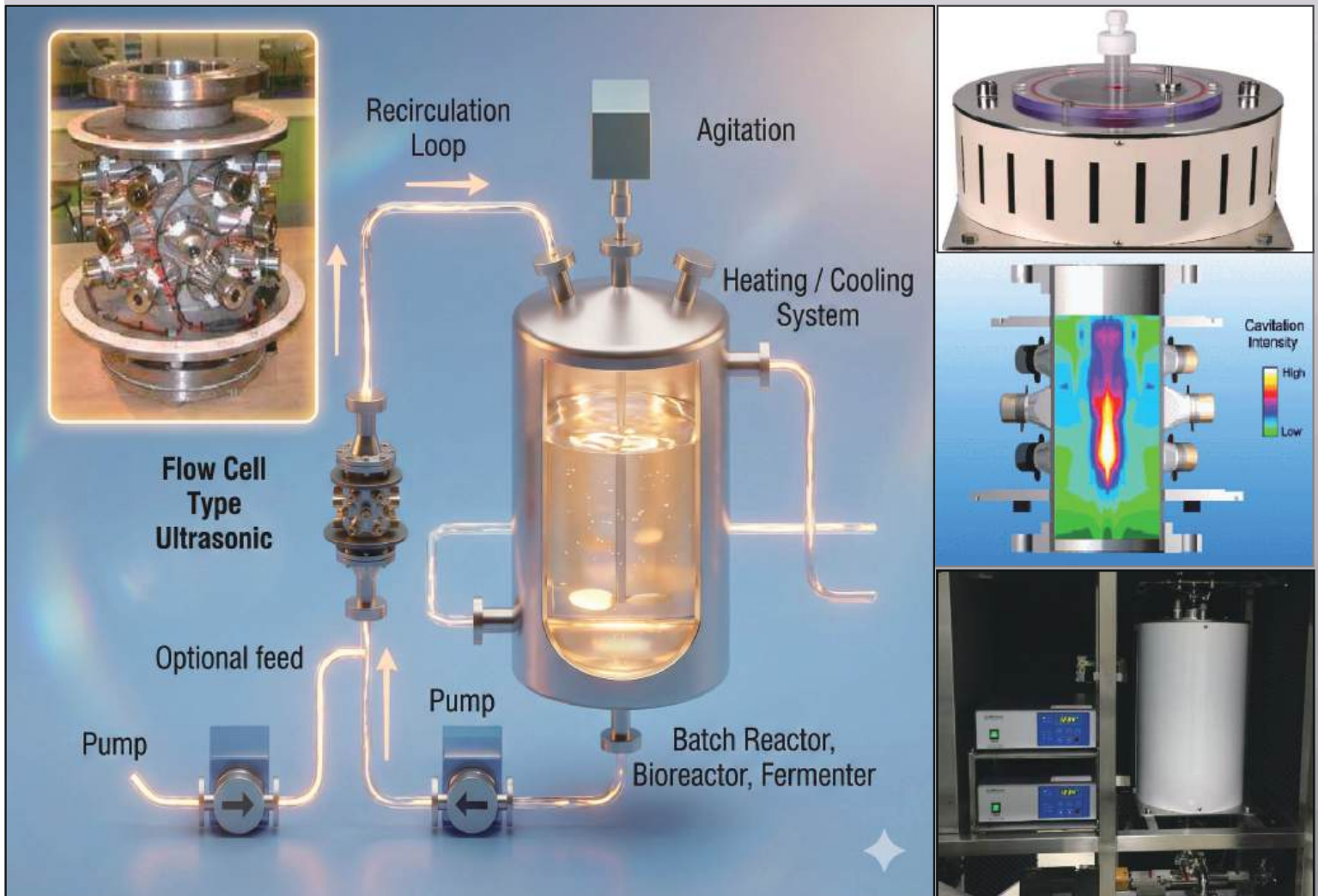
### Sonochemistry : New Opportunities for Green Chemistry

#### Main Product

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

#### Application

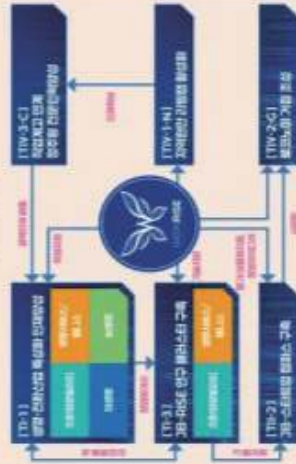
- Bio-Diesel • Extraction • Homogenizing • Mixing • Dispersion



### 비전

- 01 인구증백기, 산업 및 사회수요, 미래 세대의 변화
- 02 국내외 청년이 찾는 지역, 창의력 인재가 육성되는 지역
- 03 개인의 역량이 발휘되는 산업생태계의 자주성과 조성
- 04 지식·학연 협력 활성화 및 지역 일자리 창출
- 05 정책의 실효를 발휘할 수 있는 지역·가능한 지역

### 추진 체계



### RISE 자·산·학·연 협력체계

- 지자체(3) 익산시, 남원시, 완성군
- 교육기관(3) 전북대학교·고려대학교, 원광보건대학교, 전주보건대학교
- 산업체(9) (주)정읍제과, (주)용림파이버, (주)황동산업, (주)진우에스엔씨 등
- 학선기관(11) 한국식품산업협회·스타트업진흥원, 전북바이오융합산업진흥원 등



**트랙 1.1**  
**JB-SPARK**  
생명·전환산업 혁신  
생명·전환산업 특성화 인력양성

| 산업분야 | 협업교수      | 협업기관            | 총 학생  |
|------|-----------|-----------------|-------|
| 농림업  | 김관민 외 11명 | FOODPOOLS 외 28개 | 490   |
| 헬스   | 이숙연 외 40명 | 협업산업 외 29개      | 2,198 |
| 의생명  | 권오상 외 43명 | 유비메디칼 외 12개     | 2,058 |
| 모바일  | 이승하 외 33명 | 전주비전드레일 외 17개   | 1,149 |
| 소계   |           |                 | 5,895 |

**농생명**  
스타트업에서 푸드테크까지, 혁신을 이끄는 농생명 인재양성

**SAFT-Woman**  
Sustainable Agri-foods Talent for Innovation

- W 스타트업 중심
- W 푸드테크
- W 미래농업분류

**생명서비스**  
헬스·심자면·음극음·성 문화 인재양성

**LIFE-E 사업**  
Leader with/ethics purpose regional Friendly, Innovative EduLab

- ▲ 마음 중심
- ▶ 지면 중심
- ➕ 몸 중심

**의생명**  
생의 질 향상을 위한 바이오소재·진주기 진원인력양성

**RELAX 사업**  
Regional Educator for Long, Healthy and Active Suburbance

- ▶ 기능성 바이오소재
- ▶ 후·기능성물질 생산
- ▶ 유종양 인력양성

**친환경모빌리티**  
미래형모빌리티 기술융합혁신인력양성

**SPECIAL-E 사업**  
Special Purpose Eco-friendly intelligent Automotive EduLab

- ▲ 특종·농기계
- ▶ AI·VR 분야
- ▶ 친환경 분야

**트랙 1.3**  
**JB-SPARK**  
생명·전환산업 혁신  
JB-RISE 연구플랫폼 구축

| 산업분야 | 협업교수      | 협업기관                | 총 학생  |
|------|-----------|---------------------|-------|
| 헬스   | 민경필 외 42명 | 국립안동대학교·한신대학교 외 23개 | 1,465 |
| 모바일  | 김재오 외 17명 | JMAT 외 6개           | 816   |
| 소계   |           |                     | 2,281 |

**생명서비스**  
통합적 헬스 문화 산업 프로그램 개발 및 기술고도화

**LIFE-R 사업**  
Leader with/ethics purpose regional Friendly, Innovative Research cluster

- ▲ 마음
- ▶ 지면
- ➕ 몸

**친환경모빌리티**  
미래형모빌리티 융합기술개발

**SPECIAL-T 사업**  
Special Purpose Eco-friendly intelligent Automotive EduLab

- ▶ 소재
- ▶ 구조·장부품
- ▶ 시스템

**트랙 2**  
**JB-ROOT**  
지역·추력산업 성장  
JB-스타트업 캠퍼스 구축



**트랙 4**  
**JB-TEAM**  
동행협력 지역발전

**[남원] 근중 이노베이션 리빙랩**

- 근중·이노베이션·리빙랩
- 근중·이노베이션·리빙랩
- 근중·이노베이션·리빙랩

**[임실] 반전동물친화도시를 위한 도약**

- 반전동물친화도시
- 반전동물친화도시
- 반전동물친화도시

**신취업·후학습 농생명·바이오 계약학과**

**04 신사후학습**

- 신사후학습
- 신사후학습
- 신사후학습

**03 학사후학습**

- 학사후학습
- 학사후학습
- 학사후학습

**02 신취업**

- 신취업
- 신취업
- 신취업

**01 고교**

- 고교
- 고교
- 고교

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

# WONRISE가 전북특별자치도와 함께 더 큰 미래를!

탄소중립과 자원순환의 지속가능성을 추구하는 기업

# NH RECYTECH



한국청정기술학회 2026년도

# 춘계 총회 및 학술대회 초록집

2026 THE KOREAN SOCIETY OF CLEAN TECHNOLOGY SPRING CONFERENCE

에너지 산업에서의 청정기술 역할과 패러다임 변화

Clean Technologies in the Energy Industry:  
Driving a Paradigm Shift Toward a Sustainable Future

2026년 3월 18일(수) ~ 20일(금)  
부산 BEXCO 제2전시장 3층

주 최 : 한국청정기술학회

후 원 :  (주)와인테크놀로지  
Bio Technology Adhesive Tape

 고려아연


 한성중공업  
HANSAHONG  
HANSAHONG  
HANSAHONG

 KITECH  
한국생산기술연구원

 KRICT  
한국화학연구원

 NH RECYTECH

 JTP 제주테크노파크  
JEJU TECHNOPARK

 KITECH-PNU HYDROGEN INDUSTRY UNI-CORE  
생기원-부산대 화연협력플랫폼 사업단

 RISE사업단  
www.kuic.or.kr/risecenter

 RISE  
중부대학교 기계신소재공학부 RISE사업단  
@emerson.aspenintech.com

 KIGAM

 RIMS 중소조선연구원

 YOUNG IN  
Chromoss

 U I T  
EMERSON  
@aspenintech

 TAEYOUNG  
태영건설

 MIRAE  
ULTRASONIC

 enis  
www.enis.com

 HANSAHONG  
1959

 KGU  
경기대학교  
Korea University

 EnTeCs

 CS INT  
Carbon Negative Solution

 KIMM 한국기계연구원  
KOREAN INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

 한국청정기술학회  
KSCT The Korean Society of Clean Technology

국가의 미래를 위해 나아갈 길, 청정기술

# (사)한국청정기술학회

문서번호 청정기술 2026-01 (2026.1.20)

수신 청정기술 전문가 및 소속기관

참조

제목 한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회 개최

1. 귀 기관의 무궁한 발전을 기원합니다.

2. 한국청정기술학회에서 '에너지 산업에서의 청정기술 역할과 패러다임 변화를 주제로 2026년도 춘계 총회 및 학술대회를 아래와 같이 개최하오니 귀 기관의 소속 전문가가 참석할 수 있도록 협조하여 주시길 바랍니다.

- 아 래 -

가. 행사명: 한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

나. 행사일시: 2026년 3월 18일(수)~20일(금)

다. 장소: BEXCO 제2전시장 3층

라. 등록비:

|                       | 정회원      | 학생회원     |
|-----------------------|----------|----------|
| 사전등록(3월 6일(금) 마감)     | 180,000원 | 100,000원 |
| 온라인/현장등록(3월 6일(금) 이후) | 200,000원 | 120,000원 |

(사)한국청정기술학회

회장 전 병 훈



한국청정기술학회 사무국[(02856) 서울특별시 성북구 안암로 119 한국화학회관 3층]

전화 070-7636-7939 / ksct@cleantechnol.or.kr / http://www.cleantechnol.or.kr

# 인사말



존경하는 한국청정기술학회 회원 여러분!

안녕하십니까?

한국청정기술학회 제24대 회장 전병훈입니다.

2026년도 한국청정기술학회 춘계 총회 및 학술대회가 오는 3월 18일(수)부터 20일(금)까지 부산에서 개최됩니다. 바쁘신 일정에도 불구하고 우리 학회의 학술 교류와 발전을 위해 함께해 주시는 회원 여러분께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

우리 한국청정기술학회는 매년 학술대회의 규모와 참여 열기가 꾸준히 확대되며, 국내 청정기술 분야를 대표하는 학술 교류의 중심으로 자리매김하고 있습니다. 연구 주제의 다양성과 학문적 깊이 또한 확장되고 있다는 점에서 우리 학회의 미래가 더욱 기대됩니다.

기후 위기 대응과 탄소중립 실현, 순환 경제 전환, 친환경 공정 혁신 등 시대적 과제가 분명해지는 가운데, 청정기술은 국가 경쟁력과 산업 지속 가능성을 이끄는 핵심 분야로 자리하고 있습니다. 이번 춘계 총회 및 학술대회는 “에너지 산업에서의 청정기술 역할과 패러다임 변화”를 주제로 공정시스템, 수소및재생에너지, 자원순환, 청정융합 등 다양한 분야의 최신 연구 성과를 공유하는 자리를 마련하였습니다. 또한, 신진연구자와 대학원생을 위한 학생 발표 세션, 신진연구자 특별세션, 산업체 교류 특별세션 등 10개의 특별세션을 준비하여 풍성한 프로그램이 되도록 구성하였습니다. 활발한 토론과 교류를 통해 새로운 협력과 연구의 전기가 마련되기를 기대합니다.

아울러, 오는 8월에는 말레이시아 연계 국제 학술대회(ICSEIE-2026)를 개최할 예정입니다. 이는 우리 학회의 국제적 위상을 한 단계 확장하는 중요한 전환점이 될 것이며, 회원 여러분의 적극적인 참여와 관심이 무엇보다 중요합니다. 해외 연구자들과의 학술 교류를 통해 연구 네트워크를 세계로 넓히고, 우리 학회가 아시아를 넘어 글로벌 청정기술 분야를 선도하는 학회로 도약하는 기반을 다지고자 합니다.

이번 춘계 총회 및 학술대회가 연구 성과를 공유하는 자리를 넘어, 미래 비전을 함께 설계하는 뜻깊은 만남의 장이 되기를 바랍니다. 성공적인 행사 준비를 위해 애써주시는 운영위원회, 부문위원회, 평의원회, 자문위원단과 후원해 주신 기관 및 기업 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

초봄의 산뜻한 기운이 감도는 3월, 아름다운 항구 도시 부산에서 회원 여러분을 직접 뵙고 인사드릴 수 있기를 기대합니다.

항상 건강과 건승이 함께하시길 기원합니다.

감사합니다.

2026년 3월 18일

한국청정기술학회 회장 **전 병 훈**

## 한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회 진행표

| 3월 18일(수)   | 320호  | 321호  | 322호  | 323호   | 324호  | 325호   | 326호   |
|-------------|---|---|---|--|---|--|--|
| 13:00~17:00 | 등 록   |   |   |  |   |  |  |
| 13:00~18:00 | <b>자문회의<br/>부문위원장<br/>회의</b><br>16:10~16:50 | <b>특별세션(II)</b><br>신진연구자<br>특별세션 I<br>15:00~16:00 | <b>특별세션(III)</b><br>미세조류를<br>이용한<br>지속가능한<br>항공유<br>13:00~14:50 | <b>특별세션(IV)</b><br>친환경<br>이차전지<br>산업을 위한<br>고순도<br>탄산리튬<br>실증기술 및<br>ESG<br>대응전략<br>비공개<br>13:00~14:20 | <b>특별세션(V)</b><br>충청권<br>지역혁신선도연구<br>센터, 충북RISE<br>차세대이차전지<br>공동연구센터 및<br>학연협력플랫폼<br>공동 이차전지<br>소재 연구 개발<br>심포지엄<br>15:00~17:00 | <b>특별세션(I)</b><br>[원광대학교<br>RISE 사업단]<br>미래형모빌리티<br>융합기술개발<br>세미나<br>15:00~17:00 | <b>특별세션(VI)</b><br>탄소중립선도<br>수소 생태계<br>확립을 위한<br>원스탑 플랫폼<br>기술교류회<br>15:00~17:10 |
| 17:00~18:00 |   | <b>춘계<br/>평의원회</b>                                |   |  |   |  |  |
| 18:00~      |   | <b>평의원 만찬<br/>(중식당 금루)</b>                        |   |  |   |  |  |
| 13:00~17:00 | 홍보전시회 (3층 로비)                               |   |   |  |   |  |  |

| 3월 19일(목)   | 321+322호   | 323호   | 324호   | 325호  | 326호  | 로비(3F)                         |
|---|--|--|--|---|---|--------------------------------|
| 08:30~17:00   | 등 록  |  |  |   |   |                                |
| 09:00~11:00   | <b>학생 구두발표I</b><br>자원순환<br>09:00~10:20   | <b>학생 구두발표II</b><br>대기환경<br>09:00~09:30            | <b>학생 구두발표IV</b><br>공정시스템<br>09:00~10:20                           | <b>학생 구두발표VI</b><br>청정생산<br>09:00~09:20             | <b>일반 구두발표</b><br>청정융합<br>09:00~11:20   | <b>포스터발표 I</b><br>09:00~11:00  |
|   |  | <b>학생 구두발표III</b><br>에너지저장<br>09:40~10:40          |  |   |   |                                |
|   | <b>일반 구두발표</b><br>자원순환<br>10:20~10:40  | <b>일반 구두발표</b><br>에너지저장<br>10:50~11:10             | <b>학생 구두발표V</b><br>에너지전환<br>10:30~11:30                            | <b>일반 구두발표</b><br>청정생산<br>09:20~10:00               | <b>일반 구두발표</b><br>수소및재생에너지<br>10:10~11:25   |                                |
|   |  |  |  | <b>일반 구두발표</b><br>수소및재생에너지<br>10:10~11:25           |   |                                |
| 11:20~11:30   | 휴 식  |  |  |   |   |                                |
| 11:30~12:00   | <b>초청강연: "지방정부가 여는 탄소중립의 새로운 질서<br/>- 경기도의 전략적 전환 실험"</b><br>김혜애 원장(경기환경에너지진흥원) (321+322호) |  |  |   |   |                                |
| 12:00~13:00   | 점 심  |  |  |   |   |                                |
| 13:00~17:30   | <b>특별세션(X)</b><br>조선해양<br>청정기술의<br>새로운 지평:<br>혁신과 협력의<br>장!!<br>13:20~16:40                | <b>특별세션(II)</b><br>신진연구자<br>특별세션 II<br>13:00~16:30 | <b>일반 구두발표</b><br>공정시스템<br>13:00~15:20                             | <b>학생 구두발표VII</b><br>수소및재생에너지<br>13:00~14:50        | <b>학생 구두발표VIII</b><br>청정융합<br>13:00~15:10   | <b>포스터발표 II</b><br>13:00~15:00 |
|   |  | <b>일반 구두발표</b><br>에너지전환<br>16:40~17:20             | <b>특별세션(VII)</b><br>암모니아 기반<br>에너지 및 친환경<br>기술 심포지엄<br>15:30~17:30 | <b>특별세션(IX)</b><br>폐기물 에너지화<br>및 자원화<br>15:10~17:40 | <b>특별세션(VIII)</b><br>2026년 제1회<br>제주<br>지역기술혁신허브<br>기술성과교류회<br>비공개<br>15:20~17:30 |                                |
| 17:40~18:30   | 총회, 시상, 경품추첨(321+322호)   |  |  |   |   |                                |
| <b>포스터발표 I: 대기환경, 수소및재생에너지, 에너지저장, 청정생산, 청정융합,<br/>특별세션(I): [원광대학교 RISE사업단] 미래형모빌리티 융합기술개발 세미나</b><br><b>포스터발표 II: 공정시스템, 에너지전환, 자원순환, 특별세션(VIII): 2026년 제1회 제주지역기술혁신허브 기술성과교류회</b> |  |  |  |   |   |                                |
| 09:00~17:00   | 홍보전시회 (3층 로비)  |  |  |   |   |                                |

| 3월 20일(금)   | 321호                                       |
|-------------|--|
| 09:30~12:00 | 특별세션(XI) 탄소중립을 위한 청정기술의 역할 (chair: 안용태 교수) |

## 부산 BEXCO 제2전시장 3층 발표장 안내



- 사전 및 현장등록처: 3층 발표장 로비
- 평의원회: 321호
- 포스터발표: 3층 로비
- 홍보전시회: 3층 발표장 로비
- 평의원 만찬: 중식당 금루(센텀메디컬센터 3층, 0507-1436-3727)
- 커피 제공: 3층 로비
- ※ BEXCO 제2전시장 3층: wifi 가능
- ※ 제2전시장 2층 공중보행통로를 이용하여 제1전시장으로 이동 가능
- 초청강연, 총회, 시상, 경품 추첨: 321+322호
- 구두발표: 321~326호
- VIP룸, 미팅룸, 휴게공간: 320호

## 경품추첨 행사



### ■ 추첨방법

- 등록자 중에서 랜덤 추첨

### ■ 추첨 및 경품지급

- 추첨: 2026년 3월 19일(목), 17:40 총회 장소(321+322호)
- 갤럭시탭S10 128GB: 1대
- 에어팟 4세대: 2대
- 도서상품권 10만원권 5매, 5만원권 10매

## 부산 BEXCO 오시는 길



주소: 부산광역시 해운대구 APEC 30로 (대표전화: 051-740-7300)

### [자동차로 오시는 길]

- 경부고속도로 이용: 약 5시간 10분 소요
- 중부내륙고속도로 이용: 약 5시간 10분 소요

### [기차로 오시는 길]

- 출발지: 서울  
서울역 ↔ 부산역 (약 2시간 48분 소요) ↔ 부산 BEXCO(택시 약 38분 소요)
- 출발지: 타지역  
대구, 동대구역 ↔ 부산역 (약 40분 소요) ↔ 부산 BEXCO(택시 약 38분 소요)  
대전역 ↔ 부산역 (약 1시간 35분 소요) ↔ 부산 BEXCO(택시 약 38분 소요)

## 초청강연

- 일시 2026년 3월 19일(목) 11:30~12:00
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 321+322호

chair: 안용태 총무이사(경기대학교)

- 11:30(30') 지방정부가 여는 탄소중립의 새로운 질서  
- 경기도의 전략적 전환 실험  
김혜애 원장(경기환경에너지진흥원)

### 연사소개



#### □ 주요경력

- 경기도 기후위기대응위원회 위원(현)
- 한국환경보전원(구.환경보전협회) 상근부회장(2021~2023)
- 한양대학교 자원환경공학과 대우교수(2020~2023)
- 대통령직속 탄소중립·녹색성장위원회 위원(2021~2022)
- 한국국제협력단 비상임이사(2021~2022)
- 대통령비서실 기후환경비서관(2017~2020)
- (사)녹색연합 공동대표(2015~2017)
- 서울에너지드림센터 센터장(2013~2017)
- (사)녹색교육센터 소장(2007~2012)

#### □ 학 력

- 한양대학교 사회학과 졸업
- 한양대학교 공공정책대학원 행정학(정책학) 석사 졸업

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

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

- 일시 2026년 3월 18일(수) 15:00~17:00
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 325호
- Organizer 심재오 교수(원광대학교)
- 주관 원광대학교 RISE 사업단

chair: 전경원 교수(국립군산대학교)

- 15:00('20) CT-S1-1 고농도 일산화탄소를 줄이기 위한 수성가스전이(Water-Gas Shift)반응용 Cu 기반 촉매 개발 연구  
윤채민<sup>1</sup>, 전이정<sup>1</sup>, 김창현<sup>1</sup>, 전경원<sup>2</sup>, 심재오<sup>1</sup> (<sup>1</sup>원광대학교, <sup>2</sup>국립군산대학교)
- 15:20('20) CT-S1-2 X선 분석 기반 RWGS 반응에서의 Cu-CeO<sub>2</sub>-MgO 촉매의 반응 메커니즘 규명 연구  
전이정<sup>1</sup>, 김창현<sup>1</sup>, 윤채민<sup>1</sup>, 전경원<sup>2</sup>, 심재오<sup>1</sup> (<sup>1</sup>원광대학교, <sup>2</sup>국립군산대학교)
- 15:40('20) CT-S1-3 FEM을 활용한 VR 레졸버의 편심 분류 및 특성 연구  
김종민, 최준서, 정선우, 진창성 (원광대학교)
- 16:00('20) CT-S1-4 실험계획법을 통한 비가역 감자에 대한 Dy-Free 영구자석 모터의 최적 설계  
윤성현, 이광민, 정옥윤, 임태현, 진창성 (원광대학교)
- 16:20('20) CT-S1-5 Synthesis of Boron Nitride Nanoparticles and Nanotubes via Nitrogen Thermal Plasma without Additional Nitriding Agents  
Se Jin Oh, Han Jun Lee, Tae-Hee Kim (Wonkwang University)
- 16:40('20) CT-S1-6 Resource Recovery Using Thermal Plasma Decomposition of Waste Undaria Pinnatifida: Biochar and Hydrogen Production  
Han Jun Lee, Se Jin Oh, Tae-Hee Kim (Wonkwang University)

## 특별세션(II): 신진연구자 특별세션 I Rising Stars: Toward Cleaner Technology

- 일시            2026년 3월 18일(수) 15:00~16:00
- 장소            부산 BEXCO 제2전시장 321호
- Organizer    손문 박사(한국과학기술연구원), 이보름 교수(전남대학교)

chair: 손문 박사(한국과학기술연구원)

- 15:00('05)            연사 소개 및 세션 목적 안내
- 15:05('35)            ICT 융합 연구 전략과 연구재단 과제 평가 프로세스의 이해  
박종애 단장(한국연구재단 ICT 융합연구단)
- 15:40('20)            질의응답
- 17:00('60)            평의원회의 참석: 신진연구자 소개
- 18:00~                평의원과 함께 하는 만찬(중식당 금루)

## 특별세션(II): 신진연구자 특별세션 II Rising Stars: Toward Cleaner Technology

- 일시            2026년 3월 19일(목) 13:00~16:30
- 장소            부산 BEXCO 제2전시장 323호
- Organizer    손문 박사(한국과학기술연구원), 이보름 교수(전남대학교)

chair: 손문 박사(한국과학기술연구원)

- 13:00('20) CT-S2-1    Investigating the CO<sub>2</sub> Adsorption Reversibility of Solid Semiclathrates  
Confined in Silica Gel Pores  
Junghoon Mok<sup>2</sup>, Sungwoo Kim<sup>1</sup>, Gyeol Ko<sup>1</sup>, Yongwon Seo<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Ulsan National Institute of Science and Technology, <sup>2</sup>Kyonggi University)
- 13:20('20) CT-S2-2    Structure-Performance Engineering of Porous Adsorbents for CO<sub>2</sub>  
Separation  
Heseong An (Suncheon National University)
- 13:40('20) CT-S2-3    바이오매스 유래 알코올의 전기화학적 산화 및 고분자 단량체 생산을 위한 니켈 기반  
수산화물 전기축매 설계  
문병철 (한국과학기술연구원)
- 14:00('20) CT-S2-4    Phase- and Composition-Engineered Transition Metal Dichalcogenide  
Alloy Nanosheets for Efficient Hydrogen Evolution Reaction  
Ik Seon Kwon (Kunsan National University)
- 14:20('20) CT-S2-5    Nanostructured Electrode Design Strategies for High-Performance  
Metal-Chalcogen Batteries  
Jin-Sung Park (Ajou University)
- 14:40('10)            coffee break  
chair: 이보름 교수(전남대학교)
- 14:50('20) CT-S2-6    차세대 소듐이온전지용 고용량 전극 소재 개발을 위한 조성 설계 전략  
김경호 (국립부경대학교)
- 15:10('20) CT-S2-7    Catalytic and Reactor Engineering for Efficient Photoelectrochemical  
H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Production  
Taehwa Jeon (Korea Institute of Science and Technology)
- 15:30('20) CT-S2-8    사용 후 배터리 재활용을 위한 에너지 효율적 기계적 전처리 공정 설계  
이원재<sup>1</sup>, 한성수<sup>1,2</sup>, 서주범<sup>1</sup>, 조인태<sup>1,2</sup>  
(<sup>1</sup>한국지질자원연구원, <sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교)
- 15:50('20) CT-S2-9    수차해석과 AI 모델링을 활용한 에너지·화공 플랜트 시스템 성능 및 환경성 최적화 연구  
조현빈 (한국에너지기술연구원)
- 16:10('20) CT-S2-10    Biofuel Production Towards better Combustion and Emissions  
Taehoon Han (University of Suwon)

## 특별세션(III): 미세조류를 이용한 지속 가능한 항공유 Sustainable Aviation Fuel from Microalgae

- 일시 2026년 3월 18일(수) 13:00~14:50
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 322호
- Organizer 정우진 교수(경기대학교)
- 주관 엔텍스(주), (주)씨엔에스아이엔티, 한양대학교, 경기대학교, 한국기계연구원

chair: 정우진 교수(경기대학교)

- 13:00('20) CT-S3-1 Mega Cell Factory 기반 미세조류 바이오매스 연속 생산과 CO<sub>2</sub> MRV 통합 기술개발  
홍수열, 박상용, 송지호, 김소원, 황성현, 김용희, 사영호, 정지훈, 손주동  
((주)씨엔에스아이엔티)
- 13:20('20) CT-S3-2 Organic Solvent-Free Purification of Microalgae-Derived HTL Bio-Crude Toward Sustainable Aviation Fuel Production  
Deok-Won Kim, Hyun-Jo Ahn, Liao Ziqiao, Nikita Yadav, Ghulam Mustafa, Aliya Alvi, Byong-Hun Jeon (Hanyang University)
- 13:40('20) CT-S3-3 미세조류 수열액화 공정 부산물 하이드로차의 특성 변화와 흡착 성능 평가: 지속가능 항공유 생산 공정에서 활용 가능성  
정우진, 장순웅, 이건호 (경기대학교)
- 14:00('10) coffee break
- 14:10('20) CT-S3-4 수열 액화 공정을 이용한 미세조류 유래 바이오원유의 수율 및 연료 특성 평가  
박명수, 구슬기, 남궁현민 (엔텍스(주))
- 14:30('20) CT-S3-5 미세조류로부터 바이오오일 생산을 위한 CSTR 반응기에서 수열액화 반응에 대한 수치 해석  
최상균<sup>1,2</sup>, 정연우<sup>1</sup>, 한소영<sup>1</sup> (<sup>1</sup>한국기계연구원, <sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교)

## 특별세션(IV): 친환경 이차전지 산업을 위한 고순도 탄산리튬 실증기술 및 ESG 대응전략\_비공개

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

- 일시 2026년 3월 18일(수) 13:00~14:20
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 323호
- Organizer 박헌수 연구소장((주)엔에이치리사이텍컴퍼니)
- 주관 (주)엔에이치리사이텍컴퍼니

chair: 박헌수 연구소장((주)엔에이치리사이텍컴퍼니)

- 
- 13:00('20) CT-S4-1 실증공정 적용을 위한 인산리튬 기반 탄산리튬 입도 제어 영향 평가  
장영준, 심문수, 박헌수 ((주)엔에이치리사이텍컴퍼니)
  - 13:20('20) CT-S4-2 Integrated Process for Battery-Grade Lithium Carbonate Production  
and Residual Lithium Recovery Using Commercial Adsorbent (LSM-201)  
Eun-Ji Lee, Soon-Ho Cho, Ramesh Kumar, Chejarla Venkatesh Reddy,  
Byong-Hun Jeon (Hanyang University)
  - 13:40('20) CT-S4-3 막증류공정을 활용한 리튬 수용액 농축 및 HCl 회수기술  
석진국, 김백암 (앵스트롬스(주))
  - 14:00('20) CT-S4-4 리튬이온 농축을 위한 흡착공정 거동 해석  
박종기, 추고연 (한국에너지기술연구원)

특별세션(V): 충청권 지역혁신선도연구센터, 충북RISE 차세대  
이차전지 공동연구센터 및 학연협력플랫폼 공동 이차전지 소재 연구  
개발 심포지엄

Chungcheong Regional Innovation Leading Research Center,  
Chungbuk RISE Next-Generation Secondary Battery Joint Research  
Center & Industry-Academia Cooperation Platform Joint Symposium  
on Secondary Battery Materials Research

- 일시 2026년 3월 18일(수) 15:00~17:00
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 324호
- Organizer 정상문 교수(충북대학교), 조중상 교수(충북대학교), 박기대 교수(충북대학교)
- 주관 기업수요 대응 차세대 이차전지 소재 선도연구센터,  
차세대 이차전지 학연협력플랫폼 구축 시범사업,  
충북RISE 차세대 이차전지 공동연구센터

chair: 박기대 교수(충북대학교)

- |            |         |   |
|------------|---------|---|
| 15:00('15) | CT-S5-1 | Rational Gradient Design of Mo and F Doped Ni-Rich Layered Cathodes for High-Performance Lithium-Ion Batteries<br><u>Srinivasan Alagar</u> , Jun Kim, Gi Dae Park, Sang Mun Jeong (Chungbuk National University)  |
| 15:15('15) | CT-S5-2 | Fire-Resistant Electrolyte Engineering for Safer and High-Performance Silicon and High Nickel-Based Li-Ion Batteries<br><u>Dong Guk Kang</u> <sup>1</sup> , Kihun An <sup>1</sup> , Dung Tuan Tien Vu <sup>1</sup> , Han Bao Nguyen <sup>1</sup> , Do Youb Kim <sup>2</sup> , Koeun Kim <sup>3</sup> , Yoon Sung Lee <sup>3</sup> , Seung-Wan Song <sup>1</sup><br>( <sup>1</sup> Chungnam National University, <sup>2</sup> Korea Research Institute of Chemical Technology, <sup>3</sup> Hyundai Motor Group) |
| 15:30('15) | CT-S5-3 | Confining Li <sup>+</sup> Solvation in Core-Shell Metal-Organic Frameworks for Stable Lithium Metal Batteries at 100°C<br><u>Quan Van Nguyen</u> , Sangbaek Park (Chungnam National University)   |
| 15:45('15) | CT-S5-4 | Synergistic Polysulfide Regulation via Ball-Milled Z-Scheme Ternary Oxide/g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Heterojunctions for High-Performance Lithium-Sulfur Batteries<br><u>Jinseok Han</u> , MinA Kim, Jae-Kwang Kim (Cheongju University)   |
| 16:00('15) |         | coffee break  |
| 16:15('15) | CT-S5-5 | Pursing Stable and Redox Mediating Interfaces for High-Performance Lithium-Sulfur Batteries<br><u>Won Il Kim</u> , Ho Seok Park (Sungkyunkwan University)   |
| 16:30('15) | CT-S5-6 | Selective Extraction-Driven Resource Redistribution of Waste Materials for Advanced Li-Ion Battery Cathode Materials<br><u>Kyoung Sun Kim</u> <sup>1,2</sup> , Seulgi Kim <sup>3</sup> , Dongju Lee <sup>4</sup> , Seung-Ho Yu <sup>2</sup> , Hyungsub Kim <sup>1</sup><br>( <sup>1</sup> Korea Atomic Energy Research Institute, <sup>2</sup> Korea University, <sup>3</sup> Korea institute of Geoscience and Mineral Resources, <sup>4</sup> Chungbuk National University)                                   |
| 16:45('15) | CT-S5-7 | Phase Engineering of Vanadium-Based Cathode to Enhance Zn-Ion Diffusion Kinetics in Aqueous Systems<br><u>Bobae Ju</u> , Won G. Hong, Hae Jin Kim (Korea Basic Science Institute)   |

## 특별세션(VI): 탄소중립선도 수소 생태계 확립을 위한 원스탑 플랫폼 기술교류회

### Technology Exchange Meeting of One-Stop Platform for Establishing a Hydrogen Ecosystem

- 일시            2026년 3월 18일(수) 15:00~17:10
- 장소            부산 BEXCO 제2전시장 326호
- Organizer    이만식 박사(한국생산기술연구원), 최경민 교수(부산대학교)
- 주관            동남권 학연협력플랫폼 사업단

chair: 나상경 교수(부산대학교)

- |            |         |  |
|------------|---------|--|
| 15:00('10) | CT-S6-1 | SCAPS-1D 시뮬레이션을 통한 태양광 수소 생산용 Tandem 페로브스카이트 태양전지 구조 최적화<br>김민철, 이동현 (부산대학교)   |
| 15:10('10) | CT-S6-2 | Ni Based Hydrogenation Catalyst for Sustainable Aviation Fuel (SAF) Production<br>Suhan Kim <sup>1</sup> , Yoon Hyun Seo <sup>1</sup> , Joonhee Kang <sup>2</sup><br>( <sup>1</sup> Korea Institute of Industrial Engineering, <sup>2</sup> Pusan National University)   |
| 15:20('10) | CT-S6-3 | 액화수소 저장탱크 제작을 위한 용접부 피로 및 파괴 특성 평가 연구<br>박정열 <sup>1</sup> , 김정현 <sup>2</sup> , 지창욱 <sup>1</sup> , 박재한 <sup>1</sup> ( <sup>1</sup> 한국생산기술연구원, <sup>2</sup> 부산대학교)   |
| 15:30('10) | CT-S6-4 | 수계아연전지용 아연 음극 안정화를 위한 표면 개질 기술 개발<br>김대욱 (한국생산기술연구원)   |
| 15:40('10) | CT-S6-5 | Thermal Phase Engineering of 2D Ni Nanoplates as OER Catalysts for Alkaline Seawater Anion Exchange Membrane Electrolysis<br>Suyeon Kim <sup>1</sup> , Oi Lun Helena Li <sup>2</sup> , Dong-Ha Lim <sup>1</sup><br>( <sup>1</sup> Korea Institute of Industrial Technology, <sup>2</sup> Pusan National University)  |
| 15:50('10) | CT-S6-6 | Reduction-Driven Wet Alloying Strategy toward Low-Iridium Ir-Ni-Co Ternary Electrocatalysts for Enhanced Oxygen Evolution<br>Seong Ji Kim <sup>1,2</sup> , Jin Ho Lee <sup>2</sup> , Oi Lun Helena Li <sup>1</sup> , Dong-Ha Lim <sup>1,2</sup> , Hee Soo Kim <sup>2</sup> ( <sup>1</sup> KITECH & Pusan National University, <sup>2</sup> Korea Institute of Industrial Technology) |
| 16:00('10) |         | coffee break   |

chair: 박정열 박사(한국생산기술연구원)

- |            |          |  |
|------------|----------|--|
| 16:10('10) | CT-S6-7  | A Dual-Cathode Microbial Electrolysis Cell Enabling Mode Switching between Hydrogen and Methane Production<br>Eunseo Kim, Minsoo Kim, Jung Rae Kim (Pusan National University)   |
| 16:20('10) | CT-S6-8  | Development of an Ethylene Glycol-Based Alternative Anodic Oxidation Strategy for Advancing Alkaline/AEM Water Electrolysis Technology<br>Min Kyoung Kim, Jungho Jae (Pusan National University)   |
| 16:30('10) | CT-S6-9  | 액체수소 탱크 내 자가가압·증발 거동과 리브 구조의 저감 효과<br>조성범, 김성윤, 김재성, 엄도건, 최승태, 황진울 (부산대학교)   |
| 16:40('10) | CT-S6-10 | Bolted Joint Analysis in a Torispherical-Head Propellant Tank<br>Heesung Lee, Kyunghoon Lee (Pusan National University)  |
| 16:50('10) | CT-S6-11 | Pore Architecture as a Determinant of Intrinsic Platinum Utilization and Catalytic Efficiency in the Hydrogen Evolution Reaction<br>Rahul Ramkumar <sup>1</sup> , Seung Geun Jo <sup>1</sup> , Byungjin Lee <sup>2</sup> , Jung Woo Lee <sup>1</sup><br>( <sup>1</sup> Pusan National University, <sup>2</sup> Korea Institute of Industrial Technology) |
| 17:00('10) | CT-S6-12 | Plasma-Engineered Cl-N Co-Doped Graphene for Active Chloride Exclusion and Enhanced Corrosion Resistance in Seawater Oxygen Evolution Reaction Systems<br>Aye Myint Myat Kyaw, So Hyun Jeong, Oi Lun Li (Helena)<br>(Pusan National University)  |
| 17:10      |          | 단체 사진촬영  |

## 특별세션(VII): 암모니아 기반 에너지 및 친환경 기술 심포지엄 Symposium on Ammonia-Based Energy and Clean Technologies

- 일시 2026년 3월 19일(목) 15:30~17:30
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 324호
- Organizer 채호정 박사(한국화학연구원)
- 주관 한국화학연구원 수소공정 연구센터

chair: 김영민 박사(한국화학연구원)

- 15:30('30) CT-S7-1 암모니아-SCR 기술을 활용한 내연기관 배출가스 저감 및 AI 이용 제어 가능성 연구  
조규백<sup>1</sup>, 김양화<sup>2</sup>, 이성원<sup>1</sup>, 김홍석<sup>1</sup> (<sup>1</sup>한국기계연구원, <sup>2</sup>울산대학교)
- 16:00('30) CT-S7-2 수소 생산을 위한 CeO<sub>2</sub>-CoFe 기반 비귀금속 암모니아 분해 촉매 개발  
이수언, Thien An Le, 김영민, 이유진, 김정량, 김태완, 정광은, 채호정  
(한국화학연구원)
- 16:30('30) CT-S7-3 건식 밀링을 이용한 메탄 슬립 저감용 Pd/Zeolite 촉매 개발  
김민식, 임영환, 이연진, 이유진, 김영민, 채호정 (한국화학연구원)
- 17:00('30) CT-S7-4 Solvothermal Processed Ru-Based Catalyst Enhances Ammonia  
Decomposition Efficiency for Green H<sub>2</sub> Production  
Thien An Le, Youngmin Kim, Younghwan Im, Min Sik Kim, Ho-Jeong Chae  
(Korea Research Institute of Chemical Technology)

## 특별세션(VIII): 2026년 제1회 제주 지역기술혁신허브 기술성과교류회\_비공개

The 2026 1st Meeting for 'Jeju Regional Technology Innovation Hub'  
Performance Review and Strategic Planning

- 일시            2026년 3월 19일(목) 15:20~17:30
- 장소            부산 BEXCO 제2전시장 326호
- Organizer    이대현 박사((재)제주테크노파크), 조현석 교수(서강대학교)
- 주관            (재)제주테크노파크
- 지원            대기환경부문위원회

chair: 류성필 단장((재)제주테크노파크)

- |            |         |   |
|------------|---------|---|
| 15:20('10) |         | 참석자 등록 및 인사<br>이대현 ((재)제주테크노파크)   |
| 15:30('15) | CT-S8-1 | 알칼라인 수전해 고전류·부하변동 운전을 위한 셀 계면 및 물질전달 최적화 연구<br>조현석, 신희중, 이종석 (서강대학교)                            |
| 15:45('15) | CT-S8-2 | 고성능 MEA 구조 알칼라인 수전해 개발<br>조원철, 이정원 (서울과학기술대학교)  |
| 16:00('15) | CT-S8-3 | 전기화학적 산소발생반응 안정성과 부식 내성이 향상된 적층형 전극 및 분리판 기술 연구<br>김민중, 이빈 (경희대학교)                              |
| 16:15('15) | CT-S8-4 | MOF Derived NiCoP 촉매 최적화를 통한 알칼라인 수전해 수소 발생 반응성능 향상<br>김완식 (한국에너지공과대학교)                         |
| 16:30('15) | CT-S8-5 | 재생에너지 변동 대응 ESS 및 수전해를 위한 DC/DC 전력변환 및 지능형 부하적응 제어 연구<br>최영준, 선희정, 진현진 (제주대학교)                  |
| 16:45('15) | CT-S8-6 | 제주 그린수소 혁신 허브 구축을 위한 실증 부지 선정 및 인허가 로드맵 수립<br>장문석, 정석용, 강태형, 정광성 ((주)웅진엔지니어링)                   |
| 17:00('15) | CT-S8-7 | RE100 기반 그린수소 생산을 위한 수전해시스템 테스트베드 및 데이터베이스 구축<br>김대진, 유경상, 김찬수, 남양현, 윤승진, 전덕환, 최미곤 (한국에너지기술연구원) |
| 17:15('15) | CT-S8-8 | 250kW급 수전해 시스템의 부하 변동 운전 특성 분석 및 안정성 제어 방안<br>김경수, 권경안, 황세선, 김대원 ((주)테크로스)                      |

## 특별세션(IX): 폐기물 에너지화 및 자원화 Waste-to-Energy/Resource

- 일시 2026년 3월 19일(목) 15:10~17:40
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 325호
- Organizer 남인현 박사(한국지질자원연구원), 권오범 과장(태영건설)
- 주관 한국지질자원연구원, 태영건설

chair: 남형석 교수(경북대학교)

- 15:10('20) CT-S9-1 Wastewater-to-Clean H<sub>2</sub> via Gaseous NH<sub>3</sub> Recovery  
Jechan Lee (Sungkyunkwan University)
- 15:30('20) CT-S9-2 Sustainable Conversion of Livestock Manure into Solid Fuel for Carbon Neutrality  
Dong-Jun Lee (Chonnam National University)
- 15:50('20) CT-S9-3 플라스틱과 바이오매스의 공동 수열 탄화로부터 유도된 하이드로차의 특성 및 연소 성능  
김정훈, 이도연 (국립한밭대학교)
- 16:10('10) coffee break

chair: 조성현 교수(부산대학교)

- 16:20('20) CT-S9-4 전로슬래그의 이산화탄소 흡착제 및 재생건설재료 활용  
정성업 (경북대학교)
- 16:40('20) CT-S9-5 Techno-Economic and Life-Cycle Assessment of Hydrogen and Methanol Production from Nonwoven Polymer Waste via CO<sub>2</sub>-Assisted Pyrolysis  
이재원<sup>1</sup>, 이세영<sup>1</sup>, 조형태<sup>2</sup> (<sup>1</sup>한양대학교 ERICA, <sup>2</sup>경희대학교)
- 17:00('20) CT-S9-6 Insect-Based Valorization of Organic Waste  
Jee Young Kim (Ajou University)
- 17:20('20) CT-S9-7 폐리튬배터리 양극재 재합성 연구 소개  
권경중 (세종대학교)

## 특별세션(X): 조선해양 청정기술의 새로운 지평: 혁신과 협력의 장!!

### New Horizons in Marine Clean Technology: A Forum for Innovation and Collaboration!!

- 일시 2026년 3월 19일(목) 13:20~16:40
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 321+322호
- Organizer 임동하 박사(한국생산기술연구원), 장재환 박사(중소조선연구원)
- 주관 한국생산기술연구원, 중소조선연구원

chair: 임동하 박사(한국생산기술연구원), 장재환 박사(중소조선연구원)

- 13:20('20) CT-S10-1 친환경 기술과 관련된 AI 기술 및 시뮬레이션 사례  
김낙근, 김귀연, 김대현, 유승우, 장재민 (캐드아이티코리아)
- 13:40('20) CT-S10-2 An Experimental Study on the Thermal Performance and Improvement of a Heat Exchanger for Ammonia-Fueled Engine Exhaust Aftertreatment System  
Gyudeok Kim, Jaehwan Jang  
(Research Institute of Medium & Small Shipbuilding)
- 14:00('20) CT-S10-3 Application of Zero-Leakage Sealing Structure for Ammonia SCR Systems Based on Empirical Data from Marine SOx Scrubbers  
Hansaem Seong (DH Controls)
- 14:20('20) CT-S10-4 MW급 암모니아 엔진 후처리용 배기가스 승온 장치의 열유동 수치해석 및 설계 타당성 검증  
황규관, 김준범, 전형철, 김성태 ((주)유아이티)
- 14:40('20) CT-S10-5 암모니아-디젤 혼소 단기통 엔진에서 분사 시기가 성능에 미치는 영향 연구  
장진영<sup>1</sup>, 유동규<sup>1,2</sup>, 이강산<sup>1,3</sup>, 우영민<sup>1</sup>, 고아현<sup>1</sup>, 황선미<sup>1</sup>, 임옥택<sup>2</sup>, 박성욱<sup>3</sup>  
(<sup>1</sup>한국에너지기술연구원, <sup>2</sup>울산대학교, <sup>3</sup>한양대학교)
- 15:00('20) CT-S10-6 Emission Aftertreatment Technologies for Ammonia-Fueled Ships  
Sun-Mi Hwang, Hermawan Prajitno, Sun A Choi, Soon Kwan Jeong  
(Korea Institute of Energy Research)
- 15:20('20) CT-S10-7 Investigation of Tunable Surface Characteristics of Ceria-Supported Cobalt Spinel Catalysts for Direct N<sub>2</sub>O Decomposition  
Dong Wook Kwon<sup>1</sup>, Hwajun Lee<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Korea Institute of Science and Technology, <sup>2</sup>Korea University of Science and Technology)
- 15:40('20) CT-S10-8 조선·해양 산업의 친환경 기술  
김희경, 강종대, 이승필 (HD한국조선해양)
- 16:00('20) CT-S10-9 시스템 모델링기반 풍력터빈 및 배터리 화재예측모델 개발  
김창현 (중소조선연구원)
- 16:20('20) CT-S10-10 발표취소

## 일반 구두발표: 수소 및 재생에너지

- 일시 2026년 3월 19일(목) 10:10~11:25
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 325호
- Organizer 장원준 교수(아주대학교)

chair: 김정철 교수(국립한밭대학교)

- 10:10('15) CT-A1 Deterministic Reinforcement Learning-Based Control of Power-to-Hydrogen Integrated District Heating Networks  
Nikita Gupta, Vahid Khaligh, Jay Liu (Pukyong National University)
- 10:25('15) CT-A2 Aluminothermic-Reduction Driven Surface Reconstruction of Ni Foam into Structurally Integrated Fe-Ni Secondary Phase Electrodes for Alkaline Water Electrolysis  
Seonghee Kim<sup>1</sup>, Oi Lun Li<sup>2</sup>, Dong-Ha Lim<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, <sup>2</sup>Pusan National University)
- 10:40('15) CT-A3 암모니아 경로를 고려한 수소환원제철의 모델 기반 통합 분석  
김진수 (전남대학교)
- 10:55('15) CT-A4 Direct Methane Decomposition in a Fluidized-Bed Reactor Using Nickel-Supported Red Mud Catalysts  
Na Yeon Kim, Hyungwon Jang, Ji Bong Joo (Konkuk University)
- 11:10('15) CT-A5 Stepwise Upgrading of Biomass Pyrolysis Oils Toward Sustainable Aviation Fuel via Alkylation and Hydrodeoxygenation  
Hanbyeol Kim, Dong-Ha Lim (Korea Institute of Industrial Technology)

## 일반 구두발표: 에너지저장

- 일시 2026년 3월 19일(목) 10:50~11:10
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 323호
- Organizer 조중상 교수(충북대학교)

chair: 박진성 교수(아주대학교)

- 10:50('20) CT-B1 중공 질소 도핑 탄소 네트워크와 피치 유래 탄소를 활용한 계층적 실리콘 복합 마이크로스피어의 설계 및 리튬 이온전지 음극 특성  
이재섭<sup>1,2</sup>, 조중상<sup>1</sup> ( <sup>1</sup>충북대학교, <sup>2</sup>고려대학교)

## 일반 구두발표: 에너지전환

- 일시 2026년 3월 19일(목) 16:40~17:20
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 323호
- Organizer 라호원 박사(한국에너지기술연구원)

chair: 윤성민 박사(한국에너지기술연구원)

- 16:40('20) CT-C1 순환유동층 암모니아 혼소 시스템 운전 최적화를 위한 AI 기반 예측 모델 개발  
조현빈<sup>1</sup>, 임호태<sup>1,2</sup>, 박성진<sup>1</sup>, 윤성민<sup>1</sup>, 이경택<sup>1,2</sup>, 라호원<sup>1</sup>, 문태영<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>한국에너지기술연구원, <sup>2</sup>성균관대학교)
- 17:00('20) CT-C2 해양생물 유래 지질의 FAME계 바이오연료 전환 가능성 조사  
장정희, 장현성, 이지은, 윤여진, 이재홍, 조윤희 (고등기술연구원)

## 일반 구두발표: 청정융합

- 일시 2026년 3월 19일(목) 09:00~11:20
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 326호
- Organizer 장민 교수(광운대학교)

chair: 김형일 교수(연세대학교)

- 09:00('20) CT-D1 Diagnosing Metabolic Bottlenecks via Flexibility Collapse: An Intervention-Aware Digital Twin for Non-Model Microbial Cultures  
Changman Kim (Chonnam National University)
- 09:20('20) CT-D2 Integrating Vermiremediation of Dairy Sludge: Influence of Pre-Composting Duration on Nutrient Enrichment and Agronomic Potential  
Ramesh Kumar<sup>1</sup>, Jyotiskha Mohapatra<sup>2</sup>, Sankha Chakraborty<sup>2</sup>, Mustafa Ghulam<sup>1</sup>, Hye-Lim Kwon<sup>1</sup>, Byong-Hun Jeon<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Hanyang University, <sup>2</sup>Kalinga Institute of Industrial Technology)
- 09:40('20) CT-D3 Amendment of Acidic Soil to Neutralization and Microbiome Abundance During Agricultural Utilization of Rock Waste Sludge  
Ju-Hyeok Kwon, Kil-Hong Seol, Ghulam Mustafa, Soon-Ho Cho, Byong-Hun Jeon (Hanyang University)
- 10:00('20) CT-D4 한국 산성광산배수로부터의 희토류 회수 및 수질 정화 동시 공정 개발  
황건덕<sup>1,2</sup>, 강태이<sup>1</sup>, 이재형<sup>1</sup>, 누하슬리나<sup>1,2</sup>, 장민<sup>1,2</sup>  
(<sup>1</sup>광운대학교, <sup>2</sup>플라즈마바이오효과과학연구센터)
- 10:20('20) CT-D5 An Alternative to "Cumene Process": A Green Approach for Phenol Production  
Shankha S. Acharyya, Ramesh Kumar, Byong-Hun Jeon (Hanyang University)
- 10:40('20) CT-D6 광산 배수 슬러지를 이용한 불소 입상 흡착제 개발  
종초은<sup>1,2</sup>, 유혜진<sup>1</sup>, 렌니샤<sup>1</sup>, 윤소연<sup>1,2</sup>, 장민<sup>1,2</sup>  
(<sup>1</sup>광운대학교, <sup>2</sup>플라즈마바이오효과과학연구센터)
- 11:00('20) CT-D7 Reversible Catalyst Deactivation in Electrolyte-Engineered Photoelectrochemical Ammonia Oxidation Systems  
Wooyul Kim (Korea Institute of Energy Technology)

## 일반 구두발표: 자원순환

- 일시 2026년 3월 19일(목) 10:20~10:40
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 321+322호
- Organizer 한요셉 박사(한국지질자원연구원)

chair: 한성수 박사(한국지질자원연구원)

- 10:20('20) CT-F1 Semi-Flow Depolymerization of Cellulose to DP-Controlled Oligosaccharides for Polyol Applications  
Han-Ung Kim<sup>1</sup>, Jungho Jae<sup>2</sup>, Dong-Ha Lim<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, <sup>2</sup>Pusan National University)

## 일반 구두발표: 청정생산

- 일시 2026년 3월 19일(목) 09:20~10:00
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 325호
- Organizer 성기명 교수(수원대학교)

chair: 성기명 교수(수원대학교)

- 09:20('20) CT-G1 (Invited Lecture) Sustainable in-situ Depolymerization of PET Microplastics Using Engineered Marine Living Biocatalysts  
Sung In Lim, Gyu-Jin Lee (Pukyong National University)
- 09:40('20) CT-G2 (Invited Lecture) E-Gasoline 생산 및 활용 관련 기술 동향: 자동차 산업 분야  
오세철 (부산대학교)

## 일반 구두발표: 공정시스템

- 일시 2026년 3월 19일(목) 13:00~15:20
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 324호
- Organizer 안유찬 교수(계명대학교), 유준재 교수(서울시립대학교), 이호재 교수(홍익대학교)

chair: 임종훈 박사(고등기술연구원)

- 13:00('20) CT-H1 (Keynote Speaker) 재생에너지 연계형 스마트팜의 에너지 최적화 및 환경성, 경제성 평가  
이용운<sup>1</sup>, 박지선<sup>2</sup>, 조경일<sup>1</sup> (<sup>1</sup>한국생산기술연구원, <sup>2</sup>연세대학교)
- 13:20('15) CT-H2 Multi-level Predictive Modeling of Rotating Packed Bed (RPB) Contactors for Enhanced Carbon Capture  
Boram Gu (Chonnam National University)
- 13:35('15) CT-H3 Biodiesel Production from Microalgae through Thermally Induced Non-Catalytic Transesterification: Techno-Economic Assessment  
Hyungtae Cho<sup>1</sup>, Dongho Choi<sup>1</sup>, Junyoung Park<sup>1</sup>, Eilhann E. Kwon<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>Kyung Hee University, <sup>2</sup>Hanyang University)
- 13:50('15) CT-H4 공정시스템 관점에서의 친환경 메탄올 생산 루트 탐색  
박진우 (동국대학교)
- 14:05('15) coffee break

chair: 박진우 교수(동국대학교)

- 14:20('15) CT-H5 EO 모델링, 최적화 기반 공정 청정기술 구현 전략  
김종운 (인천대학교)
- 14:35('15) CT-H6 청정에너지 생산을 위한 유동층 반응기 설계 및 스케일업: 실험, 시뮬레이션, 모델링 통합 연구  
김준영 (가톨릭대학교)
- 14:50('15) CT-H7 에너지 집약산업 LCA 기술개발 현황  
변재원 (전남대학교)
- 15:05('15) CT-H8 Novel Process Design for Heat Pump-Assisted Clean Hydrogen Production from Organic Waste Enhancing Energy and Economic Potential  
Jonghun Lim<sup>1</sup>, Subeen Wi<sup>1</sup>, Eunhye Song<sup>2</sup>, Seoyul Yang<sup>1</sup>,  
Soo Young Kang<sup>1</sup>, Hyungwoon Song<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Institute for Advanced Engineering, <sup>1</sup>Korea University)

## 학생 구두발표 I: 자원순환

- 일시            2026년 3월 19일(목) 09:00~10:20
- 장소            부산 BEXCO 제2전시장 321+322호
- Organizer    한요셉 박사(한국지질자원연구원)

chair: 한성수 박사(한국지질자원연구원)

- 
- |            |        |  |
|------------|--------|--|
| 09:00('10) | CT-S01 | <p>Sequential Oxidative Degradation and Mineralization of Polyethylene, Polypropylene, and Polystyrene by Mealworm Gut and Frass Microbial Consortia</p> <p><u>Suleman Shahzad</u>, Sandesh Pandey, Fida Hussain, Aparna Sharma, Syed Ejaz Hussain Mehdi, Woochang Kang, Sang-Eun Oh<br/>(Kangwon National University)</p>   |
| 09:10('10) | CT-S02 | <p>가축분퇴비 부숙도 평가를 위한 FRI 기반 DOM 형광 특성 변화 분석</p> <p><u>윤다은</u><sup>1</sup>, <u>박지은</u><sup>2</sup>, <u>정유진</u><sup>3</sup>, <u>장순웅</u><sup>1</sup>, <u>이윤경</u><sup>2</sup>, <u>허진</u><sup>2</sup>, <u>정우진</u><sup>1</sup><br/>(<sup>1</sup>경기대학교, <sup>2</sup>세종대학교, <sup>3</sup>국립환경과학원)</p>  |
| 09:20('10) | CT-S03 | <p>해조류 바이오매스와 생분해성 페플라스틱 빨대의 공동수열액화 반응 특성 연구</p> <p><u>정승묵</u>, <u>차재원</u>, <u>김정훈</u>, <u>이도연</u> (국립한밭대학교)</p>   |
| 09:30('10) | CT-S04 | <p>Upcycling of Spent LiCoO<sub>2</sub> as a Catholyte for Zinc-Cobalt Redox Flow Batteries</p> <p><u>Daeun Kim</u>, <u>Minjoon Park</u> (Pusan National University)</p>   |
| 09:40('10) | CT-S05 | <p>The Recycling of Used LFP Cathode Active Material for High-Voltage Redox Flow Batteries</p> <p><u>Seongbin Kang</u>, <u>Minjoon Park</u> (Pusan National University)</p>  |
| 09:50('10) | CT-S06 | <p>Highly Selective Production of Gasoline-Range Hydrocarbons via Hydroconversion of Polyolefins over Ru/CeO<sub>2</sub> and BEA Hybrid Catalysts</p> <p><u>Junho Suh</u><sup>1</sup>, <u>Hyeongdong Jung</u><sup>1</sup>, <u>Joonkeol Yoon</u><sup>1</sup>, <u>Jae-Soon Choi</u><sup>2</sup>, <u>Jungup Bang</u><sup>2</sup>, <u>Do Heui Kim</u><sup>1</sup><br/>(<sup>1</sup>Seoul National University, <sup>2</sup>Catalyst R&amp;D, LG Chem)</p> |
| 10:00('10) | CT-S07 | <p>Development of Technology for Recovering Metal Resources and Producing Energy from Spent Cathode Materials Using an Environmentally Friendly Microbial Fuel Cell System</p> <p><u>Yeonseo Jang</u>, <u>Haesung Jung</u> (Changwon National University)</p>  |
| 10:10('10) | CT-S08 | <p>폐배터리 재활용 공정 부산물로부터 비중선별을 활용한 유가 금속 분리 연구</p> <p><u>문서진</u><sup>1,2</sup>, <u>이원재</u><sup>1</sup>, <u>서주범</u><sup>1</sup>, <u>정해성</u><sup>2</sup>, <u>한성수</u><sup>1</sup> (<sup>1</sup>한국지질자원연구원, <sup>2</sup>창원대학교)</p>   |

## 학생 구두발표 II: 대기환경

- 일시 2026년 3월 19일(목) 09:00~09:30
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 323호
- Organizer 이종석 교수(서강대학교)

chair: 안희성 교수(국립순천대학교)

- 09:00('10) CT-S09 Improving the Sulfur Resistance of the Bulk Vanadium Oxide Catalyst for Low-Temperature NH<sub>3</sub>-SCR via Zeolite Mixing  
Hongbeom Park<sup>1</sup>, Hyun Sub Kim<sup>1</sup>, Hyeongdong Jung<sup>1</sup>, Sung Min Kim<sup>1</sup>, Jihoon Cha<sup>1</sup>, Inhak Song<sup>2</sup>, Do Heui Kim<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Seoul National University, <sup>2</sup>Korea University)
- 09:10('10) CT-S010 Enrichment of Coordinatively Unsaturated Pd Sites in Pd/CeO<sub>2</sub> via Facile Mechanochemical Synthesis for Efficient Methane Oxidation  
Gyu Hyun Jang, Dong Chan Park, Jun Hee Yoon, Do Heui Kim  
(Seoul National University)
- 09:20('10) CT-S011 NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Spinel for Simultaneous Abatement of Methane Slip and CO in LNG Marine Exhaust  
Wonjung Cho<sup>1,2</sup>, Gyungmin Choi<sup>2</sup>, Hee Soo Kim<sup>1</sup>, Dong-Ha Lim<sup>1,2</sup>  
(<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, <sup>2</sup>Pusan National University)

## 학생 구두발표 III: 에너지저장

- 일시 2026년 3월 19일(목) 09:40~10:40
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 323호
- Organizer 조중상 교수(충북대학교)

chair: 박진성 교수(아주대학교)

- 09:40('10) CT-S012 BNNS-Polymer Hybrid Interfaces for Dendrite-Free Anodes in Aqueous Zinc-Ion Batteries  
Ingyu Choi, Minseo Kim, Dongju Lee (Chungbuk National University)
- 09:50('10) CT-S013 프러시안 블루 유사체로부터 유래된 중공형 이원계 금속 산화물/탄소 복합 구조체 합성 및 리튬 이온 배터리 음극 소재로의 적용  
정승호<sup>1,2</sup>, 조중상<sup>1</sup> (<sup>1</sup>충북대학교, <sup>2</sup>고려대학교)
- 10:00('10) CT-S014 Enhancing the Stability of Lithium Metal Batteries via 3D Porous Yolk-Shell Carbon Frameworks Embedding Multi-Anion ZnS<sub>2</sub> Nanocrystals  
Jin Won Yang, Gi Dae Park (Chungbuk National University)

- 10:10('10) CT-S015 **올인원 비커법 및 분무건조 공정을 이용한 탄소 통합형 실리콘/중공 전이금속 산화물/질소 도핑 흑연질 탄소 복합 마이크로스피어의 합성 및 리튬이온전지 음극 적용**  
조범수<sup>1,2</sup>, 조중상<sup>1</sup> ( <sup>1</sup>충북대학교, <sup>2</sup>고려대학교)
- 10:20('10) CT-S016 **Ion-Regulating Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene/PVDF-HFP Separators for Long-Life Lithium Metal Batteries**  
Yechan Kim, Hyunsu Yu, Seongyun Kwon, Hyojin Jeon, Dongju Lee (Chungbuk National University)
- 10:30('10) CT-S017 **Polyfunctional Amine/전이 금속 산화물 복합체를 포함하는 N-도핑 탄소 중공 마이크로스피어의 One-Step 분무 열분해 합성 및 리튬 저장 특성 분석**  
김진웅, 조중상 (충북대학교)

## 학생 구두발표 IV: 공정시스템

- 일시 2026년 3월 19일(목) 09:00~10:20
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 324호
- Organizer 안유찬 교수(계명대학교), 유준재 교수(서울시립대학교), 이호재 교수(홍익대학교)

chair: 류준재 교수(서울시립대학교)

- 09:00('10) CT-S018 **FeSO<sub>4</sub>-Palmitic Acid Chemical Bath Deposition for Practical Superhydrophobic Coatings with Frost Suppression Performance in Heat Pump Systems**  
Soon Hyuk Lee, Jiyull Kim, Deokwoo Kim, Ji Bong Joo (Konkuk University)
- 09:10('10) CT-S019 **비용 경쟁력을 고려한 지속가능한 요소 생산 공정 설계: 고체 산화물 수전해와 순산소연소 기반 탄소 포집의 활용**  
박세빈, 조서연, 이인규 (부산대학교)
- 09:20('10) CT-S020 **Food Waste to Sustainable Aviation Fuel: CO<sub>2</sub> Utilization via Anaerobic Digestion and Dry Reforming of Methane**  
Seungeun Kim, Jeongheon Kim, Inkyu Lee (Pusan National University)
- 09:30('10) CT-S021 **Modeling of a Rotating Packed Bed for Acrylic Acid Absorption**  
정민경, 황성원 (인하대학교)
- 09:40('10) CT-S022 **LSTM-Based Soft Sensor for Real-Time Prediction of Distillation Column Top Product Composition**  
Yunseo Yang, Sunghun Song, Sungwon Hwang (인하대학교)
- 09:50('10) CT-S023 **저탄소 항공연료 생산을 위한 CO<sub>2</sub> 전기분해-Fischer Tropsch 통합 공정의 설계 및 경제성 평가**  
Hyerim Hong, Yunjeong Do, Sungwon Hwang (인하대학교)

- 10:00('10) CT-SO24 혼합 페플라스틱에서 수소로: 공정 시뮬레이션 연계 Scope 기반 eTEA를 적용한 열분해유 개질 경로 평가  
김석준<sup>1</sup>, 김도현<sup>1</sup>, 고상혁<sup>1</sup>, 김희향<sup>2</sup>, 이하람<sup>1</sup>, 이보름<sup>1</sup> (<sup>1</sup>전남대학교, <sup>2</sup>현대건설)
- 10:10('10) CT-SO25 Integrated Catalyst-Process Evaluation of Toluene Hydrogenation for LOHC Systems over Noble-Metal/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts: Activity Comparison and Aspen Plus-Based Techno-Economic Analysis  
Yong-Hee Lee<sup>1,2</sup>, Sangyoon Lee<sup>1</sup>, Yubeen Choi<sup>1</sup>, Junghwan Kim<sup>2</sup>, Man Sig Lee<sup>1,3</sup> (<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, <sup>2</sup>Yonsei University, <sup>3</sup>Pusan National University)

## 학생 구두발표 V: 에너지전환

- 일시 2026년 3월 19일(목) 10:30~11:30
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 324호
- Organizer 라호원 박사(한국에너지기술연구원)

chair: 라호원 박사(한국에너지기술연구원)

- 10:30('10) CT-SO26 Oxidation Resistant Ni-Based Dual Functional Material for Integrated CO<sub>2</sub> Capture and Methanation of Simulated Flue Gas  
Dong Seop Choi<sup>1</sup>, Sung Beom Hwang<sup>1</sup>, Jiyull Kim<sup>1</sup>, Minkyu Kim<sup>2</sup>, Ji Bong Joo<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Konkuk University, <sup>2</sup>Yeungnam University)
- 10:40('10) CT-SO27 심층공용용매를 이용한 미세조류 HTL 바이오크루드 질소화합물 저감 가능성 평가  
이건호, 장순웅, 정우진 (경기대학교)
- 10:50('10) CT-SO28 2상 혐기성 소화조 내 미세플라스틱과 항생제 투여에 따른 공정 효율 영향 분석  
지태현<sup>1</sup>, 방동규<sup>2</sup>, 박현경<sup>2</sup>, 전병훈<sup>2</sup>, 정우진<sup>1</sup>, 장순웅<sup>1</sup> (<sup>1</sup>경기대학교, <sup>2</sup>한양대학교)
- 11:00('10) CT-SO29 해중림 폐자원과 농업 폐기물의 공수열탄화를 통한 하이드로차 특성 평가  
차재원, 정승묵, 김정훈, 이도연 (국립한밭대학교)
- 11:10('10) CT-SO30 Behaviors of Cokes-Deposited Ferrierite Zeolite during Gas-Phase Fluidized-Bed DME Carbonylation  
Jimin Kim<sup>1</sup>, Hyun Seung Jung<sup>1</sup>, Noritatsu Tsubaki<sup>2</sup>, Jong Wook Bae<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Sungkyunkwan University, <sup>2</sup>University of Toyama)
- 11:20('10) CT-SO31 비촉매 메탄 부분 산화 및 스팀 개질 복합 반응을 통한 합성가스 제조 특성 분석  
이경택<sup>1,2</sup>, 윤성민<sup>1</sup>, 조현빈<sup>1</sup>, 라호원<sup>1</sup>, 류창국<sup>2</sup> (<sup>1</sup>한국에너지기술연구원, <sup>2</sup>성균관대학교)

## 학생 구두발표 VI: 청정생산

- 일시 2026년 3월 19일(목) 09:00~09:20
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 325호
- Organizer 성기명 교수(수원대학교)

chair: 한태훈 교수(수원대학교)

- 09:00('10) CT-SO32 Design of Cs-Exchanged Zeolite with Enhanced Regenerability for Ammonia Adsorption through HSAB-Based Iodine Pretreatment  
Hyeok-Sang Ryu<sup>1,2</sup>, Jung-ho Jae<sup>2</sup>, Hee-su Kim<sup>1</sup>, Dong-Ha Lim<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, <sup>2</sup>Pusan National University)
- 09:10('10) CT-SO33 Electrochemically Controlled hydrolysis of Kenaf Toward Targeted Sugar Production  
Ji Yeon Park<sup>1,2</sup>, Myeonghwan Oh<sup>3</sup>, Hyojung Park<sup>2</sup>, Yubin Lee<sup>1,5</sup>,  
Byoung Seung Jeon<sup>1</sup>, Byoung-In Sang<sup>2</sup>, Wooyul Kim<sup>4</sup>, Dong Ki Lee<sup>3</sup>,  
Jin Hyung Lee<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology,  
<sup>2</sup>Hanyang University, <sup>3</sup>Korea Institute of Science and Technology, <sup>4</sup>Korea  
Institute of Energy Technology, <sup>5</sup>Korea University)

## 학생 구두발표 VII: 수소 및 재생에너지

- 일시 2026년 3월 19일(목) 13:00~14:50
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 325호
- Organizer 장원준 교수(아주대학교)

chair: 전경원 교수(국립군산대학교), 이열림 교수(계명대학교)

- 13:00('10) CT-SO34 Enhanced Catalytic Performance of Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by Promoter Addition for Toluene Hydrogenation  
Hayoon Park<sup>1,2</sup>, Chang-Hoon Jeong<sup>1</sup>, Jeongho Jae<sup>2</sup>, Minji Kim<sup>1</sup>, Man Sig Lee<sup>1,2</sup>  
(<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, <sup>2</sup>Pusan National University)
- 13:10('10) CT-SO35 Shockwave Timing-Controlled Enhancement and Process Optimization of High Sulfur-Tolerant Pt/CeO<sub>2</sub> Catalysts for High-Temperature Water-Gas Shift Reaction  
Geon-Hyeong Lee, Hyeon-Seok Kang, P. Sivaprakash, Ikhyun Kim,  
Yeol-Lim Lee (Keimyung University)
- 13:20('10) CT-SO36 Correlation between Surface Properties of Pd/C Catalysts Modulated by Reducing Agents and Benzyl Alcohol Selectivity over Benzaldehyde Hydrogenation  
Anna Hwang<sup>1,2</sup>, Ye Eun Kim<sup>1</sup>, Seunghun Choi<sup>1</sup>, Jungho Jae<sup>2</sup>, Man Sig Lee<sup>1,2</sup>  
(<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, <sup>2</sup>Pusan National University)

- 13:30('10) CT-SO37 **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Driven Surface Nano-Roughening of Ni Foam Cathodes for Enhanced HER Performance in Alkaline Water Electrolysis**  
Jeongha Kim<sup>1,2</sup>, Se Hun Kwon<sup>2</sup>, Dong-Ha Lim<sup>1</sup>  
 (<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, <sup>2</sup>Pusan National University)
- 13:40('10) CT-SO38 **폐기물 유래 합성가스로부터 수소 생산을 위한 고온 수성가스전환 반응의 최적 조건 연구**  
권재민, 공지현, 김민주, 박진우, 장원준 (아주대학교)
- 13:50('10) CT-SO39 **Green Hydrogen from Water Electrolysis: Supply Chain Emissions Assessment and Net-Zero Pathways**  
고상혁, 김석주, 이하람, 이보름 (전남대학교)
- 14:00('10) CT-SO40 **Enhanced Stability of Cu<sup>+</sup> Active Sites by Ce<sup>3+</sup>-Mediated Electron Migration Effect in ZSM-5 Zeolite for CO Capture**  
Shoon Pa Pa Aung, Dong Myung Kim, May Zaw Win, Wathone Oo, Ngwe Soe Han, Phyu Phyu Han, Ei Thandar Aung, Kwang Bok Yi  
 (Chungnam National University)
- 14:10('10) CT-SO41 **방향족 탄화수소 기반 수소 생산을 위한 수증기 개질 반응의 열역학적 고찰**  
김민주, 공지현, 권재민, 박진우, 장원준 (아주대학교)
- 14:20('10) CT-SO42 **Polyol-Mediated Synthesis of Egg-Shell Ru@Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Pellet Catalysts for Efficient Toluene Hydrogenation**  
Phuong Nam Nguyen<sup>1,2</sup>, Ye Eun Kim<sup>1</sup>, Chae Eun Choi<sup>1</sup>, Inkyu Lee<sup>2</sup>, Man Sig Lee<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, <sup>2</sup>Pusan National University)
- 14:30('10) CT-SO43 **Hydrothermal Synthesis of Vanadium Doped NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> on Nickel Foam for Efficient Alkaline Anion Exchange Membrane Water Electrolysis**  
Seongjun Moon, Dongju Lee (Chungbuk National University)
- 14:40('10) CT-SO44 **Effect of Preparation Parameter Control on the Low-Temperature Water-Gas Shift Activity of Cu-Zn-Al Catalysts**  
Minsang Jo<sup>1,2</sup>, Jungho Jae<sup>2</sup>, Hee Soo Kim<sup>1</sup>, Dong-Ha Lim<sup>1,2</sup>  
 (<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, <sup>2</sup>Pusan National University)

## 학생 구두발표 VIII: 청정융합

- 일시            2026년 3월 19일(목) 13:00~15:10
- 장소            부산 BEXCO 제2전시장 326호
- Organizer    장 민 교수(광운대학교)

chair: 김우열 교수(한국에너지공과대학교)

- 13:00('10) CT-SO45    Effect of Applied Voltage on Simultaneous Pyrene Degradation and Nitrate Reduction in a Dual-Chamber Microbial Electrolysis Cell (MEC)  
Aparna Sharma, Syed Ejaz Hussain Mehdi, Suleman Shahzad, Sandesh Pandey, Fida Hussain, Woochang Kang, Sang-Eun Oh (Kangwon National University)
- 13:10('10) CT-SO46    Pilot-Scale Evaluation of Coral Reef Media for pH Buffering and Nutrient Supply in Koi-lettuce Aquaponics  
Syed Ejaz Hussain Mehdi, Aparna Sharma, Suleman Shahzad, Sandesh Pandey, Fida Hussain, Woochang Kang, Sang-Eun Oh (Kangwon National University)
- 13:20('10) CT-SO47    Activated Alumina-Based Sulfur Composite for Simultaneous Denitrification and Phosphate Removal from Low C/N Wastewater  
Ammarah Mushtaq, Fida Hussain, Sandesh Pandey, Suleman Shahzad, Aparna Sharma, Syed Ejaz Hussain Mehdi, Woochang Kang, Sang-Eun Oh (Kangwon National University)
- 13:30('10) CT-SO48    폐기물 기반 지오폐리머의 Pb(II) 제거: pH 고정 배치 실험을 통한 흡착-침전 기여 분리  
 권동혁<sup>1</sup>, 설길홍<sup>2</sup>, 최궁원<sup>2</sup>, 전병훈<sup>2</sup>, 안용태<sup>1</sup> ( <sup>1</sup>경기대학교, <sup>2</sup>한양대학교)
- 13:40('10) CT-SO49    첨가제 보조 산 침출 공정 기반 리튬 침출 거동 및 LCA/TEA 평가  
 박소현<sup>1</sup>, Liao Ziqiao<sup>2</sup>, 권동혁<sup>1</sup>, 소웅<sup>1</sup>, 서정민<sup>1</sup>, 신재관<sup>1</sup>, 안용태<sup>1</sup> ( <sup>1</sup>경기대학교, <sup>2</sup>한양대학교)
- 13:50('10) CT-SO50    고성능 불소 전기흡착을 위한 아르곤 제트 플라즈마 처리 탄소펠트  
 렌니샤<sup>1</sup>, 정중훈<sup>1</sup>, 종초은<sup>1,2</sup>, 장민<sup>1,2</sup> ( <sup>1</sup>광운대학교, <sup>2</sup>플라즈마바이오과학연구센터)
- 14:00('10) CT-SO51    광산배수 내 불소 제거효율 향상을 위한 광산배수 슬러지 기반 흡착제 개발 및 최적화  
 윤소연<sup>1,2</sup>, 유혜진<sup>1,2</sup>, 렌니샤<sup>1,2</sup>, 조윤서<sup>1</sup>, 종초은<sup>1,2</sup>, 장민<sup>1,2</sup> ( <sup>1</sup>광운대학교, <sup>2</sup>플라즈마바이오연구센터)
- 14:10('10) CT-SO52    아르곤 제트 플라즈마-산화제 연계 공정을 이용한 불소계 오염물질 PFOA의 분해 향상  
 유혜진<sup>1,2</sup>, 종초은<sup>1,2</sup>, 장민<sup>1,2</sup> ( <sup>1</sup>광운대학교, <sup>2</sup>플라즈마바이오연구센터)

- 14:20('10) CT-S053 산성광산배수 (AMD)로부터 선택적 침전을 이용한 중금속의 지속가능한 회수 및 희토류 원소(REEs)의 정제  
 누하슬리나<sup>1,2</sup>, 정보경<sup>1</sup>, 황건덕<sup>1,2</sup>, 종초은<sup>1,2</sup>, 장민<sup>1,2</sup>  
 (<sup>1</sup>광운대학교, <sup>2</sup>플라즈마바이오효과학연구센터)
- 14:30('10) CT-S054 광산배수의 적극적 처리 시설 발생 유기고분자 함유 슬러지 내 희토류 분리 공정 개발  
 김민지<sup>1</sup>, 오동윤<sup>1</sup>, 김연화<sup>1</sup>, 종초은<sup>1,2</sup>, 장민<sup>1,2</sup>  
 (<sup>1</sup>광운대학교, <sup>2</sup>플라즈마바이오효과학연구센터)
- 14:40('10) CT-S055 Differential Electrolyte pH Control Enabling Sustained Biohydrogen Generation in Dual-Chamber MECs  
 Haju Son, Minsoo Kim, Eunseo Kim, Jung Rae Kim  
 (Pusan National University)
- 14:50('10) CT-S056 Advancing Waste-to-Hydrogen Technology through Strategic Surface Coordination Modulation  
 Seo-Yong Lee, Seon-Yong Ahn, Beom-Jun Kim, Hyun-Seog Roh  
 (Yonsei University)
- 15:00('10) CT-S057 Process-Intensified Single-Step Pretreatment of SCG-Derived Biocrude Oil: Removal of Inorganics and Emulsified Water for Sustainable Biofuel Applications  
 Ziqiao Liao, SoonHo Cho, Chejarla Venkatesh Reddy, Byong-Hun Jeon  
 (Hanyang University)

# 한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

## 포스터발표 I: 대기환경

- 일시            2026년 3월 19일(목) 09:00~11:00
- 장소            부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비
- Organizer    김창만 교수(전남대학교)

- PE-1            Pilot급 복합 열캐리어 연소기의 최적 운전조건 도출 시험  
정석우, 정기진, 권인구, 전동환 (고등기술연구원)
- PE-2            선속도 유사성 기반의 복합 열캐리어 연소기 스케일업 설계  
신은주, 정석우 (고등기술연구원)
- PE-3            세라믹 중공사막 기반 혈액투석 모듈의 생체적합성과 요독물질 제거 특성 연구  
황재연, 박정훈 (동국대학교)
- PE-4            고순도 리그닌 회수를 위한 염분 제거 기술 최적화  
강은희, Xuelong Zhuang, 박정훈 (동국대학교)
- PE-5             $\gamma$ - $Al_2O_3$  코팅  $\alpha$ - $Al_2O_3$  지지체 기반 Pd-Ru 중공사막의 고온 수소 분리 성능 평가  
한성우, 신민창, 박상민, 허승희, 박정훈 (동국대학교)
- PE-6            비정질(Amorphous) 합금 분리막의 수소 분리 정제 연구  
신민창, 한성우, 허승희, 박상민, 박정훈 (동국대학교)
- PE-7            무전해 도금을 이용한 Pd-Ag-Cu 합금수소 분리막 제조 및 분리 효율 검증  
박상민, 한성우, 신민창, 허승희, 박정훈 (동국대학교)
- PE-8             $Al_2O_3$  중공사막을 이용한 암모니아 분해 공정용 수소 분리 특성 비교: 산화물과 Pd 막의 성능 분석  
허승희, 한성우, 박정훈 (동국대학교)
- PE-9            가시광 활성 블랙  $TiO_2$  기반 중공사 광촉매막을 이용한 고효율 암모니아 제거  
장학룡, 황재연, 강은희, 한성우, 박정훈 (동국대학교)
- PE-10          선택적 분리를 위한  $\gamma/\alpha$ - $Al_2O_3$  세라믹 나노여과막 개발 연구  
박소희, 강은희, 장학룡, 신민창, 황재연, 박정훈 (동국대학교)
- PE-11          The Effect of Binder on Physical Properties and Adsorption Performance in the Structured Adsorbent Coating Process for DAC  
Min Ju Kim, Tae Heon Kim, Heon Lee, Wang-Geun Shim (Suncheon National University)

- PE-12 Trends in Data Processing Automation for Carbon Emission Management: An Initial Mapping Analysis Based on Academic Publications and Public Patents  
Heekyung An (Korea Institute of Industrial Technology)
- PE-13 MIL-125(Ti)-Derived TiO<sub>2</sub>-Carbon Composite Supports for Enhanced NH<sub>3</sub>-SCR Catalysis  
Wonjung Cho<sup>1,2</sup>, Hyejin Kim<sup>1</sup>, Han-Ung Kim<sup>1</sup>, Hee Soo Kim<sup>1</sup>, Dong-Ha Lim<sup>1,2</sup>  
(<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, <sup>2</sup>Pusan National University)
- PE-14 고내구성 CF<sub>4</sub> 가수분해 촉매에 관한 연구  
이은한<sup>1,2</sup>, 조원섭<sup>1,3</sup>, 조재현<sup>4</sup>, 김한성<sup>2</sup>, 이신근<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>한국에너지기술연구원, <sup>2</sup>연세대학교, <sup>3</sup>고려대학교, <sup>4</sup>나노화인테크(주))
- PE-15 마이크로웨이브 가열을 위한 촉매 및 이를 이용한 VOCs 산화 반응에 관한 연구  
조원섭<sup>1,2</sup>, 이은한<sup>1,3</sup>, 김세호<sup>2</sup>, 이신근<sup>1</sup> (<sup>1</sup>한국에너지기술연구원, <sup>2</sup>고려대학교, <sup>3</sup>연세대학교)
- PE-16 Controlling the Surface Roughness of Ceramic Substrates for Gas Separation Membranes  
Hong Joo Lee, Jang-Hoon Ha, Jongman Lee, In-Hyuck Song  
(Korea Institute of Materials Science)

## 한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회 포스터발표 I: 수소 및 재생에너지

- 일시 2026년 3월 19일(목) 09:00~11:00
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비
- Organizer 김창만 교수(전남대학교)

- PA-1 원자력발전소 연계 수전해 수소 활용 기술 개발  
민진원, 김경덕, 나희승 (한국가스기술공사)
- PA-2 Long-Term Adaptive Dynamics of Industrial Waste-Sulfur Bioreactors: Linking Mineral Transformation, Microbial Ecology, and Nutrient Removal  
Sang-Eun Oh, Sandesh Pandey, Fida Hussain, Suleman Shahzad, Aparna Sharma, Syed Ejaz Hussain Mehdi, Woo-Chang Kang, Ammarah Mushtaq  
(Kangwon National University)
- PA-3 Chemical Looping을 이용한 다중 연료의 수소 생산 기술 연구  
강태진, 이지은, 김진호 (고등기술연구원)
- PA-4 발표취소
- PA-5 발표취소

- PA-6 Optimization of Electrospray-Deposited Catalyst Layer Architecture for Low-Pt Proton Exchange Membrane Fuel Cells  
Vikraman Athira, Soo Hyung Kim (Pusan National University)
- PA-7 Synergistic Light Scattering from Mixed-Size TiO<sub>2</sub> Nanoparticles for High-Performance Perovskite Solar Cells  
Raji Radhakrishnan, Jung Keun Cha, Soo Hyung Kim (Pusan National University)
- PA-8 줄열 기반 펄스 반응기에서의 SMR-WGS 순차 반응 구현을 통한 고효율 수소 생산  
황다원, 제정호 (부산대학교)
- PA-9 메탄 건식 개질 반응(DRM)을 위한 CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 지지체를 첨가한 Ni-MgO 촉매의 주요 특성  
박진우, 공지현, 김민주, 권재민, 김상민, 장원준 (아주대학교)
- PA-10 NCM 양극재 재활용 공정에서의 결정 입자 크기 제어를 통한 공침 공정의 경제성 최적화  
박경근<sup>1</sup>, 김정동<sup>2</sup>, 김정환<sup>1</sup> (<sup>1</sup>연세대학교, <sup>2</sup>Massachusetts Institute of Technology)
- PA-11 CO<sub>2</sub> 포집 공정 내 아민 부식 속도 예측을 위한 머신러닝 모델링  
정재빈, 김세영, 김민재, 김정환 (연세대학교)
- PA-12 Tuning Structural Defects in Co/CeO<sub>2</sub> 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)
- PA-13 전구체 농도가 공침법으로 합성된 CuZnMgAl 촉매의 물리화학적 특성 및 메탄올 직접 합성 반응에 미치는 영향  
장정균<sup>1</sup>, 김민경<sup>1</sup>, 이승우<sup>1</sup>, 권병찬<sup>1</sup>, 박노국<sup>1</sup>, 권재현<sup>2</sup>, 배종욱<sup>2</sup> (<sup>1</sup>영남대학교, <sup>2</sup>성균관대학교)
- PA-14 Reduced-Order Mathematical Modelling of an Electrified Reverse Water Gas Shift Reactor  
Dong-Gi Lee<sup>1</sup>, Jin-Ju Lee<sup>2,3</sup>, Mansurbek Urol Ugli Abdullaev<sup>2</sup>, Seung-Jun Baek<sup>3</sup>, Yong-Tae Kim<sup>2</sup>, In-Hyoun Song<sup>3</sup>, Boram Gu<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Chonnam National University, <sup>2</sup>Korea Research Institute of Chemical Technology, <sup>3</sup>Yonsei University)
- PA-15 Screening of CaO-TM Dual Functional Materials for Improving Calcium Looping Efficiency  
Jae Won An, Wong Min Jin, Karen Solanki, Bhanupratap S, See Hoon Lee (Jeonbuk National University)
- PA-16 Scalable Porous Metal Oxide-Functionalized Silica Adsorbents for Residual Ammonia Removal  
May Zaw Win, Dong Myung Kim, Wathone Oo, Shoon Pa Pa Aung, Ngwe Soe Han, Phyu Phyu Han, Ei Thandar Aung, Kwang Bok Yi (Chungnam National University)

- PA-17 **Mechanistic Investigation of Covalently PEI-Grafted Silica-Coated Carbon-Zeolite Composites for Humidity-Resilient CO<sub>2</sub>-Selective Direct Air Capture**  
Wathone Oo, Dong Myung Kim, May Zaw Win, Kwang Bok Yi  
 (Chungnam National University)
- PA-18 **Tailoring Support-Metal Interaction via pH-Regulated Precursor Evolution for Toluene Hydrogenation over Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**  
Ye Eun Kim<sup>1</sup>, Seonju Park<sup>1</sup>, Anna Hwang<sup>1,2</sup>, Man Sig Lee<sup>1,2</sup>  
 (<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, <sup>2</sup>Pusan National University)
- PA-19 **해상풍력 하부구조물 자동 용접을 위한 기초 용접 조건 도출**  
 하을용<sup>1</sup>, 김영현<sup>1</sup>, 이송은<sup>1</sup>, 안기주<sup>2</sup>, 정유일<sup>2</sup>, 진상훈<sup>3</sup>, 임수희<sup>3</sup>, 김재웅<sup>1</sup>  
 (<sup>1</sup>한국생산기술연구원, <sup>2</sup>(주)유일, <sup>3</sup>건주테크)
- PA-20 **Effect of Feedback-Based Flow Rate Control on the Efficiency of Proton Exchange Membrane Water Electrolysis Systems**  
Jeongha Kim<sup>1,2</sup>, Se Hun Kwon<sup>2</sup>, Dong-Ha Lim<sup>1</sup>  
 (<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, <sup>2</sup>Pusan National University)
- PA-21 **Stable Hydrogen Production from Catalytic Methane Decomposition over Waste-Derived Ni/Red Mud Catalysts Using Inert Particle-Assisted Fixed-Bed Operation**  
Minsang Jo<sup>1,2</sup>, Jungho Jae<sup>2</sup>, Hee Soo Kim<sup>1</sup>, Dong-Ha Lim<sup>1,2</sup>  
 (<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, <sup>2</sup>Pusan National University)
- PA-22 **암모니아 직접 주입 산화물 연료전지에서 암모니아 슬립 절감 촉매 개발**  
 심기동<sup>1</sup>, 권성민<sup>1,2</sup>, 김영민<sup>1</sup>, 임영환<sup>1</sup>, 채호정<sup>1</sup> (<sup>1</sup>한국화학연구원, <sup>2</sup>고려대학교)
- PA-23 **암모니아 분해를 이용한 고효율 수소 생산용 줄 가열(Joule-Heating) 반응기**  
 고유진, 김민식, 임영환, 김영민, 채호정 (한국화학연구원)
- PA-24 **수소 캐리어로서 저압 암모니아 합성을 위한 Ru 기반 이중 프로모터 촉매 설계 연구**  
 최진아<sup>1</sup>, 이수언<sup>1</sup>, 김태완<sup>1</sup>, 김영민<sup>1</sup>, 강기혁<sup>1</sup>, 박선영<sup>1</sup>, 문준혁<sup>2</sup>, 채호정<sup>1</sup>  
 (<sup>1</sup>한국화학연구원, <sup>2</sup>고려대학교)
- PA-25 **암모니아 기반 수소 생산을 위한 고성능 Ru Bead 촉매 설계**  
 권성민<sup>1,2</sup>, 심기동<sup>1</sup>, 김영민<sup>1</sup>, 이기봉<sup>2</sup>, 임영환<sup>1</sup>, 채호정<sup>1</sup> (<sup>1</sup>한국화학연구원, <sup>2</sup>고려대학교)
- PA-26 **소뼈 유래 Hydroxyapatite 촉매를 이용한 폐식용유의 열적 유도 전이에스테르화에 의한 바이오디젤 생산**  
 김민영, 권일한 (한양대학교)

# 한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

## 포스터발표 I: 에너지 저장

- 일시 2026년 3월 19일(목) 09:00~11:00
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비
- Organizer 김창만 교수(전남대학교)

- PB-1 Spray Pyrolysis-Derived Cobalt Compound Yolk-Shell Microspheres from Waste Solutions for Li- and Na-Ion Storage  
Yeong Beom Kim<sup>1,2</sup>, Jaewon Lee<sup>2</sup>, Jihong Park<sup>2</sup>, Yun Chan Kang<sup>1</sup>, Gi Dae Park<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>Korea University, <sup>2</sup>Chungbuk National University)
- PB-2 Spray Pyrolysis Derived CNT-Integrated Multi-Voids Microspheres with ZnO and Sn-Doped NiO Lithiophilic Seeds for Stable Lithium Metal Anodes  
Hyo Yeong Seo<sup>1</sup>, Hyebin Yoon<sup>2</sup>, Yun Chan Kang<sup>1</sup>, Gi Dae Park<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>Korea University, <sup>2</sup>Chungbuk National University)
- PB-3 Rapid and Sustainable Lithium Recovery from Spent LiFePO<sub>4</sub> Cathodes via K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>-Assisted Mechanochemical Solid-State Oxidation  
Junhee Kim, Min Hyuk Choi, Dong Won Kim, Kyeong-Ho Kim  
(Pukyong National University)
- PB-4 A Multiscale Thermal Simulation Framework for Lithium-Ion Battery Cells under Mechanical Impact  
Raghda Mansour Kamel Noureldin, Jeong Keun Cha, Soo Hyung Kim  
(Pusan National University)
- PB-5 기계적 충격 조건에서 충전 상태에 따른 원통형 리튬이온전지의 열·전기적 응답 및 변형 특성  
차경근, 김수형 (부산대학교)
- PB-6 Aerosol-Assisted Synthesis of Three-Dimensional Carbon-Composited Metal Sulfide Microspheres with Numerous Empty Nanorooms for High-Capacity Sodium-Ion Batteries  
Ji Myeon Park, Seul Jeong, Jin Hyeong Lee, Dong Hwi Kim, Jin-Sung Park  
(Ajou University)
- PB-7 Rational Engineering of Yolk-Shell Sn/Sn-Chalcogenide@Carbon Architectures Toward Advanced Lithium-Ion Storage  
Jin Hyeong Lee, Byeong Chan Kim, Jin-Sung Park (Ajou University)
- PB-8 Coupled 2D-2D Heterostructures in Porous Metal Chalcogenide-Graphene Oxide Composites for Enhanced Alkali-Ion Storage  
Hwa Young Choi, Jin Hyeong Lee, Jin-Sung Park (Ajou University)

- PB-9      분무 건조 공정으로 합성된 LMR 양극재의 장기 사이클 안정성 향상 연구  
정슬, 이진형, 박지연, 오재하, 박진성 (아주대학교)
- PB-10     Dendrite Suppression in Anode-Free Lithium Metal Batteries via Nanoscale  
LiF-Induced Nanorod Growth  
Jiwoo Kim, Mee-Ree Kim, Sangbaek Park (Chungnam National University)
- PB-11     Enabling Dense  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  (LLZO) Garnet Electrolytes at 1000°C without Pressure  
via Cooperative Template and Dopant Design  
Seung Hoon Chun, Sangbaek Park (Chungnam National University)
- PB-12     Improving High-Rate Capability of Graphite//NCM811 Lithium-Ion Battery via Interface  
Control  
Gwangyong Ko, Kihun An, Dung Tien Tuan Vu, Seung-wan Song  
(Chungnam National University)
- PB-13     Ga(FSI)<sub>3</sub>-Derived Core-Shell Liquid Metal Interlayer Enabling Uniform Lithium  
Deposition in Anode-Free All-Solid-State Batteries  
Jimin Kwon, Do-Hun Kim, Sangbaek Park (Chungnam National University)
- PB-14     Femtosecond Laser-Engineered Coffee Waste as a Sustainable Anode for Lithium-Ion  
Batteries  
Si Eun Park<sup>1</sup>, Ju Young Oh<sup>1</sup>, Suhyun Park<sup>1</sup>, Tongmei Jing<sup>2</sup>, Han Ku Nam<sup>1</sup>, Sangbaek Park<sup>1</sup>,  
Young-Jin Kim<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Chungnam National University, <sup>2</sup>Korea Advanced Institute of Science and  
Technology)
- PB-15     One-Dimensional Zeolitic Imidazolate Framework-Based Separator Regulating Li<sup>+</sup>  
Transport in Semi-Solid-State Lithium Metal Batteries  
Jiwoo Yoon, Jin-ung Kim, Jung-sang Cho, Sangbaek Park (Chungnam National University)
- PB-16     전이금속 셀레늄화물/질소-도핑 탄소 복합 다공성 나노섬유의 합성 및 포타슘 이차전지 음극 성능 평가  
곽영신, 조중상 (충북대학교)
- PB-17     분무 열분해법 기반 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/rGO/CNT@HNCN 마이크로스피어 합성 및 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 결정 성장 제어를 통한  
고용량 음극 소재 개발  
김태현, 조중상 (충북대학교)
- PB-18     안티모니 셀레나이드/질소-도핑 탄소 복합 나노섬유 합성 및 소듐 이온 전지 음극 소재로의 적용  
염혜원, 조중상 (충북대학교)
- PB-19     프러시안 블루 유사체 유래 이성분계 전이금속 셀레늄화물/그래핀 산화물/탄소 복합 섬유의 구조 설계 및  
소듐 이온 전지 음극 소재 특성 평가  
권현지, 조중상 (충북대학교)

- PB-20 주석 황화물이 내장된 계층적 다공성 질소 도핑 탄소 마이크로스피어의 합성 및 소듐 이차전지 음극 소재로의 적용  
우석진, 최윤서, 조중상 (충북대학교)
- PB-21 분무열분해 공정을 활용한  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$  조성의 단결정 리튬이온배터리 양극소재 합성 전략  
Tae Ha Kim, Seung Yub Baek, Jun Hwan Kwon, Gi Dae Park  
(Chungbuk National University)

## 한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회 포스터발표 I: 청정생산

- 일시 2026년 3월 19일(목) 09:00~11:00
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비
- Organizer 김창만 교수(전남대학교)

- PG-1 NiO-Mo/ZSM-5 촉매의 성형 조건이 메탄 탈수소 방향족화 반응 성능에 미치는 영향  
김주은<sup>1</sup>, 김민희<sup>1</sup>, 강재욱<sup>1</sup>, 김가은<sup>1</sup>, 김예주<sup>1</sup>, 이강현<sup>1</sup>, 오현택<sup>1</sup>, 이연진<sup>1</sup>, 조예진<sup>1</sup>, 김도희<sup>2</sup>, 전종기<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>국립공주대학교, <sup>2</sup>서울대학교)
- PG-2 ZSM-5 촉매에서 Mo 소성 조건과 NiO 담지 최적화가 메탄 탈수소방향족화반응에 미치는 영향  
김가은<sup>1</sup>, 김지연<sup>1</sup>, 강재욱<sup>1</sup>, 김예주<sup>1</sup>, 김주은<sup>1</sup>, 이강현<sup>1</sup>, 오현택<sup>1</sup>, 이연진<sup>1</sup>, 조예진<sup>1</sup>, 김도희<sup>2</sup>, 전종기<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>국립공주대학교, <sup>2</sup>서울대학교)
- PG-3 바이오매스-페플라스틱 혼합물 열분해 반응용 HZSM-5 Extudate와 Sphere 성형촉매 특성분석  
김예주<sup>1</sup>, 이종엽<sup>1</sup>, 강재욱<sup>1</sup>, 김가은<sup>1</sup>, 김주은<sup>1</sup>, 이강현<sup>1</sup>, 오현택<sup>1</sup>, 이연진<sup>1</sup>, 조예진<sup>1</sup>, 임효석<sup>2</sup>, 박영권<sup>2</sup>, 전종기<sup>1</sup> (<sup>1</sup>국립공주대학교, <sup>2</sup>서울시립대학교)
- PG-4 Binder 함량에 따른 실란처리한 NiO-Mo/HZSM-5 촉매 재생 성능 평가 및 성형 촉매 대량 생산을 위한 Scale-Up 최적화  
강재욱<sup>1</sup>, 김주은<sup>1</sup>, 김가은<sup>1</sup>, 김예주<sup>1</sup>, 이강현<sup>1</sup>, 오현택<sup>1</sup>, 조예진<sup>1</sup>, 이연진<sup>1</sup>, 김도희<sup>2</sup>, 전종기<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>국립공주대학교, <sup>2</sup>서울대학교)
- PG-5 Molecular Dynamic Simulations to Estimate the Solubility of Long-Chain Fatty Acids in Water at Elevated Temperatures  
Jeongho Park, Wonbin Seo, Tae Jun Yoon (Seoul National University)
- PG-6 Hydrothermal Leaching Behavior of NMC Cathodes with Varying Compositions Using Organic Acids  
Wonbin Seo, Hajin Kim, Tae Jun Yoon (Seoul National University)
- PG-7 The Study Calculates the Precise Solubility of Propylene Carbonate in Dilute scCO<sub>2</sub> Using the FEP Method of MD at 313, 333, and 353 K  
Bomin Kim, Tae Jun Yoon (Seoul National University)

- PG-8 Kinetics of MgCO<sub>3</sub> Decomposition in Subcritical and Supercritical Water  
Hyo Jung Kim, Tae Jun Yoon (Seoul National University)
- PG-9 Life Cycle Assessment of On-Board e-Methane Systems with Thermal Integration for Marine Applications  
Joon-Gi Yoon, Taehoon Han (University of Suwon)
- PG-10 Impact of Alcoholic Solvents and Reaction Temperatures on Biochar Production via Hydrothermal Carbonization (HTC)  
Woojin Kim, Taehoon Han (University of Suwon)
- PG-11 Molecular Design of Bio-Based Diesters for Targeted Lubricant Applications  
Hye Jin Lee, Jayeon Baek, Yong Jin Kim (Korea Institute of Industrial Technology)
- PG-12 초임계 CO<sub>2</sub> 추출을 이용한 녹차의 디카페인 공정 연구  
임지선<sup>1,2</sup>, 천현준<sup>1</sup>, 김재훈<sup>2</sup>, 조흔태<sup>1</sup>, 이홍식<sup>1,3</sup> (한국생산기술연구원, <sup>2</sup>성균관대학교, <sup>3</sup>중앙대학교)
- PG-13 초임계 CO<sub>2</sub> 기반 식품 건조 효율 향상 공정 최적화 연구  
임지선<sup>1,2</sup>, 오인환<sup>1</sup>, 김재훈<sup>2</sup>, 조흔태<sup>1</sup>, 이홍식<sup>1,3</sup> (한국생산기술연구원, <sup>2</sup>성균관대학교, <sup>3</sup>중앙대학교)
- PG-14 Analysis of Alignment between Building Envelope Technology and Carbon Neutrality Technology Innovation Strategy  
Seongkon Lee<sup>1</sup>, Gento Mogi<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Korea Institute of Energy Research, <sup>2</sup>The Univ. of Tokyo)

## 한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회 포스터발표 I: 청정융합

- 일시 2026년 3월 19일(목) 09:00~11:00
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비
- Organizer 김창만 교수(전남대학교)

- PD-1 폐탈황제 기반 황 복합 탈질 시스템을 이용한 침출수 처리수 내 질소·인 제거 특성 및 적용성 평가  
오상은, 강우창, 후세인 피다, 판디 산데시, 샤흐자드 술레만, 메흐디 시드 에자즈 후세인, 샤르마 아파르나, 무슈타크 아마라 (강원대학교)
- PD-2 Sustainable Desulfurized Waste-Derived Sulfur Composite for Coupled Nitrogen and Phosphorus Removal from Landfill Leachate  
Sang-Eun Oh, Fida Hussain, Sandesh Pandey, Ammarah Mushtaq, Suleman Shahzad, Aparna Sharma, Syed Ejaz Hussain Mehdi, Woochang Kang (Kangwon National University)
- PD-3 폐기물 기반 흡착제를 이용한 수중 불소 흡착 연구  
이준호, 윤도경, 권동혁, 소웅, 안용태 (경기대학교)

- PD-4 **Anchoring Site Formation through Controlled Reduction of CeO<sub>2</sub> for Durable Ni/CeO<sub>2</sub> Catalysts in Coupled DRM-RWGS**  
Hyeon-Seok Kang<sup>2</sup>, Beom-Jun Kim<sup>1</sup>, Geon-Hyeong Lee<sup>2</sup>, Hyun-Seog Roh<sup>1</sup>, Yeol-Lim Lee<sup>2</sup>  
 (<sup>1</sup>Yonsei University, <sup>2</sup>Keimyung University)
- PD-5 **HEFA 기반 수침 촉매공정을 이용한 항공/도로/해운 수송분야 연료제조 실증 사례**  
 한기보, 장정희, 이지은, 장현성, 윤여진, 이재홍, 조윤희 (고등기술연구원)
- PD-6 **방향족 화합물 기반 LOHC 소재 적용 촉매수소화 반응특성**  
 한기보, 장정희, 이지은, 장현성, 윤여진, 이재홍, 조윤희 (고등기술연구원)
- PD-7 **Photoreduction-Assisted Synthesis of Cu-Doped Hydrogenated TiO<sub>2</sub> from MOF Templates for Advanced Water Purification**  
Kyubeom Lee, Yujeong Jeong, Sungwook Chung (Pusan National University)
- PD-8 **CO<sub>2</sub>-Based Microbial Electrosynthesis for Waste Valorization: Engineering the Cathodic Microbiome**  
Eunseo Kim, Minsoo Kim, Jung Rae Kim (Pusan National University)
- PD-9 **미생물 연료전지 및 탈염전지 데이터 기반 최적화를 위한 합성 다중모달 벤치마크 데이터셋**  
 김후, 자히드 올라, 정나현, 손문 (한국과학기술연구원)
- PD-10 **HFC 가스 하이드레이트 기반 담수화 공정 특성 연구**  
 홍소희<sup>1,2</sup>, 조상규<sup>1,3</sup>, 서성덕<sup>1</sup>, 전창수<sup>1</sup>, Burla Sai Kiran<sup>1</sup>, Subhash Kumar Sharma<sup>1</sup>, 이주동<sup>1</sup>  
 (한국생산기술연구원, <sup>2</sup>부경대학교, <sup>3</sup>동아대학교)
- PD-11 **Enhanced Exopolysaccharide Production from Isolated Novel Soil Bacterium Using Integrated RSM and ANN Optimization Approaches**  
Rahul Tanpure<sup>1</sup>, Shiv Shankar Prasad<sup>2</sup>, Swabhimohan Mohanty<sup>1</sup>, Ramesh Kumar<sup>1</sup>,  
 Aliya Alvi<sup>1</sup>, Deok-Won Kim<sup>1</sup>, Sriya P Dash<sup>1</sup>, Byong-Hun Jeon<sup>1</sup>  
 (<sup>1</sup>Hanyang University, <sup>2</sup>St. Xavier's College)
- PD-12 **Analysis of Field-Scale Soil and Plant Characteristics Using Waste Stone Sludge**  
Kil-Hong Seol, Ju-Hyeok Kwon, Chejarla Venkatesh Reddy, Byong-Hun Jeon  
 (Hanyang University)
- PD-13 **Ultrasonic-Assisted Mild Alkaline Treatment for Separation of FePO<sub>4</sub> from Spent LFP Cathodic Material**  
Hye-Lim Kwon, Ramesh Kumar, Ju-Hyeok Kwon, Byong-Hun Jeon (Hanyang University)
- PD-14 **Sulfur Enrichment via Desulfurization Sludge Reconfigures Acetoclastic Methanogenic Networks in Anaerobic Co-Digestion**  
Donggyu Bang<sup>1</sup>, Soonwoong Chang<sup>2</sup>, Woojin Chung<sup>2</sup>, Byong-Hun Jeon<sup>1</sup>  
 (<sup>1</sup>Hanyang University, <sup>2</sup>Kyonggi University)

## 한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회 포스터발표 I: 특별세션(I): [원광대학교 RISE사업단] 미래형모빌리티 융합기술개발 세미나

- 일시 2026년 3월 19일(목) 09:00~11:00
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비
- Organizer 심재오 교수(원광대학교)

PS1-1 탈산소 반응 기반 탄화수소계 바이오연료 생산 및 실제 적용 평가  
김창현<sup>1</sup>, 전이정<sup>1</sup>, 윤채민<sup>1</sup>, 전경원<sup>2</sup>, 심재오<sup>1</sup> (<sup>1</sup>원광대학교, <sup>2</sup>국립군산대학교)

PS1-2 초소형 농약분사 차량의 구조 강건성 해석  
김준성, 홍정욱, 이윤서, 이상욱 (원광대학교)

## 한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회 포스터발표 II: 공정시스템

- 일시 2026년 3월 19일(목) 13:00~15:00
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비
- Organizer 김창만 교수(전남대학교)

PH-1 Sustainable Production of Bio-Methanol via Integrated CO<sub>2</sub>-Assisted Catalytic Pyrolysis Process: Techno-Economic Analysis and Life Cycle Assessment  
박준영, 최동호, 안용상, 조형태 (경희대학교)

PH-2 MLIP-Accelerated Construction of a Zinc-Electrolyte Adsorption Energy Database for High-Throughput Electrolyte Screening in Aqueous Zinc-Ion Batteries  
안용상<sup>1</sup>, 안나현<sup>2</sup>, 박준영<sup>1</sup>, 조형태<sup>1</sup>, 가성빈<sup>3</sup>  
(<sup>1</sup>경희대학교, <sup>2</sup>Georgia Institute of Technology, <sup>3</sup>울산대학교)

PH-3 Enhancing the Efficiency of Mobile LNG Refueling Systems: Strategies for BOG Minimization  
Hyunjin Kang<sup>1</sup>, Hyungtae Cho<sup>1</sup>, Jaewon Lee<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Kyung Hee University, <sup>2</sup>Hanyang University)

PH-4 복합 플라스틱의 열분해 기반 친환경 에너지 원료화  
길진우<sup>1</sup>, 최동호<sup>1</sup>, 이재원<sup>2</sup>, 조형태<sup>1</sup> (<sup>1</sup>경희대학교, <sup>2</sup>한양대학교)

PH-5 Real-Time Prediction and Restoration of Temperature Field through PCA-DNN-Based Soft Sensing in Battery Electrode Drying Process  
Yunju Yu<sup>1</sup>, Yup Yoo<sup>1</sup>, Jaewon Lee<sup>1</sup>, Hyungtae Cho<sup>2</sup>, Seongbin Ga<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>Kyunghee University, <sup>2</sup>University of Ulsan)

- PH-6 파과 실험 기반 다성분 등은 매개변수 및 물질전달계수 동시 추정  
진석환<sup>1</sup>, 진현석<sup>2</sup>, 박재현<sup>2</sup>, 이찬현<sup>2</sup>, 가성빈<sup>2</sup> ( <sup>1</sup>경희대학교, <sup>2</sup>울산대학교)
- PH-7 양자 금속-유기 골격체 기반 Xe/Kr 분리 소재의 Multiscale High-Throughput Screening 및  
기술경제성 평가  
정민주<sup>1</sup>, 진석환<sup>1</sup>, 진현석<sup>2</sup>, 안나현<sup>3</sup>, 가성빈<sup>2</sup> ( <sup>1</sup>경희대학교, <sup>2</sup>울산대학교, <sup>3</sup>조지아공과대학교)
- PH-8 순환 정상상태 조건에서 총상형 흡착강화 수성가스전환 반응기의 설계 및 운전 인자 영향에 대한 동적  
시뮬레이션  
양다빈<sup>1</sup>, 가성빈<sup>2</sup> ( <sup>1</sup>경희대학교, <sup>2</sup>울산대학교)
- PH-9 Techno-Economic Evaluation for Glycerol-Derived Product Separation of  
Cost-Effective DHA Production  
Junki Son, Yuchan Ahn (Keimyung University)
- PH-10 Upcycling Strategy for Battery-Industry Sodium Sulfate Byproduct: Integrated Process  
and Techno-Economic Assessment  
Duyeon Kim, Yuchan Ahn (Keimyung University)
- PH-11 Recycling of Sodium Sulfate from Secondary Battery Waste: Process Design and  
Techno-Economic Assessment  
Sejung Kim, Yuchan Ahn (Keimyung University)
- PH-12 Upcycling Waste PVC for Sustainable Gold Recovery: An Integrated Techno-Economic  
and Environmental Assessment  
Seungho Lee, Wangyun Won (Korea University)
- PH-13 Dynamic Simulation and Rigorous Parameter Estimation of an Industrial 2-Bed PSA  
Process for CO<sub>2</sub> Capture  
Seungho Lee, Wangyun Won (Korea University)
- PH-14 Influence of Acceleration Intensity on Boil-Off Gas Generation in Cryogenic Liquid  
Hydrogen Transport  
Jingyeong Im<sup>1</sup>, Boram Gu<sup>2</sup>, Wangyun Won<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Korea University, <sup>2</sup>Chonnam National University)
- PH-15 Polyolefin Waste Upcycling via LOHC-Based Hydrogen Delivery  
Taeun Kwon, Seoyoung Ahn, Insoo Ro, Wangyun Won (Korea University)
- PH-16 Catalytic Upcycling of Polyolefin Plastics via Water-Catalyst Interactions  
Taeun Kwon, Byeongchan Ahn, Insoo Ro, Wangyun Won (Korea University)
- PH-17 메탄 건식 개질 촉매 성능 예측을 위한 머신러닝 모델 개발  
김승한, 김민재, 최현준, 김정환 (연세대학교)

- PH-18 Multi-Regional Techno-Economic Assessment of Power-to-Olefin Pathway  
Hira Mahmood, Jay Liu (Pukyong National University)
- PH-19 A Multi-Criteria Blue Hydrogen Suitability Index for Regional Screening Under Uncertainty  
Muhammad Ansub Khan, Jay Liu (Pukyong National University)
- PH-20 타르 제거 및 수소-탄소 비 조절 방식에 따른 폐플라스틱 기반 합성천연가스 생산 공정의 기술-경제성 평가  
안도영, 전하늘, 이인규 (부산대학교)
- PH-21 Low-Carbon Olefin Production Processes with Liquid Hydrogen Cold Energy Recovery and Electric Heating  
Hyunju Cho, Jeongheon Kim, Inkyu Lee (Pusan National University)
- PH-22 비용-효과적인 그린 수소 공급을 위한 액화 수소-암모니아 통합 가치사슬 설계  
이예진, 조서연, 이인규 (부산대학교)
- PH-23 페타이어 열분해 기반의 방향족 물질을 활용한 지속가능한 항공유 합성 공정의 기술-경제성 평가  
김정현, 이인규 (부산대학교)
- PH-24 Integration of LH<sub>2</sub>- and NH<sub>3</sub>-Based Hydrogen Value Chain via LN<sub>2</sub> Circulation and Improved H<sub>2</sub> Productivity  
Seoyeon Cho, Yejin Lee, Inkyu Lee (Pusan National University)
- PH-25 Integration of Waste Plastic Gasification and CO<sub>2</sub> Electrolysis for Sustainable Hydrogen Production  
Dongyeop Yeom, Doyeong Ahn, Inkyu Lee (Pusan National University)
- PH-26 Vapor-Liquid Phase Coexistence and Interfacial Properties of CO<sub>2</sub> and Short-Chain Alcohols by Molecular Dynamics  
Dongho Yoo, Tae Jun Yoon (Seoul National University)
- PH-27 Vapor-Liquid Equilibria of Ethylene Carbonate (EC)-Containing Electrolyte Solvents with CO<sub>2</sub>: Molecular Dynamics Simulation and Experimental Analysis  
Soomin Gee, Bomim Kim, Tae Jun Yoon (Seoul National University)
- PH-28 Measurement and Thermodynamic Modeling of Cu(acac)<sub>2</sub> Solubility in Supercritical CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>-Cosolvent System  
Donghwi Kim, Tae Jun Yoon (Seoul National University)
- PH-29 양자 시계열 인공지능 모델을 이용한 증류탑의 출력 온도 예측 모델 개발  
정재빈, 권혁원, 이창원, 박경덕, 김정환 (연세대학교)

- PH-30 실제 데이터 기반 Bio-E 메탄올 공급망의 단·장기 운영 계획 및 설비 용량 설계  
정세민<sup>1</sup>, 최현준<sup>1</sup>, 김정동<sup>2</sup>, 김정환<sup>1</sup> (1연세대학교, 2Massachusetts Institute of Technology)
- PH-31 국내 수소 수입 기반 액화수소 공급망의 터미널 선택 및 다기간 확장 최적화  
최현준<sup>1</sup>, 김영근<sup>1</sup>, 권휘웅<sup>2</sup>, 김정환<sup>1</sup> (1연세대학교, 2순천향대학교)
- PH-32 아레니우스 방정식 기반 배터리 열화 예측 모델 개발  
박훈, 김찬호, 이나은, 김정환 (연세대학교)
- PH-33 친환경 수소 운송과 저장 효율 향상을 위한 LNG-액화 수소 결합 공정 설계  
송경민, 변주영, 고진, 김정환 (연세대학교)
- PH-34 국가별 조건에 따른 태양구동 담수화 도입 전략 비교·평가: 5개국 사례연구  
김민지<sup>1</sup>, 장지은<sup>1</sup>, 최종두<sup>1</sup>, 임중훈<sup>2</sup>, 김정훈<sup>1</sup>, 김정환<sup>1</sup> (1연세대학교, 2고등기술연구원)
- PH-35 Quantum-Prior 기반 Conditional-VAE를 이용한 목표 물성 대상 신규 윤활유 레시피 생성  
김찬호, 이창원, 박경덕, 김정환 (연세대학교)
- PH-36 배터리 팩 내 셀 전압 시계열 기반 비지도 통계적 이상 거동 탐지 기법 개발  
이나은, 김찬호, 박훈, 김정환 (연세대학교)
- PH-37 건식전극용 PTFE 바인더의 제조 및 재활용 공정에 관한 기술경제성 평가  
김은서, 이상영, 김정환 (연세대학교)
- PH-38 넷제로 정책 프레임워크 기반 호주 수소 생산의 경제성·환경성 평가  
김동현<sup>1</sup>, 김유림<sup>2</sup>, 변주영<sup>1</sup>, 이성민<sup>1</sup>, 김정환<sup>1</sup> (1연세대학교, 2메사추세츠공과대학교)
- PH-39 해석 가능한 머신러닝 프레임워크 기반 Furfural의 THFA 수소화 반응 촉매 설계  
김영근<sup>1</sup>, 최현준<sup>1</sup>, 김예은<sup>2</sup>, 이용희<sup>2</sup>, 이만식<sup>2</sup>, 김정환<sup>1</sup> (1연세대학교, 2한국생산기술연구원)
- PH-40 Integrated Hydrogen Storage Systems with Cold Energy from LNG Regasification: Exergy and Techno-Economic Analysis  
고진, 변주영, 송경민, 김정환 (연세대학교)
- PH-41 탄소가격 조건에서 폴리스티렌 해중합 재활용과 버진 PS의 기술·경제성 비교 분석  
변주영<sup>1</sup>, 김동현<sup>1</sup>, 김은서<sup>1</sup>, 황동원<sup>2</sup>, 윤광남<sup>2</sup>, 김정환<sup>1</sup> (1연세대학교, 2한국화학연구원)
- PH-42 작용기 선호도 정량화 및 방향성 작용기 네트워크 기반 OLED 분자 탐색 방법론  
양태욱, 김민지, 김영근, 김정환 (연세대학교)
- PH-43 혼합 아민의 CO<sub>2</sub> 기액평형 예측을 위한 도메인 지식 기반 머신러닝 모델링  
김민재<sup>1</sup>, 주종호<sup>2</sup>, 송호준<sup>3</sup>, 김정환<sup>1</sup>  
(1연세대학교, 2University College London, 3한국생산기술연구원)

- PH-44 광촉매 기반 인공광합성 수소 생산·저장 통합 공정 설계  
고진<sup>1</sup>, 조은비<sup>2</sup>, 최현준<sup>1</sup>, 김정환<sup>1</sup> (<sup>1</sup>연세대학교, <sup>2</sup>건국대학교)
- PH-45 TBP-FeCl<sub>3</sub>-Diethyl Succinate 기반 시너지 SX 염수 리튬 회수 공정 모델링과 경제성 평가  
김민지, 김은수, 김정환 (연세대학교)
- PH-46 효과적인 폭발 과압 예측을 위한 DMD-CNN-LSTM 기반 예측 모델 개발  
이찬우, 김정환 (연세대학교)
- PH-47 페플라스틱 기반 수소 생산 공정의 단위 공정별 운전 조건 민감도 분석: 열분해, 가스화, SMR 및 SE-WGS  
차윤서, 김선우, 배성환, 이지희, 임세영, 허준우, 가성빈 (울산대학교)
- PH-48 DNN Trained Dynamic Optimization Model and Adsorbent Material Comparison for High-Purity Green Hydrogen Production by Pressure Swing Adsorption Process from DMC-Derived Streams  
Dipta Pal, Seongbin Ga (University of Ulsan)
- PH-49 Dynamic Modeling of Continuous-Bipolar Membrane Electrodialysis: Energy Optimisation and Pulsed Operation  
Jiun Yun, Boram Gu (Chonnam National University)
- PH-50 Coupled Equilibrium-Transport Modeling of Ammonia Recovery from Wastewater Using Air Gap Membrane Distillation  
Sunyoung Oh, Boram Gu (Chonnam National University)
- PH-51 Hybrid Modeling for Predicting Membrane Fouling in Industrial Reverse Osmosis Processes: Integrating First-Principles and Deep Neural Networks  
Dongkyu Kim<sup>1</sup>, Sunyoung Oh<sup>1</sup>, Woo Hyung Park<sup>2</sup>, Ik-Jong Choi<sup>2</sup>, Ye Seol Lee<sup>3</sup>, Boram Gu<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Chonnam National University, <sup>2</sup>CJ CheilJedang Corp., <sup>3</sup>University College London)
- PH-52 Dynamic BOG Prediction in LNG Holding Mode with Recirculation  
Kang Lee, Boram Gu (Chonnam National University)
- PH-53 문헌 검증 키네틱 기반 암모니아 크래킹 반응기의 1차원 모델링  
Hohyeon Rho, Jinsu Kim (Chonnam National University)
- PH-54 메탄 열분해 반응기 유형별 에너지 성능 비교와 용융 금속 반응기 평가  
Yeonghun Jang, Jinsu Kim (Chonnam National University)
- PH-55 습도의 영향을 고려한 DAC의 열역학적 최소 에너지 비교와 분석  
Juhyeong You, Jinsu Kim (Chonnam National University)
- PH-56 인공지능 융합 인공후각 센서 시스템을 위한 가스 센서 시계열 특성 추출 및 단조성 검증  
Moonju Ju, Jinsu Kim (Chonnam National University)

- PH-57 Development of Deep Neural Network-Based Tube Metal Temperature Prediction Model and Real-Time Monitoring for Naphtha Cracking Center  
권혁원<sup>1,2</sup>, 이재원<sup>3</sup>, 한승필<sup>4</sup>, 김도형<sup>4</sup>, 조형태<sup>5</sup>, 백재호<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>한국생산기술연구원, <sup>2</sup>연세대학교, <sup>3</sup>한양대학교 ERICA, <sup>4</sup>GS칼텍스, <sup>5</sup>경희대학교)
- PH-58 연속식 가스하이드레이트 생산 공정의 설계 및 구현과 응용 가능성 평가  
조상균<sup>1,2</sup>, 홍소희<sup>1,3</sup>, 서성덕<sup>1</sup>, Burla Sai Kiran<sup>1</sup>, Subhash Kumar Sharma<sup>1</sup>, 전창수<sup>1</sup>, 사정훈<sup>2</sup>, 이주동<sup>1</sup> (<sup>1</sup>한국생산기술연구원, <sup>2</sup>동아대학교, <sup>3</sup>부경대학교)
- PH-59 A Study on the Characteristics of RSR Random Packing in the Packing Column  
Sungjin Kang<sup>1</sup>, Hayoon Park<sup>2,3</sup> (<sup>1</sup>Korea Polytechnics University, <sup>2</sup>Korea Institute of Industrial Technology, <sup>3</sup>Pusan National University)
- PH-60 Controlled Synthesis of Monodisperse Spherical Microsilica from Rice Husk via Precipitation Process  
Yu Bin Lee<sup>1,2</sup>, Su Yeon Ha<sup>1,3</sup>, Ji Yeon Park<sup>1,3</sup>, Byoung-In Sang<sup>3</sup>, Jin Hyung Lee<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, <sup>2</sup>Korea University, <sup>3</sup>Hanyang University)
- PH-61 Hydrogen and Methanol Generation from Nonwoven Polymer Waste through CO<sub>2</sub>-Assisted Pyrolysis: Techno-Economic and Life-Cycle Assessment  
이세영<sup>1</sup>, 조형태<sup>2</sup>, 이재원<sup>1</sup> (<sup>1</sup>한양대학교 ERICA, <sup>2</sup>경희대학교)
- PH-62 CO<sub>2</sub> 보조열 분해를 통한 고분자 섬유 폐기물의 메탄올 전환: 기술·경제성 및 환경성 평가  
신창범, 고태연, 이재원 (한양대학교 ERICA)
- PH-63 LSTM-Transformer Autoencoder-Based Anomaly Detection for Multimode Chemical Processes  
권혁원<sup>1</sup>, 권혁원<sup>2</sup>, 황상필<sup>3</sup>, 이재원<sup>1</sup> (<sup>1</sup>한양대학교 ERICA, <sup>2</sup>한국생산기술연구원, <sup>3</sup>GS칼텍스)
- PH-64 다상 유동 CFD 해석을 통한 마이크로 버블 스크러버 성능 개선 연구  
고태연<sup>1</sup>, 길진우<sup>2</sup>, 조형태<sup>2</sup>, 이재원<sup>1</sup> (<sup>1</sup>한양대학교 ERICA, <sup>2</sup>경희대학교)

## 한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회 포스터발표 II: 에너지전환

- 일시 2026년 3월 19일(목) 13:00~15:00
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비
- Organizer 김창만 교수(전남대학교)

- PC-1 바이오플라스틱(PLA) 에너지화를 위한 열화학적 가용화 공정의 최적화 및 경제성 분석  
김남균, 차재훈, 장순웅, 정우진 (경기대학교)

- PC-2 미세조류 기반 SAF용 지질 수율 향상을 위한 복합 스트레스 배양 분석  
 이아영, 이건호, 장순웅, 정우진 (경기대학교)
- PC-3 트리글리세라이드 유래 파라핀계 항공유의 저온특성 조절을 위한 업그레이딩 공정 연구  
 장정희, 장현성, 이지은, 윤여진, 이재홍, 조윤희 (고등기술연구원)
- PC-4 수첨 전환 반응에서 바이오 원료에 따른 반응 특성 비교  
 장현성, 장정희, 이지은, 윤여진, 이재홍, 조윤희 (고등기술연구원)
- PC-5 광생이모자반과 커피찌꺼기 공동 수열탄화(Co-HTC)에 따른 하이드로차 조성 및 열적 특성 변화  
 전혜린, 차재원, 정승묵, 박진수, 이성아, 윤희정, 김정훈, 이도연 (국립한밭대학교)
- PC-6 폐플라스틱 가스화 합성가스로부터 나프타 생산을 위한 Fe 기반 Fischer-Tropsch 합성 반응용 촉매 연구  
 공지현, 권재민, 김민주, 박진우, 장원준 (아주대학교)
- PC-7 Cu-Zn-Mg-Al 복합 산화물 촉매의 구조 최적화 및 CO<sub>2</sub> 메탄올 전환  
 권민석<sup>1</sup>, 이건호<sup>1</sup>, 이승우<sup>1</sup>, 권병찬<sup>1</sup>, 박노국<sup>1</sup>, 권재현<sup>2</sup>, 배종욱<sup>2</sup> (<sup>1</sup>영남대학교, <sup>2</sup>성균관대학교)
- PC-8 합성가스 생산 증대를 위한 과일 가공 산업 부산물의 이산화탄소 활용 열분해  
 박경남, 권일한 (한양대학교)

## 한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회 포스터발표 II: 자원순환

- 일시 2026년 3월 19일(목) 13:00~15:00
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비
- Organizer 김창만 교수(전남대학교)

- PF-1 소수성 분리막 접촉기를 이용한 암모니아 회수 공정의 BBD 기반 운영인자 최적화  
 이윤아, 차재훈, 정우진, 장순웅 (경기대학교)
- PF-2 분리막 접촉기 기반 CO<sub>2</sub> 탄산염 전환 공정의 성능 평가  
 이지섭, 차재훈, 임동재, 정우진, 장순웅 (경기대학교)
- PF-3 대구경 분리막을 이용한 RO 농축수 탄산광물화 기반 CaCO<sub>3</sub> 회수 공정의 안정 운전 특성 평가  
 차재훈, 임동재, 정우진, 장순웅 (경기대학교)
- PF-4 우분 및 계분의 초기 성상에 따른 퇴비화 후 최종 퇴비 특성 비교  
 이환희<sup>1</sup>, 윤다은<sup>1</sup>, 박지은<sup>2</sup>, 정유진<sup>3</sup>, 장순웅<sup>1</sup>, 이윤경<sup>2</sup>, 허진<sup>2</sup>, 정우진<sup>1</sup>  
 (<sup>1</sup>경기대학교, <sup>2</sup>세종대학교, <sup>3</sup>국립환경과학원)
- PF-5 탄소 광물화 기반 막 증류(MD) 전처리 공정: 해수 농축수 내 유가 자원(Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) 회수 및 스케일 제어  
 임동재, 차재훈, 정우진, 이인규, 장순웅 (경기대학교)

- PF-6 폐기물 가스화 및 CO<sub>2</sub> 전환 기반 고부가가치 화학원료 생산을 위한 탄소 순환형 촉매 반응 시스템 공정 연구  
남형석, 채호진, 장은호, 정세은, 박경두, 하재언, 김문영 (경북대학교)
- PF-7 저농도 옥살산 침출제에 의한 상용 및 재생 NCM 분말의 리튬 회수 비교 연구  
김대원<sup>1</sup>, 김희선<sup>1</sup>, 김성원<sup>1</sup>, 김재찬<sup>1</sup>, 최희락<sup>2</sup> (<sup>1</sup>고등기술연구원, <sup>2</sup>부경대학교)
- PF-8 테일러 반응을 이용한 NCM811 전구체 합성 및 분말 특성 비교 연구  
김희선, 정향철, 김대원 (고등기술연구원)
- PF-9 옥살산 농도에 따른 아연 및 철 성분의 침출 및 분리 효율 비교 연구  
김희선, 진연호, 김성원, 김대원 (고등기술연구원)
- PF-10 Sustainable Lithium Recovery from Spent LiFePO<sub>4</sub> Cathodes via Chlorine-Mediated Indirect Electrochemical Leaching  
Yun-Seong Ok, Kyeong-Ho Kim (Pukyong National University)
- PF-11 Controlling Beta Zeolite Acidity for Polypropylene Hydrocracking via Phosphorus Modification  
Junseok Na, Jungho Jae (Pusan National University)
- PF-12 Boron-Modified MFI Zeolites for Selective Fuel-Range Hydrocarbon Production from Polypropylene Hydrocracking  
Wansu Kim, Jungho Jae (Pusan National University)
- PF-13 Unveiling the Role of Joule Heating in Modulating Lattice Distortion and EGOR Activity of CoMo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/NF Catalysts  
Giljung Kim, Jungho Jae (Pusan National University)
- PF-14 Joule Heating Reactor for Plastic Upcycling Using ZSM-5 Abstract  
Giljung Kim, Jungho Jae (Pusan National University)
- PF-15 Structure-Activity Relationships and Selectivity of NiZn-Based Catalysts for Electrooxidation of Waste PET-Derived Ethylene Glycol  
Min Kyoung Kim, Jungho Jae (Pusan National University)
- PF-16 Hydroconversion of Polyethylene over Ru-Based Catalysts  
Joonkeol Yoon<sup>1</sup>, Hyeong Dong Jung<sup>1</sup>, Junho Suh<sup>1</sup>, Yong Hyun Lim<sup>1</sup>, Jae-soon Choi<sup>2</sup>, Jungup Bang<sup>2</sup>, Do Heui Kim<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Seoul National University, <sup>2</sup>Catalyst R&D, LG Chem.)
- PF-17 Molecular-Level Analysis of Carbonation-Induced Changes in Cement Hydrates Using Raman Spectroscopy  
Seong Deok Seo, Sang-Gyu Cho, Sohee Hong, Changsu Jeon, Ju Dong Lee (Korea Institute of Industrial Technology)

PF-18 Impact of Ball-Milling and Thermal Hydrolysis on Physico-Chemical Properties and Anaerobic Digestion Kinetics of Mixed Slaughterhouse and Agricultural Wastes  
Won Jae Lee<sup>1,2</sup>, Sang Heon Lee<sup>1,3</sup>, Oh Hyun Gweon<sup>1</sup>, Byoung Seung Jeon<sup>1</sup>,  
Young Wook Go<sup>3</sup>, Chang Sook Jin<sup>4</sup>, Young Seop Yu<sup>4</sup>, Byoung-In Sang<sup>3</sup>, Jin Hyung Lee<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, <sup>2</sup>Korea University,  
<sup>3</sup>Hanyang University, <sup>4</sup>KEC System Co.)

PF-19 Anaerobic Digestion of Biodegradable Plastics via Biological Methane Potential (BMP) for Application of Ball Mill-Based Physicochemical Pretreatment Assessment  
Won Jae Lee<sup>1,2</sup>, Sang Heon Lee<sup>1,3</sup>, Sun Mi Lee<sup>2</sup>, Jin Hyung Lee<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, <sup>2</sup>Korea University, <sup>3</sup>Hanyang University)

PF-20 파인애플 껍질의 지속가능한 처리를 위한 레블린산 생산 및 CO<sub>2</sub> 열분해 통합 공정  
박종현<sup>1</sup>, 이연준<sup>1</sup>, 이태우<sup>2</sup>, 권일한<sup>1</sup> (<sup>1</sup>한양대학교, <sup>2</sup>제주대학교)

## 한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회 포스터발표 II: 특별세션(VIII): 2026년 제1회 제주 지역기술혁신허브 기술성과교류회

- 일시 2026년 3월 19일(목) 13:00~15:00
- 장소 부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비
- Organizer 이대현 박사((재)제주테크노파크), 조현석 교수(서강대학교)

PS8-1 발표취소

PS8-2 확장 칼만 필터(EKF) 기반 인덕턴스 추정을 이용한 토렘폴 PFC 컨버터의 모델 예측 전류 제어  
선희정, 최영준 (제주대학교)


PS8-3 3상 LLC 공진형 컨버터를 위한 개선된 전류 밸런싱 제어 방법  
진현진, 최영준 (제주대학교)

## 학회상 수상자


### ■ 공로상

|   |                           |
|---|---------------------------|
|    | 이만식 수석연구원<br>한국생산기술연구원    |
|    | 김정환 교수<br>연세대학교 화공생명공학과   |
|    | 이도연 교수<br>국립한밭대학교 건설환경공학과 |
|    | 이주동 수석연구원<br>한국생산기술연구원    |
|   | 임동하 수석연구원<br>한국생산기술연구원    |
|  | 김정철 교수<br>국립한밭대학교 화학생명공학과 |
|  | 심재오 교수<br>원광대학교 화학공학과     |
|  | 정성엽 교수<br>경북대학교 환경공학과     |
|  | 이선도 대표이사<br>제우스유화공업(주)    |

### ■ 우수논문상

|   |                           |
|---|---------------------------|
|  | 최창호 교수<br>경상국립대학교 화학공학교육과 |
|---|---------------------------|

### ■ 논문기여상

|   |                      |
|---|----------------------|
|  | 김대원 수석연구원<br>고등기술연구원 |
|---|----------------------|

## 홍보전시회 참여 업체

|                  |                     |  |
|------------------|---------------------|--|
| <b>영인크로매스(주)</b> | <b>홈페이지</b>         | <a href="https://kor.youngincm.com">https://kor.youngincm.com</a>  |
|                  | <b>전 화</b>          | 031-428-8700   |
|                  | <b>업체 소개 및 전시품목</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 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 인정받았습니다.</li> <li>- 전시품목: HPLC, GC, 초순수제조장치(WPS)</li> </ul>   |
| <b>UIT</b>       | <b>홈페이지</b>         | <a href="https://www.uitsolutions.com">https://www.uitsolutions.com</a>  |
|                  | <b>전 화</b>          | 02-2051-2305   |
|                  | <b>업체 소개 및 전시품목</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 업체소개: UIT는 1997년 설립 이래, 해외의 최신 공학 기술을 발굴하고 기술 동향을 선제적으로 파악하여, 국내 고객들에게 지속적인 혁신과 가치를 제공해 왔습니다. 기술 중심의 정밀한 분석과 다년간의 경험을 바탕으로, UIT는 단순한 제품 공급을 넘어, 고객 맞춤형 솔루션 제공과 서비스 창출에 주력하며 함께 성장해 왔습니다. 창립 30주년을 앞둔 지금, UIT는 새로운 도약을 준비하고 있습니다. 각 산업 분야의 특성과 니즈를 깊이 이해하고, 이를 바탕으로 직접 개발 및 기술 지원 역량을 강화함으로써, 고객의 비즈니스 경쟁력을 높이는 진정한 기술 파트너로 거듭나고자 합니다. UIT는 앞으로도 '기술과 고객의 가치를 연결하는 플랫폼'으로서, 끊임없이 진화하며 더 큰 미래를 만들어 가겠습니다.</li> <li>- 전신품목: AspenONE Engineering (AspenHYSYS, AspenPlus, EDR, Dynamics)</li> </ul> |

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

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

## 초청강연

---

2026년 3월 19일(목) 11:30~12:00  
부산 BEXCO 제2전시장 321+322호

## 지방정부가 여는 탄소중립의 새로운 질서

- 경기도의 전략적 전환 실험

### 김혜애 원장(경기환경에너지진흥원)

기후위기는 더 이상 환경 분야의 과제가 아니다. 이는 산업 구조와 투자 흐름, 기술 경쟁의 방향을 바꾸는 거대한 전환의 시대적 과제다. 탄소 규제는 강화되고, 글로벌 공급망은 RE100과 ESG 기준을 요구하며, 청정기술은 선택이 아닌 생존 조건이 되고 있다. 이러한 전환의 한복판에서 지방정부의 역할은 단순한 집행을 넘어 전략 설계로 확장되고 있다.

대한민국 최대 산업 집적지이자 에너지 소비가 가장 높은 지역인 경기도는 이 변화의 최전선에 서 있다. 감축 부담이 가장 큰 지역이지만, 동시에 산업 전환의 파급력이 가장 큰 공간이기도 하다. 경기도는 탄소중립을 ‘환경 보호 정책’이 아니라 ‘산업 경쟁력 재편 전략’으로 재정의하며 새로운 실험을 시작했다.

첫째, ‘경기 RE100’ 정책을 통해 기업의 재생에너지 전환을 지원하고 있다. 이는 단순한 선언 캠페인이 아니라, 산업단지과 공공부지를 활용한 발전 기반 확충, 중소기업 대상 행정·금융 지원, 글로벌 공급망 대응 역량 강화로 이어지는 구조적 접근이다. 기업의 부담을 줄이면서도 전환을 촉진하는 전략이다.

둘째, 기후테크를 미래 전략산업으로 육성하고 있다. 탄소저감 기술, 에너지저장, 수소, 자원순환 등 청정기술 분야에서 실증·연구·공공수요 창출을 결합한 생태계를 조성함으로써 기술을 ‘정책 대상’이 아니라 ‘성장 동력’으로 전환하고 있다. 탄소중립을 비용이 아닌 투자로 인식하는 관점의 전환이다.

셋째, 도민 참여 기반의 감축 정책을 통해 사회적 동의를 확장하고 있다. 에너지 절약, 친환경 이동, 생활 속 실천을 인센티브와 연결하는 정책은 탄소중립을 행정의 과제가 아니라 공동의 프로젝트로 만드는 장치다. 기술과 산업 전환이 시민의 삶과 연결될 때 비로소 지속 가능성이 확보된다는 점을 보여준다.

이러한 시도는 하나의 메시지를 담고 있다. 지방정부는 더 이상 중앙 정책의 하위 집행자가 아니라, 전환의 설계자이자 실험자라는 것이다. 산업·금융·기술·시민 참여를 결합한 통합적 접근은 탄소중립을 지역 발전 전략과 연결하는 새로운 모델을 제시한다.

경기도의 사례를 통해, 탄소중립 시대에 지방정부가 어떤 리더십과 전략을 선택해야 하는지, 그리고 청정기술과 산업 전환을 통해 지역의 미래 경쟁력을 어떻게 재구성할 수 있는지를 제안하고자 한다.

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

## 특별세션(I):

**[원광대학교 RISE 사업단] 미래형모빌리티 융합기술개발  
세미나**

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

---

2026년 3월 18일(수) 15:00~17:00  
부산 BEXCO 제2전시장 325호

## 고농도 일산화탄소를 줄이기 위한 수성가스전이(Water-gas shift)반응용 Cu 기반 촉매 개발 연구

윤채민<sup>1</sup>, 전이정<sup>1</sup>, 김창현<sup>1</sup>, 전경원<sup>2</sup>, 심재오<sup>1\*</sup>  
원광대학교<sup>1</sup>, 국립군산대학교<sup>2</sup>

### Development of Cu-based catalysts for the water-gas shift reaction to reduce a high concentration of carbon monoxide

Chae-Min Yoon<sup>1</sup>, I-Jeong Jeon<sup>1</sup>, Chang-Hyeon Kim<sup>1</sup>, Kyung-Won Jeon<sup>2</sup>, Jae-Oh Shim<sup>1\*</sup>  
Wonkwang University<sup>1</sup>, Kunsan National University<sup>2</sup>

#### 초록

수성가스전이(Water-gas shift, WGS)반응은 폐기물 유래 합성가스 내 일산화탄소를 저감함과 동시에 고순도 수소를 생산할 수 있다는 점에서 주목받고 있다. 그러나 폐기물 가스화를 통해 생성된 합성가스는 높은 농도의 일산화탄소를 포함하고 있어 후단 수소 정제 공정에서 촉매독으로 작용할 수 있으므로, 이를 효과적으로 제거할 수 있는 촉매의 적용이 필수적이다. 특히 Cu 기반 촉매는 WGS 반응에서 활성을 나타내지만, 고온에서의 소결 현상과 약한 금속-지지체 상호작용으로 인해 고온 반응 적용에 한계가 있다. 촉매의 물리화학적 특성은 제조방법에 의해 크게 의존하기 때문에, 본 연구에서는 Cu 기반 촉매의 고온 WGS 반응 적용 가능성을 향상시키기 위해 네 가지 제조방법을 통해 Cu-CeO<sub>2</sub>-MgO 촉매를 합성하였다. 그중 수열합성법으로 제조된 촉매는 0%의 CH<sub>4</sub> 선택도와 100%의 CO<sub>2</sub> 선택도를 나타내어 Cu 기반 촉매의 고온 WGS 반응 적용 가능성을 확인하였다.

#### Keywords

수성가스전이(WGS)반응, 일산화탄소 저감, Cu 기반 촉매, 수열합성법

## X선 분석 기반 RWGS 반응에서의 Cu-CeO<sub>2</sub>-MgO 촉매의 반응 메커니즘 규명 연구

전이정<sup>1</sup>, 김창현<sup>1</sup>, 윤채민<sup>1</sup>, 전경원<sup>2</sup>, 심재오<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>원광대학교, <sup>2</sup>국립군산대학교

### Reaction mechanism of Cu-CeO<sub>2</sub>-MgO catalysts for the reverse water-gas shift reaction revealed by X-ray analysis

I-Jeong Jeon<sup>1</sup>, Chang-Hyeon Kim<sup>1</sup>, Chae-Min Yoon<sup>1</sup>, Kyung-Won Jeon<sup>2</sup>, Jae-Oh Shim<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>Wonkwang University, <sup>2</sup>Kunsan National University

#### 초록

전 세계적으로 탄소중립 선언이 확산되면서 이산화탄소 저감을 위한 연구와 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 이산화탄소를 일산화탄소로 전환하여 화학물질 합성을 위한 합성가스로 활용할 수 있는 역수성가스전이(RWGS, reverse water-gas shift) 반응에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 본 연구에서는 높은 열적 안정성을 가지는 MgO와 우수한 산화환원 특성을 지닌 CeO<sub>2</sub>를 활성 금속 Cu와 조합하여 RWGS 반응에 적용하였다. 반응 전·후의 Cu-CeO<sub>2</sub>-MgO 촉매에 대해 다양한 물리화학적 특성 분석을 수행하였으며, 특히 X선 흡수 분광법을 활용하여 원소의 국소 구조와 결합 상태 변화를 규명하였다. 이를 통해 RWGS 반응에서 Cu-CeO<sub>2</sub>-MgO 촉매의 반응 메커니즘을 간접적으로 제시하였다.

#### Keywords

역수성가스전이(RWGS)반응, Cu-CeO<sub>2</sub>-MgO, X선 흡수 분광법, 반응 메커니즘

## FEM을 활용한 VR 레졸버의 편심 분류 및 특성 연구

김종민, 최준서, 정선우, 진창성\*  
원광대학교

### A Study on the Characteristics and Classification of Eccentricity Types in VR Resolvers Using FEM

Jong-Min Kim, Jun-Seo Choi, Seon-Woo Jeong, Chang-Sung Jin  
Department of Electrical Engineering, Wonkwang University

Variable Reluctance (VR) 레졸버의 출력 전압 파형에 미치는 편심의 영향을 유한요소해석(FEM) 기법을 통해 분석하였다. VR 레졸버는 영구자석 동기전동기(PMSM)의 회전자 위치를 감지하기 위한 위치 센서로 사용되며, 높은 내구성과 내환경성을 가지는 특징이 있다. 그러나 제조 및 설치 과정에서 발생하는 축 정렬 불일치로 인해 정적, 동적, 혼합 편심이 발생할 수 있으며, 이는 출력 전압의 진폭 및 위상에 왜곡을 초래한다. 본 연구에서는 Ansys Maxwell을 사용하여 각 편심 유형이 SIN 및 COS 출력 전압 파형에 미치는 영향을 해석하였다. 또한, 시뮬레이션 결과를 실험 데이터와 비교하여 편심 유형별 전압 왜곡 패턴을 분석하고, 이를 통해 편심을 분류할 수 있는 기준을 제시하였다.

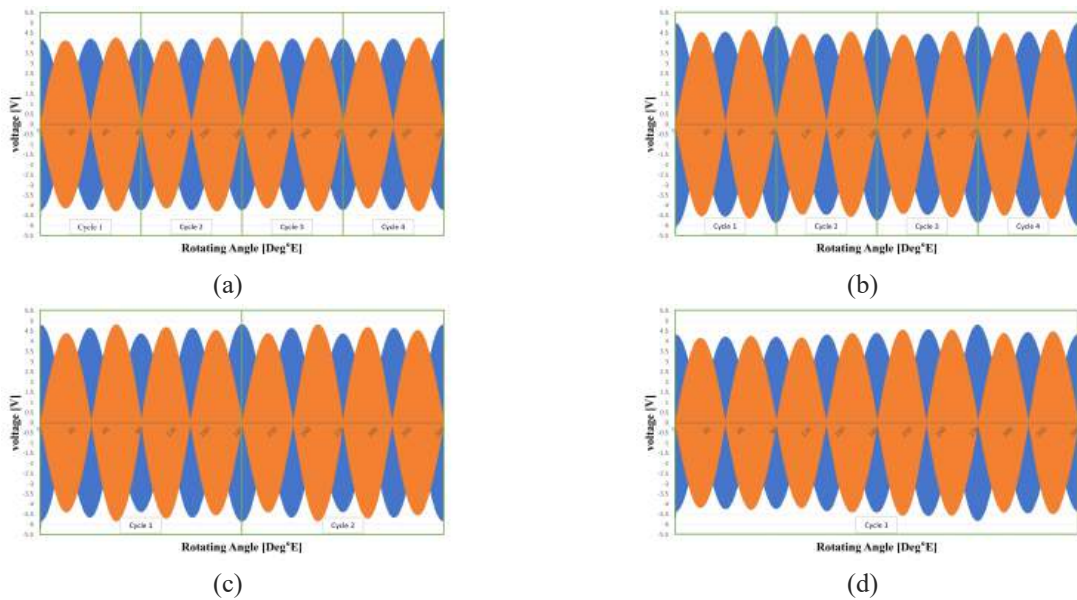


그림. 1. 4극 VR레졸버에서 편심 종류에 따른 출력 전압  
(a) 정상 상태 (b) 정적 편심 (c) 동적 편심 (d) 혼합 편심

## 실험계획법을 통한 비가역 감자에 대한 Dy-Free 영구자석 모터의 최적 설계

윤성현<sup>1</sup>, 이광민<sup>1</sup>, 정옥윤<sup>1</sup>, 임태현<sup>1</sup>, 진창성<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>원광대학교

### Optimal Design of Dy-Free Permanent Magnet Motor for Irreversible Demagnetization through Experimental Design

Sung-Hyun Yoon<sup>1</sup>, Kwang-Min Lee<sup>1</sup>, Ok-Yun Jung<sup>1</sup>, Tae-Hyun Lim<sup>1</sup>, Chang-Sung Jin<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Wonkwang University

최근 환경 문제에 대한 전 세계적인 관심이 높아지면서 주요 자동차 제조사들은 내연기관 차량의 생산을 중단하고 있다. 반면 전기차의 생산은 점진적으로 확대되고 있다. 전기차에는 고효율·고출력의 영구자석 모터가 필수적이다. 이러한 자석은 일반적으로 희토류 소재로 구성되며, 지속적인 가격 상승과 특정 국가의 독점적 공급 구조로 인한 수급 불안정에 대한 우려를 낳고 있다.

본 논문에서는 희토류 원소 중 하나인 디스프로슘(Dy)을 사용하지 않는 영구자석 모터를 제안한다. 그러나 Dy를 사용하지 않은 영구자석은 보자력이 낮고 온도 특성이 저하되어 비가역 감자에 취약해지는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 외부 감자 요인에 매우 취약한 바(bar)형 구조에서 V형 구조로 영구자석의 형상을 변경하였다. 또한 실험계획법의 일종인 다구치(Taguchi) 방법을 활용하여 최적 설계를 수행하였다.

#### 참고문헌

1. Sung-Il Kim, Ji-Young Lee, Young-Kyoun Kim, Jung-Pyo Hong, Y. Hur and Yeon-Hwan Jung, "Optimization for reduction of torque ripple in interior permanent magnet motor by using the Taguchi method," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 5, pp. 1796-1799, May 2005.
2. J. G. Che, G. M. Xian and E. M. Knod, "An Integrated Design Method of New Product and the Production Process Based on Taguchi Robust Design," 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Harbin, China, 2007.
3. G. Lei, C. Liu, Y. Li, D. Chen, Y. Guo and J. Zhu, "Robust Design Optimization of a High-Temperature Superconducting Linear Synchronous Motor Based on Taguchi Method," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 29, no. 2, pp. 1-6, March 2019.
4. H. Hajar-Rivera, J. Sanchez-Leal and A. Valles-Chavez, "Improving a soldering process applying the dual response approach to a Taguchi's orthogonal array," 2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering, Troyes, France, 2009.
5. S. Ruoho, J. Kolehmainen, J. Ikaheimo and A. Arkkio, "Interdependence of Demagnetization, Loading, and Temperature Rise in a Permanent-Magnet Synchronous Motor," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 3, pp. 949-953, March 2010.

## Synthesis of Boron Nitride Nanoparticles and Nanotubes via Nitrogen Thermal Plasma without Additional Nitriding Agents

Se Jin Oh, Han Jun Lee and Tae-Hee Kim \*

Department of Chemical Engineering, Wonkwang University

Boron Nitride (BN) possesses unique physical and chemical properties, existing primarily in two allotropic forms: hexagonal BN (h-BN), which is structurally similar to graphite, and cubic BN (c-BN), which shares a structure with diamond [1].

In this study, boron nitride (BN) nanoparticles and nanotubes (BNNTs) were successfully synthesized using a DC thermal plasma system without any external nitriding agents, such as ammonia (NH<sub>3</sub>). The research focused on utilizing the high energy density and rapid quenching rates of nitrogen (N<sub>2</sub>) thermal plasma to induce the direct nitridation of boron precursors and the formation of cubic BN (c-BN), a metastable phase typically requiring high-pressure and high-temperature conditions (HPHT) [2].

Experimental parameters, including precursor type, hydrogen injection, and the presence of a thermal insulation tube, were investigated. Numerical simulations confirmed that the thermal insulation tube maintained the reactor wall temperature at approximately 1,000 K, increasing the residence time of particles.

The synthesized nanomaterials exhibited a mixture of metastable c-BN nanoparticles and hexagonal BN (h-BN) structures, including BNNTs, across all runs. When amorphous boron was used as a precursor (Runs 1-3), it was more advantageous for c-BN synthesis than h-BN precursors. The average particle sizes ranged from 16.25 nm to 23.93 nm. Run 3 (without H<sub>2</sub> injection) yielded the smallest size of 16.25 nm due to faster quenching, while Run 2 (with insulation) produced the largest crystallite size of 20.4 nm and multi-walled BNNTs. These results demonstrate that nitrogen thermal plasma is an efficient clean technology for the direct production of metastable c-BN and other high-value BN nanomaterials.

### References

1. Bello, I. et al. Cubic boron nitride films for industrial applications. *Diam. Relat. Mater.* 14, 1784–1790 (2005).
2. Vel, L., Demazeau, G. & Etourneau, J. Cubic boron nitride: synthesis, physicochemical properties and applications. *Mater. Sci. Eng. B* 10, 149–164 (1991).

## Resource recovery using thermal plasma decomposition of waste *Undaria pinnatifida*: Biochar and hydrogen production

Han Jun Lee, Se Jin Oh and Tae-Hee Kim\*

Department of Chemical Engineering, Wonkwang University

Korea is a major producer and consumer of *U. pinnatifida* (*Undaria pinnatifida*). During processing, about 40-60% of *U. pinnatifida* is discarded as non-edible by products, corresponding to approximately 0.14-0.21 Mt/yr [1]. Disposal of these residues into the ocean contributes to ecosystem disturbance and eutrophication, while land transport creates additional waste management burdens. Therefore, valorization routes that recover energy and carbon materials from waste *U. pinnatifida* are required.

This study investigated DC thermal plasma decomposition of *U. pinnatifida* for syngas and char production. A nitrogen plasma jet was generated at 50 L/min and Nitrogen at 5 L/min was used as the carrier gas for feed injection. The input current was adjusted to 40, 60, 80 A (4, 6, 8 kW, respectively) to compare conversion characteristics. Biochar and hydrogen-containing syngas were obtained under all tested conditions. The biochar was characterized by Nitrogen adsorption/desorption analysis. The best textural properties were obtained at 6 kW, achieving a BET surface area of 4.196 m<sup>2</sup>/g, a total pore volume of 0.160 cm<sup>3</sup>/g and a mean pore diameter of 15.22 nm, indicating a predominantly mesoporous structure. Overall, these results confirm syngas–char co-production from waste *U. pinnatifida* and provide baseline data for further process optimization.

### References

1. R. M. Templonuevo et al., “Bioactive compounds of sea mustard (*Undaria pinnatifida*) waste affected by drying methods,” *Foods*, 13(23), 3815 (2024).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

**특별세션(II):**  
**신진연구자 특별세션 II**  
**Rising Stars: Toward Cleaner Technology**

---

2026년 3월 19일(목) 13:00~16:30  
부산 BEXCO 제2전시장 323호

## Investigating the CO<sub>2</sub> adsorption reversibility of solid semiclathrates confined in silica gel pores

Sungwoo Kim<sup>1</sup>, Junghoon Mok<sup>2</sup>, Gyeol Ko<sup>1</sup> and Yongwon Seo<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil, Urban, Earth, and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan 44919, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Civil and Energy System Engineering, Kyonggi University, Suwon-si, Gyeonggi-do 16227, Republic of Korea

<sup>3</sup>Graduate School of Carbon Neutrality, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan 44919, Republic of Korea

Traditional hydrate-based gas separation (HBGS) techniques, which rely on temperature-driven phase changes, often suffer from poor operational efficiency and irreversible phase transitions. To overcome these drawbacks, this study presents a novel strategy using pre-synthesized solid tetra-n-butyl ammonium chloride (TBAC) semiclathrates embedded in porous silica gels, facilitating pressure-induced reversible CO<sub>2</sub> sorption and desorption. The synthesis and efficacy of these TBAC semiclathrates were verified through comprehensive analytical techniques for applications in pre-combustion CO<sub>2</sub> capture. Cryogenic scanning electron microscopy (cryo-SEM) revealed that the semiclathrate structures predominantly form within the internal pores of the silica gel rather than in the interstitial spaces between particles. Furthermore, differential scanning calorimetry (DSC) results indicated an absence of thermal fluctuations during gas exchange, corroborating a diffusion-mediated process that avoids discrete phase transitions. A high CO<sub>2</sub> selectivity of approximately 90% was achieved, suggesting that CO<sub>2</sub> molecules preferentially occupy the semiclathrate cages. The reversibility of the process was further confirmed via in-situ Raman spectroscopy, where CO<sub>2</sub>-specific signals appeared during gas loading and completely disappeared upon evacuation. Cyclical stability was demonstrated over ten consecutive adsorption-desorption runs, showing no significant loss in structural integrity or performance. These results signify a major advancement in HBGS technology, offering a robust and sustainable framework for practical CO<sub>2</sub> capture implementations.

## Structure-Performance Engineering of Porous Adsorbents for CO<sub>2</sub> Separation

Heseong An<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Sunchon National University

Two porous material systems—metal–organic frameworks and biomass-derived adsorbents—were engineered using mechanistically distinct design strategies, yet both were guided by deliberate physicochemical structure regulation to improve selective CO<sub>2</sub> adsorption. In each platform, systematic control over pore topology, surface functionality, and framework rigidity was employed to modulate adsorption energetics and diffusion characteristics. Structural tuning enabled the formation of well-defined adsorption sites with enhanced specific interactions and optimized pore size distribution, thereby influencing CO<sub>2</sub> affinity and transport behavior. Despite their disparate chemical compositions and structural origins, both materials demonstrate that precise manipulation of microstructural parameters governs gas–solid interactions at the molecular level. These results reinforce the importance of structure–performance relationships in porous materials design and provide mechanistic insights for advancing selective CO<sub>2</sub> capture technologies.

## 바이오매스 유래 알코올의 전기화학적 산화 및 고분자 단량체 생산을 위한 니켈 기반 수산화물 전기촉매 설계

문병철\*  
한국과학기술연구원

바이오매스 유래 알코올의 전기화학적 산화 반응은 전기에너지를 활용한 지속가능한 화합물 생산 전략으로 주목받고 있으며, 물산화반응 (Water Oxidation Reaction)을 대체함으로써 전해반응 (electrolysis)의 구동 전위를 낮추고 고부가가치 화합물의 생산을 가능케 한다. 특히 5-Hydroxymethylfurfural (HMF)의 전기화학적 산화반응으로부터 얻어지는 2,5-Furandicarboxylic acid (FDCA)는 석유계 플라스틱 소재를 대체할 바이오 유래 플라스틱 소재 중 하나인 polyethylene furanoate (PEF) 생산의 핵심 원료로서 활용된다. 전기화학 공정은 열화학공정에 비해 상대적으로 온화한 조건에서 반응 경로를 정밀하게 제어할 수 있고 연속 공정과의 결합이 용이하다는 장점을 가진다.

염기 조건 하에서 니켈을 포함하는 전이금속 수산화물 (transition-metal hydroxides) 촉매는 바이오매스의 알코올 기능기 (functional group)를 알데하이드 (aldehyde), 카르복실 (carboxylate) 기능기로 전환하는 산화반응의 핵심 역할을 한다. 최종 생성물인 FDCA의 생성 과정은 알코올 산화뿐 아니라 알데하이드의 추가 산화를 반드시 수반하기 때문에, 반응 중간체 (intermediates)의 전환 속도를 향상시키기 위한 촉매 설계가 매우 중요하다. 니켈 외에 구리, 철, 바나듐, 몰리브덴 등 다양한 전이금속의 도입은 전자구조 조절, 중간체 흡착 특성 변화, 그리고 알데하이드 산화 촉진을 통해 전체 반응 속도와 선택도를 크게 향상시킬 수 있다. 이러한 관점에서, 다성분계 촉매 및 계면 활성 사이트의 역할을 이해하고 반응 경로를 제어하는 것이 고효율 바이오매스 전환 촉매 설계의 핵심 전략이 된다.

또한 이러한 반응을 실제 공정으로 확장하기 위해서는 촉매 성능뿐 아니라 반응기 및 시스템 설계 전략이 중요하다. 대면적 전극 제조를 통해 안정적인 전해 운전을 구현하고, 연속식 전해 시스템을 이용하여 생성물을 지속적으로 생산하며, 동시에 고순도 생성물을 회수하기 위한 전략을 통합하는 것이 필요하다. 더 나아가 전기화학 공정의 실용화를 위해서는 셀 전압 저감과 반응 선택도 향상을 통한 에너지 효율 확보가 필수적이며, 이러한 접근은 재생에너지 기반 화학물질 생산의 경제성과 확장성을 동시에 확보하는 데 중요한 기반을 제공한다.

본 연구에서는 반응 메커니즘 이해를 바탕으로 고순도의 FDCA를 효율적으로 생산하기 위한 고효율 촉매 소재 설계와 전해 시스템 (electrolyzer)의 안정적인 구동을 위한 시스템 설계 전략을 제시하고, 전기화학적 바이오매스 자원화와 화합물 생산 공정의 실용 가능성을 제시한다.

### 참고문헌

1. Kim, K. H., Jang, H., Woo, J., Lee, M. Y., Kim, M. G., Moon, B. C.\*, and Lee, D. -K.\*, "NiV Layered Double Hydroxide for Efficient and Scalable Electrochemical Oxidation of 5-Hydroxymethylfurfural to High-Purity 2,5-Furandicarboxylic Acid," ACS Catal., 2025, 15, 17, 14693-14702.
2. Woo, J., Moon, B. C., Lee, U., Oh, H. S., Chae, K. H., Jun, Y., Min, B. K.\*, Lee, D. -K.\*, "Collaborative Electrochemical Oxidation of the Alcohol and Aldehyde Groups of 5-Hydroxymethylfurfural by NiOOH and Cu(OH)<sub>2</sub> for Superior 2,5-Furandicarboxylic Acid Production," ACS Catal., 2022, 12, 7, 4078-4091.

## Phase- and Composition-Engineered Transition Metal Dichalcogenide Alloy Nanosheets for Efficient Hydrogen Evolution Reaction

Ik Seon Kwon\*

Department of Energy Science & Engineering, Kunsan National University, Gunsan 54150, Jeonbuk State, Republic of Korea

Control of crystalline phase and compositional complexity in transition-metal dichalcogenides (TMDs) critically dictates the electronic structure and hydrogen-adsorption Gibbs free energy ( $\Delta G_{H^*}$ ), which are key descriptors governing electrochemical hydrogen evolution reaction (HER) activity. In this study, an integrated phase–composition engineering strategy is established for selenide-based TMD nanosheets synthesized under Se-rich colloidal growth conditions. Under Se-enriched environments,  $WSe_2$  and  $MoSe_2$  preferentially stabilize into the 2M (monoclinic) phase rather than the conventional 2H structure, as directly identified by atomic-resolution STEM, which resolves the characteristic 2M stacking sequence clearly distinct from the 1T' phase. Density functional theory calculations incorporating Se-intercalation and Se-substitution models further support the thermodynamic stabilization of the 2M phase under Se-rich conditions.

For multicomponent alloy systems, including  $(MoWV)Se_2$  and  $(MoNbV)Se_2$ , precise compositional tuning systematically shifts the d-band center and drives  $\Delta G_{H^*}$  toward thermoneutral values, thereby enhancing the intrinsic HER activity. Importantly, phase and composition exhibit a strong coupling effect: alloying alters the relative phase stability and facilitates access to metallic phases, while Se-rich growth amplifies the electronic-structure modulation induced by compositional complexity. In situ X-ray absorption spectroscopy (XAS) under operating conditions tracks dynamic changes in local coordination environments and electronic states, providing direct insight into the structure–activity relationship. Consequently, the engineered TMDs nanosheets exhibit enhanced electrical conductivity and a higher density of catalytically active sites, leading to significantly improved HER performance and offering a rational design guideline for advanced TMD-based electrocatalysts beyond conventional phase engineering.

### References

1. **Kwon, I. S.**, Kwak I. H., Kim, J. Y., Lee, S. J., Sial, Q. A., Ihsan, J. Lee, K. -S., Yoo, S. J., Park, J., and Kang, H. S., “2H–2M Phase Control of  $WSe_2$  Nanosheets by Se Enrichment Toward Enhanced Electrocatalytic Hydrogen Evolution Reaction,” *Adv. Mater.*, **36**(8), 2307867 (2024).
2. **Kwon, I. S.**, Kwak I. H., Kim, Zewdie, G. M., Lee, S. J., Kim, J. Y., Yoo, S. J., Kim, J. -G., Park, J., and Kang, H. S., “ $MoSe_2$ – $VSe_2$ – $NbSe_2$  Ternary Alloy Nanosheets to Boost Electrocatalytic Hydrogen Evolution Reaction,” *Adv. Mater.*, **34**(41), 2205524 (2022).

## Nanostructured Electrode Design Strategies for High-Performance Metal–Chalcogen Batteries

Jin-Sung PARK<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Energy Systems Research Ajou University Suwon 16499, Korea

<sup>2</sup> Department of Material Science and Engineering Ajou University Suwon 16499, Korea

Metal–chalcogen batteries, represented by Li-S and Li-Se batteries, are attracting growing attention as next-generation energy-storage technologies because of their high theoretical capacities and energy densities. Despite these advantages, their practical performance is often limited by fundamental challenges such as poor electrical conductivity of active materials, sluggish reaction kinetics, dissolution of intermediate species, and large volume fluctuations during cycling. To overcome these issues, recent research has increasingly emphasized nanostructured electrode design as a universal strategy for performance enhancement.

Across a wide range of studies, a consistent conclusion is that tailoring electrode architecture at the nanoscale enables simultaneous control of electrochemical kinetics, structural stability, and interfacial reactions. In particular, porous conductive host frameworks have proven highly effective because they can physically confine active materials, improve electrical contact, and regulate ion transport. Hierarchical pore systems that integrate multiple pore sizes are especially beneficial, as they balance rapid mass transport with strong active-material immobilization.

Beyond porosity, structural morphology and dimensionality also play crucial roles. One-dimensional and three-dimensional nanostructures can provide continuous electron pathways, shortened diffusion distances, and large interfacial areas, all of which contribute to improved rate capability and cycling stability. In addition, compositional tuning of host materials—such as heteroatom incorporation or defect engineering—can further enhance interactions between the host matrix and chalcogen species, stabilizing electrochemical reactions.

Overall, these studies collectively demonstrate that nanostructured electrode engineering represents a fundamental design paradigm for metal–chalcogen batteries. Rather than relying solely on chemical composition, controlling nanoscale architecture offers a powerful and versatile route to achieving high capacity, fast kinetics, and long-term durability, providing key insights for the development of high-energy battery systems.

### References:

1. Hyun Jin Kim, Jeong Ho Na, Haeseong Jang, Jin-Sung Park, and Seung-Keun Park, "Hierarchically porous flower-like N-doped carbon spheres engineered via KOH activation for high Se loading in K–Se batteries," *Appl. Surf. Sci.*, 729, 166223 (2026).
2. Sung Eun Wang, Min Ji Kim, Jin-Sung Park, Jin Woong Lee, Do Woong Yoon, Youngsin Kim, Jung Hyun Kim, Yun Chan Kang, and Dae Soo Jung, "Silicon oxycarbide-derived hierarchical porous carbon nanoparticles with tunable pore structure for lithium-sulfur batteries," *Chem. Eng. J.*, 465, 143035 (2023).
3. Seung-Keun Park, Jin-Sung Park, and Yun Chan Kang, "Trimodally porous N-doped carbon frameworks with an interconnected pore structure as selenium immobilizers for high-performance Li-Se batteries," *Mater. Charact.*, 151, 590–601 (2019).
4. Seung-Keun Park, Jin-Sung Park, and Yun Chan Kang, "Metal-Organic-Framework-Derived N-Doped Hierarchically Porous Carbon Polyhedrons Anchored on Crumpled Graphene Balls as Efficient Selenium Hosts for High-Performance Lithium–Selenium Batteries," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 10, 16531–16540 (2018).
5. Seung-Keun Park, Jin-Sung Park, and Yun Chan Kang, "Selenium-infiltrated metal–organic framework-derived porous carbon nanofibers comprising interconnected bimodal pores for Li-Se batteries," *J. Mater. Chem. A*, 6, 1028 (2018).

## 차세대 소듐이온전지용 고용량 전극 소재 개발을 위한 조성 설계 전략

김경호\*

국립 부경대학교 융합소재공학부 재료공학전공

**Compositional Engineering Strategies for Developing High-Capacity Electrode Materials for Next-Generation Sodium-Ion Batteries**

Kyeong-Ho Kim\*

Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University

As promising post-lithium-ion energy storage systems, sodium-ion batteries (SIBs) have received significant attention owing to the natural abundance of sodium and their similar intercalation chemistry to lithium-ion batteries (LIBs). Despite these similarities, several intrinsic thermodynamic and kinetic limitations must be overcome to achieve practical energy densities and cycling stability. In particular, conventional graphite and silicon anodes, which are effective in LIBs, exhibit poor sodium storage capability, necessitating alternative anode materials. Among them, red phosphorus (P) has emerged as a high-capacity candidate (~2596 mAh g<sup>-1</sup>) based on its formation of the sodium-rich Na<sub>3</sub>P phase. However, its poor electronic conductivity and severe volume change during cycling lead to rapid capacity decay. Transition metal phosphides (MP<sub>x</sub>) have been explored to mitigate these issues by providing improved electronic/ionic conductivity and structural buffering effects. In this context, P-rich phases in MP<sub>x</sub> ( $x > 2$ ) are of particular interest due to their high theoretical capacities derived from the high P contents.

In this study, two distinct design strategies were developed to enhance the electrochemical performance of P-rich phosphide anodes for SIBs. First, cation-substituted Mn<sub>1-x</sub>V<sub>x</sub>P<sub>4</sub> compounds were introduced to modify the intrinsic electronic structure of MnP<sub>4</sub>, thereby improving its electrical conductivity and sodium-ion reaction kinetics[1]. Second, anion-substituted NiP<sub>2-x</sub>S<sub>x</sub> compounds were designed to upshift the P redox potential of NiP<sub>2</sub>, effectively expanding the operational potential window for sodium storage.[2] These strategies collectively demonstrate the potential of cationic and anionic substitutional engineering to overcome intrinsic electronic and thermodynamic barriers in high-capacity phosphide-based anodes for next-generation SIBs.

참고문헌

1. Kim, K.-H., and Hong, S.-H., "Manganese Tetrphosphide (MnP<sub>4</sub>) as a High Capacity Anode for Lithium-Ion and Sodium-Ion Batteries", *Adv. Energy. Mater.*, 11, 2003609 (2021).
2. Kim, H.-H.<sup>†</sup>, Kim, K.-H.<sup>†</sup>, and Hong, S.-H., "Anion Exchanged NiP<sub>2-x</sub>S<sub>x</sub> Solid Solution as an Anode for Sodium Ion Batteries", *Chem. Eng. J.*, 455, 140798 (2023).

## Catalytic and Reactor Engineering for Efficient Photoelectrochemical H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Production

Taehwa Jeon\*

Center for Water Cycle Research, Korea Institute of Science and Technology

Hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) is an environmentally benign oxidant with growing demand in water treatment, chemical synthesis, and energy applications. Conventional anthraquinone processes are energy-intensive and centralized, motivating the development of decentralized and sustainable production routes. In this presentation, we report integrated photoelectrochemical (PEC) strategies for efficient and bias-free solar generation of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, including both durable dual-electrode systems and solid polymer electrolyte (SPE)-based electrolyte-free production.

In the first study, we demonstrate a dual-electrode PEC configuration that enables simultaneous H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> generation at both the photoanode and cathode under solar irradiation. Mo-doped and phosphate-treated BiVO<sub>4</sub> (P-Mo-BVO) photoanodes were rationally engineered to enhance the selectivity of the two-electron water oxidation pathway while suppressing competing four-electron oxygen evolution, achieving a Faradaic efficiency (FE) of 40–50% for anodic H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> production. Concurrently, an anthraquinone-anchored carbon nanotube cathode (AQ-CNT) promotes highly selective two-electron oxygen reduction (2e<sup>-</sup> ORR) toward H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> with nearly 100% FE while completely suppressing competing H<sub>2</sub> evolution. The integrated system sustains stable operation for over 100 hours with more than 90% photocurrent retention and achieves a net H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> production rate of 0.16 μmol min<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> under bias-free conditions, highlighting the critical role of interfacial charge transfer control and reaction pathway engineering.

We further introduce a membrane-integrated PEC architecture employing a solid polymer electrolyte (SPE) to directly produce high-purity, electrolyte-free H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solutions. A ruthenium catalyst-decorated TiO<sub>2</sub> nanorod photoanode (RuO<sub>x</sub>/TNR) and an anthraquinone-functionalized graphite cathode (AQ/G) are placed in separate compartments, with an SPE middle compartment in between. Under solar illumination, H<sup>+</sup> generated via water oxidation at the photoanode and HO<sub>2</sub><sup>-</sup> generated via 2e<sup>-</sup> ORR at the cathode are selectively transported through the SPE into the middle compartment, where they combine to form pure H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution. Without any external bias, this system continuously produces ~80 mM electrolyte-free H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> with ~90% FE over 100 hours of operation, representing the highest H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration achieved by any PEC system to date.

In summary, these studies establish design principles for efficient and durable PEC H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> production, integrating photoelectrode engineering, reaction selectivity control, and membrane-based product purification. The presented strategies advance solar-driven H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> synthesis toward decentralized, sustainable chemical manufacturing and on-site environmental applications.

1. Jeon, T. H., et al., "Highly durable photoelectrochemical H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> production via dual photoanode and cathode processes under solar simulating and external bias-free conditions", *Energy Environ. Sci.*, **13**, 1730-1742 (2020).
2. Jeon, T. H., et al., "Solar photoelectrochemical synthesis of electrolyte-free H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> aqueous solution without needing electrical bias and H<sub>2</sub>", *Energy Environ. Sci.*, **14**, 3110-3119 (2021).

## 사용후 배터리 재활용을 위한 에너지 효율적 기계적 전처리 공정 설계

이원재<sup>1</sup>, 한성수<sup>1,2\*</sup>, 서주범<sup>1</sup>, 조인태<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 자원활용연구본부 자원회수연구센터,

<sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교 자원공학과

### Design of an Energy-Efficient Mechanical Treatment Process for Recycling End-of-Life Lithium-Ion Batteries

Wonjae Lee<sup>1</sup>, Seongsoo Han<sup>1,2\*</sup>, Joobeom Seo<sup>1</sup>, Intae Jo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Resources Utilization Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources(KIGAM), 124  
Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Republic of Korea,

<sup>2</sup>University of Science & Technology (UST), 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Republic of  
Korea

#### 초록

사용후 배터리(EOL LIB) 재활용에서 파쇄, 분쇄, 스크리닝을 포함한 기계적 전처리 공정은 필수적이거나 에너지 소비가 매우 높다는 문제가 있다. 그러나 에너지 효율적 공정 설계에 관한 연구는 여전히 제한적이며, 대부분의 연구가 개별 단위 공정 개선에 국한되어 있다. 본 연구는 상용 기계적 전처리 장비에 에너지 모니터링 장치를 장착하여 에너지 소비를 정량적으로 측정하고, 탄소 배출량, 블랙매스 회수율 및 불순물 함량을 종합적으로 고려한 최적 공정 구성을 제안하였다.

과우치형 EV 배터리 셀의 조성 분석 결과, 블랙매스(양극 36.8 wt.% + 음극 활물질 28.5 wt.%)가 전체 질량의 65.3 wt.%를 차지하였다. 각 장비별 처리 산물에 대한 입도별 성분 분포 분석을 수행한 결과, 미세 입자일수록 블랙매스 함량이 높고 Al·Cu 불순물 농도가 낮은 경향이 일관되게 관찰되었으며, 이를 통해 355 µm가 고순도 블랙매스를 확보할 수 있는 최적 스크린 크기로 결정되었다. 또한 개별 장비 성능 평가에서 해머밀의 스크린 막힘 현상이 공정 효율의 핵심 병목으로 확인되었으며, 이는 분리막 소재의 물리적 특성과 충격 파쇄 메커니즘 간의 비호환성에 기인한다.

이를 바탕으로 네 가지 공정 구성(Case A: 순차 공정, Case B: 해머밀 전 스크리닝, Case C: 슈레더 후 조기 스크리닝, Case D: 다단계 스크리닝)을 개발하여 비교 평가하였다. 다단계 스크리닝을 적용한 Case D는 에너지 소비량 2.05 kWh/ton을 달성하여 기존 순차 공정(Case A, 21.52 kWh/ton) 대비 90.5% 감소하였으며, 탄소 배출량은 9.68에서 0.92 kg CO<sub>2</sub> /ton으로 저감되었다. 동시에 94.97%의 블랙매스 순도와 53.52%의 회수율을 유지하였다. 본 연구는 에너지 소비, 탄소 배출 및 블랙매스 품질을 통합적으로 고려하는 전체 공정 수준의 설계가 경제적·환경적 요건을 동시에 충족하는 기계적 전처리 공정 개발에 핵심적임을 제시한다.

주제어 : 사용후 배터리, 재활용, 기계적 처리, 블랙매스, 에너지 모니터링

\* Corresponding author : 한성수, sshan@kigam.re.kr

## 수치해석과 AI 모델링을 활용한 에너지·화학 플랜트 시스템 성능 및 환경성 최적화 연구

조현빈<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국에너지기술연구원 청정연료연구실, 대전광역시 유성구 가정로 152 (34129)

### Optimization of Energy and Chemical Process Plants Using Numerical Simulation and AI Modeling

Hyunbin Jo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Clean Fuel Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research, 152, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34129, Republic of Korea

\*Corresponding author : [hyunbin.jo@kier.re.kr](mailto:hyunbin.jo@kier.re.kr)

#### Abstract

본 연구는 수치해석(Computational Fluid Dynamics, CFD)과 인공지능(AI) 모델링을 활용하여 플랜트 시스템의 성능과 환경성을 예측·최적화하기 위한 연구 방향을 제시한다. 연소 및 가스화 기반 플랜트는 유동, 난류 혼합, 화학반응, 복사 열전달이 복합적으로 작용하는 고차원 비선형 시스템으로, 설계 변수와 운전 조건의 변화에 따라 성능과 배출 특성이 크게 달라진다. 따라서 물리 기반 해석과 데이터 기반 예측의 유기적 활용을 통한 접근이 요구된다.

먼저, 상용 보일러를 대상으로 CFD 해석 체계를 구축하고, 격자 민감도 평가와 효율적 계산 전략을 포함한 연소 거동, 공기 단계 분배, 화염 구조, 열흡수 분포 및 NO<sub>x</sub> 형성 메커니즘 모델링 방법론을 체계적으로 검증하였다. 이를 바탕으로 공기 분배 조건 변화에 따른 보일러 성능과 NO<sub>x</sub> 배출 간의 상충 관계를 정량화하였다. 특히 단계 연소 전략(Overfire Air 적용)의 효과를 평가하여 NO<sub>x</sub> 저감과 보일러 효율 간의 균형 조건을 도출하였으며, 실제 발전소 운전에서 빈번히 발생하는 공기 공급 불균일이 화염 변형과 열흡수 분포에 미치는 영향을 규명함으로써 운전 변수 조정을 통한 완화 가능성을 제시하였다.

한편, CFD 해석의 높은 계산 비용과 실시간 적용의 제약을 극복하기 위해 실제 발전소 운전데이터를 활용한 딥러닝 기반 예측 모델을 개발하였다. 연료 물성의 변동성과 난류 연소의 비정상성으로 인해 출력 변수가 시간적으로 크게 변동하는 실제 운전 환경을 고려하여 입력 변수 구조를 설계하고, 과거 운전 이력이 반영되는 시계열 학습 체계를 구축하였다. 또한 서로 다른 학습 특성을 갖는 다중 모델을 결합하는 앙상블 전략을 적용함으로써 예측의 안정성과 일반화 성능을 동시에 확보하였다. 이를 통해 보일러 출력의 주요 운전 변수와 배출 농도를 단기 선행 예측할 수 있는 데이터 기반 제어 지원 프레임워크를 구축하였다.

또한 에너지 플랜트를 대상으로 한 AI 모델 개발을 CFBC 보일러 암모니아 혼소 시스템으로 확장하여, 연소 안정성과 배출 특성을 예측하는 시계열 AI 모델과 운전보조 알고리즘을 개발하였다. 암모니아 혼소 시 연소 반응 특성과 화염 안정성은 기존 단일 연료와 상이하므로, 연료 혼합비 변화에 따른 동적 거동을 예측하는 모델의 필요성이 크다. 이에 따라 연소장 내부 반응 특성과 운전 데이터 간의 연계를 고려한 예측 구조를 설계하고, 실시간 운전 의사결정을 지원하는 모델 기반 운전보조 체계를 구축하고 있다.

동시에 폐플라스틱 가스화를 중심으로 자원순환형 에너지화 공정의 반응 특성 해석과 공정 조건 최적화 연구를 수행함으로써, 연소 기반 시스템에서 가스화 기반 시스템까지 연구 범위를 확장하고 있다. 특히 열화학적 전환 과정에서의 반응 경로와 합성가스 조성 변화를 수치해석적으로 규명하고, 공정 변수 변화에 따른 시스템 응답 특성을 분석함으로써 에너지 효율과 환경성을 동시에 고려한 운전 전략 수립 가능성을 모색하고 있다.

본 발표에서는 수치해석을 통해 플랜트 내부의 복잡한 물리·화학적 거동을 정량적으로 이해하고, AI 모델링을 통해 이를 실시간 예측과 운전 의사결정 체계로 연결하는 통합 전략을 제시한다. 나아가 물리 기반 해석과 데이터 기반 예측을 결합한 디지털 최적화 프레임워크가 에너지·화학 플랜트의 저탄소 운전, 배출 저감 및 자원순환형 공정 설계에 어떻게 기여할 수 있는지를 논의하고자 한다.

## **Biofuel production towards better combustion and emissions**

Taehoon Han

Department of Mechanical Engineering, University of Suwon, Republic of Korea. 18323.

### **Abstract**

Carbon neutrality is one of the most important messages in the recent climate change era, so the utilization of biofuels is becoming more important in the power generation and transportation sectors. Numerous biofuel production pathways have been introduced so far, and the composition of various biofuels covers a wide range of applications. When biofuels are utilized in powertrains, however, combustion efficiency and emissions often become worse than conventional fossil fuels due to insufficient combustion by non-optimized operating conditions. To improve combustion and emissions quality, composition-optimized biofuels are necessary to properly operate the powertrain systems. Thus, this study introduces the relation between fuel composition and engine combustion and emissions characteristics. In addition, several biofuel production methods are discussed, such as hydrothermal liquefaction and bio-oil upgrading process towards biodiesel and sustainable aviation fuels.

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

## 특별세션(III):

특별세션(III): 미세조류를 이용한 지속 가능한 항공유  
Sustainable Aviation Fuel from Microalgae

---

2026년 3월 18일(수) 13:00~14:50  
부산 BEXCO 제2전시장 322호

**Title: Mega Cell Factory 기반 미세조류 바이오매스 연속 생산과 CO<sub>2</sub> MRV 통합 기술개발**

**발표자:** 홍수열

**공동저자:** 박상용, 송지호, 김소원, 황성현, 김용희, 사영호, 정지훈, 손주동

본 연구는 지속가능 항공유(Sustainable Aviation Fuel, SAF) 및 탄소중립 실현을 위한 핵심 원료로서 미세조류 바이오매스를 대규모·연속적·저탄소 방식으로 생산하기 위해, Mega Cell Factory 개념의 엔지니어링 기반 광배양 시스템을 구축하고, 이와 연계된 이산화탄소 MRV(Measurable, Reportable, Verifiable) 통합 기술을 개발·검증하는 것을 목표로 하였다.

미세조류로는 담수종 *Chlorella vulgaris*를 선정하였으며, 고농도 바이오매스 생산과 장기 연속 운전을 위해 직립형 튜블러 광생물반응기(vertical tubular photobioreactor, PBR)를 적용하였다. 본 연구에서는 장기 연속운전과 산업 규모 확장을 동시에 고려한 공정 및 운영 기술 확보에 중점을 두고, 유효 배양용량 1.5톤을 기본 단위로 하는 모듈형 Mega Cell Factory 시스템을 설계·구축하여, 개방형 레이스웨이 대비 외부 오염원 유입 가능성을 현저히 저감하고, 장기간 연속 운전 조건에서도 안정적인 배양 환경을 유지할 수 있음을 확인하였다.

이에 본 연구에서는 실험실용 배지 조성에서 벗어나, 질소·인·칼륨(N-P-K)을 중심으로 한 상용 비료 기반 배양 배지 조성을 도입하여 배양 원가 절감 가능성을 검토하였다. 또한 대규모 연속 배양 공정에서 불가피하게 발생하는 기상 조건 및 일사량 변동은 생산성 저하의 주요 요인을 보완하기 위해 Mega Cell Factory 시스템에는 고효율 LED 보조 광원을 적용하여 자연광 부족 시 광합성 유효광량(PAR)을 보완하도록 하였다. 이러한 운영 조건 하에서, 건조중량 기준 평균 30-35% 수준의 지질 함량과 평균 체적 생산성 >2.0 g/L/day 이상을 확보하고, 배양 안정성을 유지하면서 배양배지 비용을 절감할 수 있는 가능성을 확인하였다.

한편, 본 연구에서는 생산 공정에서 미세조류에 의해 이용되지 않고 배출되는 CO<sub>2</sub>를 단순 배출이 아닌 재자원화 대상으로 인식하고, 배출가스 회수 및 재공급이 가능한 CO<sub>2</sub> 리사이클링 구조를 적용하였다. 이를 통해 CO<sub>2</sub> 이용 효율을 향상시키는 동시에 외부 배출량 저감 가능성을 제시하였다. 이러한 접근은 Mega Cell Factory 기반 미세조류 배양 공정을 폐쇄형 탄소 순환 구조로 확장하는 기술적 기반을 제공하는 것이다.

본 연구의 또 다른 핵심 성과로서, Mega Cell Factory 운영 데이터와 연계된 CO<sub>2</sub> MRV 통합 체계를 구축하였다. CO<sub>2</sub> 유입량, 배양액 내 용존 CO<sub>2</sub> 농도, 미세조류 바이오매스 생산량을 실시간으로 계측(Measurable)하고, IoT 기반 데이터 수집 및 저장 시스템을 통해 자동화된 보고(Reportable) 구조를 구현하였다. 또한 물질수지 기반 탄소 고정량 산정 모델을 적용함으로써, 외부 검증이 가능한 CO<sub>2</sub> 저감 효과 검증 체계(Verifiable)를 확보하였다.

결론적으로, 본 연구는 미세조류 바이오매스 연속 생산 공정에 Mega Cell Factory 개념과 CO<sub>2</sub> MRV 통합 기술을 접목함으로써, 생산성·경제성·환경성을 동시에 고려한 공정 모델을 제시한다. 이는 미세조류 기반 SAF 원료 생산뿐만 아니라, 정량적 탄소 관리가 요구되는 탄소중립 산업 공정으로의 확장 가능성을 제시하며, 향후 다중 모듈 확장 및 전과정평가(LCA) 연계를 통해 산업적 적용 가능성이 더욱 확대될 것으로 기대된다.

## Organic Solvent-Free Purification of Microalgae-Derived HTL Bio-Crude toward Sustainable Aviation Fuel Production

Deok-Won Kim, Hyun-Jo Ahn, Liao Ziqiao, Nikita Yadav, Ghulam Mustafa, Aliya Alvi and  
Byong-Hun Jeon\*

Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763.

### Abstract

Hydrothermal liquefaction (HTL) of microalgae produces energy-dense bio-crude; however, it also concentrates inorganic contaminants, posing challenges for subsequent upgrading processes such as hydrotreating and hydrocracking required for sustainable aviation fuel (SAF) production [1]. In this study, microalgae-derived HTL products were generated at pilot scale and were found to contain elevated concentrations of Fe (2,168 mg/L), Mg (476 mg/L), Ca (305 mg/L), and K (311 mg/L), highlighting the necessity of inorganic removal prior to refining. This study presents a solvent-free, multi-stage purification strategy. First, solvent-free phase separation, driven by the temperature-dependent dielectric constant of water at 90°C, enabled simultaneous separation of the oil and aqueous phases while transferring 94.8% of the total inorganic mass into the aqueous phase. This step achieved high removal efficiencies for K (99.4%), Na (99.3%), Al (90.5%), and Si (90.3%). However, Fe exhibited limited removal (10.3%) at this stage. Subsequent acidic washing (pH 2) targeting residual metals further enhanced bio-crude purity. Final vacuum fractional distillation (180–320°C) resulted in near-complete Fe removal (>99%), reduced the water content from 8.4% to <1.3%, and increased the higher heating value from 31.2 to 39.3 MJ/kg. This sequential, reagent-minimized approach demonstrates a scalable and practical pathway for producing high-quality microalgae-derived bio-crude suitable for advanced biofuel applications.

### References

- [1] Sellbach, S., Muhle, J., Tiedtke, H., and Brilman, D. W. F., "Demineralization of Miscanthus Biocrude Obtained from Catalytic Hydrothermal Liquefaction: Conditioning through Acid Washing," *Processes*, 9(6), 1035 (2021).

### Acknowledgment

This work was funded by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) of the Republic of Korea (RS-2023-00255939).

## 미세조류 수열액화 공정 부산물 하이드로차의 특성 변화와 흡착 성능 평가: 지속가능항공유 생산 공정에서 활용 가능성

정우진<sup>1</sup>, 장순웅<sup>1</sup>, 이건호<sup>2</sup>

<sup>1</sup>경기대학교 사회에너지시스템공학과, <sup>2</sup>경기대학교 환경에너지공학전공

### Structural Evolution and Adsorption Performance of Hydrochar Derived from Microalgal Hydrothermal Liquefaction : Implications for Sustainable Aviation Fuel Production

WooJin Chung<sup>1</sup>, SoonWoong Chang<sup>1</sup>, GeonHo Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Energy System Engineering, Kyonggi University

<sup>2</sup>Department Environmental Energy Engineering, Kyonggi University

미세조류는 비식량 기반의 3차 바이오매스로 높은 생산 효율과 빠른 성장 속도를 가지는 지속가능한 바이오자원으로 주목받고 있다. 최근 지속가능항공유(Sustainable Aviation Fuel, SAF) 생산을 위한 원료로서 미세조류 활용 가능성이 활발히 연구되고 있다. 그러나 미세조류는 지질뿐만 아니라 탄수화물과 단백질 함량이 높고 수분 함량이 높아 기존 공정 적용에 제약이 있으며, 건조 공정을 필요로 하지 않는 전환 기술이 요구된다.

수열액화(Hydrothermal Liquefaction, HTL)는 고온·고압 조건에서 습식 바이오매스를 직접 전환하여 바이오원유를 생산할 수 있는 기술이다. 선행 연구에서는 랩 규모 HTL 반응기를 이용하여 온도(200-300℃), 압력(50-200 bar), 반응 시간(15-45 min) 조건에서 미세조류 기반 바이오원유를 생산하고 특성을 분석하였다.

한편 HTL 공정에서 생성되는 바이오원유 뿐만 아니라 공정부산물로 발생하는 하이드로차의 활용 가능성을 확인하기 위해 구조적 특성과 흡착 성능을 분석하였다. SEM 및 FT-IR 분석을 통해 하이드로차의 구조적 특성을 확인하였으며, 메틸렌블루를 모델 양이온 물질로 활용한 흡착 성능을 평가하였다. Langmuir과 Freundlich 모델 분석을 통해 높은 적합도( $R^2 = 0.914 \sim 0.990$ )를 확인하였다.

본 연구는 미세조류 기반 HTL 공정을 통해 SAF 원료 생산 가능성을 제시함과 동시에, 공정 부산물 하이드로차의 흡착 소재 활용 가능성을 입증하여 자원 순환형 공정 설계의 기초자료로 활용 가능성을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. Kutluk B. G and Kutluk T., "Sustainable bio-crude from microalgae via hydrothermal liquefaction: A circular path to clean energy a critical review, Sustainable Energy Technologies and Assessments 83, 104613 (2025)
2. Wei, I. et al. "Life-cycle assessment of microalgae liquid biofuel production in biofilm cultivation system via conversion technologies of transesterification, hydrothermal liquefaction and pyrolysis" Journal of Cleaner Production 436 (2024)

#### 사사

본 연구는 2026년도 정부(산업통상자원부)의 채원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다(RS-2023-00255939, 미세조류를 이용한 탄소저감형 바이오항공유 업그레이드용 바이오오일 생산 통합시스템 개발).

## 수열 액화 공정을 이용한 미세조류 유래 바이오원유의 수율 및 연료 특성 평가

\*박명수<sup>1</sup>, 구슬기<sup>1</sup>, 남궁현민<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>엔텍스(주)

### Evaluation of Yield and Fuel Properties of Bio-crude Derived from Microalgae Using a Hydrothermal Liquefaction Process

Myoung Soo Park<sup>1</sup>, Seul Ki Koo<sup>1</sup>, Hyun Min Namkung<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Entecs Co., Ltd. Republic of Korea

선행 연구에서는 미세조류를 원료로 적용한 수열액화(HTL) 공정을 통해 바이오원유의 생산 가능성을 확인하였고, 연속 공정 적용을 고려한 Hybrid 공정(CSTR+PFR)의 기술적 적용 가능성을 검토하였다. 선행 연구에서는 바이오원유 생산 결과에 대한 논의가 이루어졌으며 바이오원유 물성의 정량적 평가는 추가적인 검토가 필요한 단계로 남아있었다. 본 연구에서는 수열액화 공정을 통해 생산된 바이오원유의 수율과 발열량 측정을 바탕으로 항공유 적용 가능성을 정량적으로 분석하고자 하였다. 연속 공정 실험에 앞서 Batch 실험을 수행하였고, 연속 공정은 원료탱크 - 시린지펌프 - CSTR 반응기 - 리시버탱크로 구성하였다. 실험은 300°C, 125 bar, 15 min 조건에서 수행되었고, 반응 후 기름층과 수층으로 나뉜 HTL 생성물을 회수하였다. 본 연구에서 바이오원유 수율은 분리된 기름층만을 대상으로 하지 않고 HTL 생성물 전체를 기준으로 하여 생성물 중 Oil & Grease 중량을 반응기 투입 미세조류의 건조중량 기준으로 산정하였다. 그 결과 수질오염공정시험 기준(기름성분 중량법)에 따라 산정된 바이오원유 수율은 36.6%로 나타났다. 또한 HTL 생성물을 분별증류법으로 정제한 후 항공유 비등점 범위(180~240°C)에서 회수된 바이오원유의 발열량을 KS M 2057:2006(석유제품 및 윤활유 발열량 시험방법, 고위발열량 측정 HHV, MJ/kg) 기준으로 분석한 결과 38.8 MJ/kg 으로 측정되었다. 이는 항공유 기준 발열량을 상회하는 수준으로, 미세조류 기반 HTL 공정에서 생산된 바이오원유가 항공유 대체 연료로서 활용 가능성이 있음을 정량적으로 확인하였다.

#### 사사

본 연구는 산업통상자원부 미세조류를 이용한 탄소저감형 바이오항공유 업그레이드용 바이오오일 생산 통합시스템 개발사업의 연구비 지원(과제번호 RS-2023-00255939)에 의해 수행되었습니다.

\*교신저자(E-mail: entecs@hanmail.net)

## 미세조류로부터 바이오오일 생산을 위한 CSTR 반응기에서 수열액화반응에 대한 수치해석

최상규<sup>1,2\*</sup>, 정연우<sup>1</sup>, 한소영<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>한국기계연구원, <sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교

### Numerical Analysis on the Hydrothermal Liquefaction in a CSTR reactor for Bio-oil Production from Microalgae

Sangkyu Choi<sup>1,2\*</sup>, Yeonwoo Jeong<sup>1</sup>, Soyoung Han<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Korea Institute of Machinery & Materials, <sup>2</sup>University of Science and Technology

바이오매스는 지구온난화를 방지할 수 있는 신재생에너지원으로서 최근 활발한 연구가 이루어지고 있다. 특히 정유 및 항공운송 분야에서 저탄소 바이오 연료 생산 기술 개발에 많은 노력을 기울이고 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 교반 탱크 반응기(Continuous-Stirred Tank Reactor, CSTR)에서 수열액화반응에 대한 수치해석을 수행하였다. 미세조류의 구성 성분은 protein, carbohydrate, lipid로 설정하고, 수열액화 반응 생성물은 biocrude, aqueous phase, solid, gas로 구분하였으며 미세조류 슬러리와 수열액화 생성물의 다양한 성상을 모사하기 위하여 Eulerian multiphase model을 적용하였다. 수열액화 반응에 대해서는 선행 연구에서 제시된 1차 반응 속도식을 기반으로 하여, 회분식 실험을 통하여 도출된 생성물 수율을 예측할 수 있도록 반응 속도 상수를 조정하여 해석에 적용하였다. 다양한 온도에서 연속식 공정에 대한 정상상태 해석을 수행하였으며, CSTR 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 2026년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다. (RS-2023-00255939, 미세조류를 이용한 탄소저감형 바이오항공유 업그레이드용 바이오오일 생산 통합시스템 개발)

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

## **특별세션(IV):**

**친환경 이차전지 산업을 위한 고순도 탄산리튬 실증기술 및  
ESG 대응전략\_비공개**

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

---

2026년 3월 18일(수) 13:00~14:20  
부산 BEXCO 제2전시장 323호

## 실증공정 적용을 위한 인산리튬 기반 탄산리튬 입도 제어 영향 평가

장영준<sup>1</sup>, 심문수<sup>1</sup>, 박헌수<sup>1\*</sup>  
(주)엔에이치리사이텍컴퍼니 기술연구소<sup>1</sup>

### Evaluation of Particle Size Control of $\text{Li}_2\text{CO}_3$ Derived From $\text{Li}_3\text{PO}_4$ for Pilot-Scale Process

Yeong-Jun Jang<sup>1</sup>, Moon Soo Sim<sup>1</sup>, Hun-Su Park<sup>1\*</sup>  
NHRECYTHECH Company<sup>1</sup>

#### 초록

이차전지 산업의 급격한 성장으로 인해 리튬 자원은 안정적 확보와 재자원화 기술의 중요성이 매우 높아지고 있다. 최근 저품질 염호에서의 인산리튬( $\text{Li}_3\text{PO}_4$ ) 회수 기술은 중국, 미국 및 남미 리튬삼각지대 국가들에서 활발히 연구되고 있다. 특히 탄산리튬( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ )의 입도 특성( $D_{50}$ )이 이차전지의 균일성 및 최종 성능에 직접적인 영향을 미치기 때문에 인산리튬( $\text{Li}_3\text{PO}_4$ )으로부터 제어된 입도 특성( $D_{50}$ )을 갖는 탄산리튬( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ )을 회수하는 공정은 리튬 순환 단계의 핵심 기술로 부상하고 있다. 따라서 본 연구에서는 탄산리튬( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ )의 입도( $D_{50}$ )를 효과적으로 제어하기 위한 실험을 수행하였다.

탄산리튬( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) 회수 실험은 다음과 같이 수행하였다. 먼저 고체 인산리튬( $\text{Li}_3\text{PO}_4$ )을 1M 염산 용액에 용해하여 리튬을 수용액 상태로 전환한 후, 수산화칼슘( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )을 첨가하여 인산기를 수산화인회석( $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ ) 형태로 선택적으로 침전하였다. 이어서 탄산나트륨( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )을 반응 용액에 첨가하여 탄산리튬( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) 침전물을 회수하였으며, 생성된 침전물은 XRD 분석을 통해 확인하였다.

탄산리튬( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ )의 입도( $D_{50}$ ) 제어는 탄산나트륨( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 투입 시의 반응 온도와 교반 속도 등을 주요 변수로 설정하여 실험을 수행하였다. 그 결과, 교반 속도가 증가할수록, 반응온도가 감소할수록 입도가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

본 연구의 결과는 향후 실증 공정의 운전 조건 최적화를 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 사사

본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(RS-2024-00431554).

## Integrated Process for Battery-Grade Lithium Carbonate Production and Residual Lithium Recovery Using Commercial Adsorbent (LSM-201)

Eun-Ji Lee<sup>1</sup>, Soon-Ho Cho<sup>1</sup>, Ramesh Kumar<sup>1</sup>, Chejarla Venkatesh Reddy<sup>1</sup> and Byong-Hun Jeon<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

Lithium is becoming a critical element for the economy due to the rising production of lithium-ion batteries, yet conventional methods are energy-intensive, and environmentally harmful (Kumar et al. [1]). A divalent-free brine with low lithium concentration can be selectively extracted up to 95%-97% as  $\text{Li}_3\text{PO}_4$  by adding alkaline phosphate solution (Shin et al. [2]). Further optimization of the dissolution of  $\text{Li}_3\text{PO}_4$  in acid and the conversion process to high-purity  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  is crucial to improve efficiency and the sustainable supply of critical metals to the battery industry. In this study, an integrated process comprising  $\text{Li}_3\text{PO}_4$  dissolution and  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  precipitation was developed and optimized using Design-Expert 12. In addition, the residual lithium was recovered using LSM-201.  $\text{Li}_3\text{PO}_4$  dissolution was carried out using hydrochloric acid under optimized conditions of 0.97 N HCl, a solid-to-liquid ratio of 72.35 g/L, and 35 °C. These conditions resulted in a final pH of 4, a dissolved lithium concentration of 10,000 mg/L, and a lithium dissolution efficiency of 82.88%.  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  precipitation was conducted without a washing step using LiCl and  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  solutions to simplify the process. Optimal non-washing conditions were a  $[\text{CO}_3^{2-}]/2[\text{Li}^+]$  ratio of 1.10 (M/M), an injection rate of 8.07 mL/min, and 80 °C, achieving 90.96% lithium recovery with a product purity of 93.98%. After precipitation, to minimize lithium loss, the adsorption performance of an aluminum-based adsorbent (LSM-201) was evaluated. The maximum adsorption capacity was 5.54 mg/g at a  $[\text{Na}]/[\text{Li}]$  ratio of 100 (M/M) and a flow rate of 2 BV/h. Approximately 94% of the adsorbed lithium (5.21 mg/g) was recovered during desorption. Overall, the proposed integrated dissolution-precipitation-adsorption process enhances lithium recovery efficiency while reducing resource loss, providing a sustainable route for producing battery-grade  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  from salt lake brines.

### References

1. Kumar et al., "Sustainable lithium extraction from liquid ores using membrane-based technologies: a review", *Environmental Chemistry letters*, 23, 1569-1660 (2025).
2. Shin et al., "Preparation of lithium carbonate from waste lithium solution through precipitation and wet conversion methods", *Hydrometallurgy*, 210, 105863 (2022).

## 막증류공정을 활용한 리튬 수용액 농축 및 HCl 회수기술

석진국, 김백암  
 앙스트롬스(주)

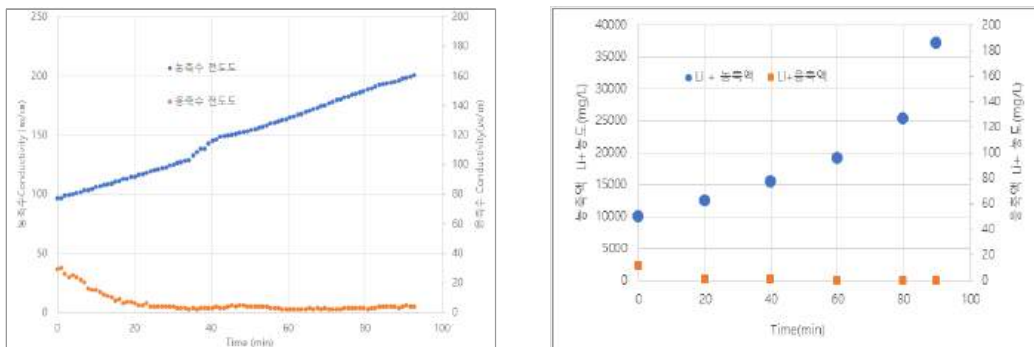
### Concentration of Lithium Aqueous Solution and HCl Recovery Using a Membrane Distillation Process

Jingook Seok, Baekahm Kim  
 Angstroms Co., Ltd

리튬은 이차전지 및 에너지저장장치의 핵심 원료로서 수요가 급증하고 있으며, 저품위 리튬 자원으로 부터 고순도 리튬을 회수하기 위한 공정 고도화가 요구되고 있다. 특히 리튬 수용액의 고농도화와 공정 중 사용되는 산의 회수는 경제성 및 친환경성 확보 측면에서 중요한 요소이다. 본 연구에서는 막증류(Vacuum Membrane Distillation, VMD) 공정을 적용하여 리튬 수용액 농축과 염산(HCl) 회수를 동시에 구현하는 기술을 개발하고 그 성능을 평가하였다.

PTFE 중공사막 기반 Lab-scale 막증류 시스템을 설계·제작하였으며, 운전온도(55~75℃) 및 순환유량 조건에 따른 플럭스 변화와 농축 특성을 분석하였다. 그 결과 온도 및 유량 증가에 따라 플럭스가 향상되었으며, 초기 9,900 ppm의 리튬 용액을 최대 37,200 ppm까지 안정적으로 농축하였다. ICP-OES 및 공인기관(KTR) 분석을 통해 농축액의 농도 상승과 함께 응축액 내 리튬이 불검출 수준임을 확인하여 99.9% 이상의 리튬 제거율을 검증하였다.

또한 소형 막증류 모듈을 이용하여 3M 염산 용액에 대한 회수 실험을 수행한 결과, 회수액 기준 56.3%의 염산 회수율을 달성하였다. 이는 막증류 공정이 리튬 농축과 동시에 산을 재활용할 수 있는 통합 공정으로 적용 가능함을 보여준다. 본 연구는 막증류 기반 공정이 에너지 효율적이며 확장 가능한 리튬 회수 및 자원순환 기술로 활용될 수 있음을 제시한다.



#### 참고문헌

1. Sun et al., A study of membrane distillation and crystallization for lithium recovery from high-concentrated aqueous solutions. *Journal of Membrane Science*, 505:167-173.
2. Kesieme et al., Recovery of water and acid from leach solutions using direct contact membrane distillation. *Water Science and Technology*, 69(4):868-875.

\* 이 성과는 산업통상자원부(한국에너지기술평가원)에서 시행한 산업기술혁신사업(RS-2024-00431554)의 지원을 받아 수행되었음

## 리튬이온 농축을 위한 흡착공정 거동 해석

박종기, 추고연  
한국에너지기술연구원

### Adsorption Process Behavior Analysis for the Concentrating Lithium Ion

Jongkee Park, Koyeon Choo  
Korea Institute of Energy Research

리튬이온과 소듐이온 그리고 음이온을 포함하는 수용액에서 리튬염을 농축하기 위한 흡착공정의 거동을 해석하였다. 계산시 문헌에 나타난 흡착등온선식을 이용하였다<sup>1</sup>. 과과곡선을 계산하였으며 이에 근거하여 흡탈착 속도가 매우 느릴 경우 흡착탑에 충전된 흡착제의 사용 효율을 높이기 위하여 초기에 공급속도를 높이고 시간의 경과에 따라 점진적으로 공급속도를 줄이는 방식을 제시하였다. 2-BED 흡착 시스템에 있어서 흡착, Drain, 탈착, 그리고 세정 스텝으로 구성된 공정에 대하여 전산모사를 실시하였다. 2,000 mg/L의 농도인 (리튬/소듐 = 0.2) 수용액으로부터 리튬의 농도가 95%이상인 용액을 얻을 수 있는 것으로 계산되었다.

#### 참고문헌

1. Zhang et al. "Synthesis of High Specific Surface Lithium-Ion Sieve Templated by Bacterial Cellulose for Selective Adsorption of Li+," *Molecules* 28, 3191, 1- 13 (2023).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

## **특별세션(V):**

**충청권 지역혁신선도연구센터, 충북RISE 차세대 이차전지  
공동연구센터 및 학연협력플랫폼 공동 이차전지 소재 연구  
개발 심포지엄**

**Chungcheong Regional Innovation Leading Research  
Center, Chungbuk RISE Next-Generation Secondary  
Battery Joint Research Center & Industry-Academia  
Cooperation Platform Joint Symposium on Secondary  
Battery Materials Research**

---

2026년 3월 18일(수) 15:00~17:00  
부산 BEXCO 제2전시장 324호

## Rational Gradient Design of Mo and F Doped Ni-Rich Layered Cathodes for High-Performance Lithium-Ion Batteries

Srinivasan Alagar<sup>1</sup>, Jun Kim<sup>1</sup>, Gi Dae Park<sup>2,3\*</sup>, Sang Mun Jeong<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>*Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Chungbuk 28644, Republic of Korea.*

<sup>2</sup>*Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk, 361-763, Republic of Korea*

<sup>3</sup>*Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-gu, Cheongju 28644, Republic of Korea*

gdpark@chungbuk.ac.kr<sup>2\*</sup>, smjeong@chungbuk.ac.kr<sup>1\*</sup> (Corresponding author)

### Abstract

Nickel-rich layered oxides are promising cathodes for next-generation lithium-ion batteries due to their high theoretical capacity; however, practical application is limited by structural instability, Li/Ni cation mixing, surface degradation, and parasitic interfacial reactions during cycling. Here, we report a rational gradient design strategy employing synergistic Mo<sup>6+</sup> and F<sup>-</sup> doping to stabilize a Co-free Ni-rich layered cathode. Unlike uniform doping, this approach constructs a compositional and defect gradient from surface to bulk. Strong Mo–O bonding reinforces the transition-metal framework, while F substitution modulates the local electronic structure and suppresses oxygen instability. This dual modulation forms an antisite-defect-enriched surface layer that buffers phase transitions and restrains Ni migration while preserving lithium diffusion pathways in the bulk. Consequently, lattice strain and interfacial degradation are reduced, improving structural robustness and electrochemical reversibility. The optimized cathode delivers 231 mAh g<sup>-1</sup> at 1 C with 78.3% % retention after 200 cycles, while multilayer pouch cells achieve 176 mAh g<sup>-1</sup> at 0.1 C and 98% retention over 200 cycles, demonstrating practical feasibility. 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).

**Keywords:** Nickel-rich cathodes, Rational gradient design, dual cation-anion doping, antisite defects, lithium-ion transport, cycling durability

## **Fire-resistant Electrolyte Engineering for Safer and High-Performance Silicon and High Nickel-based Li-ion Batteries**

Dong Guk Kang,<sup>1</sup> Kihun An,<sup>1</sup> Dung Tuan Tien Vu,<sup>1</sup> Han Bao Nguyen,<sup>1</sup> Do Youb Kim,<sup>2</sup> Koeun Kim,<sup>3</sup>  
Yoon Sung Lee,<sup>3</sup> and Seung-Wan Song<sup>1\*</sup>

Department of Chemical Engineering & Applied Chemistry, Chungnam National University,<sup>1</sup>  
Advanced Energy Materials Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology,<sup>2</sup>  
Automotive Research & Development Division, Hyundai Motor Group<sup>3</sup>

The safety of high-energy-density lithium-ion batteries (LIBs) is a critical concern for both consumers and the environment. Conventional liquid electrolyte is highly flammable, often leading to thermal runaway and fire event. To mitigate those risks without losing performance and energy density, it is essential to develop fire-resistant liquid electrolyte. This need is pronounced in LIBs employing silicon-based anodes and high nickel-based cathodes, in which electrolyte and interfacial stability under high voltages and elevated temperatures is imperative. In this presentation, we introduce a newly developed fire-resistant electrolyte designed to enhance the safety and performance of silicon and high-nickel-based full-cells. The data demonstrate that the new electrolyte forms stable solid electrolyte interphase (SEI) layer and significantly improves cycling stability.

## Confining Li<sup>+</sup> solvation in core-shell metal-organic frameworks for stable lithium metal batteries at 100 °C

Quan Van Nguyen<sup>1</sup>, and Sangbaek Park<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea.

\* Corresponding author. E-mail: [sb.park@cnu.ac.kr](mailto:sb.park@cnu.ac.kr).

### Abstract

The practical deployment of lithium-metal batteries (LMBs) remains severely constrained, especially under elevated temperatures. Although metal-organic frameworks (MOFs) improve the thermal stability of liquid electrolytes by capturing them in well-ordered sub-nanopores, interparticle voids between MOF particles readily absorb liquid electrolyte, obscuring our understanding of the intrinsic role of nanopores in directing Li<sup>+</sup> transport. To address this challenge, we introduce a one-dimensional (1D) MOF model architecture that eliminates interparticle effects and enables direct observation of Li<sup>+</sup> solvation and desolvation dynamics. Comparative studies of 1D HKUST-1 and ZIF-8 uncover distinct transport behaviors, supported by both experimental measurements and neural network potential-based molecular dynamics simulations. Building on these insights, we construct a hierarchical core-shell MOF architecture by integrating ZIF-8 (core) and HKUST-1 (shell) onto a hybrid fiber scaffold. This design harnesses the complementary strengths of both MOFs to achieve continuous ion pathways, directional Li<sup>+</sup> conduction, and improved thermal and electrochemical resilience.

**Keywords:** Quasi-solid-state electrolyte; metal-organic frameworks; Li-metal batteries; thermal stability; lithium-ion solvation/desolvation.

# Synergistic Polysulfide Regulation via Ball-Milled Z-Scheme Ternary Oxide/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Heterojunctions for High-Performance Lithium-Sulfur Batteries

Jinseok Han<sup>1</sup>, MinA Kim<sup>1</sup> and Jae-Kwang Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Energy Convergence Engineering, Cheongju University, Cheongju, Chungbuk 28503, Republic of Korea

Lithium-sulfur (Li-S) batteries are regarded as one of the most promising next-generation energy storage systems due to their high theoretical energy density. However, their practical implementation remains severely constrained by intrinsically low electronic conductivity, sluggish redox kinetics of sulfur species, and the dissolution and shuttling of lithium polysulfides.

To overcome these limitations, we rationally construct a Z-scheme heterojunction between graphitic carbon nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) and ternary mixed-metal oxides (NiCoZn-O) via a facile, solvent-free ball-milling strategy. The resulting heterostructure (HGN) is employed as a functional separator interlayer to simultaneously regulate polysulfide adsorption and catalytic conversion.

Within this architecture, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> improves electronic transport while its abundant nitrogen functionalities provide strong chemical anchoring sites for Li<sup>+</sup> and polysulfide intermediates, effectively mitigating the shuttle effect. Meanwhile, NiCoZn-O introduces abundant polar adsorption sites and redox-active centers enabled by reversible valence-state transitions of Ni, Co, and Zn, thereby accelerating polysulfide conversion kinetics. Importantly, the formation of the Z-scheme heterojunction generates an internal electric field, enriched oxygen vacancies, and surface-adsorbed oxygen species, collectively facilitating charge redistribution and enhancing interfacial redox dynamics.

Benefiting from these synergistic effects, Li-S cells incorporating the HGN@PP separator deliver a high discharge capacity of 583 mAh g<sup>-1</sup> after 150 cycles at 1C. Even under a high sulfur loading of 8.0 mg cm<sup>-2</sup>, the cell maintains a capacity of 525 mAh g<sup>-1</sup> after 150 cycles at 0.1C, demonstrating both catalytic efficiency and practical viability.

This work establishes a scalable and mechanistically driven design paradigm for multifunctional separator engineering, offering a viable pathway toward high-performance and practically deployable Li-S batteries.

## 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).

## Pursing Stable and Redox Mediating Interfaces for High-Performance Lithium-Sulfur Batteries

Won Il Kim<sup>1</sup> and Ho Seok Park<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Chemical Engineering, College of Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Republic of Korea

The growing demand for high-energy-density batteries, including Li-S systems for UAM and portable electronics, highlights the need for faster and more stable sulfur redox chemistry. In Li-S batteries, redox mediators are important because they can accelerate LiPS conversion and influence LiPS dissolution, adsorption, and redistribution during cycling. Effective LiPS redox requires a stable triple-phase contact among the redox mediator, conductive matrix, and electrolyte, where electrons/ions can continuously access soluble species and solid products. However, many inorganic redox mediators are particulate, so they cannot uniformly cover the entire electrode and often leave regions with limited interfacial contact, leading to nonuniform conversion and gradual performance decay. To stabilize this interfacial environment, we explored two strategies: (i) developing an organic redox mediator that can distribute more continuously within the conductive framework, and (ii) designing sulfur to inherently express redox-mediating behavior, thereby stabilizing the phase evolution and maintaining triple-phase contact during cycling.

### Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (no. RS-2023-00217581)

## Selective Extraction-Driven Resource Redistribution of Waste Materials for Advanced Li-Ion Battery Cathode Materials

Kyoung Sun Kim<sup>1,2</sup>, Seulgi Kim<sup>3</sup>, Dongju Lee<sup>4</sup>, Seung-Ho Yu<sup>2</sup> and Hyungsub Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Neutron Science Division, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), 111 Daedeok-daero 989 Beon-Gil, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Republic of Korea, <sup>2</sup>Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea, <sup>3</sup>Resources Utilization Division, Resources and Materials Research Center, 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Republic of Korea

<sup>4</sup>Department of Urban, Energy, and Environmental Engineering, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-Gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Republic of Korea

With the rapid expansion of the lithium-ion battery industry, demand has increased not only for Li but also for critical, high-value elements such as Co and Ni, intensifying supply instability and price volatility. Recycling and upcycling of end-of-life batteries and industrial scrap have therefore emerged as important pathways to enhance material security and mitigate supply-chain risk. However, commercialization remains constrained by chemistry-specific differences in material value and processing objectives. It is further limited by within-chemistry variability in spent feedstocks, including composition, particle-size distribution, and degradation state. These factors reduce the reproducibility of regenerated materials and drive fluctuations in recovery yields, complicating reliable scale-up. In this study, selective elemental extraction is proposed as a key strategy to improve process economics and quality consistency by accounting for differences in the composition and condition of recycled feedstocks. For relatively low-value chemistries such as LiFePO<sub>4</sub>, selective recovery of key constituents broadens product streams and improves overall process economics [1]. For Ni–Co–Mn layered oxide cathodes targeted for direct recycling, selective control in the pretreatment stage reduces variability and improves the quality consistency of recycled cathode materials, enabling upcycling. [2]. Beyond battery waste, selective extraction of Co and W from WC–Co industrial scrap illustrates cross-sectoral upcycling routes that redirect industrial metal wastes into battery-relevant materials and broaden the supply base. This strategy supports recycling pathways that better manage chemistry- and feedstock-driven variability while advancing the recovery, regeneration, and reuse of materials for battery manufacturing.

### References

1. Kim et al., “Upcycling spent cathodes into single-crystalline Ni-rich cathode materials through selective lithium Extraction” *J. Mater. Chem. A*, 11, 21222 (2023)
2. Kim et al., “Gas-solid reaction-based selective lithium leaching strategy for efficient LiFePO<sub>4</sub> recycling” *Chem. Eng. J.*, 505, 159339 (2025)

## Phase Engineering of Vanadium-based Cathode to Enhance Zn-Ion Diffusion Kinetics in Aqueous Systems

Bobae Ju, Won G. Hong, Hae Jin Kim\*

Strategic Research Center for Smart Battery, Korea Basic Science Institute (KBSI), Daejeon 34133, Republic of Korea

Aqueous zinc-ion batteries (AZIBs) have garnered significant attention as a sustainable and safe alternative to lithium-ion batteries. Despite their potential, the slow diffusion kinetics of divalent zinc ions and the structural degradation of cathode materials remain critical bottlenecks. While vanadium-based compounds offer high theoretical capacity, achieving simultaneous high-rate capability and long-term cycling stability is still a major challenge.

In this study, we developed a series of vanadium sulfide-based composites with tailored microstructures to enhance electrochemical performance. By controlling the chemical composition and the integration of carbonaceous frameworks, we systematically investigated the correlation between material architecture and  $\text{Zn}^{2+}$  storage behavior. Our findings reveal that the optimized composite exhibits a unique electrochemical activation process that significantly boosts energy density and charge transfer kinetics.

Comprehensive characterizations were conducted to evaluate the structural evolution and  $\text{Zn}^{2+}$  migration pathways. The results demonstrate that the rational design of the sulfide-based host can effectively mitigate structural strain and improve interfacial stability during repetitive cycling. This work provides a versatile strategy for designing advanced cathode materials, offering new insights into the development of high-power aqueous energy storage systems.

### Acknowledgements

This research was supported by the National Research Council of Science and Technology (NST), Republic of Korea, through a grant from the Korean Government (MSIT, Republic of Korea) (No. GTL25091-000) and the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT) (RS-2023-00304768)

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

## 특별세션(VI):

탄소중립선도 수소 생태계 확립을 위한 원스탑 플랫폼  
기술교류회

Technology Exchange Meeting of One-Stop Platform  
for Establishing a Hydrogen Ecosystem

---

2026년 3월 18일(수) 15:00~17:10  
부산 BEXCO 제2전시장 326호

## SCAPS-1D 시뮬레이션을 통한 태양광 수소 생산용 Tandem 페로브스카이트 태양전지 구조 최적화

이동현<sup>1</sup>, 김민철<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>부산대학교 기계공학부

### Optimization of Tandem Perovskite Solar Cells for Solar-Driven Hydrogen Production via SCAPS-1D Simulation

Donghyeon Lee<sup>1</sup>, Min-cheol Kim<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering

최근 태양광 기반 수소 생산 기술이 차세대 청정 에너지 확보의 핵심 방안으로 주목받으면서, 이를 위한 고효율 광전 소자의 개발이 중요한 과제로 대두되고 있다. 특히, 단일 접합 태양전지의 이론적 한계를 극복하기 위해 두 개 이상의 흡수층을 적층한 tandem 구조가 활발히 연구되고 있으며, 그중 페로브스카이트 기반 tandem 태양전지는 조성 및 밴드갭 조절의 용이성과 우수한 광흡수 특성으로 인해 유망한 대안으로 평가되고 있다. 그러나 tandem 구조에서 상부 셀과 하부 셀의 두께 및 밴드갭 설계가 효율에 큰 영향을 미치므로, 체계적인 최적화 전략이 필수적이다.

본 연구에서는 SCAPS-1D 시뮬레이션을 활용하여 tandem 페로브스카이트 태양전지의 광전 특성을 해석하고, 상부 셀(top cell)과 하부 셀(bottom cell)의 흡수층 두께 및 밴드갭 변화를 통해 최적의 조합을 도출하였다. 이를 통해 광전류 정합(current matching)과 개방전압(open-circuit voltage)의 균형을 동시에 달성할 수 있는 조건을 제시하고, 수소 생산을 위한 태양광-전기화학 시스템과의 연계 가능성을 평가하였다.

또한, 시뮬레이션 기반 접근은 실제 소자 제작에 앞서 다양한 구조적 파라미터를 손쉽게 검토할 수 있다는 장점이 있으며, 이를 통해 제작 과정에서 발생할 수 있는 시행착오를 최소화할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 최적화된 tandem 구조는 향후 태양광 수소 생산 시스템의 효율 향상에 기여할 것으로 기대되며, 고효율·저비용의 청정에너지 실현을 앞당기는 데 중요한 기반이 될 것이다.

**Ni based hydrogenation catalyst for Sustainable Aviation Fuel (SAF) Production**

Suhan Kim<sup>1\*</sup>, Yoon Hyun Seo<sup>1</sup>, Joonhee Kang<sup>2</sup>

Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Engineering, Ulsan, Korea<sup>1</sup>

Department of Nanoenergy Engineering, Pusan National University, Korea<sup>1</sup>

Sustainable aviation fuel (SAF) has emerged as a prominent low-carbon alternative to conventional petroleum-derived fuels. While nickel (Ni)-based catalysts are highly effective for the hydrogenation of linear olefins, the presence of aromatic compounds can attenuate catalytic activity. This phenomenon is primarily attributed to the preferential adsorption of aromatics onto Ni active sites, which creates a competitive environment that reduces overall hydrogenation efficiency.

In this study, molybdenum (Mo)-promoted Ni–Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts were evaluated to mitigate the competitive adsorption of aromatic compounds. Decene was utilized as the model olefin, while trimethylbenzene represented the aromatic component. Hydrogenation reactions were conducted at 200 °C and 10–30 bar using both single-component and mixed feeds. The catalytic performance was assessed by comparing conversion rates across varying feed compositions and pressures. This work elucidates the hydrogenation trends of Ni–Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts in the presence of aromatics, offering insights for improving SAF production processes.

## 액화수소 저장탱크 제작을 위한 용접부 피로 및 파괴 특성 평가 연구

박정열\*<sup>1</sup>, 김정현<sup>2</sup>, 지창욱<sup>1</sup>, 박재한<sup>1</sup>  
한국생산기술연구원 울산기술실용화본부<sup>1</sup>  
부산대학교 수소선박기술센터<sup>2</sup>

최근 무탄소 에너지로 각광받던 수소가 전력을 저장할 수 있는 저장물질로 관심을 받으면서 대용량의 저장방법에 대한 관심 역시 증가하고 있다. 수소 저장 방법으로는 대표적으로 3가지의 수소 저장 방법(고압기체, 액화, 화학적 저장)이 있으며, 장주기 전력 보관 방식을 달성하기 위해서는 화학적 저장기술 및 액화 저장 방식이 주로 논의되고 있다. 이 중 액화 저장 방식은 액화 시 기체 대비 부피가 1/800으로 감소하는 특징을 이용하여 대용량의 저장을 달성하고자 한다 [1]. 따라서, 저장탱크에 사용되는 소재 및 용접부는 수소가 액화되는 온도인 초저온(-253 ℃)에서 뛰어난 기계적 특성(예를 들면, 항복강도 유지율, 파괴인성 등)을 가져야하며, 저장탱크 상단부는 가스상 수소 노출 조건에서의 수소취성 및 수소-기계적 상호작용에 대한 저항성도 높아야 한다. 대표적으로 수행되는 평가 방법으로는 파괴 역학 기반 피로 및 파괴 특성이 있으며, ISO/TR 15916의 가이드라인과 함께 CGA 및 KGS 등에서 평가 항목을 제안하고 있다 [2-4].

본 연구에서는 액화수소 저장탱크에 사용되는 소재 후보군에 대해 소재 및 용접부의 피로 및 파괴 특성 평가 연구 결과들을 소개하고 수행된 내용을 바탕으로 추후 연구 방향을 제안하고자 한다.

### 참고문헌

1. HESC, "Liquefaction of Hydrogen Gas", In website, <https://www.hydrogenenergysupplychain.com>
2. International Organization for Standardization, "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)

## 수계아연전지용 아연 음극 안정화를 위한 표면 개질 기술 개발

김대욱\*

한국생산기술연구원 저탄소에너지그룹

환경오염과 그에 따른 지구 온난화 영향으로 친환경 에너지 저장 장치의 개발이 촉진되었다. 리튬이온 배터리(Lithium-Ion Batteries, LIBs)가 여전히 지배적인 에너지 저장 시스템으로 자리잡고 있지만, 최근의 배터리 폭발과 화재 등의 안정성 문제로 차세대 에너지 저장 장치의 개발이 요구되고 있다. 특히 ESS(Energy Storage System)는 공간 제약이 상대적으로 적고 대용량으로 운용되기 때문에 화재 발생 시 피해 규모가 커질 수 있어, 보다 안전한 전지 시스템으로의 전환이 요구된다. 이러한 관점에서 수계 기반 아연 이온 배터리(Zinc-Ion Batteries, ZIBs)는 인화성 유기 전해질 대신 수계 전해질을 사용함으로써 높은 안전성, 낮은 원가, 대용량 구현 가능성 등의 장점을 지니며, 대규모 ESS 및 웨어러블 장치에 적합한 차세대 전지 기술로 주목받고 있다.

그러나 ZIBs는 아연 음극에서 발생하는 덴드라이트(수지상 결정) 형성, 부식 및 부반응에 따른 사이클 안정성 저하라는 근본적인 한계를 지닌다. 특히 덴드라이트 성장은 불균일한 아연 증착 거동에 기인하며, 이는 전지 성능 저하뿐만 아니라 내부 단락을 유발하여 안전성을 크게 저해한다.

최근 음극 안정화를 위해 보호 코팅층 형성 및 합금화 전략이 주로 연구되고 있으나, 기존의 절연성 또는 전도성 코팅 방식은 덴드라이트 성장을 완전히 억제하는 데 한계가 있으며, 코팅층의 균열 및 박리로 인해 오히려 국부적 전류 집중을 초래할 수 있다. 또한 공정의 복잡성과 환경적 부담을 줄일 수 있는 새로운 접근법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 아연 금속을 특성을 유지하면서, 플라즈마 및 레이저 공정을 통해 기존 코팅 방식과 차별화된 표면 기능화 및 입체 구조화를 구현하고자 하였다. 특히 플라즈마 처리를 통해 음극 표면에 음이온을 도입함으로써 표면 에너지를 제어하고 아연 친화성을 향상시켜, 균일한 핵 생성 사이트를 제공하도록 설계하였다. 이를 통해 아연의 균일한 증착을 유도하고 덴드라이트 성장을 효과적으로 억제하고자 한다. 본 연구는 별도의 추가 코팅층 없이 아연 음극 자체의 표면 특성을 근본적으로 조절하는 전략으로, 공정 단순화 및 친환경성을 동시에 확보할 수 있는 접근법이다. 따라서 ZIBs의 장기 안정성 향상과 상용화 가속화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**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).

This study has been conducted with the support of the Korea Institute of Industrial Technology as "Development of zinc metal anode and metal-organic framework-based cathode stabilization technology for the utilization of high-safety aqueous zinc batteries (KITECH UR-26-0007)".

## Thermal Phase Engineering of 2D Ni Nanoplates as OER Catalysts for Alkaline Seawater Anion Exchange Membrane Electrolysis

Suyeon Kim<sup>1</sup>, Oi Lun Helena Li<sup>2</sup> and Dong-Ha Lim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan, Korea

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Korea

Direct seawater electrolysis offers a sustainable alternative to freshwater-based hydrogen production by eliminating the need for desalination and reducing operational costs. However, the complex ionic composition of seawater, particularly the presence of chloride ions, accelerates catalyst degradation. Additionally, under anodic polarization, Cl<sup>-</sup> can trigger the chlorine evolution reaction (CIER) as a competing side reaction to OER. To address these challenges, developing robust OER catalysts for alkaline seawater electrolysis is essential for practical implementation.

In this study, we developed Ni-based OER catalysts for alkaline seawater systems. Unlike conventional approaches that rely on heteroatom doping, this study demonstrates that crystal structure evolution induced solely by annealing can significantly enhance catalytic performance and seawater tolerance. A Hofmann-type Ni coordination polymer was first employed as a precursor, synthesized via plasma engineering, and subsequently converted into 2D Ni nanoplates through controlled thermal treatment. The 2D Ni nanoplates exhibited superior OER activity in both 1 M KOH and alkaline seawater electrolytes, particularly at elevated current densities. In an anion exchange membrane electrolyzer using alkaline seawater, they required 267 and 393 mV lower cell voltages than RuO<sub>2</sub> at current densities of 500 and 1000 mA cm<sup>-2</sup>, respectively. Furthermore, long-term durability testing at 100 mA cm<sup>-2</sup> demonstrated stable operation over 90 h with negligible voltage increase, confirming robust stability under alkaline seawater AEMWE conditions.

Although the catalyst maintained high activity and durability in alkaline seawater, slight differences in electrochemical behavior compared to pure 1 M KOH indicated that seawater caused minor structural changes. To further elucidate the origin of performance degradation in seawater, comparative in situ Raman analysis was conducted to identify the distinct degradation mechanism relative to 1M KOH electrolyte. Seawater induced ion intercalation driven disorder in the NiOOH active phase, suppressing Ni oxidation and active oxygen formation, whereas thermal treatment mitigated this structural instability and improved durability under seawater conditions.

### 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)

## Reduction-Driven Wet Alloying Strategy toward Low-Iridium Ir-Ni-Co Ternary Electrocatalysts for Enhanced Oxygen Evolution

Seong Ji Kim<sup>1,2</sup>, Jin Ho Lee<sup>2</sup>, Li, Oi Lun Helena<sup>1</sup>, Dong-Ha Lim<sup>1,2,\*</sup>, Hee Soo Kim<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Carbon Neutrality and Climate Change, KITECH & Pusan National University, Republic of Korea

<sup>2</sup>Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Republic of Korea

Green hydrogen produced via electrochemical water splitting is a promising route toward carbon-neutral energy systems; however, its practical implementation is limited by the sluggish kinetics of the oxygen evolution reaction (OER), a complex four-electron process requiring high overpotential. Developing highly active and cost-efficient electrocatalysts with reduced precious metal content is therefore essential.

Herein, we report a thermally free, facile wet-chemical synthesis of an Ir-based ternary alloy (IrNiCo) using NaBH<sub>4</sub> as a reducing agent. Alloying with Ni and Co induces a downward shift of the Ir d-band center, weakening the binding strength of oxygenated intermediates and thereby optimizing adsorption–desorption kinetics to enhance OER activity. The optimized IrNiCo catalyst exhibits markedly improved electrochemical performance in 1 M KOH compared to conventional Ir-based catalysts, while significantly reducing Ir content.

This work demonstrates that precise electronic structure engineering via a scalable synthetic strategy enables high-performance, cost-efficient Ir-based OER catalysts, offering a promising pathway toward next-generation water electrolysis systems with reduced noble metal dependence.

### 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) and also supported by KITECH (PEH25050)

## A Dual-Cathode Microbial Electrolysis Cell Enabling Mode Switching between Hydrogen and Methane Production

Eunseo Kim<sup>1</sup>, Minsoo Kim<sup>1</sup>, Jung Rae Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> School of Chemical Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Republic of Korea

### Abstract

The increasing demand for carbon-neutral energy systems has intensified interest in clean gaseous fuels derived from organic waste. Microbial electrolysis cells (MECs) are bioelectrochemical systems in which electroactive bacteria oxidize organic substrates at the anode and drive the production of clean gaseous fuels at the cathode under an externally applied voltage. Green hydrogen and biomethane can both be produced by MECs, which share a common anodic reaction based on microbial oxidation of organic matter. Their formation proceeds via fundamentally distinct cathodic pathways. Despite this intrinsic versatility, most existing MECs have been designed to exploit only a single cathodic pathway. As a result, the selective production of hydrogen or methane has been achieved only through separate system operation strategies, limiting operational flexibility. In this study, we developed a switchable MEC system capable of selectively producing hydrogen or methane within the same reactor by controlling operational modes. The switchable MEC was sequentially operated in hydrogen and methane production modes without physical reconfiguration. Electrochemical parameters, including current density, anode and cathode potentials, and pH, were continuously monitored together with gas production rates and compositions. Under methane production mode operated at -1.1V, the system achieved a methane production rate of  $0.12 \pm 0.02$  L/L/Day over a 5-day operation period. Methane purity exceeding  $94 \pm 0.5\%$ . Under the same applied potential of -1.1V and the same operation duration, the hydrogen production mode yielded a hydrogen production rate of  $0.096 \pm 0.01$  L/L/day with hydrogen purity exceeding  $99 \pm 0.2\%$ . These results demonstrate that an MEC can be operated as a switchable platform for the selective production of hydrogen and methane within a single system. The proposed approach provides enhanced operational flexibility and practical potential for integrated waste-to-energy conversion.

## Development of an Ethylene Glycol-Based Alternative Anodic Oxidation Strategy for Advancing Alkaline/AEM Water Electrolysis Technology

Min Kyoung Kim<sup>1</sup>, Jungho Jae<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Chemical Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Republic of Korea

Green hydrogen production via alkaline and anion-exchange-membrane (AEM) water electrolysis is limited by the sluggish kinetics and large anodic overpotential of the oxygen evolution reaction (OER), which elevates cell voltage and energy losses. To circumvent this bottleneck, an ethylene glycol (EG)-assisted alternative anodic oxidation strategy is proposed by replacing OER with the ethylene glycol oxidation reaction (EGOR). This substitution is expected to decrease the operating voltage while enabling concomitant electro-upgrading of EG into value-added oxygenates, including formic acid and glycolic acid, and to ease oxygen-evolution-driven gas-management demands. Deactivation pathways and interfacial processes governing anodic durability under EGOR-relevant potentials are elucidated to inform electrode design. Composite noble-metal anodes incorporating cocatalytic components are developed to suppress oxidative surface reconstruction and stabilize interfacial redox chemistry, while nickel-derived porous frameworks are engineered as non-precious metal anodes to enhance intrinsic activity and structural robustness via high active-site accessibility and controlled (oxy)hydroxide formation. Electrocatalytic performance is benchmarked across representative electrochemical environments, with electrolyte chemistry and operating parameters optimized to maximize hydrogen-production efficiency and product selectivity. Mechanistic and kinetic descriptors are established by integrating electrochemical diagnostics with advanced structural and surface characterizations, and rational tuning of cocatalyst composition and electrode microstructure is used to improve selectivity and long-term stability. This study aims to reduce the energy penalty of alkaline/AEM electrolysis and advance a scalable, energy-efficient platform coupling hydrogen evolution with value-added organic oxidation.

### References

1. Zhao, J-J., Zhu, H-R., Huang C-J., Yin, M-H., and Li, G-R., "Recent advances of ethylene glycol oxidation reaction: catalytic mechanism, catalyst design and applications," *J. Mater. Chem. A.*, 5(13), 3236-3272 (2025).

### 가가 .

1, 1, 1, 1, 1, †1  
 1

가가

가

가

가가

. 50%

Peng -Robinson

가

가 20%

300 Pa

9.7%

### Acknowledge

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. RS-2022-NR066639) 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).

## Bolted Joint Analysis in a Torispherical-Head Propellant Tank

Heesung Lee<sup>1</sup>, Kyunghoon Lee<sup>1\*</sup>

Pusan National University<sup>1</sup>

Launch vehicle propellant tanks require both weight reduction and structural safety, particularly when bolted joints integrate the tanks into the vehicle structure. In this study, we design fuel and oxidizer tanks with torispherical heads and evaluate their structural behavior under bolted joint conditions. We initially set the thickness of both tanks to 4.0 mm. We establish design constraints based on weight and allowable von Mises stresses defined by a safety factor of 1.5 against the material yield strength. We conduct finite element analyses (FEA) using ANSYS program and explicitly model contact conditions between bolts and connected members. We assess tank stresses under prescribed boundary conditions and evaluate bolt shear stresses as well as bearing stresses in the jointed components. To identify appropriate thicknesses, we perform case studies for multiple thickness configurations. The results show that reducing the thickness to 3.0 mm for the fuel tank and 3.5 mm for the oxidizer tank satisfies the allowable stress limits while achieving weight reduction. Both configurations maintain structural integrity under shear loading and contact interactions. We select M5 bolts as the appropriate specification for both tanks. This study presents a practical and reliable design workflow for lightweight torispherical propellant tanks and provides a foundation for further structural optimization of launch vehicle subsystems.

### **Acknowledgement**

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

## Pore Architecture as a Determinant of Intrinsic Platinum Utilization and Catalytic efficiency in the Hydrogen Evolution Reaction

**Rahul Ramkumar**<sup>1</sup>, Seung Geun Jo<sup>1</sup>, Byungjin Lee<sup>2</sup>, Jung Woo Lee<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> *Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University*

<sup>2</sup> *Korea Institute of Industrial Technology*

\* **Corresponding:** [jungwoolee@pusan.ac.kr](mailto:jungwoolee@pusan.ac.kr)

### Abstract

The hydrogen evolution reaction (HER) is central to sustainable hydrogen production, yet its widespread application is hindered by the high cost and poor utilization efficiency of platinum (Pt). Conventional Pt/C catalysts suffer from nanoparticle agglomeration, pore blockage, and limited active-site accessibility, highlighting the need for rationally engineered carbon supports. Here, we systematically investigate the role of carbon pore architecture in governing Pt utilization using porous carbons spanning narrow mesoporous (MH, MH-18; 2–5 nm), wider mesoporous (MJ010, MJ030; 10–40 nm), and macroporous (MJ150; 100–110 nm) frameworks. Pt nanoparticles were introduced via a microwave-assisted polyol process, enabling controlled dispersion within interconnected pore networks. Structural and spectroscopic analyses show that macroporous MJ150 stabilizes uniformly dispersed Pt nanoparticles with minimal aggregation, whereas microporous supports promote Pt confinement and electrochemical inaccessibility. XRD and Raman results reveal enhanced crystallinity and a favourable defect environment in Pt/MJ150, while BET and BJH analyses confirm preserved pore connectivity after Pt loading. XPS further verifies preferential stabilization of metallic Pt<sup>0</sup> on the macroporous support. Electrochemically, Pt/MJ150 delivers superior HER activity, achieving an ultralow overpotential of 20 mV at 10 mA cm<sup>-2</sup> and markedly higher mass activity than commercial Pt/C. Cdl, ECSA, and ICP-OES measurements confirm improved active-site accessibility and Pt utilization, driven by efficient mass transport and rapid hydrogen release within macropores. Overall, this study establishes a clear structure property performance correlation, demonstrating that macropore-engineered carbon supports maximize Pt efficiency at minimal loading and offer a scalable strategy for next-generation HER.

**Key words** - Hydrogen Evolution Reaction (HER), Electrocatalysis, Platinum Utilization Efficiency, Porous Carbon Supports, Pore Architecture Engineering, Pt Nanoparticle Dispersion, Metal Support Interactions, Surface Defect Engineering.

## Plasma-Engineered Cl-N Co-Doped Graphene for Active Chloride Exclusion and Enhanced Corrosion Resistance in Seawater Oxygen Evolution Reaction Systems

Aye Myint Myat Kyaw<sup>1</sup>, So Hyun Jeong<sup>1</sup> and Oi Lun Li (Helena)<sup>1\*</sup>

School of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan, Republic of Korea<sup>1</sup>

Seawater constitutes approximately 96.5% of the Earth's total water resources, offering an abundant and sustainable feedstock for hydrogen production. However, practical seawater electrolysis is severely hindered by chloride ions ( $\text{Cl}^-$ ), which trigger competing chlorine evolution reactions (CIER) and accelerate electrode corrosion, leading to rapid activity degradation and poor long-term durability. This challenge is particularly critical for oxygen evolution reaction (OER) electrodes, where structural instability directly limits operational lifetime. To address chloride-induced degradation, we developed a corrosion-resistant strategy based on plasma-synthesized Cl-N co-doped graphene (Cl,N-Gr). Unlike conventional passive barrier coatings such as thick oxides or polymers, this approach enables active chloride exclusion through surface charge modulation while preserving high electrical conductivity. Nitrogen doping induces a negatively polarized carbon surface under alkaline conditions, suppressing  $\text{Cl}^-$  adsorption, while simultaneous Cl-N co-doping tailors electron density and surface polarity to enhance electrostatic repulsion and stabilize the electrode-electrolyte interface. The optimized Cl: N (50:50, v/v) composition significantly reduced corrosion compared to bare nickel foam ( $11.69 \times 10^{-9} \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ), confirming enhanced passivation and substrate protection. The protective layer was subsequently integrated with FeCoS OER catalysts via a solvothermal process at 180 °C for 12 h to construct a functional electrode. The resulting FeCoS-Cl,N-Gr/NF electrode exhibited the lowest corrosion rate ( $0.947 \times 10^{-9} \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ) while maintaining high OER activity in alkaline seawater (pH 14). The electrode delivered 1.60 V vs. RHE at a current density of 100  $\text{mA cm}^{-2}$  and 1.68 V at 300  $\text{mA cm}^{-2}$ , showing nearly overlapping polarization behavior with that of the catalyst-only electrode. These results demonstrate that the protective layer effectively suppresses chloride-induced degradation without compromising catalytic performance, providing a scalable strategy for durable seawater OER systems operating in harsh environments.

### References

1. S Mathew, Sim J-H, Rajmohan R, Li OL, Cho Y-R, "Defect-rich CoMoS nanosheets on PANI nanowires as excellent hybrid electrocatalyst for water splitting". *Electrochim Acta.* **403**. 139586 (2022)
2. Y Chen, Fan Y, Cui Z, Huang H, Cai D, Zhang J, et al., "Nickel sulfide-based electrocatalysts for overall water splitting". *Int J Hydrogen Energy.* **48**, 27992 (2023)

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

## 특별세션(VII):

암모니아 기반 에너지 및 친환경 기술 심포지엄  
Symposium on Ammonia-Based Energy and  
Clean Technologies

---

2026년 3월 19일(목) 15:30~17:30  
부산 BEXCO 제2전시장 324호

## 암모니아-SCR 기술을 활용한 내연기관 배출가스 저감 및 AI 이용 제어 가능성 연구

조규백<sup>1</sup>, 김양화<sup>2</sup>, 이성원<sup>1</sup>, 김홍석<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국기계연구원 동남권기계연구본부, <sup>2</sup>울산대학교 대학원

### A Study on Reducing Internal Combustion Engine Emissions through Ammonia-SCR Technology and Exploring the AI-Based Control

Gyubaek Cho<sup>1</sup>, Yanghwa Kim<sup>2</sup>, Sungwon Lee<sup>1</sup>, Hongsuk Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Busan-Ulsan-Gyeongnam Research Division, KIMM, <sup>2</sup>Graduate School, University of Ulsan

전 세계적으로 전기차 보급이 크게 증가하는 현실을 감안하여도 요즘 판매되는 대부분의 자동차는 여전히 내연기관을 사용하고 있으며, 특히 큰 출력과 장거리 운행을 하는 상용차들은 디젤기관의 의존도가 아직도 높다. 그러나 디젤기관은 대기환경과 인체에 큰 영향을 미치는 질소산화물과 입자상 물질을 배출하기 때문에 미국이나 유럽은 지속적으로 배출가스 규제를 강화하고 있다.

이러한 규제를 만족하기 위해서는 엔진에서 거의 제로 수준의 배출가스를 배출해야하며 특히 저온성능 향상을 위해 배기후처리장치의 귀금속 사용량이 증가할 뿐만 아니라, 후처리장치의 구조도 복잡해짐으로써 적절한 제어에 어려움이 크게 증가한다. 본 연구에서는 암모니아와 CO<sub>2</sub>가 결합하여 상온에서 고체로 존재하는 고체암모늄을 환원제로 사용하여 배출가스의 저온조건에서 질소산화물 저감성능을 크게 개선하는 결과를 보여 준다. 특히, SCR 촉매가 활성화되지 못하는 저온 조건에서 암모니아와 오존을 함께 분사 할 경우 오존이 배출가스 중의 NO가 NO<sub>2</sub>로 산화되고, NO<sub>2</sub>가 NH<sub>3</sub>와 반응하여 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>가 생성되며, 이와 같이 생성된 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>는 고온조건에서 NO<sub>2</sub>와 반응하여 NO와 N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O로 분해 됨으로써 NO의 일부를 효과적 저감 할 수 있음을 확인하였다.

또한, 인공지능 딥러닝 방법을 이용하여 SCR 촉매 내 암모니아 흡착량을 예측하고, 인공지능 강화학습 방법을 암모니아 분사량 제어에 사용할 수 있는지에 대해서 연구하였다. 이 연구에서 인공지능 강화학습 방법으로는 DDPG(Deep Deterministic Policy Gradient) 알고리즘을 사용하였으며, State, Action, Reward, Hyper-parameter에 의한 영향을 연구하였다.

CeO<sub>2</sub>-CoFe

\_\_\_\_\_, Thien An Le, , , , , , \*

[1].

[2].

CeO<sub>2</sub>-CoFe [3].

Ce

가

**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., Neksa, 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<sub>2</sub>-conjugated CoFe layered double oxides as efficient non-noble metal catalysts for NH<sub>3</sub>-decomposition enabling carbon-free hydrogen production”, *Chem. Eng. J.*, **500**, 156986 (2024).

## 건식 밀링을 이용한 메탄 슬립 저감용 Pd/zeolite 촉매 개발

김민식, 임영환, 이연진, 이유진, 김영민, 채호정  
한국화학연구원

천연가스 엔진 시스템에서 발생하는 미연소 메탄(methane slip)을 저감하기 위해서는 저온 및 수분이 존재하는 배가스 조건에서도 높은 활성을 유지하는 촉매 기술이 필수적이다. 본 연구에서는 메탄 산화 반응을 위한 고효성 촉매로서 Pd/zeolite를 선정하고, 이를 건식 밀링(dry milling) 공정을 통해 신속하고 용이하게 제조하는 방법을 제시한다. 해당 방법으로 제조된 Pd/zeolite 촉매는 수분이 포함된 반응 조건에서도 400°C 이하의 낮은 온도 영역에서 우수한 메탄 전환 성능을 나타내었다. 특히 지지체로 사용된 제올라이트의 구조적 특성이 담지된 팔라듐(Pd)의 분산도 및 화학적 상태에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 이에 다양한 분석 기법을 활용하여 제올라이트 종류에 따른 Pd의 특성 변화를 조사하였으며, 이러한 특성들이 메탄 산화 활성과 상관관계가 있음을 확인하였다.

## Solvothermal Processed Ru-based Catalyst Enhances Ammonia Decomposition Efficiency for Green H<sub>2</sub> Production

Thien An Le<sup>1</sup>, Youngmin Kim<sup>1</sup>, Younghwan Im<sup>1</sup>, Min Sik Kim<sup>1</sup>, Ho-Jeong Chae<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Chemical Process Research Division, Korea Research Institute of Chemical Technology, 141 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34114, South Korea

### Abstract

Ammonia (NH<sub>3</sub>) decomposition is a promising route for on-demand, CO<sub>x</sub>-free hydrogen generation, but it requires highly active and durable catalysts to operate efficiently at low temperatures [1-2]. In this study, Ru/CeO<sub>2</sub> catalysts were synthesized using solvothermal (ST), deposition-precipitation (DP) [3], and wet-impregnation (WI) methods [4] to elucidate how the Ru doping method affects Ru state and metal-support interactions in the catalytic NH<sub>3</sub> decomposition. The ST route using ethylene glycol produced the most active catalyst (RC-ST), delivering a H<sub>2</sub> formation rate of 1319.6 mmolH<sub>2</sub>/min/g<sub>Ru</sub> at 450 °C and WHSV = 30,000 mL<sub>NH<sub>3</sub></sub>/g<sub>cat</sub>/h with excellent stability over 100 h, outperforming state-of-the-art Ru catalysts operated under comparable conditions. Advanced analysis techniques, including N<sub>2</sub> physisorption, ICP, HAADF-STEM, CO pulse chemisorption, XRD, XPS, XAS, Raman, EPR, and temperature-programmed analysis, are employed to elucidate the beneficial properties of catalysts for the NH<sub>3</sub> decomposition. These analysis results indicate that the solvothermal processing is an effective strategy to improve Ru dispersion and construct electron-rich Ru–O<sub>v</sub>–Ce<sup>3+</sup> ensembles for the optimal Ru–N and Ru–N<sub>2</sub> binding energies to achieve highly efficient and robust NH<sub>3</sub> decomposition to H<sub>2</sub> production.

### References

1. Zhang, M., Wen, J., Zhang, Y., Wu, Y., Zhao, Z., Yan, J., Song, W., Ali A.M., Zhang, H., “Advances in the development of ammonia decomposition to CO<sub>x</sub>-free hydrogen: Catalyst materials and activity optimization”, *Int J Hydrogen Energy*, **102**, 571 (2025).
2. Le, T. A., Do, Q. C., Kim, Y., Kim, T.W., Chae, H. J., “A review on the recent developments of ruthenium and nickel catalysts for CO<sub>x</sub>-free H<sub>2</sub> generation by ammonia decomposition”, *Korean Journal of Chemical Engineering* **38**, 1087 (2021).
3. Le, T. A., Kim, Y., Kim, H. W., Lee, S. U., Kim, J. R., Kim, T. W., Lee, Y. J., Chae, H. J., “Ru-supported lanthania-ceria composite as an efficient catalyst for CO<sub>x</sub>-free H<sub>2</sub> production from ammonia decomposition”, *Appl. Catal. B*, **285**, 119831 (2021).
4. Le, T. A., Kim, Y., Han, S. J., Do, Q. C., Kim, G. J., Im, Y., Chae, H. J., “Ru dispersed on CeO<sub>2</sub>{100} facets boosting the catalytic NH<sub>3</sub> decomposition for green H<sub>2</sub> generation”, *Chemical Engineering Journal*, **493**, 152503 (2024).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

## **특별세션(VIII):**

**2026년 제1회 제주 지역기술혁신허브  
기술성과교류회\_비공개**

**The 2026 1st Meeting for 'Jeju Regional Technology  
Innovation Hub' Performance Review and Strategic  
Planning**

---

2026년 3월 19일(목) 15:20~17:30  
부산 BEXCO 제2전시장 326호

## 알칼라인 수전해 고전류·부하변동 운전을 위한 셀 계면 및 물질전달 최적화 연구

조현석, 신희종, 이종석  
서강대학교

### Improvements on Interface and Mass-Transfer Optimization for High-Current and Load-Flexible Alkaline Water Electrolysis

Hyun-Seok Cho, Heejong Shin, Jong Suk Lee  
Sogang University

재생에너지 연계형 알칼라인 수전해의 실용화를 위해서는 고전류 구동 성능과 함께 부하변동 조건에서의 내구성·안전성 확보가 필수적이다. 본 연구는 80°C에서 1.5 A cm<sup>-2</sup> (1.8 V)이상의 셀 성능을 확보하고, 20~110% 부하 범위에서 내구성을 갖춘 셀을 설계하고 운전기술을 개발하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 셀 구조 및 유로 설계, 기능성 기공구조전달체, 전해질 첨가제 메커니즘 규명을 통합하여 계면저항과 물질전달 저항을 최소화하고, 기공도·기공크기·분포·꼬임도와 전기화학 성능의 상관관계를 체계적으로 도출하고자 한다. 또한 straight/serpentine 유로와 land-channel aspect ratio 최적화, 셉트전류 저감, 부하변동 내구성 평가를 통해 고성능 셀 설계 지침을 확립한다. 아울러 전극 센싱 기반 실시간 모니터링, 전극-기공구조전달체-전해질 막 계면의 시간분해 분석, 기포 거동 가시화 및 영상 기반 해석을 통해 동적 운전 메커니즘을 규명하고, 재생에너지 전력 파형에 대응 가능한 최적 운전 전략을 제시하고자 한다. 더불어 고선택성 중공사 수소분리막을 개발하여 H<sub>2</sub> /N<sub>2</sub> 및 H<sub>2</sub> /O<sub>2</sub> 분리 성능을 확보함으로써, 고순도 수소 생산까지 포함하는 통합형 알칼라인 수전해 플랫폼 구축에 기여하고자 한다.

## 고성능 MEA 구조 알칼라인 수전해 개발

이정원<sup>1</sup>, 조원철<sup>1\*</sup>,  
<sup>1</sup>서울과학기술대학교, 미래에너지융합학과,

### Advanced MEA Structured Alkaline Water Electrolyzer

Jung Won Lee<sup>1</sup>, Won-chul Cho<sup>1\*</sup>,

<sup>1</sup>Department of Future Energy Convergence, Seoul National University of Science and  
Technology,  
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Republic of Korea

Growing demand for hydrogen production requires water electrolyzers that deliver both high efficiency and long-term stability. Although numerous Ni-based catalysts and coating strategies have achieved high current densities, scalable and reproducible manufacturing approaches suitable for industrial deployment remain limited. Addressing this gap requires membrane electrode assemblies (MEAs) that integrate catalytic performance with structural robustness and efficient mass transport.

Here, we report a membrane electrode assembly fabricated through a manufacturing strategy compatible with commercialization. The resulting architecture reduces ohmic losses, enhances catalytic kinetics, and alleviates mass-transport limitations, enabling improved electrochemical efficiency and sustained operation under alkaline conditions. This work provides a practical platform for next-generation alkaline water electrolysis.

Key words : Alkaline Water Electrolysis (알칼라인 수전해), Membrane Electrode Assembly (막전극 접합체), binder (바인더), Interfacial integration (계면 통합), Gas crossover (가스 크로스오버)

## 전기화학적 산소발생반응 안정성과 부식 내성이 향상된 적층형 전극 및 분리판 기술 연구

김민중, 이빈

경희대학교 신소재공학과

알칼라인 수전해 시스템은 높은 기술적 성숙도와 낮은 전극 소재 비용 측면에서 대용량 그린 수소 생산 기술로 적합하나, 강염기 환경에서 장시간 운전 시 산소극 및 분리판 소재의 부식으로 인한 금속 이온 용출이 발생하고, 이는 전극 표면 열화 및 부반응 유도 등으로 이어져 셀 효율과 내구성을 저하시키는 문제를 야기한다. 특히 산소발생반응(Oxygen Evolution Reaction, OER) 구동 전위 영역에서의 선택도 저하 및 전극/분리판 계면에서의 국부 부식은 장기 운전 안정성을 제한하는 주요 요인으로 작용한다.

본 연구에서는 금속 이온 용출에 기인한 부식을 억제하고 OER 에 대한 선택성을 향상시킬 수 있는 신규 고내식성 소재를 도출하고, 이를 알칼라인 수전해 산소극 및 분리판에 적용하여 전기화학적 성능과 내구성을 종합적으로 평가하고자 한다. 우선 Ni, STS 를 포함한 3 원계 이상 합금계 소재를 대상으로 OER 활성화에 대한 스크리닝을 수행하고, 강염기 조건에서의 전기화학적 안정성 및 금속 용출 거동을 체계적으로 비교·분석하였다. 또한, 선행 문헌 분석을 통해 산소극 운전 전위 범위 내에서 부식 전류를 최소화하면서도 높은 촉매 활성을 유지할 수 있는 조성 영역을 도출하였다. 더불어 산소발생반응 운전 전압 범위 내에서 높은 활성을 갖을 수 있는 3 차원 나노구조 전극을 개발하고자 다양한 합성 방법에 대한 기초 연구를 수행하였다. 또한 3D 프린팅 적층기법을 활용하여 고내식성 후보 소재 기반의 분리판을 제작하고, 유로 구조 최적화를 수행할 예정이다. 적층 공정을 통한 in-situ 합금화 과정은 고내식성 분리판 소재를 빠르게 스크리닝할 수 있는 기술로 장점이 있으며 향후 다공성 기재 및 복잡 유로 설계에 이용될 경우 기체 배출 및 전해질 순환 특성이 개선된 차세대 전극/분리판 기술로 응용이 가능하다,

본 연구는 알칼라인 수전해 셀의 효율 및 내구성 저하를 유발하는 부식 문제를 소재 설계와 구조 설계를 통합적으로 접근하여 해결하고자 한 사례로, 향후 대면적 스택 적용을 위한 산화극 및 분리판 설계 지침을 제시한다는 점에서 의의를 갖는다.

## MOF Derived NiCoP 촉매 최적화를 통한 알칼라인 수전해 수소 발생 반응성능 향상

김완식

한국에너지공과대학교

지구 온난화 대응과 2050 탄소중립 달성을 위해 화석 연료 기반의 그레이 수소에서 재생 에너지를 활용한 청정 수소로의 에너지 전환이 가속화되고 있다. 특히 알칼라인 수전해를 통한 수소 발생 반응(HER)은 청정 수소 생산의 핵심 기술로 꼽히지만, 높은 과전압과 작동 시 발생하는 전극소재 저하의 한계를 극복하기 위해 고성능 촉매 설계가 필수적이다. 본 연구에서는 금속-유기 골격체(MOF) 유래 이성분계 금속 인화물인 NiCoP 촉매를 최적화하여 알칼라인 환경에서의 HER 효율을 극대화하고자 한다. 전극은 니켈 폼을 지지체로 습식 화학법을 이용하여 Ni-Co-MOF를 합성하였으며, 이종 금속의 시너지 효과 확인을 위해 Ni:Co 몰 비를 0:1에서 1:1까지 조절하였다. 이후  $\text{NaH}_2\text{PO}_2$ 와 함께  $400^\circ\text{C}$ 에서 열처리하여 MOF 고유의 다공성 구조를 유지하면서도 전도성이 우수한 NiCoP 나노구조체를 제작하였다. 전기화학적 특성 분석 결과, NiCoP (Ni:Co=1:4) 샘플이  $10 \text{ mA cm}^{-2}$ 의 전류 밀도에서 67 mV의 낮은 과전압과 임피던스 분석에서 가장 낮은 저하 전달을 보여 단일 금속 인화물이나 MOF 구조의 전극 대비 뛰어난 성능 향상을 보였다. 또한, 24시간 동안 진행된 동적 안정성 테스트에서도 다른 샘플 대비 우수한 내구성을 유지하였다. 본 연구는 MOF 유래 나노구조 제어와 금속 조성 최적화가 고효율 수전해 촉매 개발의 효과적인 전략임을 시사한다.

## 재생에너지 변동 대응 ESS 및 수전해를 위한 DC/DC 전력변환 및 지능형 부하적응 제어 연구

선희정, 진현진, 최영준\*  
제주대학교

### DC/DC Power Conversion and Intelligent Load-Adaptive Control for ESS and Water Electrolysis under Renewable Power Variability

Hee-Jeong Seon, Hyun-Jin Jin, Yeong-Jun Choi\*  
Jeju National University

#### 초록(Abstract)

재생에너지 출력 변동성이 큰 제주 지역에서 수전해 기반 그린수소 생산을 안정적으로 운용하기 위해서는 ESS(에너지저장장치) - 수전해 스택 연계형 고효율 DC/DC 전력변환장치와 변동 대응 제어기술이 핵심이다. 본 연구는 배터리 및 수전해 부하를 전기화학적 등가모델 기반의 능동 부하로 모델링하고, 컨버터 스위칭에 따른 출력 전류 리플이 효율 및 열화에 미치는 영향을 정리한다. 또한 Interleaved Buck, Dual Active Bridge(DAB), Phase-Shifted Full-Bridge(PSFB), LLC 공진형 등 수전해 전원용 DC/DC 토폴로지와 IPOP/ISOP 기반 모듈 확장 구조를 비교·분석한다. 아울러 드롭(drop)·마스터 - 슬레이브(master - slave)·평균전류(average current) 기반 전류분담, bipolar DC 전압 밸런싱 제어, 고장·과도상태 및 FRT(Fault Ride Through) 대응 등 운전 신뢰성 요소를 검토한다. 마지막으로 제주형 재생에너지 변동 데이터를 활용한 지능형 부하적응 제어기와 통합 시뮬레이션 모델을 구축하여, 제주 지역의 수전해 실증 운전 기반 확보에 기여하고자 한다.

#### 사사(Acknowledgement)

이 논문은 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-25444452)

## 제주 그린수소 혁신 허브 구축을 위한 실증 부지 선정 및 인허가 로드맵 수립

정석용\*, 강태형, 정광성, 장문석  
(주)웅진엔지니어링

### Establishment of a Roadmap for Site Selection and Permitting for the Demonstration of a Green Hydrogen Innovation Hub in Jeju

Seok-yong Jeong\*, Tae-hyung Kang, Kwang-sung Jung, Moon-seok Jang  
Woongjin Engineering Co., Ltd.

제주특별자치도는 재생에너지 발전 비중 확대에 따른 출력제어 문제를 해결하고 '2035 탄소중립(Net-Zero)'을 달성하기 위해 PtX(Power-to-X) 기반의 그린수소 생산 인프라 구축을 추진하고 있다. 본 연구는 '제주 그린수소 생산기술·제도·사업화 통합 플랫폼' 구축 과제의 일환으로, 1차년도에는 다음과 같이 1.5MW급 수전해 설비의 실증을 위한 실증단지 부지선정과 인허가 로드맵을 수립하였다.

첫째, 실증단지 조성을 위해 제주 동·서부 지역 총 10개 후보지에 대하여 신재생에너지 연계성, 주민 수용성, 접근성, 균형발전, 법적 규제 등을 종합 고려한 입지 타당성 검토를 수행하였으며, 단지 Layout 개념 설계를 완료하였다.

둘째, 국내 선례가 부족한 그린수소 실증사업의 특성을 고려하여 도시계획, 환경·재해 영향평가, 가스안전, 산업안전, 전기안전 등 '전주기 인허가 흐름도'를 정립하였다.

2차년도에는 마을주민 대상 사업 설명회를 통한 수용성 확보와 개별 인허가를 최종 완료하고, 계통보호용 전력차단장치 기술개발 및 변압기 최적용량산정 등 주요 장치의 상세 설계와 발주를 추진할 예정이다. 본 연구를 통해 제시되는 인허가 절차서와 실증 부지 배치 모델은 향후 국내 그린수소 실증단지 개발의 표준 매뉴얼로 활용되어 관련 산업의 조기 시장 진입에 기여할 것으로 기대된다.

---

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(기술혁신허브육성지원사업(RS-2025-25444452))

## RE100 기반 그린수소 생산을 위한 수전해시스템 테스트베드 및 데이터베이스 구축

김대진<sup>1</sup>, 유경상<sup>1</sup>, 김찬수<sup>1</sup>, 남양현<sup>1</sup>, 윤승진<sup>1</sup>, 전덕환<sup>1</sup>, 최미곤<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>한국에너지기술연구원 전력시스템연구실

### Development of a Testbed and Database for an RE100-Based Water Electrolysis System for Green Hydrogen Production

Dae-Jin Kim<sup>1</sup>, KyungSang Ryu<sup>1</sup>, YangHyeon Nam<sup>1</sup>, ChanSu Kim<sup>1</sup>, Seung-JinYoon<sup>1</sup>,  
DeokHwan Jeon<sup>1</sup>, Mi-GonChoi<sup>1</sup>

Electric Power System Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Korea<sup>1</sup>

본 주제는 연구과제 2차년도 목표에 해당하는 내용으로, RE100 기반 그린수소 생산을 위한 수전해시스템 테스트베드 및 데이터베이스 구축을 다룬다. 2차년도에는 실증 인프라 조성을 위한 토목·건축 공사를 우선 수행하여 재생에너지 연계 수전해 시스템, 전력변환장치, ESS 및 부대설비를 통합 운영할 수 있는 물리적 기반을 구축하고, 장기 실증이 가능한 표준화된 테스트 환경을 확보하고자 한다.

아울러 태양광·풍력 등 변동성 재생에너지 기반 수전해 운영을 모사하는 통합 시뮬레이션 모델을 개발하고, 이를 HILS 기반으로 사전 검증한다. 특히 계측 및 운전 데이터 취득 체계를 HILS 단계에서 선제적으로 구현하여, 실제 운전과 연계 가능한 고신뢰 데이터베이스를 구축한다. 본 데이터베이스는 향후 AI 기반 최적운전 및 이상진단 기술 개발을 고려한 구조로 설계되며, 데이터 항목 정의, 수집 주기, 저장 체계 등을 체계화함으로써 AI 활용이 가능한 기반을 마련하는 데 목적이 있다.

본 연구는 실증 인프라 구축과 데이터 중심 설계를 연계한 단계적 접근을 통해, 재생에너지 기반 그린수소 생산의 안정적 운영과 고도화 기술 개발을 위한 기반을 확보하고자 한다.

## 250kW급 수전해 시스템의 부하 변동 운전 특성 분석 및 안정성 제어 방안

김경수<sup>1</sup>, 권경안<sup>1</sup>, 황세선<sup>1</sup>, 김대원<sup>1\*</sup>  
 (주)테크로스<sup>1</sup>

### Analysis of Load Variation Operation and Stability Control in 250kW-class Electrolysis System

Kyeongsu Kim<sup>1</sup>, Kwonkyung Ahn<sup>1</sup>, Seseon Hawang<sup>1</sup>, Daewon Kim<sup>1\*</sup>  
 Techcross Co. Ltd.<sup>1</sup>

본 연구에서는 수전해 시스템의 부하 변동에 따른 동특성을 분석하고, 저부하 및 부하 변동 구간에서의 가스 크로스오버(Gas Cross-over) 억제 방안을 검토하였다. 250kW급 시스템을 대상으로 출력 변화에 따른 가스 혼입 거동을 측정하였으며, 시스템 안정성 확보를 위해 설계된 제어 방안을 적용하여 그 효과를 확인하였다.

시스템 신뢰성 향상을 위한 주요 제어 전략은 다음과 같다. 첫째, 부하 변화 시나리오에 대응하여 안정적인 운전 조건 유지를 위한 공급 프로세스 최적화를 수행하였다. 둘째, 시스템 내 유체 밸런스를 능동적으로 유지할 수 있는 계통 운용 방식 개선을 통해 부하 변동 시 발생하는 가스 재유입을 차단하고 안전 운전 한계를 확보하는 데 중점을 두었다.

250kW급 시스템 시험 결과, 제안된 제어 방안 적용 시 급격한 부하 변동 및 연속 운전 상황에서도 가스 혼입 농도를 안전 기준치 이내로 관리할 수 있었으며, 이를 통해 시스템의 안정적인 운전 범위를 기존 대비 확대하였다. 본 연구에서는 실증 데이터 분석 결과를 바탕으로 부하 변동 조건에서의 시스템 운전 가이드라인과 안정성 확보 방안에 대해 기술하였다.

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

**특별세션(IX):**  
**폐기물 에너지화 및 자원화**  
**Waste-to-Energy/Resource**

---

2026년 3월 19일(목) 15:10~17:40  
부산 BEXCO 제2전시장 325호

## Wastewater-to-Clean H<sub>2</sub> via Gaseous NH<sub>3</sub> Recovery

Jechan Lee\*

Department of Global Smart City, Sungkyunkwan University, Suwon, Republic of Korea,

Wastewater is an underutilized nitrogen reservoir with the potential to serve as a carbon-free hydrogen carrier through ammonia (NH<sub>3</sub>) recovery. Although technologies for ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) and NH<sub>3</sub> extraction are well established, their hydrogen production potential from real wastewater streams has rarely been quantitatively assessed, with most efforts directed toward fertilizer reuse. This gap obscures the true energy value of wastewater-derived ammonia. Here we demonstrate an integrated wastewater-to-clean hydrogen platform that recovers NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, converts it to gaseous NH<sub>3</sub>, and catalytically decomposes it to H<sub>2</sub>. The system couples NH<sub>4</sub><sup>+</sup> recovery (via gas stripping, membrane dialysis, or electrodialysis) with electrochemical NH<sub>3</sub> generation and catalytic decomposition over Ru-, Ni-, and alloy-based catalysts. By normalizing recovery performance to equivalent real wastewater volumes, we directly quantify total NH<sub>3</sub> yield and hydrogen production potential. Our analysis reveals a theoretical hydrogen output equivalent to ~43.6% of current global H<sub>2</sub> production, positioning wastewater as a scalable renewable NH<sub>3</sub> source and carbon-free hydrogen vector. Techno-economic and environmental assessments further suggest that this pathway could provide a sustainable alternative to Haber–Bosch-dependent hydrogen supply, reframing wastewater from a liability into a strategic energy resource.

**Keywords:** NH<sub>3</sub> recovery, H<sub>2</sub> production, real-world wastewater matrices, process assessment

### Acknowledgements

This presentation is supported by a National Research Foundation of Korea grant funded by the Korean government (Ministry of Science and ICT; MSIT) (No. RS-2025-02253004).

## **Sustainable Conversion of Livestock Manure into solid fuel for carbon neutrality**

Dong-Jun Lee

Department of Animal Science, Chonnam National University, Gwangju 61186, The Republic of Korea

### **<Instructions for abstract>**

The rapid growth in global consumption of animal-sourced protein has led to a substantial increase in livestock manure production, posing serious environmental concerns such as soil and water contamination. Thus, the conversion of livestock manure into value-added fuels has garnered considerable attention in the agricultural sector as a promising strategy to mitigate environmental burdens and enhance resource efficiency. This study examines the application potential of livestock manure-derived solid fuel as a technical platform for sustainable waste valorization. The heating value of livestock manure collected from barns ranged from 7.17 to 12.56 MJ kg<sup>-1</sup>, remaining below the national standard for livestock manure-based solid fuel (12.55MJ kg<sup>-1</sup>). To overcome this, manure was blended with agricultural residues to enhance its heating value and reduce variability induced by microbial activity during storage in the cattle barn. Although ash accounts for approximately 30% of the initial mass after combustion, it can be used as a fertilizer when blended with livestock manure at appropriate levels (up to 5%). Therefore, this study demonstrates the feasibility of a livestock manure-to-fuel system for sustainable energy production towards carbon neutrality.

## 플라스틱과 바이오매스의 공동 수열 탄화로로부터 유도된 하이드로차의 특성 및 연소 성능

김정훈<sup>1</sup>, 이도연<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>국립한밭대학교 건설환경공학과 <sup>2</sup>국립한밭대학교 환경공학과

### The Properties and Combustion Performance of Hydrochars derived from Co-Hydrothermal Carbonization of Plastic and Biomass

Jung-Hun Kim<sup>1</sup>, Doyeon Lee<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University

<sup>2</sup>Department of and Environmental Engineering, Hanbat National University

대표적인 바이오 플라스틱인 폴리락티산(PLA)은 석유계 플라스틱에 비해 생산 에너지 요구량이 낮고 가공성과 기계적 강도가 우수하여 석유계 플라스틱의 대안으로써 생산 및 사용량이 증가해 왔다. 그러나 PLA는 생분해 조건에서 분해 속도가 느려 폐기 처리가 어려운 과제로 남아 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구는 PLA와 바이오매스의 공동수열탄화(co-hydrothermal carbonization)를 제안하였다. 이는 PLA보다 하이드로차 형성을 더 용이하게 촉진하는 바이오매스 유래 가수분해 중간체를 활용하여 PLA를 하이드로차로 가치화하고자 하였다. 바이오매스 조성이 하이드로차 수율 및 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해, 목질계 바이오매스와 지질이 풍부한 바이오매스를 각각 대표하는 원료로 왕겨와 커피찌꺼기를 사용하였다. 공동수열탄화 과정에서 커피찌꺼기 내의 지질 성분은 하이드로차의 소수성을 증가시켰으며, 이를 통해 PLA 유래 휘발분이 하이드로차 형성에 기여하는 비중을 감소시켰다. 공동수열탄화는 탄화 과정을 촉진하여, 휘발분에 대한 고정 탄소의 비율로 정의되는 연료비가 향상된 하이드로차를 생성하였으며, 원자 H/C 및 O/C 비율은 갈탄 및 역청탄과 유사한 수준을 나타냈다. 또한 하이드로차 수율, 에너지 수율, 고위발열량, 그리고 탄소 잔류량 측면에서 시너지 효과가 관찰되었다. 본 연구는 연소 특성 분석을 통해 하이드로차를 고체 연료로 활용할 수 있는 실질적 가능성을 탐색하였다. 이러한 결과들은 PLA와 바이오매스의 공동 수열 탄화가 하이드로차 생산을 위한 유효한 자원화 경로임을 시사하며, 생산된 하이드로차는 화석 석탄의 대체 고체 연료로서 기능할 수 있다.

#### 참고문헌

1. Trivedi, A. K., et al., "PLA based biocomposites for sustainable products: A review," *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, 6(4), 382-395 (2023).
2. Mistry, A. N., et al., "Bioaugmentation with a defined bacterial consortium: A key to degrade high molecular weight polylactic acid during traditional composting," *Bioresour. Technol.*, 367, 128237 (2023).

## 전로슬래그의 이산화탄소 흡착제 및 재생건설재료 활용

정성엽  
경북대학교 환경공학과

### Use of Converter Slag as CO<sub>2</sub> Uptake and Construction Material

Sungyup Jung  
Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

고품질의 철강은 여러산업에서 다양하게 사용되는 필수 재료 중 하나이다. 하지만, 제조 과정에서 발생하는 불순물인 전로슬래그(Converter Slag, CS)는 활용처가 별로 없어서 매립으로 처리해야 하는 실정이다. 본 연구에서는 철강산업 부산물인 전로슬래그를 소각시설, 화공플랜트 등의 고온 환경에서 발생하는 이산화탄소를 제거하는 용도로 활용하였고, 이산화탄소를 흡착한 슬래그(CCS)를 보도블록의 재생재료로 활용하는 연구를 수행하였다. 슬래그를 기존 보도블록 골재를 대체하여 사용했을 때의 기계적·환경적 특성과 경제성도 함께 검토하였다. 이산화탄소 흡착 실험은 실온에서 900°C 범위의 조건에서 수행되었으며, 전로슬래그는 약 460°C 부터 이산화탄소 흡착을 시작하여 860°C까지 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나 더 높은 온도에서는 급격한 이산화탄소 탈착이 발생함을 확인하였다. 이후 CS와 CCS를 각각 골재로 활용하여 보도블록을 제작한 결과, 휨강도는 상용 보도블록과 유사하거나 오히려 더 우수한 값을 나타냈다. 특히 천연 골재의 50 % 를 CCS로 대체한 경우, 더욱 향상된 강도를 확인할 수 있었다. 환경적 안정성을 평가하기 위해 수행한 용출 시험에서는 CCS 보도블록에서 유해 중금속이 검출되지 않아 기존 보도블록 대비 우수한 용출 안정성을 보였다.

## Techno-Economic and Life-Cycle Assessment of Hydrogen and Methanol Production from Nonwoven Polymer Waste via CO<sub>2</sub>-Assisted Pyrolysis

이재원<sup>a,†</sup>, 이세영<sup>a</sup>, 조형태<sup>b</sup>

<sup>a</sup>한양대학교 ERICA; <sup>b</sup>경희대학교

([jwlee11@hanyang.ac.kr](mailto:jwlee11@hanyang.ac.kr))

This study tackles the rising disposal of mask-derived nonwoven polymer waste (NPW) after the pandemic by evaluating CO<sub>2</sub>-assisted pyrolysis as a recycling route. Compared with N<sub>2</sub> operation, CO formation is about 6.5 times higher. The results are translated into three integrated options: waste-to-hydrogen (WtH) and two waste-to-methanol pathways (WtM<sub>MPSA</sub> and WtM<sub>SPSA</sub>). In WtH, CO<sub>2</sub>-pyrolysis syngas is supplemented with syngas from natural-gas steam methane reforming and upgraded to H<sub>2</sub> via water-gas shift. For methanol, WtM<sub>MPSA</sub> uses staged compression, pre-reforming to mitigate CH<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, and multi-pressure PSA for selective CO<sub>2</sub> removal (supported by dynamic simulation), whereas WtM<sub>SPSA</sub> simplifies the separation. TEA/LCA show WtM<sub>SPSA</sub> achieves the lowest cost (0.327–0.504 USD/kWh) under both grid and renewable electricity and, with renewables, delivers net-negative GWP (−4.77 to −5.33 kg CO<sub>2</sub>-eq), supporting CO<sub>2</sub>-assisted NPW pyrolysis as an alternative to incineration.

**Keywords:** Nonwoven polymer waste (NPW), CO<sub>2</sub>-assisted Pyrolysis, Steam Methane Reforming (SMR), Methanol synthesis, TEA&LCA

## Insect-based Valorization of Organic Waste

Jee Young Kim

Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Republic of Korea

### <Instructions for abstract>

The global generation of organic waste continues to increase, while conventional management strategies (landfilling and simple composting) are associated with greenhouse gas emissions, odor generation, and secondary environmental pollution. Consequently, the development of high-value valorization technologies capable of simultaneously advancing carbon neutrality and circular economy goals has become a critical priority. This study examines the principles and application potential of insect-based bioconversion, focusing on black soldier fly larvae (BSFL), as a platform for organic waste valorization. BSFL can efficiently convert diverse low-value organic substrates, including food waste, livestock manure, and agricultural residues, into protein- and lipid-rich biomass. The harvested larval biomass can be further utilized as animal feed protein, functional lipids, or biodiesel feedstock, while the residual frass can serve as a soil amendment or be thermochemically upgraded into biochar, contributing to additional carbon sequestration and environmental benefits. Beyond waste reduction, insect-mediated bioconversion represents an integrated circular biorefinery strategy that reconstructs organic waste streams into value-added resources. This work discusses the technical characteristics and environmental implications of BSFL-based systems and highlights their potential role as a carbon-neutral resource circulation platform.

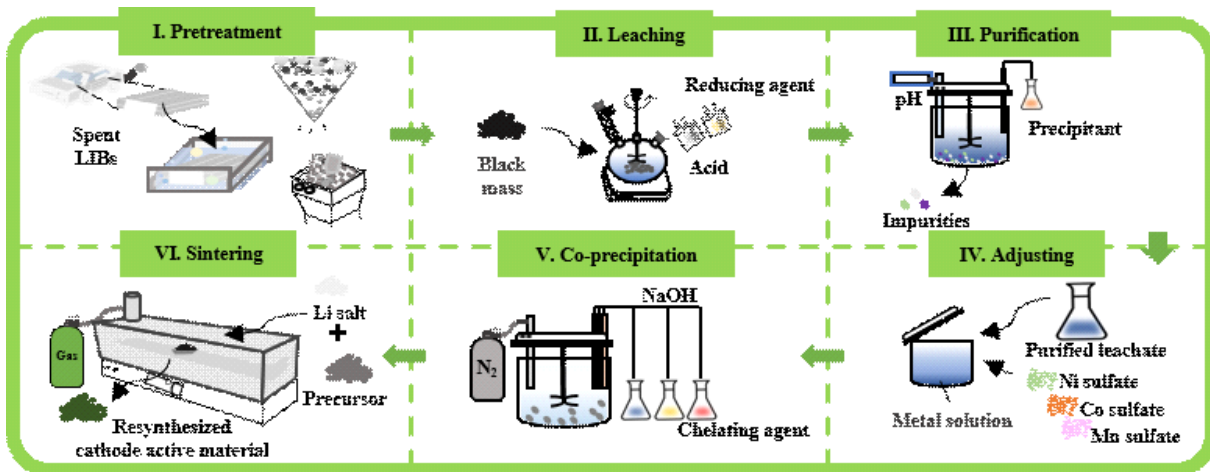
## 폐리튬배터리 양극재 재합성 연구 소개

권경중  
세종대 에너지자원공학과

### Introduction of Resynthesis of Cathode Active Materials from Spent Lithium Batteries

Kyungjung Kwon  
Sejong University, Department of Energy & Resources Engineering

전기차의 전세계적인 보급에 따라 향후 사용 후 리튬이차전지의 발생량도 급격히 증가할 것으로 예상되고 있다. 리튬이차전지에 있는 구성 요소 중 특히 양극재에서는 경제적으로 중요한 가치가 있는 Li, Ni, Co 등의 유용 금속이 포함되어 있어 재활용에 대한 필요성이 크다. 리튬이차전지의 재활용을 위한 기존 기술은 건식제련, 습식제련이 있는데, 건식제련은 사용 후 리튬이차전지의 전처리를 최소화할 수 있으며, 용융제련을 통해 구성 원소들을 합금과 슬래그로 분리하여 회수하게 된다. 습식제련은 적절한 전처리 후에 침출, 정제, 회수 등의 과정을 거치어 유용 금속이 포함된 화합물로 회수한다. 본 세미나에서는 기존 재활용 기술 외에, 사용 후 이차전지의 과분쇄산물인 블랙매스를 습식제련 방식으로 침출, 정제한 후 전구체와 양극재를 제조하는 재합성 방식에 대하여 소개하고, 관련 기업, 주요 연구 그룹 및 본 발표자의 관련 연구들에 대한 정보를 공유하고자 한다.



[그림. 폐배터리로부터 양극재 재합성 모식도 [1]]

**참고문헌**

1. Kim D., Joo H., Kim C., Kim S., Kim W.-Y., Han S., Park J., Park S., Jung H., Park S. and Kwon K., "A comprehensive review on the resynthesis of ternary cathode active materials from the leachate of Li-ion batteries", *J Energy Chem*, 95, 446-463 (2024).

교신저자: 권경중 (kjkwon@sejong.ac.kr)

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

## **특별세션(X):**

**조선해양 청정기술의 새로운 지평: 혁신과 협력의 장!!**  
**New Horizons in Marine Clean Technology: A Forum for**  
**Innovation and Collaboration!!**

---

2026년 3월 19일(목) 13:20~16:40  
부산 BEXCO 제2전시장 321+322호

## 친환경 기술과 관련된 AI 기술 및 시뮬레이션 사례

김낙근, 김귀연, 김대현, 유승우, 장재민<sup>1</sup>  
 캐드아이티코리아<sup>1</sup>

### AI technology and simulation cases related to eco-friendly technology

Nakkeun Kim, Guiyeon Kim, Daehyun Kim, Seunwoo Yu, Jaemin Jang<sup>1</sup>  
 CAD IT Korea<sup>1</sup>

전 지구적인 탄소 중립 목표와 온실가스 감축 규제가 강화됨에 따라, 산업 전반에 걸쳐 고효율, 저배출 친환경 기술 확보를 위한 엔지니어링 혁신이 시급히 요구되고 있다. 특히 에너지 생산 및 조선, 해양 분야에서는 설비의 규모가 방대하고 운용 환경이 복잡하여, 초기 설계 단계에서의 정확한 유동, 열전달 및 성능 최적화가 필수적이다.

전통적인 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) 기반의 3차원 시뮬레이션은 높은 정확도를 제공하지만, 방대한 매개변수를 탐색하기에는 막대한 컴퓨팅 자원과 해석 시간이 소요된다는 한계가 존재한다.

에너지 도메인에서는 풍력 발전기 블레이드의 공력 성능 향상, 수소 연료전지의 열유동 최적화, 그리고 폐열 회수용 고효율 열교환기 설계 등에 AI 시뮬레이션 기술이 활발히 도입되고 있다. 물리적 법칙을 따르는 복잡한 다물리 해석 데이터를 3D 딥러닝 알고리즘에 학습시켜 실시간 성능 예측 모델을 구축하는 방식이 대표적이다. 이를 통해 엔지니어는 수천 가지의 기하학적 형상 변수(Topology)를 단 몇 초 만에 탐색할 수 있으며, 압력 강하는 최소화하면서 열교환 및 발전 효율은 극대화하는 비직관적이고 유기적인 형상을 도출해 낼 수 있다. 이러한 물리 기반 AI(Physics-Informed AI) 워크플로우는 친환경 에너지 시스템의 설계 한계를 돌파하는 핵심 솔루션으로 자리 잡고 있다.

국제해사기구(IMO)의 에너지효율지수(EEXI) 및 탄소집약도지수(CII) 규제에 대응하기 위해, 조선업계는 친환경 고효율 선박 개발에 사활을 걸고 있다. 선박의 운항 마찰 저항을 줄이고 연료 효율을 높이기 위한 선형(Hull form) 최적화 과정에서, Simcenter STAR-CCM+와 같은 상용 고정밀 CFD 해석 프레임워크와 강화학습(RL) 및 머신러닝을 연동하는 파이프라인 구축 사례가 급증하고 있다. AI는 파도, 바람 등 실제 해상 상태(Actual Sea State)를 반영한 수많은 시뮬레이션 시나리오를 학습하여 최적의 선형을 스스로 제안한다. 또한, 로터 세일(Rotor Sail)이나 공기유향시스템(ALS)과 같은 친환경 보조 추진 장치를 선체에 적용할 때 발생하는 유동 간섭 효과를 AI로 빠르고 정확하게 예측하여, 선박 전체의 탄소 배출 저감 효과를 극대화하고 있다.

물리 법칙에 기반한 고정밀 시뮬레이션과, 이 데이터를 학습하여 직관을 뛰어넘는 형상을 창출하고 성능을 실시간으로 예측하는 AI 기술의 결합은 친환경 엔지니어링의 새로운 패러다임이다. 이러한 융합 설계 파이프라인의 구축은 단순한 해석 및 개발 시간의 단축을 넘어, 인간 엔지니어가 미처 발견하지 못한 혁신적인 친환경 폼팩터를 도출하는 원동력이 될 것이다. 본 발표가 에너지 및 조선·해양 산업 현장에서 친환경 기술 경쟁력을 확보하기 위한 디지털 엔지니어링의 실질적인 가이드라인이 되기를 기대한다.

본 발표에서는 기존의 고정밀 시뮬레이션에 인공지능(AI)기반의 대리 모델(Surrogated model), 생성형 설계(Generative Design), ROM(Reduced Order Model) 등 다양한 기법들이 개발되어 현재 여러 산업 현장에서 테스트 또는 실증을 완료한 내용을 기반으로 설계 효율성을 극대화하고 리드타임을 획기적으로 단축한 최신 산업 융합 사례를 소개하고자 한다.

#### 참고문헌

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

1. Baqué, P., et al. "Geodesic convolutional neural networks on Riemannian manifolds." Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. (2018).
2. Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. "Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations." Journal of Computational Physics, 378, 686-707. (2019).
3. Dong, Y., et al. "Hybrid Ship Design Optimization Framework Integrating a Dual-Mode CFD-Surrogate Mechanism." Applied Sciences. (2024).
4. Corti, M., et al. "Morphology and Solidity Optimization of Freeform Surface Turbulators for Heat Exchangers Equipped with Narrow Channels." Energies. (2024).
5. Cai, S., et al. "Physics-informed neural networks (PINNs) for fluid mechanics: A review." Physics of Fluids. (2021).

# **An Experimental Study on the Thermal Performance and Improvement of a Heat Exchanger for Ammonia-Fueled Engine Exhaust Aftertreatment System**

Gyudeok Kim, Jaehwan Jang \*

Research Institute of Medium & Small Shipbuilding

Global carbon neutrality has entered a regulation-driven phase of mandatory compliance, with the International Maritime Organization (IMO) enforcing EEXI and CII since 2023 to regulate ship efficiency and operational carbon intensity. The potential introduction of international carbon pricing is expected to further increase the burden on conventional fossil fuel-based vessels. Consequently, the adoption of alternative fuels such as LNG, methanol, and ammonia is expected to expand. Although ammonia engines do not directly emit CO<sub>2</sub> during combustion, the control of NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, and unburned ammonia remains essential.

This study was conducted under the project “Development of an Exhaust Gas Combined After-Treatment System for MW-Scale Ammonia Engines.” To secure the power required for catalyst thermal management, an Organic Rankine Cycle (ORC)-based waste heat recovery system was applied. A heat exchanger was designed and fabricated to transfer exhaust gas heat to the ORC working fluid, and its performance was experimentally evaluated. Due to the absence of a dedicated ammonia engine demonstration test facility in Korea, the experiments were conducted using an HD Hyundai Heavy Industries HIMSEN 8H22DCF dual-fuel engine as the heat source. The initial design failed to meet the target performance; however, performance requirements were satisfied after design modification and fabrication of an improved heat exchanger.

## **Acknowledgements**

This work was supported by the Korea Ministry of Trade, Industry, and Energy under the Shipbuilding & Offshore Industry Technology Development Program (No. RS-2025-02413126).

## **References**

1. Kim, E., Bang, Y., Bae, K. J., and Kwon, O. K., “Design Validation of Heat Recovery Heat Exchanger Program for Flue Gas,” Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Annual Meeting, KSME23-We22A-038, pp. 1632–1633 (2023).

## Application of Zero-Leakage Sealing Structure for Ammonia SCR Systems Based on Empirical Data from Marine SO<sub>x</sub> Scrubbers

Hansaem Seong<sup>1\*</sup>

DH Controls

As IMO environmental regulations strengthen, marine fuels are transitioning from fossil fuels to carbon-free ammonia [1]. Ammonia-fueled vessels require Selective Catalytic Reduction (SCR) systems operating at near 600 mmAq. Consequently, "Zero-Leakage" exhaust gas control valves are essential to prevent toxic gas release [2]. Conventional butterfly valves, however, face maintenance, economic, and sticking risks in such harsh environments to meet those "Zero-Leakage" requirements.

To overcome this, we developed a hydrodynamic sealing system combining a "Dual Clip-Seated damper" with "Sealing Air." Under SO<sub>x</sub> Scrubber conditions (200 mmAq), a Helium (He) tracer gas leak test quantitatively proved that gas backflow is completely blocked at the molecular level using a high-resolution detector downstream [3].

Based on these empirical data, this presentation proposes an optimal design methodology for Ammonia SCR applications. By introducing a sealing air sizing algorithm considering piping economic velocity and valve authority, we present an air barrier mechanism that fundamentally blocks ammonia leakage under 600 mmAq pressure conditions, thereby improving the safety and economic feasibility of eco-friendly vessels.

### **References**

1. Bicer, Y., and Dincer, I., "Clean fuel options with hydrogen and ammonia for a ship application," *Int. J. Hydrogen Energy.*, 43(3), 1152-1161 (2018).
2. Kim, K., Roh, G., Kim, W., and Chun, K., "A preliminary study on an alternative ship propulsion system fueled by ammonia: Environmental and economic assessments," *J. Mar. Sci. Eng.*, 8(3), 183-195 (2020).
3. McIntire, P., and Sherlock, C. N., *Nondestructive Testing Handbook: Leak Testing*, 3rd ed., ASNT, Ohio, 312-320 (1998).

### **Acknowledgements**

This work was supported by the Technology Innovation Program(or Industrial Strategic Technology Development Program-Core Technology Development Project for Shipbuilding and Offshore Industry)(RS-2025-02413126, Development of an Exhaust Gas Combined After-treatment System for MW-Scale Ammonia Engines) funded By the Ministry of Trade, Industry and Resources (MOTIR, Korea)

## MW급 암모니아 엔진 후처리용 배기가스 승온 장치의 열유동 수치해석 및 설계 타당성 검증

황규관, 김준범, 전형철, 김성태<sup>1</sup>  
(주)유아이티<sup>1</sup>

### Numerical Analysis of Thermal-Fluid Flow and Design Validation of an Exhaust Gas Heating Device for MW-Class Ammonia Engines

Kyukwan Hwang, Junbum Kim, Hyungchul Jeon, Sungtae Kim<sup>1</sup>  
UIT Inc.<sup>1</sup>

본 연구에서는 MW급 암모니아 엔진의 후처리 시스템 내 촉매 활성화를 위해 배기가스를 목표 온도까지 가열하는 유도 가열(Induction Heating) 방식 승온 장치의 성능 및 설계 타당성을 수치해석으로 검증하였다. 해석 모델은 유도 가열을 통해 유입 가스를 승온시키는 배관 영역을 포함하며, 유체와 고체 간의 복합 열전달을 모사하기 위해 OpenFOAM의 chtMultiRegionFoam 솔버를 적용한 CHT(Conjugate Heat Transfer) 해석을 수행하였다. 특히, 촉매 영역은 Darcy-Forchheimer 법칙을 적용한 다공성 매질로 모델링하여 실제 운전 시의 유동 저항을 반영하였다. 다공성 매질의 촉매 전·후단에서 발생하는 압력 강하는 6.56 mbar로 도출되어 설계 사양을 만족하는 것으로 나타났다. 열적 특성 분석 결과에서는 배관의 높은 열 질량에 따른 열적 관성으로 인해 초기 가동 시 예열 지연 현상이 관찰되었으나, 열적 평형 도달 이후에는 촉매 후단 온도가 목표 범위인 380°C 이상에 안정적으로 도달함을 검증하였다. 본 연구를 통해 도출된 열유동 특성 및 승온 시나리오는 향후 실증 실험 장비의 운용 가이드라인 및 제어 로직 설계를 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

# 암모니아-디젤 혼소 단기통 엔진에서 분사 시기가 성능에 미치는 영향 연구

장진영<sup>1\*</sup>, 유동규<sup>1,2</sup>, 이강산<sup>1,3</sup>, 우영민<sup>1</sup>, 고아현<sup>1</sup>, 황선미<sup>1</sup>, 임옥택<sup>2</sup>, 박성욱<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>한국에너지기술연구원, <sup>2</sup>울산대학교, <sup>3</sup>한양대학교

## A Study on the Effect of Injection Timing on Performance in an Ammonia-Diesel Dual-Fuel Single-Cylinder Engine

Jinyoung Jang<sup>1\*</sup>, Donggu Yu<sup>1,2</sup>, Kangsan Lee<sup>1,3</sup>, Youngmin Woo<sup>1</sup>, Ahyun Ko<sup>1</sup>, Sunmi Hwang<sup>1</sup>, Ockteck Lim<sup>2</sup>, Sungwook Park<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Energy Research, <sup>2</sup>Ulsan University, <sup>3</sup>Hanyang University

최근 화석연료의 자원 고갈 문제와 더불어 기후 변화의 주원인인 이산화탄소 배출에 대한 경각심이 전 세계적으로 고조되고 있습니다. 이러한 흐름에 발맞추어 국제해사기구(IMO)는 2050년까지 해운 산업의 탄소중립 실현을 의무화하는 강력한 규제를 도입하였습니다 [1]. 이에 따라 조선업계에서는 수소나 암모니아와 같은 탈탄소 연료 도입에 박차를 가하고 있습니다. 특히 암모니아는 유독성 및 난연성이라는 단점이 있으나, 저장과 운송 측면에서의 탁월한 효율성 덕분에 차세대 선박 연료로 주목받고 있습니다 [2].

본 연구에 사용된 엔진은 1.86L의 부피를 가지는 단기통 엔진이며, 실린더 내부에 암모니아와 디젤 연료를 직접 분사할 수 있도록 각각의 인젝터를 설치하였다. 다만, 암모니아의 경우에는 기계식 연료분사 시스템을 사용하였기 때문에 분사시기 변경을 위해서는 밸트 타이밍을 바꿔줘야하며, 분사압력은 사전에 셋팅한 개변압 조절을 통해 정해졌으며 160 bar 정도이다. 디젤 연료는 커먼레일 시스템을 이용하였으며, 전자제어 방식을 통해 분사시기, 분사압력을 제어했다. 본 연구에서는 암모니아 분사시기를 2 CAD ATDC 로 고정시켰으며, 디젤 분사시기는 -20 ~ 5 CAD ATDC 까지 5 CAD 간격으로 변화시켰다. 그 결과 디젤 분사시기가 TDC 근처에 위치할 경우에 효율이 높았으며, 디젤 분사시기가 늦어질수록 최대 연소압력이 낮아지고 점화지연이 커졌다. 배출가스 온도는 디젤 단독 연소보다 낮은 경향을 보였다.



그림 2 Test engine

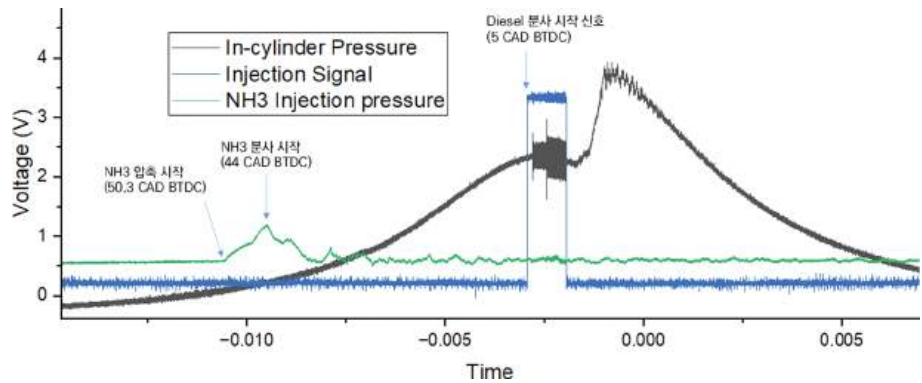


그림 1 Example of fuel injection timing

### Acknowledgments

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00281590)

### 참고문헌

1. IMO (International Maritime Organization), (www.imo.org).
2. Forecasting the Alternative Marine Fuel: Ammonia, KR (2019)

## Emission Aftertreatment Technologies for Ammonia-Fueled Ships

Sun-Mi Hwang<sup>\*</sup>, Hermawan Prajitno, Sun A Choi, and Soon Kwan Jeong

Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research (KIER)

In response to the International Maritime Organization (IMO)'s greenhouse gas reduction strategy and stringent Tier III NO<sub>x</sub> regulations, the maritime industry is accelerating its transition toward carbon-free fuels. Ammonia (NH<sub>3</sub>) is considered a promising zero-carbon marine fuel because it emits no CO<sub>2</sub> during combustion. However, ammonia combustion can generate nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), unburned ammonia (NH<sub>3</sub> slip), and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O). Notably, N<sub>2</sub>O has a global warming potential (GWP100) approximately 273 times greater than that of CO<sub>2</sub>, posing a critical challenge to the genuine decarbonization of ammonia-fueled vessels. Therefore, simultaneous mitigation of multiple nitrogen-containing pollutants is essential.

Ammonia combustion is dominated by the fuel-NO mechanism, and combustion stabilization strategies such as pilot fuel injection and lean-burn operation may cause significant NH<sub>3</sub> slip fluctuations. High oxygen and water vapor concentrations in exhaust gases further affect catalytic selectivity. Conventional selective catalytic reduction (SCR) systems alone are insufficient to control NO<sub>x</sub>-NH<sub>3</sub>-N<sub>2</sub>O simultaneously, necessitating integrated aftertreatment systems combining SCR, ammonia oxidation (NH<sub>3</sub>-SCO), and N<sub>2</sub>O decomposition catalysts.

This presentation analyzes the necessity of aftertreatment technologies from regulatory, catalytic material, and system integration perspectives.

### Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government (MSIT) (No. RS-2023-00281590), the Research and Development Program of the Korea Institute of Energy Research (KIER) (C6-2407-26).

## Investigation of Tunable Surface Characteristics of Ceria-Supported Cobalt Spinel Catalysts for Direct N<sub>2</sub>O Decomposition

Dong Wook Kwon\*, Hwajun Lee

<sup>1</sup>Extreme Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, 02792, Republic of Korea. <sup>2</sup>Division of Energy and Environment Technology, KIST School, Korea University of Science and Technology, Seoul 02792, Republic of Korea

Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) can be generated during ammonia combustion, including both ammonia co-firing and 100% ammonia firing, when used as a marine fuel. Owing to its high global warming potential and prolonged atmospheric lifetime, N<sub>2</sub>O represents a significant environmental concern. Direct catalytic decomposition, which proceeds without the need for an external reductant, has emerged as an effective approach for efficiently reducing such emissions. Although noble-metal-based catalysts exhibit high activity, their practical application is limited by high cost, insufficient thermal durability, and vulnerability to other exhaust gas components. Meanwhile, zeolite-based catalysts suffer from relatively low N<sub>2</sub>O decomposition efficiency. Among the various catalyst systems investigated, transition metals have recently attracted considerable attention as promising active sites for promoting N<sub>2</sub>O decomposition [1].

Spinel-structured transition metal oxides have attracted considerable attention as efficient catalysts for direct N<sub>2</sub>O decomposition. In this work, the catalytic activities of Co<sub>x</sub>Ce<sub>y</sub> spinel oxides were systematically evaluated and compared with those of monometallic Co and Ce oxides. Among the prepared catalysts, the Co<sub>2</sub>Ce<sub>1</sub> binary spinel exhibited the highest activity, achieving more than 95% N<sub>2</sub>O conversion at 300 °C under a GHSV of 60,000 h<sup>-1</sup>. Physicochemical characterizations indicated that Co<sub>2</sub>Ce<sub>1</sub> possessed the smallest crystallite size and the highest surface area, with Co species preferentially located at octahedral positions within the spinel structure. Moreover, the incorporation of Ce weakened the Co-O bond strength, generated abundant surface oxygen vacancies, enhanced surface basicity, and promoted interactions between Co<sup>2+</sup> and Ce<sup>3+</sup> species. Notably, the density of Lewis acid sites was identified as a key parameter governing N<sub>2</sub>O decomposition activity. These findings highlight the strong potential of Co<sub>2</sub>Ce<sub>1</sub> as an efficient catalyst for low-temperature N<sub>2</sub>O decomposition [2].

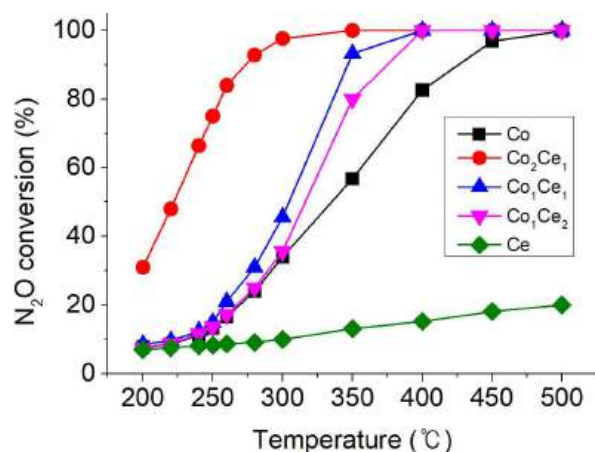


Fig. 1 N<sub>2</sub>O decomposition performance of the Co<sub>x</sub>Ce<sub>y</sub> single and binary oxide catalysts (conditions: 500 ppm N<sub>2</sub>O; space velocity of 60,000 hr<sup>-1</sup>).

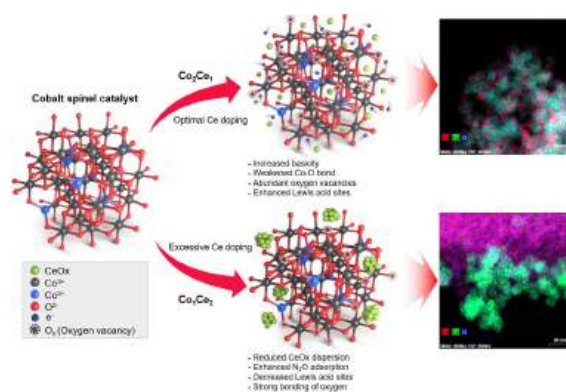


Fig. 2 Reaction pathways for N<sub>2</sub>O decomposition over ceria-doped Co<sub>x</sub>Ce<sub>y</sub> binary oxide catalysts.

### References

- Feng R., and Li Z., "Current investigations on global N<sub>2</sub>O emissions and reductions: Prospect and outlook", *Environ. Pollut.*, 338, 122664 (2023).
- Jung M.-G., Seo J.-E., Ha H.-P., Lee H., Lee J.-H., and Kwon D.-W. "Unveiling the tailorable catalytic surface properties of ceria-promoted cobalt binary spinel catalysts for efficient N<sub>2</sub>O direct decomposition", *Chem. Eng. J.*, 505, 159305 (2025).

## 조선·해양 산업의 친환경 기술

김희경, 강종대, 이승필<sup>1\*</sup>  
HD한국조선해양 미래기술연구원<sup>1</sup>

### Eco-Friendly Technologies in the Shipbuilding and Marine Industry

Heekyung Kim, Jongdae Kang, Seungpil Lee<sup>1\*</sup>  
Advanced Research Center, HD Korea Shipbuilding Offshore Engineering<sup>1</sup>

최근 급격한 기후변화로 온실가스 저감 필요성이 커지면서 IMO는 2023년 MEPC 80에서 2050년 해운 분야 Net-zero 목표를 선언하였다. 이에 따라 조선·해양 산업은 선박 자체 효율 향상과 친환경 추진시스템 개발을 병행하고 있다. 선체 측면에서는 선형 최적화와 표면 마찰저항 저감, 공기 유향, 로터/윙 세일 등 풍력 보조추진, 하이브리드 전력 시스템을 통해 연료소모율과 배기배출물 저감을 추진하며, 정박 중 배출 저감을 위한 육상전력공급 기술도 확대되고 있다. 추진기관 측면에서는 LPG·메탄올 등 저탄소 연료와 암모니아·수소 등 무탄소 연료 적용이 가속화되고, LNG 이중연료 엔진의 메탄 슬립 저감 기술 개발도 활발하다. 메탄올 이중연료 엔진은 상용화되어 대형선으로 확산 중이며, 암모니아를 연료로 사용하는 ME-LGIA(Everlence), X-DF-A(WinGD), W25DF-A(Wartsila) 등의 엔진이 출시되고 있다. 수소는 내연기관과 연료전지 기술이 병행 개발되고 있다. 한편 무탄소 연료의 실선 적용을 위해서는 저장·공급 시스템, 독성/가연성 안전대응, 연소 안정성 및 NOx·N2O·NH3 슬립 저감과 같은 기술 과제 해결이 요구된다. 또한 디지털 트윈과 AI 기반 빅데이터 분석을 통해 운항·기상·엔진 상태를 실시간 모니터링/예측하여 항로·전력 관리 최적화를 수행하고, 자율운항과 결합해 안전성과 운항 효율을 동시에 향상시키는 방향으로 기술이 고도화되고 있다.

\* 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00281590).

## 시스템 모델링기반 풍력터빈 및 배터리 화재예측모델 개발

김창현\*  
중소조선연구원

### Development of a System Modeling-Based Fire Prediction Model for Wind Turbines and Battery Systems

Changhyun Kim\*  
Research Institute of Medium & Small Shipbuilding

The increasing size and complexity of wind turbines have intensified the need for reliable real-time condition monitoring, health assessment, and early fire risk detection. However, conventional high-fidelity numerical models often require significant computational resources, limiting their applicability for real-time digital twin implementation.

This paper proposes a physics-based digital twin framework for real-time health monitoring and fire prediction of a 3 MW-class wind turbine. A physics-based numerical model was developed using Modelica to simulate the electrical and mechanical behaviors of the wind turbine based on supervisory control and data acquisition (SCADA) inputs.

Data preprocessing and wind speed calibration strategies were applied to reconcile nacelle-measured SCADA data with the turbine design specifications, thereby enhancing model reliability under real operating conditions. Furthermore, reduced-order models (ROMs) were integrated with the physics-based numerical model to predict the thermal states of critical components, including the generator and gearbox, which are closely associated with fire risk under abnormal conditions.

Key operational parameters were selected through correlation analysis to enable robust temperature prediction and anomaly detection. Validation results demonstrate that the proposed digital twin accurately reproduces the dynamic behavior of the wind turbine, while the ROM-based temperature predictions show strong agreement with SCADA measurements.

The overall framework achieves a computation time within one second, indicating its suitability for real-time fire risk assessment, diagnostic monitoring, and predictive maintenance applications.

**CT-S10-10**

개인 사정으로 인해 발표가 취소되었습니다.

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 수소 및 재생에너지

(일반 구두발표)

---

2026년 3월 19일(목) 10:10~11:25  
부산 BEXCO 제2전시장 325호

# Deterministic Reinforcement Learning-Based Control of Power-to-Hydrogen Integrated District Heating Networks

Nikita Gupta<sup>1</sup>, Vahid Khaligh<sup>1</sup>, Jay Liu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Cleaner Production Technology  
Pukyong National University

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering,  
Pukyong National University

\*jayliu@pknu.ac.kr

## Abstract

The increasing penetration of renewable energy sources and industrial waste heat in district heating networks demands advanced control strategies capable of handling nonlinear dynamics, operational constraints, and uncertainty in electricity markets. To improve energy efficiency and reduce carbon emissions, district heating systems are increasingly integrated with power-to-hydrogen technologies; however, their operation is strongly influenced by fluctuating renewable generation, volatile electricity prices, and coupled thermal–electrical dynamics [1]. This paper proposes a reinforcement learning–based control framework for a district heating network integrated with an electrolyzer operating in a power-to-hydrogen-and-heat mode. A Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient (TD3) algorithm is employed to learn a deterministic control policy, motivated by its suitability for continuous action spaces, reduced overestimation bias, and improved training stability in constrained energy systems [2]. A compact, physically meaningful state representation captures key operational variables, including electrolyzer temperature, hydrogen storage level, electricity prices, and renewable power availability. The learned policy coordinates electrolyzer power allocation, hydrogen production and discharge, waste heat recovery, electricity trading, and discrete operating modes, while explicitly addressing on–off operation, degradation costs, temperature constraints, and conversion efficiency. Simulation results demonstrate improved renewable energy utilization, effective waste heat recovery, and enhanced operational flexibility under uncertainty.

## References

- [1] Khaligh, Vahid, Azam Ghezelbash, Mohammadamin Zarei, Jay Liu, and Wangyun Won. "Efficient integration of alkaline water electrolyzer—A model predictive control approach for a sustainable low-carbon district heating system." *Energy conversion and management* 292 (2023): 117404.
- [2] Gupta, Nikita, Shikhar Anand, Deepak Kumar, Manojkumar Ramteke, Harikumar Kandath, and Hariprasad Kodamana. "A twin agent reinforcement learning framework by integrating deterministic and stochastic policies." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 63, no. 24 (2024): 10692-10703.

## Aluminothermic-reduction driven surface reconstruction of Ni foam into structurally integrated Fe-Ni secondary phase electrodes for alkaline water electroysis

Seonghee Kim<sup>1</sup>, Oi Lun Li<sup>2</sup> and Dong-Ha Lim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan, Korea

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Korea

The recent surge in global energy demand has significantly increased overall power consumption. In response, many countries are seeking to expand the use of renewable energy sources. To address these challenges, chemical energy storage via power-to-gas (P2G) conversion is widely regarded as a promising solution. In particular, hydrogen has attracted significant attention due to its advantages, including high gravimetric energy density and ease of storage and transportation.

Among electrochemical green hydrogen production technologies, alkaline water electrolysis (AWE) is regarded as a promising system. However, AWE systems are still limited by moderate operating current densities and performance degradation under dynamic conditions, particularly during frequent start–stop operation required for renewable energy integration. [1] In particular, Raney-type nickel structures, which are representative electrode materials providing high surface area and catalytic activity, are commonly fabricated as mechanically discrete catalyst layers deposited on metallic supports. In this work, we report an alternative electrode fabrication strategy based on aluminothermic reduction–driven surface reconstruction. Instead of depositing a separate catalyst layer, the aluminothermic reduction reaction is utilized as a surface alloying tool to directly reconstruct Ni foam into a structurally integrated porous Fe–Ni alloy framework. The resulting Fe–Ni-integrated porous Ni foam electrodes exhibit improved HER and OER kinetics and stable operation under industrially relevant AWE conditions (30 wt.% KOH, 80 °C), achieving 1 A cm<sup>-2</sup> at 1.88 V and durable start–stop performance over 1,000 cycles.

### Reference

1. H. Son, H. Lee, T. Han, H. Lee, C. Park, K. Jung, J. Kim, H. W. Jung, K. Kang, Enhancing durability of Raney-Ni-based electrodes for hydrogen evolution reaction in alkaline water electrolysis: Mitigating reverse current and H<sub>2</sub> bubble effects using a NiP protective layer, *Journal of Power Sources*, 661 (2026) 236580

### 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)

## 암모니아 경로를 고려한 수소환원제철의 모델 기반 통합 분석

김진수

전남대학교 전남대 석유화학소재공학과

### Model-Based Integration of Hydrogen-Based Ironmaking with Ammonia Pathways

Jinsu Kim

Department of Petrochemical Materials, Chonnam National University, Yeosu-si,  
Republic of Korea

수소환원제철은 철강 산업 탈탄소화를 위한 유망 대안으로 주목받고 있으나, 그 성능은 수소 생산 체계와 철강 환원 공정의 통합 구조에 크게 의존한다. 본 연구는 수소 생산 경로와 회전식 환원로 및 고로를 포함한 철강 공정을 연계하는 모델 기반 시스템 통합 프레임워크를 구축하였다. 회전식 환원로는 전기화 기반 직접환원철(DRI) 생산의 대표 경로로, 고로는 대규모 장치산업 특성상 단계적 탈탄소 전환이 요구되는 주요 공정으로 간주하여 분석 범위에 포함하였다. 제안된 방법론은 수소 생산 특성의 차이를 환원 공정의 물질·에너지 수지, 공정 효율, 그리고 탄소 배출 지표로 정량적으로 전파하도록 설계되었다. 또한 다양한 철강 환원 경로와 수소 공급 시나리오를 일관된 모델 구조 내에서 비교·분석할 수 있도록 확장성을 고려하였다. 나아가 본 연구는 수소 기반 환원 공정을 출발점으로 암모니아 활용 경로까지 포함하는 통합 분석 체계를 제시한다. 본 프레임워크는 향후 저탄소 철강 전환 전략 평가를 위한 정량적 공정시스템 분석 기반을 제공하는 것을 목표로 한다.

## Direct Methane Decomposition in a Fluidized-Bed Reactor Using Nickel-Supported Red Mud Catalysts

Na Yeon Kim, Hyungwon Jang and Ji Bong Joo\*

Konkuk University

Traditional fuel production processes, including the hydrocarbon reforming process and water gas shift reaction, generate CO<sub>x</sub> along with hydrogen, necessitating an extra separation process. Catalytic methane decomposition (CMD) is a promising route for CO<sub>x</sub>-free hydrogen production accompanied by valuable solid carbon; however, its industrial implementation is limited by catalyst deactivation and reactor operability. In this study, the feasibility of CMD in a continuous fluidized-bed reactor (FBR) was systematically investigated using a nickel-supported red mud catalyst derived from industrial waste. Our previously developed catalyst, nickel-supported red mud catalyst, with high intrinsic activity but poor fluidization behavior was modified using a binder and clay to enable stable operation in a fluidized-bed environment. The modified catalyst retained Fe-rich Ni–Fe alloy active species and exhibited stable bubbling fluidization when combined with an inert bed material. Parametric studies revealed that catalytic performance and stability strongly depended on operating conditions, highlighting a critical balance between high methane conversion and catalyst durability under continuous operation. Reaction kinetics were successfully described using the Kunii–Levenspiel model, demonstrating first-order behavior with respect to methane and kinetic control without significant mass transfer limitation. Characterization of the deposited carbon revealed rope-like filamentous structures, with higher reaction temperatures producing more graphitic carbon. Overall, this work demonstrates the technical feasibility of employing waste-derived nickel-supported red mud catalysts for continuous CMD in a fluidized-bed reactor, providing a robust foundation for future scale-up and industrial application.

### References

1. Haytham A., Omar B., Saumitra S., Fabiyan A., Shashank N., Ahmed Y., Ratul D., Thomas A., Bassam D., S. Mani S., "From methane to hydrogen: A comprehensive review to assess the efficiency and potential of turquoise hydrogen technologies," *Int. J. Hydrogen Energy*, **68**, 635-662 (2024).
2. Jehangeer R., Asif H. K., Mustafa A., Faisal S., Salman R. N., Rabia L., Muhammad H., Rahat J., Umair Y. Q., Brock L., "Methane decomposition for hydrogen production: A comprehensive review on catalyst selection and reactor systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **168**, 112774 (2022).

## Stepwise Upgrading of Biomass Pyrolysis Oils toward Sustainable Aviation Fuel via Alkylation and Hydrodeoxygenation

Hanbyeol Kim<sup>1</sup>, Dong-Ha Lim<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Green Materials and Processes R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan, 44413, Republic of Korea

Biomass pyrolysis oils are considered a promising renewable feedstock for sustainable aviation fuel (SAF); however, their high oxygen content, chemical instability, and short carbon-chain length severely limit direct utilization. To address these challenges, this study investigates a stepwise upgrading strategy combining alkylation and hydrodeoxygenation (HDO) for the conversion of biomass-derived oxygenates into SAF-relevant hydrocarbons.

In the alkylation step, representative oxygenated model compounds were first employed to understand carbon-chain growth and molecular restructuring behavior over mesoporous Y zeolite (Meso-Y) [1]. Based on these results, real biomass pyrolysis oils were directly alkylated, leading to an effective increase in molecular size and a reduction in highly reactive oxygenated functionalities. The alkylation process was found to play a critical role in modifying feedstock structure prior to downstream upgrading.

Subsequently, hydrodeoxygenation was performed over a non-noble 4Ni–6Cu/ITQ-2 catalyst using unalkylated model compounds, alkylated model compounds, and alkylated biomass pyrolysis oils as feedstocks [2]. Comparative evaluation revealed that alkylated feedstocks exhibited more favorable deoxygenation behavior, characterized by enhanced C–O bond removal and reduced carbon loss under relatively mild conditions. The delaminated ITQ-2 support facilitated efficient metal–acid cooperation and diffusion, enabling stable HDO performance even for complex, real bio-oil-derived mixtures.

### References

1. Kim, H., V. Murali, S. M. Lambor, Y. K. Park, J. M. Ha, D. G. Vlachos, and J. Jae, “Alkylation of biomass pyrolysis oils over zeolites for sustainable aviation fuels: A comprehensive investigation of the chemistry, catalysts, and kinetics,” *Chem. Eng. J.*, 522, 168108 (2025).
2. Kim, H., H. Jeong, K. R. Hwang, J. M. Ha, D. H. Lim, and J. Jae, “Production of sustainable aviation fuels by the two-step alkylation and hydrodeoxygenation of biomass pyrolysis oils over metal-acid bifunctional catalysts,” *Chem. Eng. J.*, 522, 169474 (2025).

### Acknowledgement

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-26-0001).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 에너지저장

(일반 구두발표)

---

2026년 3월 19일(목) 10:50~11:10  
부산 BEXCO 제2전시장 323호

## 중공 질소 도핑 탄소 네트워크와 피치 유래 탄소를 활용한 계층적 실리콘 복합 마이크로스피어의 설계 및 리튬 이온전지 음극 특성

이재섭<sup>1,2</sup>, 조중상<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 공업화학과, <sup>2</sup>고려대학교 신소재공학부

실리콘은 높은 이론용량을 지닌 유망한 리튬 이온전지 음극 소재이지만, 반복적인 충·방전 과정에서의 급격한 체적 변화로 인해 전극 균열과 전기적 접촉 손실이 발생하여 장기 안정성이 제한된다. 본 연구에서는 이러한 구조적 불안정을 완화하기 위해 다중 스케일 구조 제어를 기반으로 한 3차원 계층형 다공성 복합체를 설계하였다. 분무건조 공정을 이용하여 실리콘 나노입자와 Zn 기반 금속-유기 골격체로 구성된 2차 입자 형태의 마이크로스피어를 제조한 후, 열처리하여 질소가 도핑된 중공 탄소 나노케이지 네트워크를 스피어 내부에 형성시켰다. 이 중공 나노케이지는 실리콘 입자의 부피 변화를 수용할 수 있는 내부 완충 공간을 제공함과 동시에 전자 전도 경로를 확장하여 전기화학적 반응성을 향상시킨다. 또한 다공성 탄소 매트릭스는 전해질 침투를 원활하게 하여 리튬 이온 확산을 용이하게 한다. 추가적으로, 석유계 피치로부터 유래한 탄소를 구조 내에 도입하여 표면을 안정화하고 입자 간 전기적 연결성을 강화하였다. 이 피치 기반 탄소는 실리콘 입자를 효과적으로 캡슐화하여 충/방전 중 반복되는 부피 변화에 따른 구조 열화를 억제하고, 안정적인 고체전해질계면 형성을 유도한다. 그 결과, 제조된 음극은 1.0 A/g에서 500회 사이클 후에도 약 650 mAh/g의 용량을 유지하였다. 또한 상용 흑연과 혼합하여 구성한 전극을 NCM811 양극과 조합한 완전 셀에서도 0.5 C 조건에서 100회 후 90% 이상의 용량 유지율을 나타내었다. 따라서, 본 연구는 금속-유기 골격체 유래 질소 도핑 중공 탄소 나노케이지와 피치 기반 탄소 함침의 시너지 효과를 통해 구조적 안정성과 전기전도성을 동시에 향상시킬 수 있음을 확인하였으며, 고에너지밀도 리튬 이온전지용 실리콘 복합 음극 설계에 대한 유효한 전략을 제시한다.

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 에너지전환

(일반 구두발표)

---

2026년 3월 19일(목) 16:40~17:20  
부산 BEXCO 제2전시장 323호

## 순환유동층 암모니아 혼소 시스템 운전 최적화를 위한 AI 기반 예측 모델 개발

조현빈<sup>1\*</sup>, 임호태<sup>1,2</sup>, 박성진<sup>1</sup>, 윤성민<sup>1</sup>, 이경택<sup>1,2</sup>, 라호원<sup>1</sup>, 문태영<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국에너지기술연구원 청정연료연구실, 대전광역시 유성구 가정로 152 (34129)

<sup>2</sup>성균관대학교 기계공학부 에너지공학연구실, 경기 수원시 장안구 서부로 2066 성균관대학교 (16419)

### AI-Based Predictive Modeling for Operational Optimization of a Circulating Fluidized Bed Ammonia Co-Firing System

Hyunbin Jo<sup>1\*</sup>, Hotae Im<sup>1,2</sup>, Sung Jin Park<sup>1</sup>, Sung Min Yoon<sup>1</sup>, Gyeong Taek Lee<sup>1,2</sup>, Ho Won Ra<sup>1</sup>,  
Tae-Young Mun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Clean Fuel Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research, 152, Gajeong-ro, Yuseong-gu,  
Daejeon, 34129, Republic of Korea

<sup>2</sup>Energy Engineering Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 2066  
Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16419, Republic of Korea

\*Corresponding author : [hyunbin.jo@kier.re.kr](mailto:hyunbin.jo@kier.re.kr)

#### Abstract

고온-고압 및 유해 화학물질을 취급하는 에너지 플랜트의 안전하고 효율적인 운영을 위해서는 운전자 숙련도 편차에 따른 공정 안정성 문제를 해소할 수 있는 새로운 운전 보조 체계가 요구된다. 본 연구는 한국에너지기술연구원이 보유한 파일럿 규모의 순환유동층 암모니아 혼소 플랜트를 대상으로, 실제 운전 데이터를 기반으로 한 도메인 지식 기반 AI 예측 모델을 개발함으로써, 에너지 플랜트의 디지털 전환과 탄소중립 정책 이행에 기여하는 것을 목표로 한다.

해당 순환유동층 혼소 플랜트에서 혼소율 변화, 부하 변동 등 다양한 운전 조건에 따른 온도, 압력, 오염물질 거동, 온실가스 배출 등의 데이터를 수집하여 고정밀 AI 학습용 운전 데이터베이스를 구축하였다. 이후, 수집된 데이터를 바탕으로 물리적 특성과 시계열 특성을 분리 분석하고 이를 결합하는 도메인 지식 기반 앙상블 AI 모델을 설계하였다. 특히, 다양한 딥러닝 모델을 비교·적용하여 현시점의 운전 변수(온도, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>)를 예측하고, 이를 기반으로 일정 Time step 이후의 상태를 예측하는 선형 예측 모델을 개발하였다.

도메인 지식 기반으로 학습 변수를 선정하고, 다양한 AI 모델의 성능을 비교한 결과, 제안한 앙상블 모델은 단일 구조 기반 모델 대비 온도, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 농도 예측 정확도에서 향상된 성능을 나타냈다. 또한, 시계열 특성을 고려한 선형 예측 모델은 중·단기 예측 구간에서도 안정적인 성능을 보였으며, 공정 이상 징후를 사전에 탐지할 수 있는 가능성을 확인하였다.

본 연구를 통해 개발된 AI 기반 운전 예측 모델은 플랜트 운영의 효율성과 안전성을 동시에 제고할 수 있으며, 운전자의 숙련도 편차 보완, 비정상 상황의 선제적 대응 등 다양한 산업 현장에서 실질적인 활용 가능성을 제시한다.

#### 참고문헌

1. Abisoye, B. O. et al, "A survey of artificial intelligence methods for renewable energy forecasting: Methodologies and insights" *Renewable Energy Focus*, 48, 100529 (2024).
2. Le, T. T. et al, "Harnessing artificial intelligence for data-driven energy predictive analytics: A systematic survey towards enhancing sustainability" *International Journal of Renewable Energy Development*, 13(2), 270-293 (2024).

## 해양생물 유래 지질의 FAME 계 바이오연료 전환 가능성 조사

장정희<sup>†</sup>, 장현성, 이지은, 윤여진, 이재홍, 조윤희

고등기술연구원

## Investigation of the Feasibility of Converting Marine-Derived Lipids into FAME-Based Biofuels

Jung Hee Jang, Hyun Sung Jang, Ji Eun Lee, Yeo Jin Yun, Jae Hong Lee, Yun Hye Cho

Institute for Advanced Engineering

수산 부산물 기반 바이오연료는 식량자원과 경쟁하지 않는 비식용 원료로서 잠재력이 크다고 판단되나, 현재까지 상용화 사례는 제한적이다. 국내 바이오디젤 원료는 대부분 팜유 부산물 및 폐식용유와 같은 식물성 지질에 의존하고 있으며, 해양성 지질의 연료 전환에 대한 실증 연구는 상대적으로 부족한 상황이다. 최근 탄소중립 정책 강화와 신재생연료 혼합의무제도(RFS)의 확대에 따라 기존 식물성 지질 중심의 공급 구조의 리스크를 극복하기 위한 국내 자원 기반의 비식용 바이오매스 확보에 대한 필요성이 증가하고 있다. 비식용 수산부산물인 오징어유는 C16~C22 범위의 장쇄 지방산을 주 성분으로 하는 해양성 트리글리세라이드 구조를 가지며, 디젤 범위 탄소골격을 확보하고 있어 바이오디젤 원료로의 전환 가능성을 가진다. 그러나 해양성 지질 특유의 불포화도 및 인지질·금속 성분 등의 존재는 기존 식물유 기반 공정과 동일 조건 적용 시 품질 확보에 제약요인으로 작용할 수 있다. 본 연구에서는 동해안 유래 오징어유를 대상으로 전이에스터화 기반 FAME(Fatty Acid Methyl Ester) 제조 공정을 적용하고, 전처리 및 정제 단계를 포함한 실험실 규모 공정을 구성하여 바이오디젤 전환 가능성을 검토하였다. 그 결과 전처리 공정을 통하여 금속 및 인 계열 부산물의 저감 가능성과 연료화 가능성을 확인하였다.

키워드: 두족류, 해양생물, FAME, 바이오연료

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 청정융합

(일반 구두발표)

---

2026년 3월 19일(목) 09:00~11:20  
부산 BEXCO 제2전시장 326호

## Diagnosing Metabolic Bottlenecks via Flexibility Collapse: An Intervention-Aware Digital Twin for Non-Model Microbial Cultures

Changman Kim

Department of Biotechnology and Bioengineering, Chonnam National University, Gwangju, 61188,  
Republic of Korea

Diagnosing the root causes of underperformance in non-model microbial bioprocesses is challenging because intracellular constraints are not directly observable through routine measurements. In this study, we present an intervention-aware diagnostic platform that couples a genome-scale digital twin with explainable AI (XAI) to convert sparse experimental anchors (e.g.,  $OD_{600}$ ) into actionable diagnostic artifacts. We shift the focus from predicting static flux states to diagnosing "metabolic rigidification," defined as the loss of metabolic degrees of freedom. The platform utilizes Flux-Variability Analysis (FVA) to quantify "flexibility collapse"—the exhaustion of a network's buffering capacity—across 30 curated metabolic modules. By integrating XGBoost and SHAP attribution, the workflow identifies regime-specific signatures and organizes bottleneck hypotheses into a hierarchical "rigidification map" using causal-structure discovery. Validated using *Stenotrophomonas maltophilia* SO-1 on acetate, the platform successfully identified discontinuous regime boundaries, such as oxygen-to-acetate switches, and flagged non-stoichiometric constraints like chemical inhibition through systematic model-experiment gaps. This framework provides a scalable diagnostic route for bioprocesses where biological knowledge is limited and real-time observability is sparse.

### References

1. Orth, J.D., Thiele, I., and Palsson, B.Ø., "What is flux balance analysis?," *Nature Biotechnology*, 28, 245-248 (2010)

## Integrating vermiremediation of dairy sludge: Influence of pre-composting duration on nutrient enrichment and agronomic potential

Ramesh Kumar<sup>1</sup>, Jyotisikha Mohapatra<sup>2</sup>, Sankha Chakraborty<sup>2</sup>, Mustafa Ghulam<sup>1</sup>, Hye-Lim Kwon<sup>1</sup>,  
Byong-Hun Jeon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763,  
Republic of Korea

<sup>2</sup>School of Chemical Engineering, Kalinga Institute of Industrial Technology,  
Bhubaneswar, Odisha, India-751024

E-mail: rameshibt@hanyang.ac.kr (R. Kumar)

Large volumes of solid waste are generated during dairy wastewater processing, known as dairy processing sludge (DPS), containing organic and inorganic chemicals. Discharging untreated DPS into surrounding water sources harms the environment because of its elevated organic content. Alternatively, the DPS can be transformed into struvite, char, ash, or fertilizer equivalence values using non-conventional methods, such as earthworm-mediated vermiremediation [1]. The current experiment aims to vermistabilize dairy processing sludge (DPS) amended with cattle dung at a 70:30 ratio with variable pre-composting time period, i.e., DPS 7 (for 7days pre-composting), DPS 14 (for 14days pre-composting), DPS 21 (for 21days pre-composting), DPS 28 (for 28 days pre-composting), DPS 35 (for 35days pre-composting), for 90 days using *Eisenia fetida*. The earthworms' results increase in biomass up to the 11th week of the composting period, i.e., DPS 21 (851.69±0.56 mg), and the least in the DPS 35 (423.41±0.03 mg). By the end of the experiment, total Kjeldahl nitrogen, accessible phosphorus, and potassium increased significantly, indicating improved nutrient enrichment and compost maturity, but pH, total organic carbon, total organic matter, C:N ratio, and C:P ratio all significantly dropped. The seed germination index of *Cucurbita pepo* (pumpkin) ranges from 131%-192%, *Vigna radiata* (mung bean) from 159%-179%, and *Raphanus sativus* (radish) from 165%-192%. The findings indicate that *Eisenia fetida* can effectively transform DPS into stable, nutrient-rich, mature, and detoxified vermicompost suitable for agronomic applications and future dairy sludge management.

**Keywords:** Dairy processing sludge, pre-composting, earthworm species, nutrient enrichment, soil amendment, compost quality, 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] J. Mohapatra, R. Kumar, B. Basak, R.G. Saratale, G.D. Saratale, A. Mishra, S.K. Tripathy, B.-H. Jeon, S. Chakraborty, A review on generation, composition, and valorization of dairy processing sludge: A circular economy-based sustainable approach, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 143 (2025) 45-64. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.08.045>.

## Amendment of acidic soil to neutralization and microbiome abundance during agricultural utilization of rock waste sludge

Ju-Hyeok Kwon, Kil-Hong Seol, Ghulam Mustafa, Soon-Ho Cho, and Byong-Hun Jeon \*

*Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, 222-*

*Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, 04763, Republic of Korea*

The growing production of aggregates in quarries generates solid wastes and expands the energy footprint. These solid wastes, generally stored in landfills, cause environmental and economic problems. This study sought to provide a sustainable alternative for the valorization of one of these solid wastes, rock waste sludge (RWS), obtained from an aggregate quarry. Soil functions, fertility, and microbial abundance may be altered in various ways by RWS augmentation in acidic soil. Acidic soils were reproduced a weathered agricultural field and used for the negative control. This study revealed that the amount of RWS influences the quality of soil ameliorants and their effectiveness in improving soil properties [1]. The RWS was characterized by SEM to study surface images and physiological parameters of plant, such as seed germination index, shoot length, biomass, C:N ratio, etc. Besides, RWS from various regional industry in the Republic of Korea and combinations of RWS : acidic soil {2:1(67+33%), 1:1(50%+50%), 1:3(25%+75%), and 1:4(16%+84%)} ratios were used to study the effect of RWS on soil microbial community. The 16S rRNA metagenomic analysis revealed the dominance of phyla: *Proteobacteria*, *Firmicutes*, and *Acidobacteria* that influence the soil nutrient cycle when applied at ratio 1:1. This study highlights the valorization of RWS into ameliorant and the effect of ameliorant augmentation with soil; its impact on soil nutrients, microbial abundance, and plant biomass enhancement. The greener approach also mitigates and supports the sustainable management of solid wastes, thus reducing GHGs emissions and improving nutrient cycling.

### References

1. Ahmad, A., Chowdhary, P., Khan, N., Chaurasia, D., Varjani, S., Pandey, A., & Chaturvedi, P., "Effect of sewage sludge biochar on the soil nutrient, microbial abundance, and plant biomass: A sustainable approach towards mitigation of solid waste." *Chemosphere*, **287**, 132112 (2022).

\_\_\_\_\_,<sup>1,2</sup> 강태이<sup>1</sup>, 이재형<sup>1</sup>, \_\_\_\_\_<sup>1,2</sup>, \_\_\_\_\_<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>광운대학교 공과대학 환경공학과, <sup>2</sup>플라즈마바이오효과학연구센터

## Simultaneous Rare Earth Element Recovery and Water Purification from Acid Mine Drainage in South Korea

Kien Tiek Wong<sup>1,2</sup>, Tae I Kang<sup>1</sup>, Jaehyong Lee<sup>1</sup>, Nurhaslina Abd Rahman<sup>1,2</sup>, Min Jang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering Kwangwoon University, <sup>2</sup>Plasma Bioscience Research Center

\*e-mail : minjang@kw.ac.kr

As global demand for rare earth elements (REE) intensifies, establishing a stable supply chain has become a priority for national resource security. Traditional REE extraction methods often rely on high-energy processes and corrosive chemicals that present significant environmental risks. This study explores the potential of Acid Mine Drainage (AMD) as a sustainable secondary resource for REE recovery, specifically focusing on three sites in South Korea: Seokbong, Samtan, and Daedeok. The research aimed to develop an integrated process achieving high REE recovery while simultaneously purifying AMD water. Initial characterization of the sites revealed total REE (TREE) concentrations ranging from 0.242 mg/L at Samtan to 1.72 mg/L at Daedeok, with major identified elements being Cerium, Lanthanum, Neodymium, Praseodymium, and Yttrium. The experimental methodology focused on optimizing metal precipitation and REE crystallization by controlling pH levels between 4 and 9 and utilizing hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) to facilitate the oxidation of Fe(II) to Fe(III), which enhances REE co-precipitation. The study evaluated several alkali reagents, including NaOH, Ca(OH)<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>, and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. For the Daedeok AMD site, the optimal recovery condition was determined to be a pH of 5 with the addition of 300 ppm H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, resulting in a TREE recovery rate of 91.6%. While CaCO<sub>3</sub> is a cost-effective reagent, the research indicates that substituting it with sodium carbonate (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) is superior for preventing calcium (Ca<sup>2+</sup>) contamination. This substitution avoids the formation of insoluble by-products that interfere with subsequent purification stages, thereby improving the final purity and stability of the recovered minerals. These results confirm that South Korean AMD sites possess significant potential as a viable source for critical minerals. Future research will focus on transitioning to a semi-pilot scale system and refining selective extraction techniques to ensure long-term industrial and economic feasibility.

### **Acknowledgment**

본 연구는 환경부 산하 한국광해광업공단(KOMIR)에서 지원하는 '광산배수 내 유용금속 동시회수 수질정화 공정개발' 지원을 받아 수행된 연구임.

### **References**

Yin, X., Martineau, C., Demers, I., Basiliko, N., & Fenton, N. J. (2021). *The potential environmental risks associated with the development of rare earth element production in Canada*. Environmental Reviews, 29(3), 354-377.

## An Alternative to “Cumene Process”: A Green Approach for Phenol Production

Shankha S. Acharyya<sup>1</sup>, Ramesh Kumar<sup>1</sup>, and Byong-Hun Jeon<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bioenergy & Environmental Remediation Lab (BERL),

Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul

Activation of C-H bond is regarded as “cornerstone” in selective oxidation process as it serves as an avenue for the production of several important commodity chemicals e.g. phenol. The industrial demand for phenol is increasing every year; the Global Phenol Market size is expected to be worth around USD 48.3 Billion by 2033, From USD 28.3 Billion by 2023, growing at a CAGR of 5.5% during the forecast period from 2024 to 2033 [1]. The Hock process (cumene process) remains the global standard for phenol production, accounting for over 97% of the world's supply [2]. However, because it is energy-intensive and produces acetone as an often-unwanted co-product, recent research has shifted toward green chemistry, circular economy integration, and selective catalysis. Benzene can be oxidized to phenol by green oxidant hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), featuring energy-saving, environmentally friendly, and high atomic economy by utilization of several copper-based catalysts. Several researchers, including Acharyya et. al. [3] reported high yield of phenol using H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (68.0%); but the use of toxic chromium and less efficiency in H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-utilization (~14.0%) inhibits the catalytic system from industrialization.

Biogenic synthesis of copper-based nanomaterials is a cost-effective and environmentally friendly approach that has plunged into the field of green chemistry. While working at Bioenergy & Environmental Remediation Lab (BERL), Hanyang University (Seoul), we are enthusiastically involved in fabricating Cu-based nanomaterials utilizing biological sources, which could provide a favorable, nontoxic, and eco-friendly approach towards phenol production and thereby serve as an alternative to the conventional “Cumene” process.

### **Acknowledgement**

SSA thanks the “Brain Pool Invited Scientist Program” by the National Research Foundation of Korea (NRF), Grant No: RS-2025-25439157

### **References**

1. Market Research Report, Market.US, Report ID. 123853, (2024)
2. Acharyya S. S., Ghosh, S., Adak, S., Sasaki, T., & Bal, R. (2014). Facile synthesis of CuCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel nanoparticles: a recyclable heterogeneous catalyst for the one pot hydroxylation of benzene. *Catal. Sci. Technol.*, **4**(12), 4232–4241 (2014).

## 광산 배수 슬러지를 이용한 불소 입상 흡착제 개발

종초은<sup>1,2</sup>, 유혜진<sup>1</sup>, 렌니샤<sup>1</sup>, 윤소연<sup>1,2</sup>, 장 민<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>광운대학교 공과대학 환경공학과, <sup>2</sup>플라즈마바이오효과학연구센터

### Granular fluoride adsorbent development from acid mine drainage sludge

Choe Earn Choong<sup>1,2</sup>, Hye Jin Yoo<sup>1</sup>, Reneesha Valiyaveettil Basheer<sup>1</sup>, So Yeon Yoon<sup>1,2</sup>, Min Jang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering Kwangwoon University, <sup>2</sup>Plasma Bioscience Research Center

\*e-mail : minjang@kw.ac.kr

Aluminum-containing acid mine drainage (AMD) sludge can be utilized as a secondary resource; however, strategies to improve the stability of Al-rich aluminosilicate phases via Fe-assisted calcination remain poorly documented for F<sup>-</sup> adsorption. In this study, granular fluoride adsorbents were prepared from AMD sludge by adding Fe for encapsulation at varying calcination temperatures. Increasing the calcination temperature and introducing Fe enhanced F<sup>-</sup> adsorption performance. The optimized adsorbent (S-600-Fe0.5%), prepared with 0.5% Fe addition and calcined at 600°C, achieved a fluoride adsorption capacity of 60.3 mg g<sup>-1</sup>, representing a 1.91-fold improvement over pristine sludge. Importantly, Fe incorporation into Al-rich AMD sludge also improved adsorbent stability and reduced Al(III) leaching during fluoride adsorption. X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and in situ Raman analyses identified Al–O sites as the dominant fluoride sorption sites, primarily through electrostatic interactions. Notably, S-600-Fe0.5% maintained effective fluoride removal over 10 adsorption–desorption cycles, demonstrating excellent reusability. This study provides an alternative approach for the utilization of high Al-containing AMD sludge as F<sup>-</sup> granular adsorbents.

#### Acknowledgment

본 연구는 환경부 산하 한국광해광업공단(KOMIR)에서 지원하는 '광산배수 내 불소 제거 및 현장실증 기술개발' 지원을 받아 수행된 연구임.

#### References

1. Gao., et al., Reuse of waste alum-sludge for fluoride removal with nano ZrO<sub>2</sub> modification: Compressive strength optimization, mechanism and fixed bed column adsorption. Chemical Engineering Journal, 2025. 70: p. 106912.

## Reversible Catalyst Deactivation in Electrolyte-Engineered Photoelectrochemical Ammonia Oxidation Systems

Wooyul Kim\*

*Department of Energy Engineering / KENTECH Institute for Environmental and Climate Technology, Korea Institute of Energy Technology(KENTECH), Naju, 58330, Republic of Korea*

\*e-mail address: [wkim@kentech.ac.kr](mailto:wkim@kentech.ac.kr)

Ammonia oxidation reaction (AOR) has emerged as a promising carbon-free route for hydrogen production under ambient conditions; however, its practical deployment is hindered by rapid catalyst deactivation and competing side reactions in aqueous electrolytes. Here, we introduce an electrolyte-engineering strategy for photoelectrochemical (PEC) AOR that simultaneously enhances hydrogen evolution and enables reversible catalyst regeneration. By employing a non-aqueous acetonitrile electrolyte with a BiVO<sub>4</sub> photoanode, competing oxygen evolution and NO<sub>x</sub>-related poisoning are effectively suppressed, resulting in a 6.9-fold increase in hydrogen yield compared with conventional aqueous systems. Combined spectroscopic and electrochemical investigations reveal that catalyst deactivation in water is not irreversible but dynamically reversible upon reintroduction into a non-aqueous environment, underscoring the critical role of solvent-dependent interfacial chemistry. Notably, this electrolyte-engineering approach is broadly applicable to diverse metal-oxide photoanodes, including BiVO<sub>4</sub>, WO<sub>3</sub>, and  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, establishing a generalizable design principle for PEC AOR platforms. These findings redefine the influence of electrolyte composition on interfacial reaction pathways and provide a practical framework for developing efficient, durable, and adaptable ammonia-to-hydrogen conversion systems.

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 자원순환

(일반 구두발표)

---

2026년 3월 19일(목) 10:20~10:40  
부산 BEXCO 제2전시장 321+322호

## Semi-Flow Depolymerization of Cellulose to DP-Controlled Oligosaccharides for Polyol Applications

Han-Ung Kim<sup>1</sup>, Jungho Jae<sup>2</sup>, Dong-Ha Lim<sup>1,\*</sup>

Korea Institute of Industrial Technology<sup>1</sup>

Pusan National University<sup>2</sup>

Conventional batch hydrolysis of cellulose is conducted in closed systems, where soluble sugars remain in hot aqueous media and undergo continuous secondary depolymerization. Consequently, glucose becomes the dominant product and control over sugar molecular weight distribution is limited. This restricts the selective production of short-chain oligosaccharides (DP 2–4), which are desirable as multifunctional initiators for polymer applications such as polyol synthesis [1].

In this study, we propose a semi-flow cellulose hydrolysis strategy to regulate sugar degree of polymerization at the process level. By continuously withdrawing soluble products during reaction, semi-flow operation suppresses excessive secondary hydrolysis. Liquid space velocity (SV) was employed as the key operating parameter to control the balance between depolymerization extent and productivity.

Cellulose was mix-milled with an oxidized carbon catalyst and packed into a fixed-bed reactor. Hydrolysis was conducted at 200–240 °C and 30 bar under semi-flow conditions while systematically varying SV. Effluent sugars were analyzed to determine yield and DP distribution. A secondary hydrolysis step was further applied to convert residual mid-DP oligosaccharides into low-DP sugars. The results demonstrate that SV governs a trade-off between conversion and DP distribution. Higher SV preserved longer-chain oligosaccharides but reduced conversion, whereas lower SV promoted further depolymerization toward glucose and cellobiose. An optimal operating window was identified where high yields of low-DP sugars were obtained while maintaining practical productivity. The resulting sugars were directly used as initiators for  $\epsilon$ -caprolactone ring-opening polymerization, yielding polyester polyols with properties suitable for polyurethane-related applications. This work demonstrates that semi-flow operation combined with SV control enables practical tailoring of sugar molecular weight distribution from non-edible cellulose, providing a process-level approach for producing polymer-grade renewable feedstocks.

### References

1. Huang, Y., and Fu, Y., "Hydrolysis of Cellulose to Glucose by Solid Acid Catalysts," *Green Chem.*, **15**, 1095 (2013).

### Acknowledgment

This research was supported by the Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea, under the "Regional Innovation Cluster Development Program (R&D)(P0025345)" supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 청정생산

(일반 구두발표)

---

2026년 3월 19일(목) 09:20~10:00  
부산 BEXCO 제2전시장 325호

## Sustainable in-situ depolymerization of PET microplastics using engineered marine living biocatalysts

Sung In Lim\* and Gyu-Jin Lee

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Republic of Korea

Marine microplastic pollution, particularly from polyethylene terephthalate (PET), represents a persistent environmental challenge that demands sustainable and scalable remediation strategies[1]. However, most enzymatic degradation approaches are limited by poor performance under saline conditions and lack of environmentally compatible hosts. Here, we present a marine-adapted whole-cell biocatalytic platform based on the fast-growing halophilic bacterium *Vibrio natriegens*. By displaying PET hydrolase on the outer membrane[2], we developed a living catalytic system (Vn-PETase) capable of operating efficiently under simulated seawater conditions (3.5% NaCl, 30 °C). The engineered strain exhibits substantially improved growth and catalytic performance compared to conventional *E. coli*-based systems, highlighting its suitability for saline environments. To further enhance depolymerization efficiency, an engineered PETase variant was incorporated to generate Vn-FastPETase, which enables accelerated breakdown of PET micro- and nano-particles during cultivation in artificial seawater. The process results in the formation of mono-(2-hydroxyethyl) terephthalate (MHET) and terephthalic acid (TPA), demonstrating effective conversion of polymeric waste into defined chemical intermediates. This study positions *V. natriegens* as a promising chassis for environmentally compatible plastic bioprocessing and provides a proof-of-concept clean biotechnology approach for mitigating marine plastic pollution while contributing to circular plastic management strategies.

### References

1. Thushari, G.G.N. and Senevirathna, J.D.M., "Plastic pollution in the marine environment," *Heliyon*, **6**(8), e04709 (2020).
2. Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., and Oda, K., "A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate)," *Science*, **351**(6178), 1196-1199 (2016).

## E-gasoline 생산 및 활용 관련 기술 동향: 자동차 산업 분야

오세철  
부산대학교

### Introduction to E-fuel Technologies for Both Production and Usage in Automotive Industry

Sechul Oh  
Pusan National University

현대 사회가 직면한 기후 위기 대응을 위한 탄소중립 실현은 단순히 선언적 의미를 넘어, 국가의 에너지 안보와 산업 경쟁력을 결정짓는 핵심 과제로 부상하였다. 이에 따라 국내외 에너지 수요 및 공급망 전반에서는 화석연료 의존도를 획기적으로 낮추기 위한 다양한 저탄소 기술 개발이 활발하게 전개되고 있다. 특히 수송 분야는 전 세계 최종 에너지 소비량의 약 28%를 차지하며, 전체 온실가스 배출량의 16%에 달하는 막대한 비중을 점유하고 있어 [1], 탄소 저감을 위한 기술적 혁신 수요가 그 어느 때보다 빠르게 증가하는 추세이다. 이러한 시대적 요구에 부응하여, 현재 수송 부문의 지배적인 에너지원인 화석연료 사용을 지양하고 재생에너지 기반의 전력을 직접 활용하는 전동화 파워트레인의 보급을 장려하는 강력한 국가별 정책들이 시행되고 있다. 그러나 이러한 전동화 중심의 일변도 전략은 국가별 전력 생산 믹스(Power Mix) 및 전력 그리드의 안정성에 전적으로 의존해야 한다는 태생적인 한계를 지닌다. 이는 자국 내 에너지 자립도가 낮은 국가들에게 에너지 안보 측면의 잠재적 위험 요소로 작용할 수 있으며, 특히 전 생애 주기 평가(LCA, Life Cycle Assessment) 관점에서 볼 때 전력 생산 방식에 따라 전동화 차량이 기존 원유 기반 파워트레인보다 더 높은 온실가스 배출량을 기록할 수 있다는 연구 결과가 다수 보고되었다 [2]. 따라서 전동화의 보완적 수단이자 병행 가능한 기술로서, 기존 내연기관의 인프라와 공급망을 그대로 수용하면서도 탄소 중립적 사이클을 형성할 수 있는 재생합성연료(e-fuel)의 활용 방안이 전 세계적으로 적극 검토되고 있다.

본 연구에서는 국내외에서 진행 중인 선도적인 기술 개발 사례를 면밀히 분석하여, 기존 원유 기반 연료를 실질적으로 대체할 수 있는 e-fuel의 학술적 정의를 명확히 하고, 이를 구현하기 위한 거시적 측면의 기술 개발 방향 및 단계적 활용 전략을 제시하고자 한다. 구체적으로는 단순히 기존 연료 시스템에 물리적으로 혼합하여 사용하는 '드롭인 연료(Drop-in Fuel)'로서의 기초적인 e-fuel 활용을 넘어, 화합물의 분자 구조를 고려한 '연료 설계(Fuel Design)' 기반의 능동적인 엔진 최적화 방안을 제안한다. 특히, 현재 가솔린 엔진이 직면한 열효율 개선의 핵심 과제인 고압축비 조건에서의 이상 연소(Knock) 문제를 해결하기 위해, 뛰어난 내노킹성(Anti-knock quality)을 확보한 e-gasoline의 합성에 집중한다. 이를 실현하기 위해 요구되는 최적의 화학적 조성(Chemical composition)과 합성 공정(Synthesis process), 그리고 엔진 운전 조건에 따른 실질적인 활용 전략을 상세히 논의하고자 한다. 마지막으로, 현재 연구진이 수행하고 있는 실시간 e-fuel 생산 공정의 모사 및 연소 계통 연계 관련 최신 연구 성과를 요약하고, 수송 분야를 넘어서 다양한 산업군에서의 e-fuel 활용 가능성과 탄소 저감 기여도에 대해 심도 있게 논의하고자 한다.

#### 참고문헌

1. Stanford University Precourt Institute for Energy. Energy for Transportation. Understand Energy Learning Hub. <https://understand-energy.stanford.edu/energy-services/energy-transportation> (accessed 2026-03-03).
2. Choi, Wonjae, and Han Ho Song. "Well-to-wheel greenhouse gas emissions of battery electric vehicles in countries dependent on the import of fuels through maritime transportation: A South Korean case study." *Applied energy* 230 (2018): 135-147.

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 공정시스템

(일반 구두발표)

---

2026년 3월 19일(목) 13:00~15:20  
부산 BEXCO 제2전시장 324호

## 재생에너지 연계형 스마트팜의 에너지 최적화 및 환경성, 경제성 평가

이용운\*, 박지선<sup>1</sup>, 조경일  
한국생산기술연구원, <sup>1</sup>연세대학교

### Study on Energy Optimization and Environmental-Economic Assessment of a Renewable Energy-Integrated Smart Farm

YongWoon Lee, JiSeon Park<sup>1</sup>, KyungIl Cho  
Korea Institute of Industrial Technology, <sup>1</sup>Yonsei University

전력 공급 시스템은 기존 중앙집중형 전력망 체계에서 재생에너지원과 마이크로그리드 중심의 에너지 시스템으로 패러다임이 전환되고 있다. 에너지 생산 및 다소비 장치가 연계되는 통합 에너지 시스템에서 실질적인 저탄소 배출 달성을 위해 신재생에너지원의 도입과 활용 최적화 기술 개발의 요구가 증대되고 있다. 기존 에너지 시스템에서 재생에너지의 연계는 안정적인 에너지 공급, 에너지 자립률 100% 달성 및 경제적 타당성 등의 간헐성/변동성 해결이 필요하다. 본 연구에서는 스마트팜의 에너지 자립을 목표로 태양광 에너지를 도입하고, 에너지 효율 극대화 및 환경성·경제성 확보를 고려한 시스템 운영 최적화를 수행하였다.

본 연구의 대상 에너지 시스템은 스마트팜이며 우드펠릿 보일러, 축열조, 팬 코일 유닛(FCU), CO<sub>2</sub> 공급 장치 및 스마트팜으로 구성된다. 스마트팜 내부의 주 열원은 태양광 발전 기반의 히트펌프를 통해 공급되며, 보조 에너지원으로 중앙전력을 사용하게 된다. 스마트팜 내부 온도는 여름철 27°C, 겨울철 18°C로 운영되며, 에너지 자립률 분석을 위해 실 운전데이터와 비교 검증 하였다. 하절기 및 동절기 외기 온도 변화에 따른 히트펌프 가동 특성을 시뮬레이션하기 위해 수치해석을 활용하였으며, 도출된 분석 결과를 실제 태양광 발전량과 비교 분석을 수행하였다. 스마트팜의 에너지 최적화를 위해 기준조건으로 중앙전력을 100%로 사용하는 조건을 설정하였으며, Case1은 태양광 발전과 중앙전력을 사용하는 조건을 선정하였다. Case2,3은 여름과 겨울로 나눠 우드펠릿 보일러와 흡수식 냉동기를 활용하는 조건으로 총 4가지 시나리오에 대해 다양한 분석을 수행하였다.

스마트팜 시스템 전체의 공정 해석은 하절기와 동절기 실측 데이터를 기반으로 진행되었으며, 수치 해석 모델을 활용하여 대기 온도 변화에 따른 스마트팜의 필요 에너지량을 정량화하였다. 4가지 운영 시나리오에 대해 전주기 평가(LCA)와 기술 경제성 분석(TEA)을 수행하였다. LCA의 경우 SimaPro V9.4를 활용하여 석탄, 우드 펠릿, 태양광 패널 등 에너지원별 20년간의 CO<sub>2</sub> 배출량을 평가하였다. 경제성 분석은 비용-편익 비율(B/C Ratio), 순현재가치(NPV), 내부수익률(IRR), 투자 회수 기간(Payback Period)을 지표로 활용하였다. 연구 결과, 기존 중앙 집중형 전력망 시스템 대비 재생에너지 기반의 열 및 에너지 시스템 교체 모델이 최적 운영 시나리오에서 충분한 타당성을 가짐을 입증하였다.

## Multi-level Predictive Modeling of Rotating Packed Bed (RPB) Contactors for Enhanced Carbon Capture

Boram Gu

School of Chemical Engineering, Chonnam National University

Rotating packed bed (RPB) technology, also known as HiGee, is a candidate for process intensification in amine-based carbon capture. By using centrifugal force instead of gravity, RPBs can achieve significantly higher mass transfer than conventional columns [1]. This allows for a reduction in equipment size approximately one-third while maintaining similar absorption levels [2]. However, the complexity of high-speed fluid interactions within the packing makes it difficult to predict performance using standard empirical correlations.

This study develops a predictive modelling framework that couples different scales of fluid behaviour. The methodology starts at a micro-level, calculating the force balances and trajectories of liquid droplets as they collide with the packing. This bottom-up approach accounts for how liquid jets apart into thin films and small droplets, which directly determines the available surface area for CO<sub>2</sub> capture. These small-scale descriptions are then integrated into a macro-level model that tracks heat and mass transfer throughout the entire bed. By coupling these different levels, the model can translate localised droplet behaviour into key performance indicators, such as liquid holdup, flooding limits and overall absorption efficiency. Validated against experimental data and computational fluid dynamics, this mechanistic approach provides a versatile tool for evaluating new packing design and optimising operating conditions for more efficient carbon capture.

### References

1. Wang, Z., Yang, T., Liu, Z., Wang, S., Gao, Y. and Wu, M., 2019. Mass transfer in a rotating packed bed: a critical review. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 139, pp.78-94.
2. Adamu, A., Russo-Abegão, F. and Boodhoo, K., 2020. Process intensification technologies for CO<sub>2</sub> capture and conversion—a review. *BMC Chemical Engineering*, 2(1), pp.1-18.

## **Biodiesel Production from Microalgae through Thermally Induced Non-Catalytic Transesterification: Techno-Economic Assessment**

Dongho Choi <sup>1</sup>, Junyoung Park <sup>1</sup>, Eilhann E. Kwon <sup>2</sup>, and Hyungtae Cho<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Kyung Hee University

<sup>2</sup>Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

Thermally induced non-catalytic transesterification was proposed as a promising alternative to the conventional catalytic transesterification due to its tolerance for impurities in microalgal oil. However, its industrial viability remains uncertain owing to intensive energy requirements. To address this gap, this study assesses the techno-economic feasibility of the proposed approach at an industrial scale. Process simulation revealed that high operating temperature of the thermally induced non-catalytic transesterification leads to the increased thermal energy demand and substantial exergy destruction compared to catalytic pathway. Despite these thermodynamic challenges, the proposed case achieved a lower levelized cost of product (LCOP), compared to the base case. Furthermore, sensitivity analysis confirmed the economic robustness of the proposed case, particularly using thermally induced non-catalytic transesterification. These findings demonstrate that thermally induced non-catalytic transesterification in biodiesel production from microalgae can be a techno-economically superior alternative to the conventional catalytic transesterification.

### **References**

## 공정시스템 관점에서의 친환경 메탄올 생산 루트 탐색

박진우\*  
동국대학교

메탄올은 친환경성이 높은 연료로써 현재도 선박 및 내연기관 등에 활발히 사용되고 있으며, 2030년 메탄올 수요는 약 1억 3,879만 톤에 달할 것으로 예상되고 있다. 메탄올은 주로 메테인 혹은 수소를 활용하여 만들어지게 되는데, 그린 메탄올은 기존 그레이 메탄올 생산 방식의 5배 이상의 비용이 들므로써 가격 경쟁력 면에서 어려움을 겪고 있고, 블루 메탄올 또한 기존 그레이 메탄올보다 2배 가량 높은 가격을 보이고 있다. 이러한 경제적 문제점을 완화하고자, 각각의 공정에서 발생하는 부산물을 이용하여 경제성을 극대화하거나 효율적인 공정 구조를 만드는 등 공정시스템 관점에서 친환경 메탄올 생산 가격을 낮추고자 한 연구 사례들을 본 발표에서 소개하고자 한다. 그린 수소 혹은 바이오매스를 원료로 한 그린 메탄올과 천연가스를 원료로 한 블루 혹은 로우카본 메탄올에 대한 공정 분석을 중점적으로 소개하고자 하며, 특히 본 연구에서는 부산물 활용에 있어 신규 공정을 접목하여 보다 저렴한 친환경 메탄올 생산 루트 방식을 소개하고자 한다. 이를 통해 높아지는 메탄올 수요에 있어, 친환경적이면서도 경제성이 개선된 메탄올 생산 공정 개발에 기여 가능하리라 기대한다.

## EO 모델링, 최적화 기반 공정 청정기술 구현 전략

김종우\*

인천대학교 에너지화학공학과

본 연구는 Equation-Oriented(EO) 모델링-최적화를 중심으로 한 공정 기반 청정기술 구현 전략을 제안한다. EO는 공정 전체를 하나의 연립방정식/최적화 문제로 정식화하여 재순환 등 복잡한 시스템에서도 모사와 설계를 동시에 수행하며, 순차모듈(SM) 기반 접근에서 혼한 절단(tear) 및 반복수렴/유한차분 그라디언트 한계를 구조적으로 완화한다. 본 방법을 두개의 대표 공정에서 검증한다. 첫째, 중수 생산을 위한 CIRCE(증기개질-전기분해-LPCE 결합) 공정에 대해, LPCE 컬럼의 반응·전달현상을 포함한 1차 원리 기반 모델을 EO로 통합하고 컬럼 높이, 운전압력을 경제 목적함수(CAPEX+OPEX) 하에서 동시 최적화함으로써, 기존 대비 총비용 11-15% 수준의 절감 가능성을 제시한다. 둘째, CaO 기반 Calcium Looping(CaL) CO<sub>2</sub> 포집 공정에서는 입자-유동-장치-공정 스케일을 연결하는 멀티스케일 EO 모델(특히 기존 연구에서 단순화되던 calciner의 엄밀 모델 포함)을 구축하고, 운전변수와 기하변수(직경 등)를 함께 최적화하여 99.6% 포집효율과 함께 열부하 저감(약 12.3%) 및 연간비용 감소(약 0.49%)의 트레이드 오프 해를 도출한다. 결론적으로, EO 프레임워크 하에서 엄밀한 물리 모델의 멀티스케일 통합을 통해 경제성-성능 동시 최적화를 수행할 수 있다는 것을 보일 수 있다. 이 프레임워크를 확장하여 공정 기반 청정 기술의 최적 설계를 수행할 수 있다.

## 청정에너지 생산을 위한 유동층 반응기 설계 및 스케일업: 실험, 시뮬레이션, 모델링 통합 연구

김준영<sup>1,\*</sup>

가톨릭대학교 바이오메디컬화학공학과/인공지능학과<sup>1</sup>

본 연구는 청정에너지 생산 효율 극대화를 목표로 유동층 반응기의 통합 설계 및 스케일업 전략을 제시한다. 연구는 반응기 내 다상 유동과 분리 거동에 대한 정량적 해석과, 모델 기반 설계를 통한 공정 확장이라는 두 축을 중심으로 수행되었다. 입자 분리 및 기-고기-액 혼합 특성을 실험적으로 규명하고, 이를 기반으로 반응기 내 촉매 분포와 물질전달 효율을 제어할 수 있는 설계 인자를 도출하였다. 또한 기계적·동역학적·열역학적 모델을 통합한 다중 스케일 모델링 체계를 구축하여 실험실 규모 데이터를 파일럿 규모로 확장하는 스케일업 방법론을 확립하였다. 자체 개발 해석 코드와 ASPEN Plus를 연계한 공정 시뮬레이션을 통해 가스화 및 케미컬 루핑 연소 공정의 최적 운전 조건을 도출하고, 실제 플랜트 데이터와 비교 검증하였다. 더 나아가 머신러닝 기반 예측 모델을 활용하여 운전 변수와 수소 생산 수율 간의 비선형 상관관계를 규명하였으며, 기술경제성 분석과 전과정 평가를 통해 상용화 가능성을 정량적으로 평가하였다. 본 강연에서는 실험-모델-디지털 최적화를 통합한 차세대 유동층 반응기 설계 프레임워크를 제시한다.

## 에너지 집약산업 LCA 기술개발 현황

변재원\*

전남대학교 석유화학소재공학과

기후 위기의 가속화와 탄소국경조정제도 (Carbon Border Adjustment Mechanism; CBAM), 기업 지속가능성 보고 지침 (Corporate Sustainability Reporting Directive; CSRD) 등 글로벌 환경 규제의 강화에 따라, 철강, 석유화학, 시멘트, 반도체 등 대한민국 경제의 중추를 담당하는 에너지 집약산업의 탄소 중립은 국가 경쟁력과 직결된 생존 과제가 되었다. 이러한 산업군이 직면한 환경 규제에 선제적으로 대응하고 제품의 환경 경쟁력을 정량적으로 입증하기 위한 핵심 도구로서 전주기 평가 (Life Cycle Assessment; LCA) 기술의 중요성이 그 어느 때보다 강조되고 있다. 본 발표에서는 대표적인 에너지 집약산업 (석유화학, 시멘트, 철강 분야)의 저탄소 전환을 뒷받침하는 LCA 기술의 최신 개발 현황과 산업별 적용 사례, 그리고 미래 전략을 논의하고자 한다.

## Novel process design for heat pump-assisted clean hydrogen production from organic waste enhancing energy and economic potential

Subeen Wi, Eunhye Song<sup>1</sup>, Seoyul Yang, Soo Young Kang, Hyungwoon Song, Jonghun Lim\*

Hydrogen Energy Solution Center, Institute for Advanced Engineering, 175-28, Goan-ro 51beon-gil, Baegam-myeon, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

<sup>1</sup>Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Republic of Korea

Biogas-derived hydrogen (H<sub>2</sub>) is a sustainable and regionally available energy source. To enhance its energy and economic efficiency, improving the conversion rate during anaerobic digestion is crucial. Therefore, this work designed the heat pump-assisted H<sub>2</sub> production process from the organic waste to enhance the energy and economic potential. To design the proposed process, a process model was developed and it mainly composed of following five steps : (1) heat pump-assisted anerobic digestion, (2) biogas upgrading, (3) H<sub>2</sub> production, (4) CO<sub>2</sub> utilization and (5) H<sub>2</sub> compression and supply. Then to demonstrate the economic feasibility of the proposed heat pump assisted clean H<sub>2</sub> production process, a detailed techno-economic analysis (TEA) was conducted based on the simulation results. Also, the economic feasibility of proposed process by various country is addressed by case study. The results show that the produced biogas is increased by 81% by installing the heat pump in anerobic digestion and also the H<sub>2</sub> production rate can increase by 41%. Furthermore, the TEA results indicate that the total annualized cost (TAC) can be reduced by 8% due to increased revenues from H<sub>2</sub> and liquefied CO<sub>2</sub> production.

### References

1. Abatzoglou, N., and Boivin, S., “ A review of biogas purification processes,” *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3(1), 42–71 (2009).
2. Farghali, M., Osman, A. I., Umetsu, K., and Rooney, D. W., “ Integration of biogas systems into a carbon zero and hydrogen economy: a review,” *Environ. Chem. Lett.*, 20(5), 2853–2927 (2022).
3. Gao, Y., Jiang, J., Meng, Y., Yan, F., and Aihemaiti, A., “ A review of recent developments in hydrogen production via biogas dry reforming,” *Energy Convers. Manag.*, 171, 133–155 (2018).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 자원순환

(학생 구두발표 I)

---

2026년 3월 19일(목) 09:00~10:20  
부산 BEXCO 제2전시장 321+322호

## Sequential oxidative degradation and mineralization of polyethylene, polypropylene, and polystyrene by mealworm gut and frass microbial consortia

Suleman Shahzad<sup>1</sup>, Sandesh Pandey<sup>1</sup>, Fida Hussain<sup>1</sup>, Aparna Sharma<sup>1</sup>, Syed Ejaz Hussain Mehdi<sup>1</sup>, Woochang Kang<sup>1</sup>, and Sang-Eun Oh<sup>1,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Biological Environmental, Kangwon National University  
Chuncheon-si, Gangwon-do, Hyoja-2-dong, 24341, Republic of Korea

### Abstract

Plastic pollution from polyethylene (PE), polypropylene (PP), and polystyrene (PS) persists due to their resistance to degradation. Mealworms (*Tenebrio molitor*) can ingest these plastics, yet the fate of partially degraded fragments and the role of frass-associated microbiota remain poorly understood. This study investigates the molecular mechanisms by which gut and frass microbiota degrade PS, PP, and PE. Microbial communities isolated from the gut and frass of plastic-fed mealworms were incubated with plastic films in sealed aerobic microcosms for 60 days, during which oxygen consumption and CO<sub>2</sub> production were monitored to quantify biodegradation. Gut microbiota degraded PS, PP, and PE by up to 13.6%, 11.6%, and 9.8%, respectively, while frass microbiota achieved degradation of 13.3%, 8.9%, and 7.4%. FTIR and SEM analyses confirmed polymer modification, with FTIR revealing new C–O, C=O, and O–H functional groups indicative of oxidative processes, and SEM showing surface erosion and biofilm formation. Respiratory quotients (RQ < 0.8) indicated partial aerobic mineralization dominated by oxidative depolymerization rather than complete CO<sub>2</sub> conversion. Microbial profiling using 16S rRNA sequencing and PICRUSt2 revealed higher taxonomic diversity and enrichment of oxidative degraders, including *Pseudomonas* and *Rhodococcus*, in gut communities, whereas frass communities retained fermentative taxa that continued processing degradation intermediates. Predicted metabolic pathways included alkane monooxygenases, dehydrogenases, and β-oxidation enzymes involved in hydrocarbon degradation. Overall, mealworm gut and frass microbiota operate as a two-stage biodegradation system, with the gut initiating oxidative depolymerization and frass sustaining degradation post-egestion, highlighting the potential of insect-associated microbial consortia for plastic waste remediation.

**Key words:** *Tenebrio molitor*; gut and frass microbiota, hydrocarbon metabolism, biofilm formation, plastic degradation.

## 가축분퇴비 부숙도 평가를 위한 FRI 기반 DOM 형광 특성 변화 분석

윤다운, 박지은<sup>1</sup>, 정유진<sup>2</sup>, 장순웅, 이윤경<sup>3</sup>, 허진<sup>3</sup>, 정우진\*  
경기대학교 사회에너지시스템공학과, <sup>1</sup>세종대학교 환경융합공학과, <sup>2</sup>국립환경과학원,  
<sup>3</sup>세종대학교 환경융합공학과, 지구환경연구소

### Analysis of changes in FRI-based DOM fluorescence characteristics for Compost Maturity assessment during manure composting

Daeun Yoon, Jieun Park<sup>1</sup>, EuGene Chung<sup>2</sup>, SoonWoong Chang, Yunkyung Lee<sup>2</sup>, Jin Hur<sup>3</sup>,  
WooJin Chung\*

Department of Civil and Energy System Engineering, Kyonggi University, <sup>1</sup>Department of  
Environment and Energy, Center for Earth and Environment Research, Sejong University,  
<sup>2</sup>National Institute of Environmental Research, <sup>3</sup>Department of Environment and Energy, Center  
for Earth and Environment Research, Sejong University

국내 육류 소비 증가에 따라 연간 약 5천만 톤의 축산분뇨가 발생하고 있으며, 이 중 70% 이상이 가축분퇴비로 생산되어 농경지에 활용되고 있다. 가축분퇴비는 토양 유기물 공급, 양분 제공 및 토양 구조 개선 등 토양 비옥도와 작물 생산성을 유지하는 데 중요한 역할을 한다. 그러나 미부숙 가축분퇴비는 식물 성장과 종자 발아를 저해할 수 있어 정확한 부숙도 평가가 필수적이다. 최근 용존유기물(Dissolved Organic Matter, DOM)의 구조적 특성을 선택적·비과파적으로 평가할 수 있는 3차원 여기-방출 행렬(3D-EEM)과 형광 영역 적분(Fluorescence Regional Integration, FRI) 분석 기법에 대한 관심이 증가하고 있으나, 퇴비화 과정에서 FRI를 활용한 DOM 형광 특성 변화에 대한 체계적인 연구는 제한적인 실정이다. 이에 본 연구에서는 FRI 분석을 적용하여 퇴비화 과정 중 DOM의 형광 특성과 구조적 변화를 정량적으로 규명하고자 하였다. 계분과 우분을 톱밥과 8:2 비율로 혼합하여 스크류 교반식 자동 퇴비화 장치에서 퇴비화를 수행하였으며, 퇴비화 진행에 따른 DOM 형광 특성 변화를 분석하였다. FRI 분석 결과, 퇴비화 초기에는 Region 1, Region 2(Tyrosine-like, Tryptophan-like) 및 Region 4(Soluble microbial by-product)가 우세하였으며, 부숙이 진행됨에 따라 Region 3, Region 5 (Fulvic-like, Humic-like) 성분의 비율이 상대적으로 증가하였다. 또한, HIX(Ohno, 2002) 값은 계분과 우분 퇴비 모두에서 시간 경과에 따라 유의적으로 증가하여 유기물이 안정화됨을 확인하였다. 본 연구 결과는 FRI 분석이 퇴비화 공정에서 DOM 구조 변화를 정량적으로 평가할 수 있는 유효한 도구임을 보여주며, 향후 퇴비화 공정 관리 및 부숙도 평가를 위한 과학적 지표로 활용될 수 있음을 시사한다.

#### 참고문헌

1. Yoo, J., "Recent advances in livestock manure biochar Development in Korea: A review." Waste Management, 210, 115208, (2026)
2. Zhang, F., Li, Y., Xiong, X., Yang, M., & Li, W., "Effect of composting on dissolved organic matter in animal manure and its binding with Cu.", The Scientific World Journal, 2012(1), 289896, (2012).

#### 사사

본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2025-04-02-123). 이에 감사드립니다.

## 해조류 바이오매스와 생분해성 폐플라스틱 빨대의 공동수열액화 반응 특성 연구

정승목<sup>1</sup>, 차재원<sup>1</sup>, 김정훈<sup>2</sup>, 이도연<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>국립한밭대학교 환경공학과, <sup>2</sup>국립한밭대학교 건설환경공학과\*

### Co-hydrothermal Liquefaction of Seaweed Biomass and Biodegradable Waste Plastic

Seungmook Jung<sup>1</sup>, Jaewon Cha<sup>1</sup>, Jung-Hun Kim<sup>2</sup>, Doyeon Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of and Environmental Engineering, Hanbat National University,

<sup>2</sup>Department of Civil and Environmental 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 화학 물질을 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 팽생이모자반 (*Sargassum Horneri*)을 원료로 선정하였으며, 생분해성 플라스틱인 PLA (Polylactic Acid)와의 Co-HTL 반응 특성을 체계적으로 분석하였다. 실험은 TGA (Thermogravimetric Analysis) 분석을 통해 팽생이모자반 그리고 PLA의 열분해 특성과 주요 분해 온도를 파악하였으며 이를 기반으로 260°C에서 320°C까지의 반응 온도 범위에서 실험을 수행하였다. 단일 원료 조건과 세 가지 혼합 조건(1:1, 1:3, 3:1, w/w 비율)을 설정하여 반응 온도와 혼합 비율이 생성물 특성에 미치는 영향을 비교하였고 최적 혼합비를 바탕으로 Solvent 비율에 따른 반응 특성을 파악하였으며 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, 팽생이모자반의 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 자원 순환형 환경 기술 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. Guo, B., Yang, B., Su, Y., Zhang, S., Hornung, U., and Dahmen, N., "Screening and Optimization of Microalgae Biomass and Plastic Material Coprocessing by Hydrothermal Liquefaction," ACS ES&T Engineering, 2(1), 65-77 (2022).
2. Yuan, C., Optimization of hydrothermal co-liquefaction of seaweeds with lignocellulosic biomass, Energy, (2019).
3. Allen, M. J., and others, "Continuous Hydrothermal Liquefaction of Sargassum (seaweed) material and generating a bio-oil," ChemRxiv, (2024).
4. El-Hefnawy, M. E., et al., "Integrated approach for enhanced crude bio-oil yield from Co-HTL of microalgal biomass and agar-free seaweed residue," Journal of Cleaner Production, (2023).

## Upcycling of Spent $\text{LiCoO}_2$ as a Catholyte for Zinc-Cobalt Redox Flow Batteries

Daeun Kim<sup>1</sup>, Minjoon Park\*

Research Center of Energy Convergence Technology, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Republic of Korea

Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Republic of Korea

Advanced Energy Major, College of University, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Republic of Korea

Eco-friendly Battery Engineering, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Republic of Korea

With the increasing use of lithium-ion batteries (LIBs), the proper treatment of spent batteries and resource recycling have become important issues. In particular, cobalt used in LIB cathode materials is a key metal resource with high recycling value due to its scarcity, high cost, and supply chain instability. Conventional battery recycling methods, such as pyrometallurgical and hydrometallurgical processes, have the disadvantages of consuming a lot of energy and generating hazardous chemicals leading to environmental pollution. Therefore, there is a need for a more efficient and eco-friendly recycling process.

In this study, we propose an upcycling method to directly recycle  $\text{LiCoO}_2$  (LCO) recovered from LIBs as the catholyte in aqueous zinc-cobalt redox flow batteries (Zn-Co RFBs). Spent LCO powder recovered from degraded pouch cells was dissolved in HCl solution at 120 °C for 24 h to leach  $\text{Co}^{2+}$  ions. After removing the insoluble residues by vacuum filtration, the resulting  $\text{Co}^{2+}$ -containing solution was recycled as catholyte for the Zn-LCO RFB. The spent LCO catholyte achieved approximately 90% coulombic efficiency and 57% energy efficiency over 60 cycles under optimized 1.0 M HCl supporting electrolyte conditions. After operation of the Zn-LCO RFB, cobalt was selectively recovered from the used catholyte through a simple pH adjustment with NaOH solution, resulting in the precipitation of  $\text{Co}_3\text{O}_4$  while lithium ions remained in solution. These results demonstrate the feasibility of implementing a closed-loop upcycling process that enables sequential cobalt recovery and the potential reutilization of lithium. Overall, this work presents a practical and sustainable upcycling strategy that bridges lithium-ion battery recycling and redox flow battery technology, facilitating the development of circular energy storage systems.

### References

1. Han, D., et al., Direct Integration of Spent  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  with High Voltage Aqueous Zinc-Manganese Redox Flow Batteries as a Practical Upcycling Process, *Small*, 21(32), 2500787 (2025).
2. Kocyigit, N., et al., A Novel Vanadium/Cobalt Redox Couple in Aqueous Acidic Solution for Redox Flow Batteries, *Int. J. Energy Res.*, 44(1), 411–424 (2020).
3. Cerrillo-Gonzalez, M. del M., et al., Acid Leaching of  $\text{LiCoO}_2$  Enhanced by Reducing Agent. Model Formulation and Validation, *Chemosphere*, 287, 132020 (2022).

## The recycling of used LFP cathode active material for high-voltage redox flow batteries

Seongbin Kang<sup>1</sup>, Minjoon Park<sup>1,2,3\*</sup>

*Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Republic of Korea*

*Research Center of Energy Convergence Technology, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Republic of Korea*

*Department of Nanoenergy Engineering, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Republic of Korea*

\*corresponding author: [mjpark@pusan.ac.kr](mailto:mjpark@pusan.ac.kr), telephone: +82-51-510-3184

### Abstract

Lithium-ion batteries (LIBs) have become the primary power source for portable electronic devices, electric vehicles, and large-scale energy storage systems due to their high energy density, long cycle life, and lightweight characteristics. Due to the rapid increase in the use of lithium-ion batteries (LIBs), extensive research has been conducted on recycling technologies to promote environmental protection and ensure the sustainable supply of resources. Conventional recycling methods for LIBs, such as pyrometallurgical and hydrometallurgical processes, are energy-intensive, environmentally problematic, and involve complex procedures. In particular, the recycling process requires substantial cost and time to obtain high-purity precursors, and the focus has primarily been on the recovery of expensive metals such as Li, Ni, and Co. However, despite its widespread adoption as a cathode material, lithium iron phosphate (LFP) has received comparatively little attention in terms of recycling strategies.

In this study, an electrochemical upcycling approach was proposed, in which lithium iron phosphate (LFP) cathode materials recovered from spent lithium-ion batteries were applied to a zinc–LFP redox flow battery (Zn–LFP RFB) system. By employing a dual-membrane strategy that combines an alkaline Zn anolyte with an acidic LFP catholyte, a high cell voltage of ~1.9 V was achieved. Unlike pyrometallurgical processes, which require high temperatures and generate substantial CO<sub>2</sub> emissions, or hydrometallurgical processes, which produce hazardous chemical waste, the proposed method operates with the electrolyte itself serving as a reactive medium, thereby eliminating the need for extreme heat or external energy input. Furthermore, this hybrid electrochemical process integrates the leaching efficiency of hydrometallurgy with the simplicity of direct recycling, effectively simplifying conventional recycling procedures. In addition, iron species extracted from LFP enable high-voltage operation in acidic electrolytes, offering a promising alternative to conventional anode materials.

### Acknowledgments

This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE), Korea, under the “Global Industrial Technology Cooperation Center(GITCC) program” supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT).(Task No. P0028923). This work was financially supported by grants from the National Research Foundation of the Republic of Korea, funded by the Ministry of Education (Grant No. RS-2025-25415557)

## Highly selective production of gasoline-range hydrocarbons via hydroconversion of polyolefins over Ru/CeO<sub>2</sub> and BEA hybrid catalysts

Junho Suh<sup>1</sup>, Hyeongdong Jung<sup>1</sup>, Joonkeol Yoon<sup>1</sup>, Jae-Soon Choi<sup>2</sup>, Jungup Bang<sup>2</sup> and Do Heui Kim<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>School of chemical and biological engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-Gu, Seoul, 08826

<sup>2</sup>Catalyst R&D, LG Chem, 188 Munji-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34122

Under the growing demand for sustainable plastic lifecycle, hydroconversion of polyolefin is a promising strategy in catalytic recycling of plastic wastes into fuel-range hydrocarbons. Ruthenium (Ru)-based hydrogenolysis catalysts are active in the degradation of polyolefins, but hydrogenolysis over monofunctional catalyst requires long reaction time and produces large amount of low-value methane and broad product distribution with low selectivity [1]. Introducing the concept of hydrocracking under acid catalyst is one way to mitigate this problem [2]. In this study, bifunctional hybrid catalyst of Ru/CeO<sub>2</sub> and BEA zeolite was found to be highly active in LDPE hydroconversion. Synergistic effect between Ru/CeO<sub>2</sub> and BEA resulted in the selective production of gasoline range hydrocarbons (95.4 %) with a large fraction of branched products and suppressed methane yield (<0.8%). Also, an adequate mixing ratio of Ru/CeO<sub>2</sub> and BEA is crucial not only in maximizing the gasoline yield but also to ensure the high quality of liquid products. Ru/CeO<sub>2</sub> and BEA hybrid catalyst demonstrated highest productivity of 3451 g<sub>C5-C12</sub>/g<sub>Ru</sub>·h among the recently reported Ru-based hydroconversion catalysts, and this was even higher than the Pt and Ir-based hydrocracking catalysts in the literatures. BEA addition into Ru/CeO<sub>2</sub> resulted in the change in reaction pathway from hydrogenolysis to hydrocracking, which is relevant in selective gasoline production from the minimum reaction temperature of 250°C. When the activity of Ru/CeO<sub>2</sub> with various zeolites and acidic catalysts were evaluated, not just the high surface acidity but the combination of three-dimensional large pore structure with the acidity was essential in selective gasoline production. Moreover, Ru/BEA was less active in LDPE conversion and gasoline production and the separation of Ru metal site and acid site was found to be more effective in LDPE hydroconversion. These insights discussed in this study could contribute to the efficacious design of bifunctional catalysts, resulting in the efficient production of fuel-range hydrocarbons from polyolefins with heterogeneous catalysts.

### References

1. Julie E. Rorrer, Gregg T. Beckham, and Yuriy Román-Leshkov\*, “Conversion of Polyolefin Waste to Liquid Alkanes with Ru-Based Catalysts under Mild Conditions,” *JACS Au*, 1, 8 (2021)
2. Sibao Liu, Pavel A. Kots, Brandon C. Vance, Andrew Danielson, and Dionisios G. Vlachos\*, “Plastic waste to fuels by hydrocracking at mild conditions,” *Sci. Adv.*, 7, eabf8283 (2021)

## **Development of Technology for Recovering Metal Resources and Producing Energy from Spent Cathode Materials Using an Environmentally Friendly Microbial Fuel Cell System**

Yeonseo Jang<sup>1</sup> and Haesung Jung<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Battery and Chemical Engineering, Changwon National University

The rapid growth of Electric Vehicles (EVs), Energy Storage Systems (ESS), and small electronic devices has led to a significant increase in the demand for lithium-ion batteries, raising concerns over their end-of-life treatment and resource recovery. Spent batteries contain economically valuable metals such as cobalt (Co), nickel (Ni) and Lithium (Li), but improper disposal can lead to environmental contamination due to the leaching of heavy metals. Conventional pyrometallurgical and hydrometallurgical recycling processes using high temperature or strong acid solutions involve high energy consumption and cause significant environmental burdens. In this study, we adopted a Microbial Fuel Cell (MFC) system as an eco-friendly approach to recover valuable metals from spent cathode materials through microbial metabolism and redox reactions, while simultaneously generating energy via electrochemical processes. We used an H-type dual-chamber MFC and conducted experiments to investigate metal leaching behavior under different operating conditions, including substrate concentration and solid-to-liquid ratio. As a result, under the 3.5 g/L solid-to-liquid ratio condition, Ni, Co, and Mn exhibited maximum leaching rates of 7.1 %, 6.1 %, and 5.2 %, respectively. Moreover, the formation of manganese phosphate-based precipitates was observed on the electrode surface. Therefore, this study demonstrates the potential of MFC-based processes as an eco-friendly alternative for metal recovery from spent cathode materials, while reducing the environmental burden compared to conventional metallurgical methods.

## 폐배터리 재활용 공정 부산물로부터 비중선별을 활용한 유가 금속 분리 연구

문서진<sup>1,2</sup>, 이원재<sup>1</sup>, 서주범<sup>1</sup>, 정해성<sup>2</sup>, 한성수<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 자원활용연구본부 자원회수연구센터,

<sup>2</sup>창원대학교 이차전지화학공학전공

### Gravity Separation of Valuable Metals from Recycling Process By-products of Spent Lithium Ion Batteries

Seojin Moon<sup>1,2</sup>, Wonjae Lee<sup>1</sup>, Joobeom Seo<sup>1</sup>, Haesung Jeong<sup>2</sup>, Seongsoo Han<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Resources Utilization Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources(KIGAM), 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Republic of Korea,

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering Changwon National University, Changwon 51140, Republic of Korea

#### 초록

배터리는 탄소 중립 정책으로 인해 수요가 급증하고 있으나, 제한된 수명에 의해 폐배터리 발생량 또한 지속적으로 증가하고 있어 재활용의 필요성이 커지고 있다. 폐배터리 재활용 공정에서는 배터리 구성 물질의 효율적인 분리가 필수적이다. 폐배터리 재활용 공정은 일반적으로 기계적 처리 공정을 통해 블랙매스를 제조하는 전처리 공정과 블랙매스를 화학적 공정을 통해 금속 화합물 형태로 회수하는 후처리 공정으로 구분된다. 그러나 전처리 공정에서 발생한 블랙매스 외 공정 부산물은 여전히 재활용되지 못하고 있으며, 부산물에는 여전히 구리와 알루미늄이 높은 함량으로 존재한다. 따라서 본 연구에서는 폐배터리 재활용 공정에서 발생하는 공정 부산물을 대상으로 구리와 알루미늄을 분리하고자 하였다. 구리와 알루미늄의 비중은 각각 8.9와 2.7로 공기의 부력을 이용하는 비중선별기인 에어 지그재그 선별기를 적용하였다. 주요 공정 변수는 입도 구간과 공기 유속으로 설정하였다. 공정 조건 변화에 따른 입자 거동을 분석한 결과, 알루미늄보다 높은 비중을 가지는 구리가 float로 이동하는 경향을 확인하였으며, 입자 크기가 작은 +355 - 500  $\mu\text{m}$ 보다 입자 크기가 큰 +1000 - 1400  $\mu\text{m}$ 에서 더 높은 분리 효율이 나타났다. 이는 SEM-EDS 분석을 통해 알루미늄에 여전히 미탈착된 양극활물질이 존재하며, 음극활물질이 대부분 탈착된 구리에 비해 질량이 증가함에 따라 구리가 float로 향하게 된 것으로 해석된다. 또한, 힘-균형 모델 식을 이용한 입자 거동 예측을 통해 입자 크기가 작아질수록 구리와 알루미늄 간 입자 거동 변화를 유도하는 힘의 차이가 감소하는 경향을 확인하였다. 이러한 결과는 폐배터리 재활용 공정에서 비중선별 공정을 통해 구리, 알루미늄의 분리 가능성을 제시하며, 기존에 재활용이 되지 않던 공정 부산물의 재활용 방안으로 제안할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 폐배터리, 공정 부산물, 비중선별, 구리, 알루미늄

\* Corresponding author : 한성수, sshan@kigam.re.kr

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 대기환경

(학생 구두발표 II)

---

2026년 3월 19일(목) 09:00~09:30  
부산 BEXCO 제2전시장 323호

## Improving the sulfur resistance of the bulk vanadium oxide catalyst for low-temperature NH<sub>3</sub>-SCR via zeolite mixing

Hongbeom Park<sup>1</sup>, Hyun Sub Kim<sup>1</sup>, Hyeongdong Jung<sup>1</sup>, Sung Min Kim, Jihoon Cha, Inhak Song<sup>2\*</sup> and Do Heui Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Seoul National University, <sup>2</sup>Korea University

Developing the NH<sub>3</sub>-SCR catalyst with substantial low-temperature catalytic activity and robust resistance to sulfur poisoning is crucial for efficient control of NO<sub>x</sub> emissions. A study by Inomata et al. [1] shows that bulk vanadium oxide (VO<sub>x</sub>) catalyst has advantage over traditional NH<sub>3</sub>-SCR catalysts due to its superior low-temperature catalytic activity, yet no thorough study regarding the deactivation process of the VO<sub>x</sub> catalyst due to SO<sub>2</sub> and the strategy to alleviate the deterioration of the catalyst has been conducted. A previous study by Song et al. [2] previously reported that a highly elevated sulfur resistance of the V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> (VWTi) catalyst can be achieved by physical mixing of the zeolite, which induces migration and trapping of ammonium bisulfate (ABS) species formed on the catalyst. In this study, the deactivation behavior of the VO<sub>x</sub> catalyst has been investigated, and a similar method has been applied on the VO<sub>x</sub> catalyst to improve the sulfur resistance of the catalyst.

The deactivation rate of the VO<sub>x</sub> catalyst is notably higher in the initial stage, which originates from the rapid formation and saturation of ABS species on the catalytic surface. This result is further confirmed by the TPD-MS analysis, which verifies the existence of the ABS species formed on the catalyst. Compared to the bare VO<sub>x</sub> catalyst, the zeolite-mixed VO<sub>x</sub> catalyst shows significantly lower deactivation rate and maintains high catalytic activity after exposure to SO<sub>2</sub>. This result demonstrates that the mechanical mixing of zeolite also effectively enhanced the sulfur resistance of the VO<sub>x</sub> catalyst. The TEM-EDS analysis confirms the migration of ABS from the VO<sub>x</sub> to the zeolite, similar to the case of the VWTi catalyst physically mixed with zeolite. Our findings highlight the deactivation behavior of the VO<sub>x</sub> and zeolite-mixed catalyst and the effect of zeolite mixing on the sulfur resistance of the VO<sub>x</sub> catalyst, which further demonstrated the potential applicability of the mechanical mixing method to a wider range of catalysts to enhance their sulfur resistance.

### References

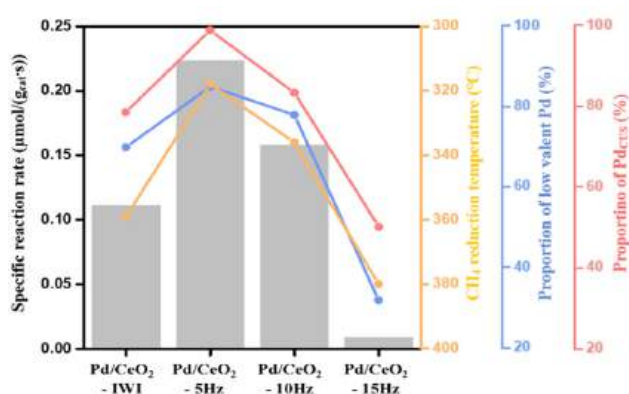
1. Y. Inomata, S. Hata, M. Mino, E. Kiyonaga, K. Morita, K. Hikino, K. Yoshida, H. Kubota, T. Toyao, K.-i. Shimizu, M. Haruta, T. Murayama, "Bulk Vanadium Oxide versus Conventional V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub>:NH<sub>3</sub>-SCR Catalysts Working at a Low Temperature Below 150 °C", ACS Catal., 9, 9327–9331 (2019).
2. I. Song, H. Lee, S.W. Jeon, I.A.M. Ibrahim, J. Kim, Y. Byun, D.J. Koh, J.W. Han, D.H. Kim, "Simple physical mixing of zeolite prevents sulfur deactivation of vanadia catalysts for NO<sub>x</sub> removal", Nat. Commun., 12 (2021).

## Enrichment of coordinatively unsaturated Pd sites in Pd/CeO<sub>2</sub> via facile mechanochemical synthesis for efficient methane oxidation

Gyu Hyun Jang, Dong Chan Park, Jun Hee Yoon, Do Heui Kim\*

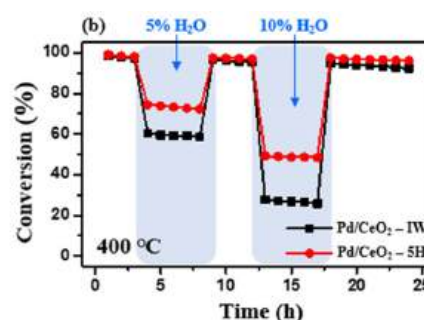
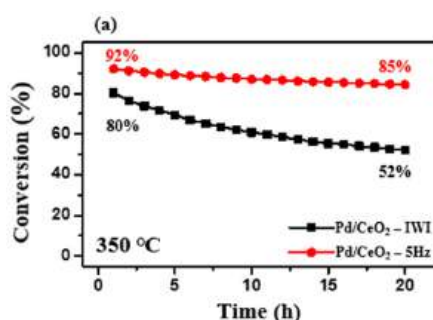
Department of Chemical and Biological Engineering, Institute of Chemical Processes,  
Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

Methane, the main component of natural gas, is both a promising clean energy carrier and a potent greenhouse gas. Catalytic combustion of methane has therefore attracted significant attention as an efficient strategy to mitigate methane emissions. Among various catalytic systems, Pd/CeO<sub>2</sub> has been extensively studied due to the unique Ce<sup>3+</sup>/Ce<sup>4+</sup> redox couple that promotes oxygen mobility. However, the challenge of activating the C-H bond and the high cost of Pd necessitate catalysts that achieve high activity at low Pd loadings. In this study, Pd-CeO<sub>2</sub> interactions were easily tuned via facile mechanochemical ball milling. Pd/CeO<sub>2</sub> prepared at 5 Hz of milling intensity (Pd/CeO<sub>2</sub>-5Hz) exhibited superior methane oxidation activity and stability, outperforming the conventional impregnated Pd/CeO<sub>2</sub> catalyst. This enhanced performance is attributed to the abundant surface-dispersed PdO<sub>x</sub> nanoparticles, which serve as the key active species. Extensive characterization revealed that these Pd species possess enhanced reducibility, a higher fraction of low-valent Pd, and a superior density of coordinatively unsaturated Pd sites. In situ DRIFTS further confirmed that these PdO<sub>x</sub> nanoparticles effectively activate CH<sub>x</sub> intermediates with molecular O<sub>2</sub>, providing a mechanistic rationale for their outstanding catalytic activity. Notably, Pd/CeO<sub>2</sub>-5Hz exhibited outstanding water tolerance under humid conditions, demonstrating its high feasibility for practical applications.



<Fig. 1. Correlation of catalytic properties with the specific reaction rates of Pd/CeO<sub>2</sub> catalysts>

<Fig. 2. (a) Catalytic stability over Pd/CeO<sub>2</sub> catalysts. (b) H<sub>2</sub>O on-off experiments over Pd/CeO<sub>2</sub> catalysts>



## NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Spinel for Simultaneous Abatement of Methane Slip and CO in LNG Marine Exhaust

Wonjung Cho<sup>1,2</sup>, Gyungmin Choi<sup>2</sup>, Hee Soo Kim<sup>1</sup>, Dong-Ha Lim<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, Low-Carbon Energy Group, Ulsan, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Busan, Republic of Korea

The enforcement of stringent maritime environmental regulations, including IMO's MARPOL Annex VI and the EU's Fit for 55 policy, has intensified the need for catalytic technologies capable of simultaneously mitigating methane (CH<sub>4</sub>) slip and carbon monoxide (CO) emissions from LNG-powered vessels. Although noble metal catalysts (Pd, Pt) exhibit excellent low-temperature activity, their high cost and susceptibility to poisoning limit large-scale marine applications.

In this study, a cost-effective non-noble NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> catalyst was synthesized via a sequential coprecipitation method using KOH and K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> as precipitants. The catalysts were characterized by XRD, BET, O<sub>2</sub>-TPD, and SEM to investigate their structural and redox properties. Catalytic performance was evaluated in a fixed-bed reactor under simulated LNG exhaust conditions (0.5% CH<sub>4</sub>, 0.1% CO, 10% O<sub>2</sub>, balance N<sub>2</sub>).

The K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-precipitated catalyst achieved complete oxidation of both CH<sub>4</sub> and CO (>99%) below 350 °C. In addition, stable operation and structural integrity of the catalyst were confirmed up to 400 °C under the tested conditions. Furthermore, sulfur (SO<sub>2</sub>) and water vapor (H<sub>2</sub>O) tolerance tests were conducted to evaluate catalyst durability under realistic marine exhaust environments. The catalyst exhibited stable activity in the presence of sulfur and moisture, demonstrating resistance to deactivation and activity recovery after removal of poisoning species.

Notably, the developed catalyst enables simultaneous CH<sub>4</sub> and CO removal without requiring an additional diesel oxidation catalyst (DOC), thereby simplifying emission control systems and reducing operational costs. The results confirm that precipitant selection significantly influences surface chemistry and redox behavior and demonstrate that Ni-Co-based non-precious catalysts are promising candidates for durable and economically viable LNG marine emission control.

### **REFERENCES:**

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).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 에너지저장

(학생 구두발표 III)

---

2026년 3월 19일(목) 09:40~10:40  
부산 BEXCO 제2전시장 323호

## BNNS-Polymer Hybrid Interfaces for Dendrite-Free Anodes in Aqueous Zinc-Ion Batteries

Ingyu Choi<sup>1</sup>, Minseo Kim<sup>1</sup>, Dongju Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>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 attracted considerable attention as safe and sustainable energy-storage systems. However, their practical implementation is limited by non-uniform Zn deposition, dendritic growth, and parasitic interfacial reactions during repeated plating/stripping. Overcoming these challenges requires the development of interfacial layers that can regulate ion transport while stabilizing the Zn surface. Boron nitride nanosheets (BNNS), as representative two-dimensional materials, provide advantageous properties such as high chemical inertness, electrical insulation, and mechanical robustness, making them suitable for interfacial protection.

In this work, BNNS were incorporated with a polymer matrix to construct a hybrid protective coating on Zn metal, aiming to improve interfacial stability and deposition behavior. The BNNS–polymer layer effectively suppresses corrosion and hydrogen evolution while promoting homogeneous ion distribution at the electrode/electrolyte interface. In addition, polymer-mediated spacing between BNNS forms ion-conductive pathways that facilitate transport across the interface and enhance charge-transfer kinetics. Consequently, the modified Zn anode delivers stable cycling performance for over 1,800 h at 1 mA cm<sup>-2</sup> with an areal capacity of 1 mAh cm<sup>-2</sup>. These results demonstrate that BNNS–polymer hybrid composites provide an effective strategy to extend Zn anode lifespan and offer strong potential for the development of durable aqueous ZIB technologies.

### **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-2023-00304768), the National Research Council of Science & Technology (NST) grant by the Korea government (MSIT) (No. CAP 22074-000) and Korea Basic Science Institute (National research Facilities and Equipment Center) grant funded by the Ministry of Education (No. RS-2025-02317677).

## 프러시안 블루 유사체로부터 유래된 중공형 이원계 금속 산화물/탄소 복합 구조체 합성 및 리튬 이온 배터리 음극 소재로의 적용

정승호<sup>1,2</sup>, 조중상<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 공업화학과, <sup>2</sup>고려대학교 신소재공학부

### Synthesis of Hollow Binary Metal Oxide/Carbon Composite Structures Derived from Prussian Blue Analogues for Application as Anodes Materials in Lithium-Ion Batteries

Seong Ho Jung<sup>1,2</sup>, Jung Sang Cho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Engineering Chemistry, Chungbuk National University

<sup>2</sup>Department of Materials Science and Engineering, Korea University

최근 고에너지 밀도, 고출력, 장수명의 특성을 가진 리튬 이차전지에 대한 수요가 지속적으로 증가함에 따라, 높은 이론 용량을 갖는 conversion 기반 전이금속 산화물이 유망한 리튬 이온 배터리 음극 소재로 주목받고 있다. 그러나 이러한 전이금속 산화물은 충·방전 과정에서 발생하는 급격한 부피 변화와 낮은 전기 전도도로 인해 전지의 수명 특성 저하 및 출력 성능 감소와 같은 한계를 지닌다. 본 연구에서는 프러시안 블루를 공침법으로 합성 후, 분무 건조 및 다단계 열처리 공정에 도입시켜, 프러시안 블루 유사체로부터 유래된 중공형 이원계 금속 산화물/탄소 복합 구조체를 합성하고 이를 리튬 이온 배터리 음극 소재로 적용한다. 다공성 구조의 프러시안 블루 유사체는 금속 산화물 입자를 견고하게 지지하는 골격체로 작용함과 동시에 소재 내 전해질의 원활한 침투를 촉진한다. 또한 분무 건조 공정에서 형성된 전도성 탄소 매트릭스는 전극 내 전자의 전도 경로를 확보하여 전체적인 전기 전도도를 향상시킨다. 특히 열처리 과정 중 Kirkendall 확산 기전에 의해 형성된 중공형 나노입자는 충·방전 시 수반되는 금속 산화물의 부피 팽창을 효과적으로 완충하며, 리튬 이온의 확산 경로를 단축함으로써 반응 속도 향상에 기여한다. 전기화학 성능 평가 결과, 해당 구조체를 적용한 음극은 1.0 A/g의 전류 밀도에서 400 사이클 후 603 mAh/g의 방전 용량을 유지하였으며, 10 A/g의 높은 전류 밀도에서도 233 mAh/g의 방전 용량을 나타내어 우수한 수명 안정성과 율속 특성을 입증하였다.

Keyword: 중공형 나노입자, 프러시안 블루 유사체, 전이금속 산화물, 전도성 탄소, 리튬 이온 배터리

## Enhancing the Stability of Lithium Metal Batteries via 3D Porous Yolk-Shell Carbon Frameworks Embedding Multi-Anion ZnSSe Nanocrystals

Jin Won Yang<sup>1</sup> and Gi Dae Park<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk 28644.

Republic of Korea

<sup>2</sup>Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-gu, Cheongju 28644, Republic of Korea

The accelerating expansion of electric vehicles and portable electronics has increased the demand for high energy density batteries. Lithium metal, with its ultrahigh theoretical capacity and low redox potential, offers significant energy-density advantages over graphite anodes. However, dendrite formation and severe volume changes during Li plating/stripping cause safety and stability issues. To address these challenges, three-dimensional (3D) conductive host structures have been widely explored to stabilize lithium metal.

In this study, a three-dimensional (3D) porous carbon yolk-shell CNT microsphere framework integrated with ZnSSe nanocrystals was designed as a lithium metal host. The interconnected porous structure with internal void space accommodates Li deposition and buffers volume fluctuations, enabling uniform Li plating/stripping. During cycling, ZnSSe forms lithiophilic ZnLi together with Li<sub>2</sub>S and Li<sub>2</sub>Se phases. These in situ-generated species create abundant heterogeneous interfaces that enhance charge-transfer kinetics, stabilize the interface, and relieve structural stress. Owing to their lithiophilicity, they promote uniform Li nucleation and growth. Consequently, the ZnSSe@PYSC-CNT architecture exhibits stable Li plating/stripping, improved Coulombic efficiency, and long-term cycling stability, as verified by structural and electrochemical analyses.

### 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).

## 올인원 비커법 및 분무건조 공정을 이용한 탄소 통합형 실리콘/중공 전이금속 산화물/질소 도핑 흑연질 탄소 복합 마이크로스피어의 합성 및 리튬이온전지 음극 적용

조범수<sup>1,2</sup>, 조중상<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 공업화학과, <sup>2</sup>고려대학교 신소재공학부

### Synthesis of Carbon-Integrated Silicon/Hollow Transition Metal Oxide/Nitrogen-doped Graphitic Carbon Composite Microspheres via All-in-One Beaker and Spray Drying Strategy for Lithium-Ion Battery Anodes

Beom Su Jo<sup>1,2</sup>, Jung Sang Cho<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Engineering Chemistry, Chungbuk National University, <sup>2</sup>Department of Material  
Sciences and Engineering, Korea University

실리콘 (Si)은 높은 이론용량 ( $3590 \text{ mA h g}^{-1}$ ), 낮은 전극전위 ( $\sim 0.4 \text{ V}$ ) 등으로 인해 고에너지밀도를 요구하는 대용량 에너지 저장장치에서 주목받는 차세대 음극 소재이다. 그러나 합금/탈합금 반응 중 발생하는 부피 팽창으로 인한 전극 구조 붕괴와 낮은 전기전도도로 인해 실리콘의 상용화에 어려움을 겪고 있다. 위 문제를 해결하기 위해 “올인원 비커 방법” 커켄달 확산 메커니즘, 분무건조공정을 결합하여, 실리콘, 중공형  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자 및 질소-도핑된 흑연 탄소(NGC) 복합체를 합성하였다. 구체적으로, Si, H- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자, 및 NGC 복합체 분말은 정적 전기로 내 단일 비커에서 가스만을 변경해서 제조되며, 이후 분무건조를 통해 균일하게 복합하여 재료 간의 밀도와 전기적 접촉을 향상시킨다. 커켄달 확산 효과에 의해 형성된 중공형  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  나노입자는 Si로부터 야기되는 부피변화를 완화하며, Fe 종의 촉매 효과로 생성된 NGC는 구조 내부의 빠른 전자 이동을 촉진한다. 그 결과, 합성된 소재는  $3.0 \text{ A g}^{-1}$ 의 전류밀도에서 1000사이클 후  $406.8 \text{ mA h g}^{-1}$ 의 방전용량을 보였으며, 높은 용량 유지율(93.1%)을 나타내었다.

## Ion-Regulating $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/PVDF-HFP Separators for Long-life Lithium Metal Batteries

Yechan Kim<sup>1</sup>, Hyunsu Yu<sup>1</sup>, Seongyun Kwon<sup>1</sup>, Hyojin Jeon<sup>1</sup>, Dongju Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Urban, Energy, and Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Republic of Korea.

\*dongjulee@chungbuk.ac.kr

Lithium metal batteries (LMBs) offer high energy density, but their practical deployment is limited by lithium dendrite formation and unstable solid–electrolyte interphases (SEIs), which lead to capacity loss and serious safety risks. Here, we report an electrospun separator composed of  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene and PVDF-HFP (MX/P-H) that simultaneously govern  $\text{Li}^+$  solvation, ion transport, and interfacial chemistry. The resulting fibrous membrane possesses high porosity, outstanding electrolyte uptake, and enhanced thermal stability. Polar surface terminations on both MXene and fluorinated PVDF-HFP segments drive homogenized ion flux and stabilize the Li/electrolyte interface.  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene provides lithiophilic sites with low migration barriers that guide surface-confined  $\text{Li}^+$  diffusion along the basal plane and reshape the local solvation structure to promote TFSI<sup>-</sup> reduction, leading to a compact LiF-rich SEI on the Li metal surface. In situ optical microscopy provides direct evidence of the suppression of dendrite growth and uniform Li plating.

Consequently, Li||Li symmetric cells employing MX/P-H display stable plating/stripping for more than 3,500 hours at high current densities ( $3\text{mA cm}^{-2}$ ,  $3\text{mAh cm}^{-2}$ ) without forming dendritic Li deposits. Li||Cu cells show enhanced coulombic efficiency, confirming highly reversible Li deposition. Full cells coupled with  $\text{LiFePO}_4$  cathodes exhibit reduced interfacial resistance and excellent rate capability, while maintaining a capacity of  $132.7\text{mAh g}^{-1}$  (97.3% retention) over 1,000 cycles at 2C. These results demonstrated that anion-regulating separator provides a versatile platform that integrates solvation control with interphase engineering for high-energy LMBs.

### ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. RS-2023-00217581), the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes(COMPA) grant funded by the Korean Government(Ministry of Science and ICT) (RS-2023-00304768) and Korea Basic Science Institute(National research Facilities and Equipment Center) grant funded by the Ministry of Education (No. RS-2025-02317677).

## Polyfunctional amine/전이 금속 산화물 복합체를 포함하는 N-도핑 탄소 중공 마이크로스피어의 one-step 분무 열분해 합성 및 리튬 저장 특성 분석

김진웅<sup>1</sup>, 조중상\*<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>충북대학교 공업화학과

### One-Step Spray Pyrolysis Synthesis and Lithium Storage Properties of N-Doped Carbon Hollow Microspheres Containing Polyfunctional Amine/Transition Metal Oxide Composites

Jin Ung Kim<sup>1</sup>, Jung Sang Cho\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Engineering Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju-Si

상용 리튬 이온 전지(LIB)의 주요 음극 소재인 흑연은 우수한 수명 특성을 지니고 있으나, 372 mAh/g에 불과한 이론 용량 제약으로 인해 전반적인 에너지 밀도를 향상시키는 데에는 뚜렷한 한계를 지닌다. 이를 대체할 차세대 고용량 음극 후보군으로서 전이 금속 산화물이 높은 이론 용량을 바탕으로 큰 주목을 받고 있으나, 본질적으로 낮은 전기 전도성 및 이온 전도도 문제가 실용화의 걸림돌로 작용하고 있다. 본 연구에서는 단일 단계 분무 열분해(one-step spray pyrolysis) 공정을 도입하여 Polyfunctional amine/전이 금속 산화물 복합체와 질소가 도핑된 탄소 골격으로 구성된 중공형 마이크로스피어를 설계하는 합성법을 제시한다. Polyfunctional amine은 금속 전구체와의 배위 결합을 통해 전이 금속 산화물 상의 미세 구조를 제어하며, 표면에 위치한 아민 작용기는 리튬 이온의 원활한 이동을 돕는 확산 채널로 기능한다. 이에 더해, 분무 열분해 도중 형성되는 중공 구조는 전해액과의 접촉을 극대화하여 나노 구조 내부의 빠른 산화환원 반응을 유도한다. 나아가 N-도핑 탄소 매트릭스는 반복적인 충방전 환경에서 야기되는 전이 금속 산화물의 부피 팽창을 완충함으로써 전극의 구조적 내구성을 크게 향상시킨다. 본 공정을 통해 합성된 Polyfunctional amine/전이 금속 산화물 기반 N-도핑 탄소 중공 복합 음극은 1.0 A/g의 전류 밀도 하에서 600 사이클 진행 후에도 471 mAh/g의 가역적인 방전 용량을 입증하였으며, 2.0 A/g의 고율 충방전 조건에서도 뛰어난 율속 특성을 나타냈다. 결론적으로, 본 합성 접근법은 차세대 리튬 저장 장치의 고성능 음극 개발을 위한 실용적인 방안을 제공할 것으로 기대된다.

1. 본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북 RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(2026-RISE-11-014-01)
2. 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).

#### 참고문헌

1. Lee et al,[1] "Coral-like porous microspheres comprising polydopamine-derived N-doped C-coated MoSe<sub>2</sub> 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).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 공정시스템

(학생 구두발표 IV)

---

2026년 3월 19일(목) 09:00~10:20  
부산 BEXCO 제2전시장 324호

## FeSO<sub>4</sub>–Palmitic Acid Chemical Bath Deposition for Practical Superhydrophobic Coatings with Frost Suppression Performance in Heat Pump Systems

Soon Hyuk Lee, Jiyull Kim, Deokwoo Kim, and Ji Bong Joo\*

Department of Chemical Engineering, Konkuk University, 120 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05029, Republic of Korea.

Superhydrophobic surface technologies have emerged as a prospective strategy for addressing frost nucleation and accumulation that repeatedly occur on outdoor heat exchanger surfaces in heat pump systems. In this study, a superhydrophobic surface was fabricated by a chemical bath deposition (CBD) process based on FeSO<sub>4</sub> precursor and palmitic acid. Its anti-frosting performances were verified under simulated operating conditions of practical heat pump environments. An optimized palmitic acid concentration of 0.02 M and an immersion time of 2 h exhibited excellent superhydrophobicity with a contact angle exceeding 155 ° and a sliding angle of 1 °. The surface morphology, chemical compositions, and nanostructures were characterized using FE-SEM, AFM, and EDS. Chemical and physical stability was evaluated through a series of durability tests, and the coating was successfully applied to cellulose paper, demonstrating superior water-repellent performance. In the icing tests, the coated substrates exhibited a significant reduction in mass gain compared to uncoated substrates, confirming its effective anti-icing performance. Similarly, frosting tests revealed a simultaneous reduction in both frost mass increase and frost layer thickness on the treated surfaces. Particularly, the application of CBD-based superhydrophobic coating to heat exchanger of heat pump led to a considerable decrease in frost mass growth from 17.35 % to 1.05 %. These results suggest that the superhydrophobic coating fabricated via the CBD process can effectively suppress frost formation and growth on the heat exchanger of heat pump at a practical operation condition. Furthermore, it demonstrates strong potential to maintain heat transfer performance and improve energy efficiency under repeated low-temperature operating conditions.

### References

1. Kim, J., Yu, H., Lee, S. H., Kim, N. Y., and Joo, J. B., "Self-cleaning and corrosion-resistant superhydrophobic surfaces via Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>-based chemical bath deposition," *J. Ind. Eng. Chem.*, Available online 22 October 2025.
2. Tang, R., Wei, W., Wang, Y., Wang, W., Sun, Y., Dai, C., Luo, Z., Teng, W., and Wei, S., "Frost suppression performance and degradation mitigation strategy of superhydrophobic air source heat pump," *Energy*, 338, 138690 (2025).

## 비용 경쟁력을 고려한 지속가능한 요소 생산 공정 설계: 고체 산화물 수전해와 순산소연소 기반 탄소 포집의 활용

박세빈<sup>1</sup>, 조서연<sup>1</sup>, 이인규<sup>1,\*</sup>  
<sup>1</sup>부산대학교 응용화학공학부  
 \*inkyu.lee@pusan.ac.kr

요소는 글로벌 식량 안보 유지에 필수적인 질소 비료의 원료이다. 기존 요소 생산 공정은 화석 연료 기반 수소에 의존하고 있어 탄소 집약도가 높다는 문제를 가진다 [1]. 요소 생산 공정의 탄소 배출을 저감하기 위해 다양한 경로들이 제시되어 왔지만, 다음과 같은 한계점이 존재한다. 첫째로, 탄소를 포함하는 단일 수소원을 활용하는 경우 탄소 전환 효율이 낮다 [2]. 수전해 기반 단일 경로를 활용한다면, 수전해 장치의 높은 장치 집약적 특성 때문에 자본비용 부담이 크다 [3]. 두 개 이상의 수소원을 활용하는 경로 또한 제안되었지만, 효율적인 하이브리드 공정에 대한 탐색이 여전히 부족하다. 이러한 한계를 해결하기 위해, 본 연구는 고체 산화물 수전해와 순산소연소 기술을 활용한 요소 생산 공정을 제안하였다. 내부에서 포집된 탄소를 전량 활용하는 CO<sub>2</sub>F, 이에 더해 외부 탄소를 추가로 보충하는 CO<sub>2</sub>E 두 가지 공정이 제안되었다. 비교를 위한 기준 공정으로는 아민 기반 흡수법을 적용한 CO<sub>2</sub>P 공정이 설계되었다. 제안된 공정들은 낮아진 화석 연료 소모량으로 탄소 전환 효율이 향상되었다. 또한, 아민 용매 재생에 필요한 열에너지 소모를 제거함과 동시에 높은 탄소 포집률을 달성하였다. 경제성 및 환경성 분석 결과, CO<sub>2</sub>F는 가장 낮은 생산 단가를 나타냈으며, CO<sub>2</sub>E는 가장 낮은 온실가스 배출량을 보였다. 나아가 환경성을 고려한 경제성 평가를 수행한 결과, CO<sub>2</sub>E가 가장 높은 경제적 잠재력을 나타냈다.

### 참고문헌

1. J. Ding et al, "Direct synthesis of urea from carbon dioxide and ammonia", *Nat Commun.*, 14, 4586, (2023).
2. H. Zhang et al, "Techno-economic comparison of 100% renewable urea production processes", *Applied Energy*, 284, 116401, (2021).
3. S. Devkota et al, "Decarbonizing urea: Techno-economic and environmental analysis of a model hydroelectricity and carbon capture based green urea production", *Applied Energy*, 372, 123789, (2024).

## Food Waste to Sustainable Aviation Fuel: CO<sub>2</sub> Utilization via Anaerobic Digestion and Dry Reforming of Methane

Seungeun Kim<sup>1</sup>, Jeongheon Kim<sup>1</sup>, Inkyu Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Pusan National University

Sustainable aviation fuel (SAF) is a promising option for decarbonizing the aviation sector, but its economic feasibility is limited by a high levelized cost of SAF (LCOF) [1]. A key contributor to the high LCOF is feedstock cost, motivating the use of waste-derived feedstocks. One promising feedstock for SAF production is food waste (FW). It is generated in large quantities and contains substantial carbon that can be valorized into fuels and chemicals. The Gasification–Fischer–Tropsch (G–FT) pathway can process diverse waste feedstocks, making it suitable for converting FW into SAF [2]. However, the conventional G–FT pathway typically captures and removes the CO<sub>2</sub> formed during syngas conditioning. It lowers the carbon efficiency (CE) and SAF production rate, which can also potentially increase the LCOF. Thus, this study proposes and evaluates a process that utilizes CO<sub>2</sub> and anaerobic digestion biogas via dry reforming. A conventional G–FT pathway was implemented as the base case. Both cases were optimized to minimize the LCOF. Compared with the base case, the proposed case increases CE and annual SAF production rate from 47.14% to 51.95% and from 13.58 to 14.97 ktonne/year, respectively. Economically, LCOF decreased from 1.24 to 1.13 \$/kg<sub>SAF</sub>. FW disposal subsidy and SAF production incentive were taken into consideration. An internal rate of return (IRR) above 15% is considered highly feasible in this study. Compared with the base case, the proposed case achieves same IRR target under lower subsidy and incentive levels.

### References

1. Van Dyk, S. and Saddler, J., “Progress in Commercialization of Biojet/Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies and Policies,” IEA Bioenergy Task 39, IEA Bioenergy (2024).
2. Shahabuddin, M., Alam, M. T., Krishna, B. B., Bhaskar, T., and Perkins, G., “A review on the production of renewable aviation fuels from the gasification of biomass and residual wastes,” *Bioresour. Technol.*, 312, 123596 (2020).

## Modeling of a rotating packed bed for acrylic acid absorption

정민경<sup>1</sup>, 황성원\*<sup>1,2</sup>

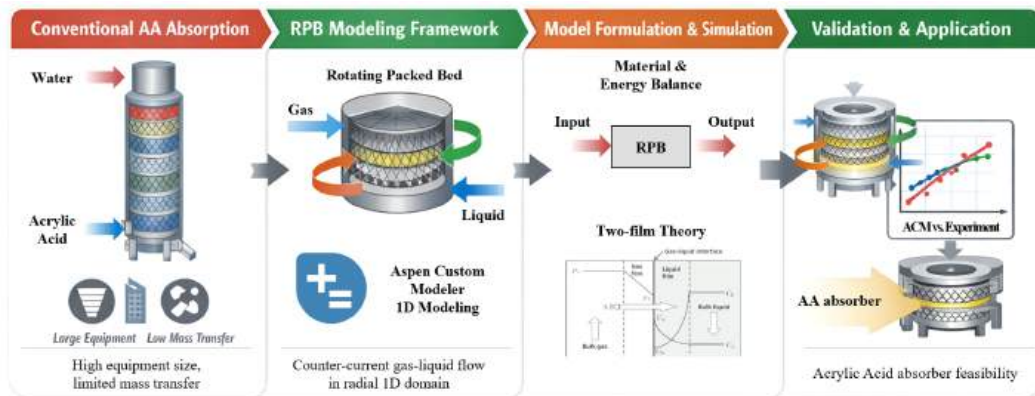
<sup>1</sup>인하대학교 에너지공정혁신융합학과, <sup>2</sup>인하대학교 화학·화학공학융합학과

산업 공정에서 아크릴산은 프로필렌의 촉매 산화 반응을 통해 생산되며, 이후 반응 후 배출되는 혼합 가스로부터 분리되어야 한다. 이때 사용되는 기존의 고정식 충전탑 흡수기는 기-액 물질 전달 효율이 낮아 대형 장치와 높은 용매 순환량을 요구하며, 이에 따른 설비 비용 증가라는 한계를 가진다. 이에 따라 동일한 분리 성능을 보다 작은 장치에서 구현할 수 있는 공정 집약화 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 고중력 조건에서 운전되는 회전식 충전탑(RPB)은 향상된 계면적과 물질전달 특성을 통해 유망한 대안으로 주목받고 있다.

본 연구에서는 아크릴산 흡수 공정을 위한 공정 수준의 RPB 흡수기 모델링 프레임워크를 구축하였다. Aspen Custom Modeler(ACM)를 활용하여 rate-based RPB 모델을 개발하였으며, RPB를 반경 방향 1차원 도메인으로 정의하고 기체와 액체의 향류(counter-current) 흐름을 고려하였다. 기-액 상평형은 NRTL-HOC 기반  $\gamma$ - $\phi$  VLE 모델로 기술하였고, 계면 물질 및 열 전달은 이중막(two-film) 이론을 적용하였다. 질량 및 에너지 수지는 대수-편미분방정식 형태로 구성하였으며, 수치적 안정성을 위해 반경 방향 1차 후진 유한차분법(BFD1)을 적용하였다.

모델 결과, RPB 적용 시 기존 충전탑과 유사한 흡수 성능을 유지하면서도 물 사용량은 약 40-60% 감소하고, 흡수탑 크기는 약 50-70% 축소 가능한 것으로 예측되었다. 이는 고중력 운전 에 따른 물질전달 향상이 흡수 공정 집약화에 크게 기여함을 보여준다.

종합적으로, RPB 기술은 장치 소형화와 용매 순환량 감소를 통해 아크릴산 흡수 공정의 집약화를 실현할 수 있는 유망한 대안임을 시사한다. 본 연구에서 제안한 ACM 기반 rate-based RPB 모델링 프레임워크는 공정 성능의 정량적 평가, 예비 설계 및 공정 비교 분석을 위한 실용적이고 유연한 도구로 활용될 수 있으며, 향후 공정 최적화 및 스케일업 연구의 기반을 제공한다.



### 참고문헌

1. Neumann, K., et al., "A guide on the industrial application of rotating packed beds," Chem. Eng. Res. Des., 134, 443-462 (2018).
2. Otitoju, O., et al., "Modelling, scale-up and techno-economic assessment of rotating packed bed absorber for CO<sub>2</sub> capture from a 250 MWe combined cycle gas turbine power plant," Appl. Energy, 335, 120747 (2023).
3. Dhaneesh, K. P., and Ranganathan, P., "A comprehensive review on the hydrodynamics, mass transfer and chemical absorption of CO<sub>2</sub> and modelling aspects of rotating packed bed," Sep. Purif. Technol., 295, 121248 (2022).
4. Jassim, M. S., et al., "Carbon dioxide absorption and desorption in aqueous monoethanolamine solutions in a rotating packed bed," Ind. Eng. Chem. Res., 46(9), 2823-2833 (2007).

## LSTM-Based Soft Sensor for Real-Time Prediction of Distillation Column Top Product Composition

Yunseo Yang<sup>1</sup>, Sunghun Song<sup>1,2</sup>, \*Sungwon Hwang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 인하대학교 화학·화학공학융합 학과

<sup>2</sup> 인하대학교 에너지공정혁신융합 학과

증류 공정에서 상단 제품 조성은 후단 반응기의 부반응 발생을 좌우하는 핵심 품질 지표이다. 두 개의 증류탑이 연속 연결된 본 공정에서는 두 번째 증류탑 상단 제품의 조성을 안정적으로 유지하는 것이 중요하다. 이상적으로는 주요 성분 B만 분리되어야 하나, 비점이 유사한 부산물 A가 동반 배출된다. 상단 stream 내 A 조성이 증가하면 후단 반응기에서 부반응이 증가해 수율과 공정 안정성이 저하된다. 그러나 해당 조성은 실시간 측정이 불가능하며, 하루 2회 실험실 GC 분석에 의존하고 있어 품질 저하 발생 시 즉각적 대응에 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 약 4년간 실제 산업 공정에서 수집된 1,200개의 시계열 데이터를 기반으로 LSTM 기반 소프트 센서를 개발하였다. 입력 변수는 유량, 온도, 압력 등 운전 변수로 구성하였다. 증류탑은 체류 시간과 holdup의 영향으로 과거 운전 조건이 현재 조성에 영향을 미치는 동적 시스템이므로, 시계열 의존성을 효과적으로 학습할 수 있는 LSTM 구조를 적용하였다. 조성 데이터는 GC 분석 시점을 기준으로 기록되어 공정 데이터와 불규칙한 time gap이 존재하므로, 시점 t의 조성 예측을 위해 t-90분부터 t까지의 공정 데이터를 입력으로 구성하였다. 전처리 과정에서는 이상치 제거, 이동평균, 과생변수 추가 및 정규화를 수행하였다.

모델은 하이퍼파라미터 튜닝을 통해 결정된 2-layer LSTM 기반 2-stage 구조로 설계하였다. Stage 1에서 A 조성을 예측하고, Stage 2에서 예측된 A를 활용해 B 조성을 예측함으로써 두 성분 간 상관관계를 반영하였다. 최근 90분간의 데이터를 시계열 입력으로 구성하고 직전 예측값을 일부 반영하였으며, A의 좁은 조성 범위를 고려해 Loss 가중치를 조정하였다.

공정 데이터만 활용한 경우 Test R<sup>2</sup>는 약 0.5 수준이었으나, GC 분석값 도출 시 예측값을 실측값으로 대체해 누적 오차를 보정하였다. 그 결과 B 조성 예측 성능은 Test 기준 R<sup>2</sup>=0.846, RMSE=1.025, MAE=0.669로 유의미하게 향상되었다. 제안된 모델은 상단 제품 조성을 실시간으로 예측하여 운전 조건의 선제적 제어를 가능하게 하고, 부반응 감소 및 공정 안정성 향상에 기여할 수 있다.

### 참고문헌

1. Alencar, G. M. R. de; Fernandes, F. M. L.; Moura Duarte, R.; Melo, P. F. de; Cardoso, A. A.; Gomes, H. P.; Villanueva, J. M. M., A Soft Sensor for Flow Estimation and Uncertainty Analysis Based on Artificial Intelligence: A Case Study of Water Supply Systems, *Automation*, 5, 106-127 (2024).
2. Hsiao, Y.-D., Kang, J.-L., and Wong, D. S.-H., Development of Robust and Physically Interpretable Soft Sensor for Industrial Distillation Column Using Transfer Learning with Small Datasets, *Processes*, vol. 9, art. 667, doi:10.3390/pr9040667 (2021).
3. Pasha, M.K., Dai, L., Liu, D., Du, W., and Guo, M., A Hybrid Soft Sensor Framework for Real-Time Biodiesel Yield Prediction: Integrating Mechanistic Models and Machine Learning Algorithms, *Renewable Energy*, vol. 237, 121888 (2024).

## 저탄소 항공연료 생산을 위한 CO<sub>2</sub> 전기분해-Fischer Tropsch 통합 공정의 설계 및 경제성 평가

Hyerim Hong<sup>1,2,3</sup>, Yunjeong Do<sup>1,2,3</sup>, Sungwon Hwang<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 화학·화학공학융합학과,

<sup>2</sup>인하대학교 에너지공정혁신융합전공,

<sup>3</sup>인하대학교 스마트 에너지 소재 및 공정 교육연구단

탄소중립 달성을 위해 항공 부문 배출 저감이 필수적이며, 전기화·수소 직접전환의 기술·인프라 제약으로 SAF가 현실적 대안으로 주목받았다. 재생전력 기반 CO<sub>2</sub> 전환 PtL은 탄소순환형 항공연료 생산 경로로 높은 잠재력을 지닌다. 본 연구는 AEM 기반 저온 CO<sub>2</sub> 전기분해 - FT 합성 - 후속 정제를 통합한 PtL 시스템을 구축하고 Aspen HYSYS로 성능과 경제성을 평가하였다. 물질전달계수와 Henry 상수를 반영하고 AvCarb MGL190 GDL(공극률 0.78, 두께 0.19 mm) 기반 전달계수를 도입하였으며, 기체상 확산계수로 촉매층 물질전달계수 kCL을 정의하여 cathode 출구 CO 예측오차를 184 - 410%에서 2 - 140%로 개선하였다. 셀 전압 오차는 0.7 - 2.1%였다. 생성 합성가스는 CO 비율이 높아 H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> ≈ 2 확보를 위해 PEM 전해로 H<sub>2</sub>를 보충하였고, 조정된 합성가스는 SiO<sub>2</sub> 기반 Co 촉매 PFR에서 LHHW 속도식으로 모사하여 CO 전환율 75% 기준으로 반응기 규모를 결정하였다. tail gas 리사이클과 ASTM D86 분별증류·hydrocracking으로 kerosene(170 - 370°C) SAF 분획 수율을 증대하였다.

본 PtL 공정의 MJSP는 약 70 \$/kg 수준으로 분석되었으며, 부산물 판매를 반영할 경우 소폭 추가 절감이 가능하였다. 전체 비용은 OPEX가 지배적이었고, 특히 원료비 비중이 가장 크게 나타났다. CAPEX는 상대적으로 작은 비중을 차지하였으나, hydrocracking 공정과 CO<sub>2</sub> 전해조 설비가 주요 투자 항목으로 분석되었다.

정책지원이 적용될 경우 MJSP는 유의미하게 감소하는 경향을 보였으며, CO<sub>2</sub> 비용 절감과 전해 성능 향상이 병행될 경우 생산단가는 크게 낮아질 수 있었다. 특히 추가 PtL 보조금이 적용될 경우 최저 4.94 \$/kg 수준까지 낮아질 수 있는 것으로 분석되어, 공정의 경제성은 CO<sub>2</sub> 확보 비용과 전해조 성능에 크게 좌우되는 것으로 평가되었다.

본 연구는 물질전달을 고려한 AEM 기반 CO<sub>2</sub> 전기분해 모델의 정확도를 향상시켰고, 이를 FT 및 후속 정제 공정과 통합하여 SAF 생산의 기술적·경제적 가능성을 정량적으로 제시하였다. 향후 전해조 성능 향상, DAC 비용 절감, 공정 최적화를 통해 PtL 기반 SAF의 상용화 가능성을 더욱 확대할 수 있을 것으로 판단하였다.

### 참고문헌

1. Weng et al. (2019). Towards membrane-electrode assembly systems for CO<sub>2</sub> reduction: a modeling study. *Energy & Environmental Science*, 12(6), 1950-1968.
2. Jafati et al. "Techno-economic assessment of flare gas valorisation during membrane-based GTL process by net-zero strategy", *Energy Conversion and Management* 315 (2024): 118796
3. Gambaro et al. (2011). Hydrocracking of Fischer Tropsch waxes: Kinetic modeling via LHHW approach. *AIChE journal*, 57(3), 711-723.
4. Peters et al. (2022). A techno-economic assessment of fischer-tropsch fuels based on syngas from Co-electrolysis. *Processes*, 10(4), 699.

## 혼합 폐플라스틱에서 수소로: 공정 시뮬레이션 연계 Scope 기반 eTEA를 적용한 열분해유 개질 경로 평가

김석주, 김도현, 고상혁, 김희향<sup>1</sup>, 이하람, 이보름\*

전남대학교 환경에너지공학과, 대한민국 광주광역시 북구 용봉로 77, 61186

<sup>1</sup>현대건설, 대한민국 서울특별시 종로구 율곡로 75

플라스틱 폐기물의 누적과 저탄소 수소 수요의 동시 증가는 혼합 폐플라스틱을 수소로 전환하는 통합 공정의 환경·경제 성과를 정량적으로 검증할 필요성을 증대시킨다. 이에 본 연구는 혼합 폐플라스틱(PE:PP:PS=2:2:1, 질량비)을 대상으로 열분해-전(前)개질-증기 메탄 개질(SMR)-수성가스 전환(WGS)-Pressure Swing Adsorption(PSA)을 결합한 수소 생산 경로를 Aspen Plus V14로 모사하고, 그로부터 도출된 시뮬레이션 기반 질량·에너지 수지를 Scope 기반 온실가스 회계 및 환경·기술·경제성 평가(eTEA)와 결합하였다. 환경성은 ISO 14040/14044 및 GHG Protocol의 정합적인 Scope 분류를 적용하여 배출원 기여도를 규명하였으며, 경제성은 항목별 TEA와 할인현금흐름 분석을 통해 수소 균등화비용 및 투자 지표를 산정하였다. 또한, 주요 불확실 변수에 대해 삼각분포 기반 Monte Carlo 시뮬레이션(10,000회)을 수행하여 결과의 안정성을 평가하였다.

그 결과, 시뮬레이션상 제안 공정은 1년 중 93%의 가동률 하에 연간 7.1 kt의 수소를 생산하였다. 아울러 이로 인한 연간 온실가스 배출량은 Scope 1 58.3 ktCO<sub>2</sub>eq, Scope 2 9.6 ktCO<sub>2</sub>eq, Scope 3 13.7 ktCO<sub>2</sub>eq로 평가되어, 총 81.6 ktCO<sub>2</sub>eq로 산정되었다. 이 가운데 Scope 1은 PSA로부터 유래된 Tail Gas의 보일러 연소에 따른 공정 열회수로부터 기인된 온실가스가 지배적이었다. 또한, Scope 3에서는 판매 제품 처리(Category 10)가 우세하여, 고압 압축 등 수소 가공에 대한 전력 수요 및 공장 가동이 핵심 배출 요인으로 확인되었다. 더 나아가 기준이 된 플라스틱 매립/소각과 Grey 수소 공급의 연계 과정과 비교하였을 때, 제안 경로는 전체 환경 영향을 약 42% 저감하는 것으로 나타났다.

경제성 측면에서는, 제안 공정의 LCoH가 \$2.4/kg-H<sub>2</sub>로 기준 공정(\$2.1/kg-H<sub>2</sub>) 대비 약 13% 증가하였다. 그럼에도 불구하고 할인율 5% 기준의 할인현금흐름 분석의 결과 순현금흐름은 약 \$160M, 내부 수익률 13.6%, 회수 기간 7.3년으로 산출되어 장기 수익성이 확보되는 것으로 나타났다. 또한, 불확실성 분석에서 총 배출량은 약 71-89 ktCO<sub>2</sub>eq/yr, NPV는 약 \$35M-229M의 범위를 갖는 것으로 파악되었으며, 특히 생산률 변동과 유지 보수 부담이 경제성과 환경성 변동성에 유의미한 영향을 미쳤다.

종합하면, 혼합 폐플라스틱의 화학적 재활용을 수소 생산과 통합하는 경로는 기존 처리 및 공급 체계 대비 기후 편익을 제공하는 반면, 경제성은 상대적으로 저감되었다. 따라서 이를 보완하기 위해선 전력 탈탄소화 및 운전 안정성 향상이 총배출 저감과 경제적 타당성 제고를 동시에 확보하기 위한 우선 과제로 도출되었다.

**Integrated Catalyst-Process Evaluation of Toluene Hydrogenation for  
LOHC Systems over Noble-Metal/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts:  
Activity Comparison and Aspen Plus-Based Techno-Economic Analysis**

Yong-Hee Lee<sup>1,2</sup>, Sangyoon Lee<sup>1</sup>, Yubeen Choi<sup>1</sup>, Junghwan Kim<sup>2\*</sup>, Man Sig Lee<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)

<sup>2</sup>Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University

<sup>3</sup>Major of PNU-KITECH Hydrogen and Next Energy Convergence, Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University

Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs) have attracted increasing attention for large-scale hydrogen storage and transportation. Among LOHC candidates, the toluene/methylcyclohexane (TOL/MCH) system is attractive because it remains liquid under ambient conditions and is supported by established industrial supply chains. In this work,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-supported noble-metal catalysts (M = Rh, Ru, Pt, Pd, Ir; 1 wt%) were prepared by impregnation and evaluated for selective toluene hydrogenation. Catalyst physicochemical properties were characterized by N<sub>2</sub> physisorption (BET), temperature-programmed reduction (TPR), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) to correlate surface/structural features with catalytic activity. High-pressure batch experiments showed selective hydrogenation of toluene to MCH with no detectable by-products. Apparent rate constants were extracted from the reaction data and incorporated into an Aspen Plus reactor model. Under an identical flowsheet with fixed production rate and product specifications, the catalyst amount was treated as a design variable and adjusted automatically to satisfy the target conversion. This approach enabled a quantitative comparison of catalyst requirement and associated process duties (e.g., heat-removal duty) arising from differences in intrinsic activity among noble metals. The integrated experiment-to-simulation workflow provides a consistent basis for catalyst screening and process design for LOHC hydrogenation.

### **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). Also, This study has been conducted with the support of Ulsan metropolitan city (IZ260002).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 에너지전환

(학생 구두발표 V)

---

2026년 3월 19일(목) 10:30~11:30  
부산 BEXCO 제2전시장 324호

## Oxidation resistant Ni-based Dual Functional Material for Integrated CO<sub>2</sub> Capture and Methanation of Simulated Flue Gas

Dong Seop Choi <sup>a</sup>, Sung Beom Hwang <sup>a</sup>, Jiyull Kim <sup>a</sup>, Minkyu Kim <sup>b</sup>, Ji Bong Joo <sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Chemical Engineering, Konkuk University, 120 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, 05029, Korea

<sup>b</sup>School of Chemical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Gyeongbuk 38541, Korea

### <Abstract>

The integrated CO<sub>2</sub> capture and methanation (ICCM) is a promising pathway for the utilization of flue gas. However, the oxidation of dual functional materials (DFMs) owing to O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in flue gas remains a critical challenge to be addressed. Hearin, an oxidation-resistant Ni-based DFM was designed by supporting Ni and Na on CeO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, respectively, followed by physical mixing. Comprehensive characterization revealed that Na exists as Na<sup>+</sup>-O<sup>-</sup>-Al species on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and as dispersed Na<sub>2</sub>O on CeO<sub>2</sub>, resulting in distinct CO<sub>2</sub> capture behaviors. Na<sup>+</sup>-O<sup>-</sup>-Al sites enabled reversible CO<sub>2</sub> adsorption and utilization via bidentate carbonate formation, whereas Na<sub>2</sub>O irreversibly adsorbed CO<sub>2</sub> to form bulk Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Under simulated flue gas conditions, Ni-Na-Al DFM suffered from irreversible oxidation of metallic Ni, whereas Ni-Na-Ce DFM exhibited limited methanation activity because of non-regenerable Na<sub>2</sub>O species, by contrast, a physically mixed Ni-Ce/Na-Al DFM exhibited superior oxidation tolerance and stable CH<sub>4</sub> production over repeated CO<sub>2</sub> capture and methanation cycles. This performance was attributed to the synergistic combination of CeO<sub>2</sub>-mediated oxygen mobility and reversible CO<sub>2</sub> adsorption site.

### References

1. Dong Seop Choi, Hye Jin Kim, Jiyull Kim, Hyeona Yu, Ji Bong Joo, "Integration of CO<sub>2</sub> Adsorbent with Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts for Enhanced Methane Production in Carbon Capture and Methanation," *Catalysts* **2024**, 14, 834

## 심층공용용매를 이용한 미세조류 HTL 바이오크루드 질소화합물 저감 가능성 평가

이건호, 장순웅<sup>1</sup>, 정우진<sup>1\*</sup>  
경기대학교 환경에너지공학전공, <sup>1</sup>경기대학교 사회에너지시스템공학과

### Investigation of Deep Eutectic Solvent Extraction of nitrogen compounds from Microalgal HTL Biocrude

GeonHo Lee, SoonWoong Chang<sup>1</sup>, WooJin Chung<sup>1\*</sup>  
Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University  
<sup>1</sup>Department of Civil and Energy System Engineering, Kyonggi University

지속가능항공연료(Sustainable Aviation Fuel, SAF)의 혼합 의무화 정책 확대에 따라 안정적인 원료 공급원이 요구되고 있다. 미세조류는 장기적·안정적 생산이 가능하고 지질이 중·장쇄 지방산으로 구성되어 있어 항공유 분획(C<sub>8</sub> - C<sub>16</sub>)의 탄화수소 생산에 적합한 원료로 평가된다. 수열액화(Hydrothermal Liquefaction, HTL)는 아임계 조건의 물을 반응 매체로 이용하는 공정으로, 건조 전처리가 불필요하여 미세조류와 같은 습식 바이오매스를 연료로 전환할 수 있으며 건조 공정에 따른 에너지 소비를 줄일 수 있어 에너지 효율성이 높은 기술이다.

그러나 미세조류 HTL로 생산된 바이오크루드(bio-crude)는 단백질 유래 질소화합물 함량이 높아 점도 증가, 열적 불안정성 및 연료 특성 저하를 유발하며, 후속 수첨탈질(Hydrodenitrogenation, HDN) 공정에서 촉매 독성과 수소 소비량 증가의 주요 원인으로 작용한다. 특히 일부 방향족 질소화합물은 HDN 공정에서도 제거가 어려워 공정 효율을 저해하는 병목 요인으로 작용한다.

이에 본 연구에서는 난분해성 질소화합물의 선택적 저감을 위한 전처리 기술로 심층공용용매(Deep Eutectic Solvent, DES)를 적용하였다. DES는 수소결합 공여체(HBD)와 수소결합 수용체(HBA)로 구성된 용매계로, 방향족 질소화합물과 수소결합 및 산-염기 상호작용을 통해 탄화수소 성분 대비 질소화합물의 선택적 분배를 유도할 수 있다. 기존 DES 연구가 모델 연료 또는 석유계 연료에 국한되어 수행된 것과 달리, 본 연구에서는 미세조류 HTL 바이오크루드에 DES를 적용하여 질소화합물 선택적 제거 가능성을 탐색하고, 실제 바이오매스 유래 바이오오일 조건에서의 DES 적용성 평가를 위한 기초 데이터를 확보하고자 하였다.

#### 참고문헌

1. Mohammad Chand Ali, Qiwei Yang, Andrew Aaron Fine, Wenbin jin, Zhiguo Zhang, Huabin Xing and Qilong Ren, "Efficient removal of both basic and non-basic nitrogen compounds from fuels by deep eutectic solvents", Green Chem., 18, 157-164, (2016).

#### 사사

본 연구는 2026년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다. (RS-2023-00255939, 미세조류를 이용한 탄소저감형 바이오항공유 업그레이드용 바이오오일 생산 통합시스템 개발)

## 2상 혐기성 소화조 내 미세플라스틱과 항생제 투여에 따른 공정 효율 영향 분석

지태현<sup>1</sup> 방동규<sup>1</sup> 박현경<sup>2</sup> 전병훈<sup>1</sup> 정우진<sup>3</sup> 장순웅<sup>3\*</sup>  
 경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과<sup>1</sup> 한양대학교 자원환경공학과  
<sup>2</sup>한양대학교 의과대학 소아청소년과 <sup>3</sup>경기대학교 사회에너지시스템공학과

### Impact of Microplastics and Antibiotics on the Process Efficiency of Two-Phase Anaerobic Digestion

Tachyeon Ji Donggyu Bang<sup>1</sup> Hyunkyung Park<sup>2</sup> Byonghun Jeon<sup>1</sup> Woojin Chung<sup>3</sup> SoonWoong Chang<sup>3\*</sup>

Department of Environmental Energy Engineering, Graduate school of Kyonggi University

<sup>1</sup>Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

<sup>2</sup>Department of Pediatrics, Hanyang University College of Medicine

<sup>3</sup>Department of Civil and Energy System Engineering, Kyonggi University

최근 항생제와 플라스틱 사용량의 급격한 증가로 인해 하·폐수처리시설로 유입되는 난분해성 오염물질의 부하가 가중되고 있으며, 최종 처리 공정인 혐기성 소화조(Anaerobic Digestion, AD) 내에 고농도로 축적되어 공정 효율을 저해시키는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 제어하기 위해 오염물질 간의 상관관계 및 단계별 영향 기전에 대한 이해가 필요하나, 기존 연구는 단일 오염물질의 단상 AD 시스템 영향 분석에 집중되어 있어, 실제 현장의 복합 오염환경에서의 영향 기전을 명확히 파악하는데 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 독성이 강하고 사용량이 많은 PVC(Polyvinyl chloride)와 FLO(Florfenicol)를 2상 AD 시스템에 복합 투여하여 공정 효율에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 실험은 Lab-scale CSTR(산발효조 2L, 메탄발효조 8L)을 이용하여 HRT 25일, 중온 조건에서 수행되었으며, 음폐수와 잉여슬러지 혼합액을 유입 기질로 사용하였다. 시스템 안정화 이후 PVC와 FLO를 복합 투여하였으며, 투여 전후의 바이오가스 조성, VFAs, COD 변화를 통해 공정 효율을 평가하였다. 분석 결과, 산발효조 내 VFAs 생성량과 SCOD 및 가스 수율이 저하되었고, 메탄발효조의 경우 투여 초기에는 가스 수율이 감소하는 경향을 보이다가 투여 10일 차부터 점진적으로 회복되었으며, 이 과정에서 Propionic acid의 축적과 함께 TCOD 및 SCOD가 상승하는 현상이 관찰되었다. 이는 산발효조에서 처리되지 못한 유기물의 분해 과정이 메탄발효조 내에서 지연되어 진행됨에 따라 메탄 생성 속도가 유기물 분해 속도를 충분히 수용하지 못해 발생한 대사적 병목 현상에 기인한 것으로 판단된다. 결론적으로 PVC와 FLO의 복합 유입은 2상 AD 시스템의 유기적 대사 흐름을 지연시키고 공정의 소화 효율을 저해하는 요인임을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. Liu, H., Yuan, X., Yao, Y., Yao, L., Zhang, J., & Maurer, C., "Microplastics, Antibiotics, and Heavy Metals in Anaerobic Digestion Systems: A Critical Review of Sources, Impacts, and Mitigation Strategies.", *Recycling*, 10(3), 116., (2025).
2. Wei, W., Huang, Q. S., Sun, J., Wang, J. Y., Wu, S. L., & Ni, B. J., "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 한국에너지기술평가원(KETEP)과 산업통상자원부(MOTIE)의 연구과제 ‘수요맞춤형 물관리 시설 수요자원화 기술개발 및 실증(과제번호: RS-2025-02307821)’ 지원에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

## 해양 폐자원과 농업 폐기물의 공수열탄화를 통한 하이드로차 특성 평가

차재원<sup>1</sup>, 정승묵<sup>1</sup>, 김정훈<sup>2</sup>, 이도연<sup>1,2\*</sup>  
<sup>1</sup>국립한밭대학교 환경공학과 <sup>2</sup>국립한밭대학교 건설환경공학과

### Evaluation of Hydrochar Properties via Co-Hydrothermal Carbonization of Marine and Agricultural Biomass Wastes

Jaewon Cha<sup>1</sup>, Seungmook Jung<sup>1</sup>, Jung-hun Kim<sup>2</sup>, Doyeon Lee<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of and Environmental Engineering, Hanbat National University

<sup>2</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University

해양으로 대량 유입되는 팽생이모자반은 해양 생태계 교란과 어업 피해를 유발하며, 수거 후 주로 소각 및 매립 방식으로 처리되어 에너지 회수가 어려운 실정이다. 농업 부산물인 왕겨 또한 대량 발생함에도 불구하고 낮은 에너지 밀도와 높은 회분 함량으로 인해 활용 효율이 제한적이다. 수열탄화는 고수분 바이오매스를 건조 공정 없이 고체 연료로 전환할 수 있는 열화학적 기술로, 이러한 한계를 극복할 수 있는 공정으로 주목받고 있다. 특히 공수열탄화(Co-Hydrothermal Carbonization, Co-HTC)는 서로 다른 원료 간 상호보완적 특성을 통해 연료 특성을 향상시킬 수 있는 장점을 가진다. 본 연구에서는 팽생이모자반과 왕겨를 혼합 원료로 사용하여 반응 온도(180 - 260 °C)와 혼합비(1:0, 3:1, 1:1, 1:3, 0:1)를 변화시키며 Co-HTC를 수행하고, 하이드로차의 에너지 특성 최적화를 평가하였다. 생성물의 연료 특성을 분석하기 위해 원소분석, FT-IR, TGA를 수행하였으며, 고위발열량(HHV), 에너지 수율 및 탄소 보존율을 비교하였다. 반응 온도가 증가함에 따라 탈산소화와 방향족화가 촉진되어 탄소 함량과 에너지 밀도가 증가하였으며, 혼합 원료 기반 하이드로차는 단일 원료 대비 향상된 연료 특성을 나타냈다. 특히 SH:RH = 1:1 혼합비, 260 °C 조건에서 생성된 하이드로차는 HHV 20.16 MJ kg<sup>-1</sup>을 나타내어 갈탄(18 - 22 MJ kg<sup>-1</sup>) 수준의 에너지 특성을 보였다. 또한 SH:RH = 3:1 및 1:1 조건에서 상승작용 계수(SE > 1)가 확인되어 공수열탄화 과정에서 시너지 효과가 발생함을 확인하였다. Van Krevelen 분석 결과, Co-HTC를 통해 바이오매스 영역에서 갈탄 영역으로 이동하여 석탄 유사 연료 특성을 나타냈다. 본 연구에서 제안한 공수열탄화 공정은 해양 폐기물과 농업 폐기물의 동시 자원화를 가능하게 하며, 고수분 바이오매스의 에너지 회수 효율을 향상시킬 수 있다. 이는 기존의 단순 처분 방식에서 벗어나 폐기물 기반 고품질연료 생산을 통한 에너지 전환 전략을 제시하며, 재생 가능한 석탄 대체 연료로서의 활용 가능성을 보여준다.

#### 참고문헌

1. Lu et al.[1] "The Development of Hydrothermal Carbonization Process Using Seaweed-Contained Water as the Reaction Environment and Analysis of Its Impact on Adsorption," *Energy*, 313, 133916 (2024)
2. Abe et al.[2] "Progress on Separation and Hydrothermal Carbonization of Rice Husk Toward Environmental Applications," *Global Challenges*, 7(8), 2300112 (2023).
3. Spagnuolo et al.[7] "Hydrochar from *Sargassum muticum*: a sustainable approach via hydrothermal carbonization," *Sustainable Energy & Fuels*, published (2023)
4. Chambers et al.[8] "Physical and morphological alteration of *Sargassum* via hydrothermal carbonization with KOH activation," *Biochar and Carbon-Based Materials*, (2024)
5. Z, Zhang et al[1] "Zhang, Effects of hydrothermal carbonization process parameters on physicochemical properties and combustion behavior of maize stalk hydrochars, *Korean journal of Chemical Engineering*" 41(11) 3035-3051 (2024)

## Behaviors of Cokes-Deposited Ferrierite Zeolite during Gas-Phase Fluidized-Bed DME Carbonylation

Jimin Kim<sup>1</sup>, Hyun Seung Jung<sup>1</sup>, Noritatsu Tsubaki<sup>2</sup>, Jong Wook Bae<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University (SKKU), Suwon, Gyeonggi-do, 16419, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Applied Chemistry, School of Engineering, University of Toyama, Gofuku 3190, Toyama, Japan

Gas-phase carbonylation of dimethyl ether (DME) to methyl acetate (MA) is prone to be deactivated by coke depositions on Brønsted acid sites (Si-OH-Al groups) of ferrierite zeolite, and those inevitable coke formations on the active sites, especially in 8-membered ring (8-MR) channels, are required to be regenerated through in-situ removal of coke precursors in a circular fluidized-bed reactor (FBR) for its stable operation. The bench-scale FBR system was applied to verify optimal regenerative treatment conditions and behaviors of spray-dried FER zeolite with ~60 μm in size after regeneration. Those inactive coke precursors were effectively removed with small structural disintegrations of FER zeolite under air environment at 300–500°C with the ramping rate of 1–25 °C/min. Although the high regeneration temperature (~500°C) compared to the lower regeneration temperature of 300–400 °C caused slight decreases of Si-OH-Al sites assigned to Brønsted acid sites, the catalytic activity was almost recovered at those optimal regeneration conditions with an almost complete removal of coke precursors. The stable maintenance of active sites and original sphere shapes was clearly observed during 5 successive cycles of gas-phase DME carbonylation reaction at 240 °C and regenerative treatment at ~500 °C at a fixed pressure of 5.0 MPa, which were attributed to the appropriate removal of surface coke precursors in the 8-MR channels without any significant structural disintegration.

### References

1. H. S. Jung, B. G. Kim and J. W. Bae, “Synthetic routes of clean hydrocarbons fuels and oxygenates by catalytic conversions of carbon oxides”, *Appl. Catal. B-Environ. Energy* 343, 123477 (2024).

### Acknowledgement

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (RS-2024-00469587).

## 비촉매 메탄 부분 산화 및 스팀 개질 복합 반응을 통한 합성가스 제조 특성 분석

이경택<sup>1,2</sup>, 윤성민<sup>1</sup>, 조현빈<sup>1</sup>, 라호원<sup>1,\*</sup>, 류창국<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국에너지기술연구원 청정연료연구실, 대전광역시 유성구 가정로 152 (34129)

<sup>2</sup>성균관대학교 기계공학부 에너지공학연구실, 경기 수원시 장안구 서부로 2066 성균관대학교 (16419)

### Experimental Analysis of Syngas Production via Non-catalytic Partial Oxidation and Steam Reforming of Methane

Gyeong Taek Lee<sup>1,2</sup>, Sung Min Yoon<sup>1</sup>, Hyunbin Jo<sup>1</sup>, Ho Won Ra<sup>1,\*</sup>, Changkook Ryu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Clean Fuel Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research, 152, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34129, Republic of Korea

<sup>2</sup>Energy Engineering Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 2066 Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16419, Republic of Korea

**Corresponding author** : \*seojun@kier.re.kr

#### Abstract

나프타 분해 공정에서 발생하는 부생가스는 메탄 함유량이 높으나, 가스 내 불순물에 의한 촉매 피독 문제로 활용에 제약이 따른다[1]. 이를 해결하기 위해 전 세계적으로 미활용 부생가스를 자원화하기 위한 연구가 진행 중이다. 기존 촉매 공정의 한계를 극복하기 위한 대안으로 비촉매 부분 산화 기술이 연구되고 있으며, 이는 촉매 없이 고온에서 반응을 진행하므로 피독 문제가 발생하지 않는다.

본 연구에서는 외부 열원을 공급하는 고온 세라믹 반응기를 이용하여 상압 조건에서 메탄의 비촉매 부분 산화 특성 분석 실험을 진행하였다. 반응물 주입 시 O<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> Ratio는 0.45, Steam/CH<sub>4</sub> Ratio는 1.3을 중심으로 변화시켰으며, 반응 온도는 1,200~1,400 °C 범위로 설정하였다. 실험 결과, 1,300 °C 이상의 구간에서 전환율이 급격히 상승하여 1,400 °C 조건에서 97 %의 메탄 전환율을 달성하였다[2].

한편, 예혼합 방식 운전 시 고온 체류 과정에서 메탄의 열분해로 다량의 soot이 발생되었다. 이를 억제하기 위해 추후 시뮬레이션을 통해 가압 조건에서의 반응 특성을 분석할 예정이다. 운전 압력 상승은 산화 반응을 활성화하여 soot 발생을 저감할 수 있을 것으로 예상된다[3].

결과적으로, 온도 제어를 통한 상압 비촉매 부분 산화 반응으로 메탄 전환이 가능함을 확인하였으며, 향후 가압 운전 연구 등을 거쳐 나프타 분해 공정 부생가스의 자원화 및 고효율 수소 생산 등에 활용할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. International Energy Agency (IEA). "The Future of Petrochemicals: Towards more sustainable plastics and fertilizers." (2018).
2. Li, C et al., "The Non-catalytic Partial Oxidation of Methane in a Flow Tube Reactor Using Indirect Induction heating - An Experimental and Kinetic Modelling Study," *Chem. Eng. Sci.*, **187**, 189-199 (2018).
3. Gao, M et al., "Understanding of The Effect of Oxygen on Soot Formation During Non-catalytic Partial Oxidation Process." *Chem. Eng. Sci.*, **284**, 119499 (2024).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 청정생산

(학생 구두발표 VI)

---

2026년 3월 19일(목) 09:00~09:20  
부산 BEXCO 제2전시장 325호

## Design of Cs-exchanged zeolite with enhanced regenerability for ammonia adsorption through HSAB-based iodine pretreatment

Hyeok-Sang Ryu<sup>1,2</sup> / Jung-ho Jae<sup>2</sup> / Hee-su Kim<sup>1</sup> / Dong-Ha Lim<sup>1,\*</sup>

Green Materials & Process R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan, Korea<sup>1</sup>

Division of Chemical and Biomolecular Engineering, Pusan National University, Korea<sup>2</sup>

Ammonia is increasingly recognized as an efficient hydrogen carrier. However, residual ammonia generated during the cracking process can significantly degrade fuel cell performance and must be reduced to below 0.1 ppm to meet ISO 14687-2 specifications. Adsorption-based processes are considered one of the most economical options for achieving this level of purification, and pressure swing adsorption (PSA) is widely used because of its fast kinetics and suitability for continuous operation. Zeolite 13X is commonly employed for ammonia removal due to its strong affinity toward NH<sub>3</sub>. This strong interaction, however, makes regeneration difficult and increases energy consumption. As a result, cation-exchanged zeolites are being explored as alternative adsorbents. Cs-exchanged zeolite shows weaker interactions with ammonia and improved regenerability, although its adsorption capacity is moderately reduced. Its practical application remains limited by low ion-exchange efficiency associated with the large ionic radius and high electropositivity of Cs, leading to higher synthesis costs.

In this study, HSAB-based iodine pretreatment was introduced prior to Cs exchange in 13X. Solid iodine was sublimated onto the zeolite surface to modify the surface environment and facilitate Cs ion exchange. Surface properties and compositional changes were analyzed to evaluate the effect of iodine pretreatment and Cs exchange. Ammonia adsorption performance was evaluated through dynamic breakthrough experiments under controlled temperature, pressure, flow rate, and regeneration conditions. Long-term cyclic tests under PSA-relevant operating conditions were conducted to assess adsorption–desorption stability and practical applicability.

### **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. RS-2025-02315209).

### **References**

1. Min Woo Hong et al. "Enhanced ammonia adsorption performance of MgCl<sub>2</sub>-loaded activated carbon in pressure swing adsorption" *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 118(25), 216-225 (2022)
2. Chun Yi LIU et al. "Ammonia Adsorption on Ion Exchanged Y-zeolites as Ammonia Storage Material" *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 46(5), 301-307 (2003).

## Electrochemically Controlled hydrolysis of Kenaf Toward Targeted Sugar Production

Ji Yeon Park<sup>1,2</sup>, Myeonghwan Oh<sup>3</sup>, Hyojung Park<sup>2</sup>, Yubin Lee<sup>1,5</sup>, Byoung Seung Jeon<sup>1</sup>, Byoung-In Sang<sup>2</sup>,  
Wooyul Kim<sup>4</sup>, Dong Ki Lee<sup>3</sup>, Jin Hyung Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Cheongju-si, 28160, Republic of Korea*

<sup>2</sup>*Department of Chemical Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Republic of Korea*

<sup>3</sup>*Clean Energy Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 02792, Republic of Korea*

<sup>4</sup>*Carbon Resources Conversion Research Center, Environmental and Climate Technology, Korea Institute of Energy Technology (KENTECH), 58330, Republic of Korea*

<sup>5</sup>*Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul 08308, Republic of Korea*

\* [leejinh1@kicet.re.kr](mailto:leejinh1@kicet.re.kr)

The sustainable conversion of lignocellulosic biomass into value-added chemicals remains a central challenge in green and catalytic chemistry. Although enzymatic saccharification is widely implemented, its broader deployment is constrained by high operational costs, product inhibition, and limited catalyst stability, which restrict scalability and reliability. These limitations motivate the development of controllable, enzyme-free alternatives.

In this study, an enzyme independent electrochemical pathway for converting kenaf to glucose is presented using a DSA (dimensionally stable anode) platform. Electrochemical activation promotes effective disruption of  $\beta$ -1,4-glycosidic linkages in cellulose, correlating with maximized glucose release. The reaction network is regulated to limit progression toward overoxidation pathways. Product formation was quantified and independently validated, while comprehensive GC $\times$ GC-TOF-MS (two-dimensional gas chromatography coupled with time-of-flight mass spectrometry) analysis showed that low molecular weight overoxidation byproducts comprised only 0.1% of the total product distribution. FT-IR (Fourier-transform infrared) spectroscopy of residual solids demonstrated progressive modification of the cellulose molecular architecture consistent with hydrolysis accompanying glucose formation.

The electrochemical process achieved a maximum glucose yield of 91.7%, with 96.9% of 25 independent experimental runs meeting predefined performance metrics, demonstrating exceptional operational reproducibility.

Electrochemical regulation effectively couples  $\beta$ -1,4-glycosidic bond disruption with glucose-directed product distribution in complex lignocellulosic matrices. This establishes a controllable, enzyme-free and scalable strategy for sustainable biomass valorization.

### References

1. Song, D., Qiao, B., Wang, X., Zhao, L., Li, X., Zhang, P., Yao, Y., Chen, H., and Dong, Z., "Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Chlorine Radical Triggered Electrochemical Oxidation System," *Environ. Sci. Technol.*, 57(24), 9416-9425 (2023).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 수소 및 재생에너지

(학생 구두발표 VII)

---

2026년 3월 19일(목) 13:00~14:50  
부산 BEXCO 제2전시장 325호

## Enhanced Catalytic Performance of Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by Promoter Addition for Toluene Hydrogenation

Hayoon Park<sup>1,2</sup>, Chang-Hoon Jeong<sup>1</sup>, Jeongho Jae<sup>2</sup>, Minji Kim<sup>1</sup> and Man Sig Lee<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Republic of Korea

<sup>2</sup>Major of PNU-KITECH Hydrogen and Next Energy Convergence, Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

The increasing environmental challenges have accelerated the demand for alternative energy sources. Hydrogen, a clean and non-toxic gas, has attracted considerable attention as a promising alternative energy source [1]. Liquid organic hydrogen carrier (LOHC) systems have been widely investigated for hydrogen storage [2]. Although alkaline earth metal promotion has been reported to improve catalytic activity, systematic studies on LOHC systems are still limited. In this study, we investigated the promotion effects of alkaline earth metals on Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts for toluene hydrogenation. Alkaline earth metal (Ba, Ca, and Mg)-promoted Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> supports were prepared by the incipient wetness impregnation method, and Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts were prepared by the deposition-precipitation method. As a result, Ca-promoted Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst significantly enhanced the catalytic activity compared to the Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst. The improved performance was attributed to increased Ru dispersion resulting from alkaline earth metal promotion. Therefore, it was confirmed that alkaline earth metal promotion on Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts affected the hydrogenation of toluene to methylcyclohexane.

### References

1. Meiyong, D. et al., "A review of reversible hydrogenation and dehydrogenation catalysts for liquid organic hydrogen carriers," *Catal. Sci, Technol.*, **15**(8), 2440-2449 (2025)
2. Chen-Hui, C., et al., "Origin of enhanced toluene hydrogenation by Pt-Ru catalysts for an efficient liquid organic hydrogen carrier," *Int. J. Hydrogen Energy.*, **48**(86), 33590-33598 (2023)

### Acknowledgements

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). This study has been conducted with the support of Ulsan metropolitan city (IZ260002).

## Shockwave Timing-Controlled Enhancement and Process Optimization of High Sulfur-Tolerant Pt/CeO<sub>2</sub> Catalysts for High-temperature Water-Gas Shift Reaction

Geon-Hyeong Lee<sup>1</sup>, Hyeon-Seok Kang<sup>1</sup>, P. Sivaprakash<sup>2</sup>, Ikhyun Kim<sup>2,\*</sup>, Yeol-Lim Lee<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Chemical Engineering, Keimyung University, 1095 Dalgubeol-daero, Dalseo-gu, Daegu 42601, South Korea

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Keimyung University, 1095 Dalgubeol-daero, Dalseo-gu, Daegu 42601, South Korea

This study aims to develop high-performance sulfur-tolerant Pt/CeO<sub>2</sub> catalysts for the high-temperature water-gas shift (HT-WGS) reaction by optimizing the timing of shockwave application and processing conditions for both the support and the catalyst. The catalytic results demonstrated that all shockwave-treated catalysts exhibited enhanced sulfur tolerance compared to the pristine Pt/CeO<sub>2</sub>. Notably, the comparable performance of Shock@dried-Pt/CeO<sub>2</sub> and 500cal@Shock@dried-Pt/CeO<sub>2</sub> suggests that the additional calcination step can be eliminated. In agreement with the catalytic performance, the XPS Pt 4f spectra revealed that the shockwave-treated catalysts exhibited shifts toward higher binding energies compared to the pristine catalyst, indicating enhanced Pt-O-Ce interactions. According to BET analysis, Shock@Pt/CeO<sub>2</sub> and Shock@dried-Pt/CeO<sub>2</sub> showed increased specific surface areas compared to the pristine catalyst, while 500 cal@Shock@dried-Pt/CeO<sub>2</sub> showed a reduced surface area because of additional high-temperature calcination. Shock@dried-Pt/CeO<sub>2</sub> demonstrated the superior performance in the sulfur-tolerant HT-WGS reaction, attributed not only to the factors discussed above but also to its enhanced oxygen storage capacity (OSC). The increased OSC was supported by the appearance of a shoulder near 460 cm<sup>-1</sup> and a defect band around 600 cm<sup>-1</sup> in the Raman spectra, as well as by XPS O 1s and Ce 3d spectra.

## Correlation between Surface Properties of Pd/C Catalysts Modulated by Reducing Agents and Benzyl Alcohol Selectivity over Benzaldehyde Hydrogenation

Anna Hwang<sup>1,2</sup>, Ye Eun Kim<sup>1</sup>, Seunghun Choi<sup>1</sup>, Jung-ho Jae<sup>2,3</sup> and Man Sig Lee<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Republic of Korea

<sup>2</sup>Major of PNU-KITECH Hydrogen and Next Energy Convergence, Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

<sup>3</sup>School of Chemical Engineering, Pusan National University, Republic of Korea

Benzyl alcohol is an important intermediate in synthesis of vitamins, pharmaceutical drugs, fragrances, and various ethers. Among the various routes for benzyl alcohol production, selective hydrogenation of benzaldehyde has gained increasing attention and palladium catalysts have been widely used. However, the consecutive reaction of benzyl alcohol to toluene reduces the selectivity of benzyl alcohol. It can be controlled by adjusting surface properties of catalysts through the use of different reducing agents. Herein, this work investigates the correlation between surface properties of Pd/C catalysts and benzyl alcohol selectivity. Pd/C catalysts were prepared by electrostatic adsorption method and then reduced by three types of liquid-phase reducing agents including formic acid, formalin, and glucose. The mole ratio of reducing agent to Pd was kept constant. Comprehensive characterization confirmed that the type of reducing agent modulated the Pd surface electronic state and modified the catalyst surface acidity. In the hydrogenation of benzaldehyde, Pd/C reduced by formic acid exhibited the highest benzyl alcohol selectivity (89%). The increase in toluene formation leads to a decrease in the selectivity. Subsequently, the effect of the reaction time, temperature, and pressure was investigated using the Pd/C with the highest selectivity.

### References

1. Zhang, Y. et al., "Synergistic catalysis of hybrid nano-structure Pd catalyst for highly efficient catalytic selective hydrogenation of benzaldehyde," *Catalysis Today*, **358**, 129-137 (2020).

### Acknowledgements

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). This study has been conducted with the support of Ulsan metropolitan city (IZ260002).

## **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Driven Surface Nano-Roughening of Ni Foam Cathodes for Enhanced HER Performance in Alkaline Water Electrolysis**

Jeongha Kim<sup>1,2</sup>, Se Hun Kwon<sup>2</sup> and Dong-Ha Lim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan, Korea

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Korea

To mitigate global warming and ecological imbalance caused by climate change, a transition from a fossil fuel-based society to an environmentally friendly energy paradigm is required. Accordingly, hydrogen has attracted attention as a next-generation clean energy source, and among hydrogen production technologies, alkaline water electrolysis (ALKWE) has the advantage of enabling the use of relatively low-cost electrocatalysts [1]. In particular, Raney Ni is widely utilized as a representative cathode catalyst. However, conventional fabrication methods for Raney Ni (e.g., VPS, PVD, and electroplating) involve spatial constraints and limitations in large-area electrode manufacturing, and alloy layer detachment may occur during long-term operation.

In this study, to overcome these limitations, we designed an electrode structure that alleviates spatial constraints in the fabrication process and suppresses the formation of a continuous alloy layer. Nickel foam (Ni foam) was used as the substrate to construct a complex structured electrode, and a simple and scalable dip-coating process was employed to fabricate the cathode. The catalyst slurry was prepared by mixing polyethylene glycol (PEG) as a polymer binder with micron-sized aluminum (Al) and nanosized aluminum oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) powders. During the heat-treatment process, Al formed localized alloys, and during the alkaline leaching process, it was selectively removed to generate micron-scale pores. At the same time, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> induced secondary nano-roughness, contributing to an increase in electrochemical surface area (ECSA). XPS, SEM, and EDS analyses confirmed a significant increase in surface roughness and porous structure. The hydrogen evolution reaction (HER) performance evaluated under alkaline conditions exhibited low overpotential, low charge transfer resistance, and high ECSA. Furthermore, accelerated stress testing (AST) demonstrated excellent electrochemical performance and long-term stability based on the improved structural stability. This study presents an electrode design strategy that enhances HER performance through surface structure control without introducing additional catalysts.

### **Reference**

1. 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)

## 폐기물 유래 합성가스로부터 수소 생산을 위한 고온 수성가스전환 반응의 최적 조건 연구

권재민<sup>1</sup>, 공지현<sup>1</sup>, 김민주<sup>1</sup>, 박진우<sup>2</sup>, 장원준<sup>1,2,3,\*</sup>  
<sup>1</sup>아주대학교 환경공학과, <sup>2</sup>아주대학교 에너지시스템학과,  
<sup>3</sup>아주대학교 환경안전공학과

### Optimization of High-Temperature Water-Gas Shift Reaction for Hydrogen Production from Waste-Derived Syngas

Jae-Min Kwon<sup>1</sup>, Ji-Hyeon Gong<sup>1</sup>, Min-Ju Kim<sup>1</sup>, Jin-Woo Park<sup>2</sup>, Won-Jun Jang<sup>1,2,3,\*</sup>  
<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Ajou University,  
<sup>2</sup>Department of Energy Systems Research, Ajou University,  
<sup>3</sup>Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University

본 연구에서는 폐기물 유래 합성가스로부터 수소 생산을 위한 고온 수성가스전환 반응의 최적 조건을 도출하고자 열역학적 분석과 촉매 실험을 수행하였다. 상용 Fe-Cr 촉매를 사용하여 H<sub>2</sub>O/CO 비(1.0 ~ 4.0), 환원 온도(400 ~ 600 °C), 환원 가스 조성(2% H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, 5% H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 및 반응 가스)을 변수로 반응 특성을 비교하였다. 또한 350~550 °C의 반응 온도 범위에서 실험을 수행하고, 열역학적 평형 계산 결과와 실제 반응 결과를 비교하였다. 열역학적 분석 결과, H<sub>2</sub>O/CO 비가 2.0 이상에서 CO 전환율이 크게 증가하였으며, 촉매 실험을 통해 최적 H<sub>2</sub>O/CO 비가 2.5임을 확인하였다. 환원 조건의 경우 400 °C에서 가장 우수한 CO 전환율을 나타냈으며, 낮은 환원 온도에서는 환원 가스 조성에 따른 성능 차이가 크지 않았다. 반응 가스로 직접 환원한 경우, 다른 환원 가스와 비교하였을 때 우수한 CO 전환율을 나타냈으며 50시간 동안 안정적인 반응 성능을 유지하였다. 따라서 폐기물 유래 합성가스를 이용한 HTS 반응에서 최적 조건은 H<sub>2</sub>O/CO 비 2.5 및 환원 온도 400 °C이며, 별도의 환원 가스 없이 반응 가스를 이용한 직접 환원이 가능함을 확인하였다.

이 연구는 2024년도 산업통산자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비(RS-2024-00432109) 지원과 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(RS-2025-00559638)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## Green Hydrogen from Water Electrolysis: Supply Chain Emissions Assessment and Net-Zero Pathways

고상혁, 김석주, 이하람, 이보름\*  
전남대학교 환경에너지공학과

### 초록

본 연구는 재생에너지 기반 수전해를 통해 생산되는 그린수소의 환경성을 보다 일관되게 평가하기 위해, 알칼라인 수전해(Alkaline), 고분자 전해질 막 수전해(PEM), 고체 산화물 수전해(SOEC), 음이온 교환 막 수전해(AEM) 등 네 가지 주요 수전해 기술을 대상으로 전과정평가를 수행하였다. 특히 기존 연구들에서 상이하게 적용되었던 상류 공급망 배출(Scope 3)을 체계적으로 포함하여, 핵심 원료 채굴·제조, Stack 및 BOP(Balance of Plant) 제조, 운송 등 모든 관련 upstream 배출 범주를 통합적으로 고려하였다. 또한, 효율 및 수명 변동을 반영한 Low-High 시나리오와 2050 Net-Zero 전력망 가정을 적용하여 기술별 배출 특성을 비교·분석하였다,

분석 결과, 전과정 온실가스 배출량은 기술별로 Alkaline 0.166 - 0.210, PEM 0.102 - 0.174, SOEC 0.128 - 0.207, AEM 0.116 - 0.143 kgCO<sub>2</sub>eq/kgH<sub>2</sub> 범위로 도출되어 기술 간 환경 성과 차이가 나타났다. 모든 기술에서 Scope 3는 총 배출량의 15 - 49%를 차지하여 결과에 상당한 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 특히 SOEC는 Scope 3 비중이 가장 높았으며(최대 49%), PEM은 상대적으로 낮은 Scope 3 비중을(최소 15%)을 보였다. 이는 기술별 소재 구성 및 제조 공정 차이에서 기인한다. Alkaline 및 AEM에서는 Ni 기반 전극·촉매 및 구조재 제조가 주요 상류 배출 요인이었으며, PEM에서는 소량 사용에도 불구하고 에너지 집약적인 Pt 기반 촉매 제조가 핵심 요인으로 작용하였다. SOEC의 경우 실리콘 및 세라믹 기반 고온 소재 제조 공정이 높은 온실가스 배출을 유발하였다.

기술 성능 변수에 따른 민감도 분석 결과, 효율 및 수명 변화에 따라 총 배출량은 약 19 - 41% 범위로 나타났다. PEM은 수명 연장 시 스택 교체 빈도 감소로 Scope 3 배출 저감 효과가 가장 크게 나타났으며, SOEC는 효율 향상과 수명 개선이 동시에 이루어질 경우 최대 38%의 배출 저감 가능성을 보였다. 반면 Alkaline 및 AEM은 상대적으로 Scope 2 비중이 높아 효율 개선이 전체 배출량 감소에 더 직접적으로 기여하였다. 지역별 분석(한국, 미국, 독일, 호주)에서는 총 배출량 차이가 0.5% 이하로 제한적으로 나타나, 운송보다는 소재 집약도와 제조 공정 특성이 배출량을 지배하는 주요 요인임을 확인하였다.

또한 기존 전력망 전력을 재생에너지 전력으로 대체하는 Net-zero 감축 시나리오를 적용할 경우, 전과정 온실가스 배출량은 79-90% 감소하였으며, 기술별 배출량은 Alkaline 0.032-0.045, PEM 0.011-0.026, SOEC 0.020-0.041, AEM 0.012-0.017 kgCO<sub>2</sub>eq/kgH<sub>2</sub> 수준으로 감소하였다. 그러나 전력 탈탄소화 이후에는 Scope 2 배출이 급격히 감소하면서 상대적으로 Scope 3가 잔여 배출량의 지배적 기여원으로 전환되는 구조가 나타났다. 이는 전력 부문의 탈탄소화만으로는 수전해 기반 그린수소의 완전한 저탄소화를 달성하기 어렵고, 핵심 소재의 저탄소 제조, 소재 효율 향상, 내구성 개선, 재활용 전략 수립 등 공급망 기반 감축 전략이 병행되어야 함을 시사한다.

본 연구는 Scope 1·2·3를 통합한 정량적 배출 구조 분석을 통해, 향후 수소 인증 체계 및 공급망 기반 탄소회계 도입 시 기술 간 환경 성과를 보다 정밀하게 비교할 수 있는 방법론적 기반을 제시한다. 지속가능한 그린수소 구현을 위해서는 재생에너지 통합뿐 아니라 공급망 탈탄소화와 기술 효율·내구성 개선이 병행되어야 하며, 이는 향후 수소 산업의 정책 설계 및 기술 개발 방향 설정에 중요한 시사점을 제공한다.

## Enhanced Stability of Cu<sup>+</sup> Active Sites by Ce<sup>3+</sup>-Mediated Electron Migration Effect in ZSM-5 Zeolite for CO Capture

Shoon Pa Pa Aung<sup>1</sup>, Dong Myung Kim<sup>2</sup>, May Zaw Win<sup>1</sup>, Wathone Oo<sup>1</sup>, Ngwe Soe Han<sup>1</sup>, Phyu Phyu Han<sup>2</sup>, Ei Thandar Aung<sup>2</sup>, Kwang Bok Yi<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University, Daejeon, South Korea

<sup>2</sup>Department of Convergence Systems Engineering, Chungnam National University, Daejeon, South Korea

<sup>3</sup>Department of Chemical Engineering Education, Chungnam National University, Daejeon, South Korea

[\\*cosy32@cnu.ac.kr](mailto:*cosy32@cnu.ac.kr)

CuCl-based adsorbents for CO capture suffer from intrinsic instability, as Cu<sup>+</sup> species readily oxidize under ambient conditions, causing progressive efficiency loss. To address this, Ce-modified Cu<sup>+</sup>-doped ZSM-5 composites were synthesized through sequential wet impregnation and surface coating. Their CO/CO<sub>2</sub> adsorption properties were substantiated by detailed physicochemical characterization. Among the variants, the 3Ce-1Cu-ZSM-5 sample, containing 25 wt% Cu<sup>+</sup> with Ce-to-Cu weight ratio of 3:1, delivered the highest CO uptake capacity of 1.4 mmol/g, surpassing unmodified Cu-ZSM-5 (1.18 mmol/g). This enhancement arises from one major role of Ce<sup>3+</sup> ions, in which higher oxidation potential of Ce<sup>3+</sup> subsequently regenerates accessible active sites of Cu<sup>+</sup> through interfacial electron migration to Cu<sup>2+</sup>-based impurities by Ce<sup>3+</sup>-Cu<sup>2+</sup> redox interaction. Another significant role of the surface-exposed Ce<sup>3+</sup> layer scavenges reactive oxygen species to suppress oxidation of existing Cu<sup>+</sup> ions. Consequently, the composite maintained 98% of its CO adsorption capacity after 30 days while the unmodified sample preserved only 60%. Furthermore, based on IAST and adsorption model fitting, 3Ce-1Cu-ZSM-5 exhibited an enhanced CO/CO<sub>2</sub> selectivity of 251.6 at 0.01619 kPa where unmodified Cu-ZSM-5 showed no measurable selectivity in this regime and only 9.07 at 0.7 kPa. This improvement stems from strong  $\pi$ -complexation between CO and Cu<sup>+</sup> active sites, complemented make by cerium's contribution in generating additional adsorption centers and modifying surface acidity to favor CO uptake. Collectively, cerium incorporation provides an effective redox-stabilization and activity-enhancement strategy, enabling Cu<sup>+</sup>-based composites to achieve high CO capacity, selectivity and long-term stability under realistic conditions.

**Keywords:** carbon monoxide, selectivity, stability, capacity, cerium, redox

## 방향족 탄화수소 기반 수소 생산을 위한 수증기 개질 반응의 열역학적 고찰

김민주<sup>1</sup>, 공지현<sup>1</sup>, 권재민<sup>1</sup>, 박진우<sup>2</sup>, 장원준<sup>1,2,3,\*</sup>

<sup>1</sup>아주대학교 환경공학과, <sup>2</sup>아주대학교 에너지시스템학과, <sup>3</sup>아주대학교 환경안전공학과

### Thermodynamic Analysis of Steam Reforming of Aromatic Hydrocarbons for Hydrogen Production

Min-Ju Kim<sup>1</sup>, Ji-Hyeon Gong<sup>1</sup>, Jae-Min Kwon<sup>1</sup>, Jin-Woo Park<sup>2</sup>, Won-Jun Jang<sup>1,2,3,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Ajou University,

<sup>2</sup>Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University,

<sup>3</sup>Department of Energy Systems Research, Ajou University

본 연구는 BTX의 수증기 개질 반응을 통한 수소 생산을 위해 열역학적 분석을 바탕으로 최적의 반응 조건을 조사하였다. 열역학적 평형계산은 깁스 자유 에너지 최소화 기법을 이용하여 계산하였으며, 온도 (200 ~ 1,000 °C)와 S/C 비율(0.5 ~ 4.0) 변화에 따른 물 분율, 전환율 (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>), 선택도(C, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), 몰수(H<sub>2</sub> 및 CH<sub>4</sub>), 그리고 수소 수율을 조사하였다. BTX의 수증기 개질 반응은 벤젠 (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), 톨루엔 (C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>), 자일렌 (C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>)을 수증기 (H<sub>2</sub>O)와 반응시켜 합성가스 (H<sub>2</sub>, CO)로 전환하는 반응으로 크래킹 반응, 탄소 침적, 수증기 개질 반응, 수성가스전이반응이 동시에 일어나는 복잡한 반응이다. 크래킹 반응은 700 °C 이상의 조건에서는 발생하지 않는다는 것을 확인하였다. 탄소 침적은 S/C 비율 3.0 이상의 조건 하에서는 형성되지 않는다. 그러므로, 수증기 개질과 수성가스 전위 반응을 통해 수소 생산을 최대화하는 동시에 크래킹 반응과 탄소 침착을 최소화하기 위한 조건은 S/C 비율 3.0과 최소 700 °C의 온도이다.

이 연구는 2024년도 산업통산자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비(RS-2024-00432109) 지원과 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(RS-2025-00559638)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## Polyol-Mediated Synthesis of Egg-Shell Ru@Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Pellet Catalysts for Efficient Toluene Hydrogenation

Phuong Nam Nguyen<sup>1,2</sup>, Ye Eun Kim<sup>1</sup>, Chae Eun Choi<sup>1</sup>, Inkyu Lee<sup>2</sup> and Man Sig Lee<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Republic of Korea

<sup>2</sup>School of Chemical Engineering, Pusan National University, Republic of Korea

<sup>3</sup>Major of PNU-KITECH Hydrogen and Next Energy Convergence, Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

Egg-shell Ru@Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pellet catalysts are promising materials for liquid-phase aromatic hydrogenation since noble-metal utilization can be improved by positioning the active phase near the external surface, while reducing intrapellet mass-transfer limitations [1]. In this work, we explore a polyol-assisted preparation route to tailor the distribution and reducibility of low-loading Ru on spherical alumina pellets, where the polyol acts as a solvent, stabilizer, and reducing agent to restrict particle growth and prevent agglomeration [2]. Alumina beads were first saturated with different polyols (ethylene glycol, propylene glycol, 1,2-butanediol, or 1,4-butanediol) prior to brief contact with a ruthenium nitrosyl nitrate precursor, followed by solvent removal and calcination. A sample in the absence of polyol mediation was prepared as a reference. The formation of egg-shell-type pellets was confirmed by cross-sectional microscopy and it was revealed that the stabilizing medium strongly influences the ruthenium deposition region. XRD and N<sub>2</sub> physisorption results show that the alumina support structure and mesoporosity are largely preserved after Ru incorporation, while H<sub>2</sub>-TPR indicates that the reduction behavior of supported RuO<sub>x</sub> species was modified by the polyol environment. Kinetic analysis of toluene hydrogenation was conducted using a pseudo-first-order parallel–consecutive reaction network to compare catalyst efficiency and to relate activity trends to the egg-shell architecture. Overall, the results demonstrate a practical strategy to tune Ru deposition profiles and redox properties through solvent-mediated control, and ongoing work is focused on strengthening structure–performance correlations using complementary measurements and extended catalytic testing.

### References

1. Bai, H. et al., “Synthesis of Tailored Egg-Shell Pd@Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst for Catalytic Hydrogenation of 2-Alkylanthraquinone,” *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **7**, 7700–7707 (2019).
2. Zhao, T. et al., “Size-controlled preparation of silver nanoparticles by a modified polyol method,” *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, **366** (1–3), 197–202 (2010).

## Hydrothermal Synthesis of Vanadium doped NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> on Nickel Foam for Efficient Alkaline Anion Exchange Membrane Water Electrolysis

Seongjun Moon<sup>1</sup>, Dongju Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Urban, Energy, and Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Republic of Korea.

\*dongjulee@chungbuk.ac.kr

Efficient oxygen evolution reaction (OER) electrocatalysts are indispensable for large-scale hydrogen production through water electrolysis. However, many high-performance catalysts reported to date require elaborate multi-step synthesis routes and high-temperature post-treatments, which hinder cost-effective manufacturing and practical deployment. Although substantial progress has been made in the development of non-precious metal-based OER catalysts, it remains challenging to simultaneously achieve high catalytic activity, fast reaction kinetics, and long-term operational stability under industrially relevant conditions. Therefore, the rational design of economically viable and structurally robust electrocatalysts is critically important for advancing sustainable hydrogen technologies. In this work, we present vanadium-doped nickel iron oxide directly grown on nickel foam (V-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/NF) via a simple and scalable hydrothermal synthesis. The incorporation of vanadium ions into the NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> lattice effectively modulates the local electronic structure and increases the density of electrochemically accessible active sites. Consequently, the V-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/NF electrode exhibits outstanding OER performance, with a low overpotential of 186 mV at 10 mA cm<sup>-2</sup>, a Tafel slope of 54.45 mV dec<sup>-1</sup>, and significantly reduced charge-transfer resistance. When applied as the anode in an alkaline anion exchange membrane water electrolysis (AEMWE) system, the electrode achieves a current density of 1.0 A cm<sup>-2</sup> at a cell voltage of 1.711 V and reaches an energy conversion efficiency of 73.3%.

### ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT)(No. RS-2023-00217581), the National Research Council of Science & Technology(NST) grant by the Korea government (MSIT) (No. CAP 22074-000) and Korea Basic Science Institute(National research Facilities and Equipment Center) grant funded by the Ministry of Education (No. RS-2025-02317677).

## Effect of Preparation Parameter Control on the Low-Temperature Water-Gas Shift Activity of Cu-Zn-Al Catalysts

Minsang Jo<sup>1,2</sup>, Jungho Jae<sup>2</sup>, Hee Soo Kim<sup>1\*</sup> and Dong-Ha Lim<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

The water–gas shift reaction (WGS) is a critical process in hydrogen production, as it lowers carbon monoxide concentration while increasing hydrogen yield. Among the catalysts examined for this reaction, non-noble Cu–Zn–Al catalysts have been widely studied for low-temperature WGS due to their economic feasibility, structural stability, and high catalytic activity. In this study, we systematically investigate the effects of preparation parameters on the physicochemical properties and catalytic performance of Cu–Zn–Al catalysts. The findings aim to provide a fundamental understanding of the relationship between synthesis conditions and catalytic behavior, contributing to the rational design and optimization of high-performance catalysts for low-temperature WGS.

This study aims to enhance the low-temperature WGS activity of Cu–Zn–Al catalysts through systematic optimization of synthesis parameters, including precipitation pH, aging time, and precipitation method. The catalysts were synthesized via a co-precipitation approach, and their physicochemical properties were characterized using BET surface area analysis, XRD, and H<sub>2</sub>-TPR measurements. Catalytic performance was assessed in a fixed-bed reactor employing simulated synthesis gas corresponding to the effluent of steam methane reforming (SMR) at a gas hourly space velocity (GHSV) of 10,000 h<sup>-1</sup>.

The catalysts prepared under optimized conditions showed higher CO conversion than the other samples, which is attributed to the improved dispersion and uniform particle size of active copper species resulting from controlled nucleation and growth during synthesis. These results demonstrate that precise regulation of synthesis parameters—including pH, aging time, and precipitation method—is critical for enhancing low-temperature WGS performance. This study provides useful insights for the rational design of efficient catalysts for high-purity hydrogen production and their potential industrial application.

### References

Shim, J.-O., "An important parameter for synthesis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 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-26-0001).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 청정융합

(학생 구두발표 VIII)

---

2026년 3월 19일(목) 13:00~15:10  
부산 BEXCO 제2전시장 326호

## Effect of Applied Voltage on Simultaneous Pyrene Degradation and Nitrate Reduction in a Dual-Chamber Microbial Electrolysis Cell (MEC)

Aparna Sharma<sup>1</sup>, Syed Ejaz Hussain Mehdi<sup>1</sup>, Suleman Shahzad<sup>1</sup>, Sandesh Pandey<sup>1</sup>, Fida Hussain<sup>1</sup>, Woochang Kang<sup>1</sup>, Sang-Eun Oh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Food Biotechnology and Environmental Science, Kangwon National University, 192-1 Hyoja-dong, Chuncheon-si, Gangwon-state, 24341, Republic of Korea

### Abstract

This study investigates the long-term effect of applied voltage on simultaneous pyrene degradation and nitrate reduction in dual-chamber microbial electrolysis cells (MECs). Reactors were operated at external voltages of 0.3 - 1.2 V, alongside direct-circuit (0  $\Omega$ ) and open-circuit as controls, with 10 mgL<sup>-1</sup> pyrene and 50 mgL<sup>-1</sup> NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N. Reactor performance, biofilm morphology, gas composition, and microbial community structure were systematically evaluated. The 0.5 V system exhibited the most stable and efficient performance, achieving 93.2  $\pm$  2.1 % pyrene removal and 95.6  $\pm$  1.8 % nitrate reduction with complete acetate utilization, while minimizing N<sub>2</sub>O emissions. Higher voltages ( $\geq$ 1.0 V) induced biofilm disruption, elevated N<sub>2</sub>O production, and reduced electrochemical efficiency. Microbial analyses revealed selective enrichment of electroactive and PAH-degrading genera at 0.5 V, whereas stress-tolerant fermentative and methanogenic taxa dominated at higher voltages. Multivariate analysis, functional guild clustering, and correlation mapping confirmed strong microbe–function–performance coupling under moderate electrochemical stimulation. Overall, the results identify 0.5 V as an optimal operating potential that balances bio-electrocatalytic activity, functional microbial organization, and long-term stability, demonstrating the feasibility of MECs for treating PAH and nitrate contaminated wastewaters such as landfill leachate.

## Pilot-scale evaluation of coral reef media for pH buffering and nutrient supply in koi-lettuce aquaponics

Syed Ejaz Hussain Mehdi<sup>1</sup>, Aparna Sharma<sup>1</sup>, Suleman Shahzad<sup>1</sup>, Sandesh Pandey, Fida Hussain<sup>1</sup>,  
Woochang Kang, Sang-Eun Oh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Food Biotechnology and Environmental Science, Kangwon National University, 192-1  
Hyoja-dong, Chuncheon-si, Gangwon-state, 24341, Republic of Korea.

Nutrient deficiencies and pH fluctuations are among the major issues identified in most of the aquaponic studies. Mostly studies used chemical fertilizers and pH adjusters to resolve these issues however, a sustainable and environment friendly permanent solution is needed. In this novel pilot study, we incorporate coral carbonate media into a koi carp - lettuce aquaponic system–A (APA) to provide a continuous release of Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe, and P and supported accumulation in plant and fish biomass while maintaining neutral pH to compare with control aquaponic-B (APB). In APA mean FCR, SGR and PER were recorded 1.57 kg feed.kg fish<sup>-1</sup>, 0.58 %·day<sup>-1</sup> and 1.77 kg feed.kg fish<sup>-1</sup> protein respectively in comparison with control APB which showed mean FCR, SGR and PER 3.45 kg feed.kg fish<sup>-1</sup>, 0.27 %·day<sup>-1</sup> and 0.80 kg fish.kg protein<sup>-1</sup> respectively. Also, mean plant mass obtained during this 28 day study was 5.28 and 4.40 kg and fish weight gain of 0.51 and 0.22 kg for APA and APB respectively. In this pilot–scale study (n=2 in-dependent systems per treatment), observed plant and fish biomass in APA were 20.9% and 10.1% higher respectively than APB, these values shows descriptive differences observed in this study. Nutrient analysis observed to be showing higher release and accumulation of key nutrients in APA. This study examined a low-chemical, sustainable approach for aquaponics by using re-usable coral carbonate media to maintain neutral pH and improve nutrient availability and productivity.

### References

1. Atique, F., Lindholm-Lehto, P., and Pirhonen, J., “Is Aquaponics Beneficial in Terms of Fish and Plant Growth and Water Quality in Comparison to Separate Recirculating Aquaculture and Hydroponic Systems?” *Water*, 14(9), 1447 (2022).
2. Colt, J., Schuur, A. M., Weaver, D., & Semmens, K., “Engineering design of aquaponics systems” *Rev. in Fish. Sci. & Aqua.*, 30(1), 33-80 (2022).
3. Yang, T., & Kim, H.-J., “Characterizing nutrient composition and concentration in tomato-, basil-, and lettuce-based aquaponic and hydroponic systems.” *Water*, 12(5), 1259 (2020).

## Activated Alumina-Based Sulfur Composite for Simultaneous Denitrification and Phosphate Removal from Low C/N Wastewater

Ammarah Mushtaq<sup>1</sup>, Fida Hussain<sup>1</sup>, Sandesh Pandey<sup>1</sup>, Suleman Shahzad<sup>1</sup>, Aparna Sharma<sup>1</sup>, Syed Ejaz Hussain Mehdi<sup>1</sup>, Woochang Kang<sup>1</sup> and Sang-Eun Oh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Biological Environment, Kangwon National University, Kangwondaehak-gil 1, Chuncheon-si, Gangwon-do 24341, Republic of Korea

\*Corresponding author: Sang-Eun Oh

Sulfur-based autotrophic denitrification (SAD) is a promising low-carbon technology for nitrate removal; however, its practical application is often limited by process acidification, alkalinity consumption, and the difficulty of achieving simultaneous phosphate removal. In this study, a multifunctional activated alumina-based sulfur composite pellet (FAS-AD) was developed to enhance process stability and enable integrated nutrient removal. Batch experiments demonstrated that the optimized formulation achieved over 94% nitrate removal within 72 h while maintaining near-neutral pH and removing more than 90% of phosphate. The composite pellet was further evaluated in a continuous-flow column reactor operated for 110 days under varying hydraulic retention times (HRTs). At 24 h HRT, nitrate removal exceeded 99%, and at 12 h HRT, removal efficiencies remained between 97–99%, with effluent nitrate concentrations consistently below 1 mg L<sup>-1</sup> during stable operation. Nitrite accumulation was minimal and rapidly recovered following short-term hydraulic disturbances. Unlike conventional sulfur systems that experience significant acidification, the composite pellet maintained pH between 6.0 and 7.5 and generated alkalinity up to approximately 130 mg L<sup>-1</sup> as CaCO<sub>3</sub>, effectively buffering acidity produced during sulfur oxidation. Simultaneous phosphate removal was sustained throughout long-term operation. Overall, the FAS-AD system demonstrated superior stability and nutrient removal performance compared to traditional sulfur-based systems, highlighting its potential as a sustainable and cost-effective solution for nitrogen and phosphorus removal in low C/N wastewater treatment.

### Acknowledgement

This work was supported by the Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. RS-2023-00227531), Rural Development Administration, Republic of Korea.

## 폐기물 기반 지오폐리머의 Pb(II) 제거: pH 고정 배치 실험을 통한 흡착-침전 기여 분리

권동혁<sup>1</sup>, 설길홍<sup>2</sup>, 최궁원<sup>2</sup>, 전병훈<sup>2</sup>, 안용태<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>경기대학교 환경에너지공학과, <sup>2</sup>한양대학교 자원환경공학과, <sup>3</sup>경기대학교 사회에너지시스템공학과

## Pb(II) Removal by Waste-Derived Geopolymers: Separating Adsorption and Precipitation Contributions via pH-Controlled Batch Tests

Donghyeok Kwon<sup>1</sup>, Kil-hong Seol<sup>2</sup>, Kung-Won Choi<sup>2</sup>, Byong-Hun Jeon<sup>2</sup>, Yongtae Ahn<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environment Energy Engineering, Kyonggi University, <sup>2</sup>Department of Earth Resources and Environmental Engineering, <sup>3</sup>Department of Civil & Energy System Engineering, Kyonggi University

산업·건설계 폐기물(폐슬러지, 폐석분, 플라이애시)은 지속적으로 발생하며, 매립 중심 처리에 따른 환경부담과 자원 손실을 줄이기 위한 자원화 기술이 요구된다[1]. 한편 수계 내 납(Pb)은 독성이 높아 효율적 제거가 필요하나, 분말형 흡착제는 회수·재사용이 어렵고 미분 유출에 따른 2차 오염 우려가 있어 현장 적용에 한계가 존재한다[2]. 이에 본 연구에서는 폐슬러지-폐석분토사-플라이애시 기반 알칼리활성화(geopolymer) 재료를 제조하고 Pb(II) 제거 성능을 배치 조건에서 평가하였다. 제조에는 10 M NaOH와 sodium silicate 용액을 활성화제로 적용하고 60 °C 24 h 양생 후 상온 양생을 수행하였다. 또한 미세구조 및 표면 반응성 조절을 목적으로 탄산리튬(Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 고품분 대비 2 wt%) 도핑 시편과 무도핑 시편을 비교하였다. Pb(II) 제거는 용액 pH 변화에 민감하며, pH 상승 시 탄산염/수산화물 형성에 따른 침전·공침으로 용존 Pb가 감소하여 흡착 성능이 과대평가될 수 있으므로 [3,4], (i) pH 5.5 고정(pH-stat) 조건과 (ii) 자연 pH 조건을 병행하였다. 또한 시편의 알칼리 용출에 따른 pH drift와 용액 자체 손실(벽흡착·침전·여과 영향)을 분리하기 위해 DI water 용출 시험 및 Pb 용액 블랭크를 수행하고, 시간별 pH와 Pb 농도를 ICP로 정량하여 블랭크 보정 흡착량을 산정하였다. 본 연구는 폐기물 기반 지오폐리머의 Pb 제거에서 흡착과 용액화학적 제거(침전/공침) 기여를 분리 해석할 수 있는 실험 프레임워크를 제시하여, 회수 가능한 수처리용 기능성 재료 설계 및 적용성 평가에 기초자료를 제공한다[2].

### 참고문헌

1. Gupta, P., Nagpal, G., and Gupta, N., "Fly ash-based geopolymers: an emerging sustainable solution for heavy metal remediation from aqueous medium," Beni-Suef Univ. J. Basic Appl. Sci., 10, 89 (2021).
2. Novais, R. M., Buruberry, L. H., Seabra, M. P., and Labrincha, J. A., "Novel porous fly-ash containing geopolymer monoliths for lead adsorption from wastewaters," J. Hazard. Mater., 318, 631-640 (2016).
3. Carvalheiras, J., Novais, R. M., and Labrincha, J. A., "Metakaolin/red mud-derived geopolymer monoliths: Novel bulk-type sorbents for lead removal from wastewaters," Appl. Clay Sci., 232, 106770 (2023).
4. Stumm, W., and Morgan, J. J., Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters, 3rd ed., Wiley, New York, (1996).

## 첨가제 보조 산 침출 공정 기반 리튬 침출 거동 및 LCA/TEA 평가

박소현<sup>1</sup>, Liao Ziqiao<sup>2</sup>, 권동혁<sup>1</sup>, 소웅<sup>1</sup>, 서정민<sup>3</sup>, 신재관<sup>3</sup>, 안용태<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>경기대학교 환경에너지공학과, <sup>2</sup>한양대학교 자원환경공학과, <sup>3</sup>경기대학교 사회에너지시스템공학과

### Lithium Leaching and LCA/TEA Evaluation of an Additive-Assisted Acid Leaching Process

Sohyun Park<sup>1</sup>, Liao Ziqiao<sup>2</sup>, Donghyuk Kwon<sup>1</sup>, Woong So<sup>1</sup>, Seo Jungmin<sup>3</sup>, Sin Jaegwan<sup>3</sup>, Yongtae Ahn<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University,

<sup>2</sup>Department of Earth Resources & Environmental Engineering, Hanyang University,

<sup>3</sup>Department of Civil & Energy System Engineering, Kyonggi University

리튬이온전지는 전기차(EV)와 에너지저장장치(ESS) 확산과 함께 핵심 에너지 저장 기술로 부상하고 있으며, 이에 따라 리튬 수요도 빠르게 증가하고 있다 [1]. 특히 탄산리튬(Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)은 주요 리튬 공급원으로 서 중요성이 확대되고 있으나 [2][3], 국내는 원료를 수입에 의존하는 구조로 공급망 안정화가 요구된다 [4]. 이러한 배경에서 생산 공정에서 발생하는 폐수/여과액에 잔존하는 리튬을 회수하는 기술은 자원 효율과 공급 안정성을 동시에 높일 수 있는 대안이 될 수 있다. 탄산리튬 공정 여과액에는 저용해성 인산 리튬(Li<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)이 남아 있어 효과적인 회수 대상이 된다 [5]. 기존 산 침출은 높은 회수율을 보일 수 있으나, 과도한 시약 사용과 폐수 처리 부담이 문제로 지적되어 왔다 [6].

본 연구에서는 첨가제 보조 산 침출 공정을 적용하여 시약 사용량과 폐수 발생을 줄이면서 리튬 침출 효율 향상을 목표로 하였다 [7]. 염산(HCl), 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), 질산(HNO<sub>3</sub>)을 침출액으로 사용하고, 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), 과망간산칼륨(KMnO<sub>4</sub>), 과황산칼륨(K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>)을 첨가제로 적용하였다. 산 농도(0.5 - 3 M)와 첨가제 농도(0.01 - 0.5 M) 조건에서 반응 시간(5, 10, 15, 20, 30, 60 min) 및 온도(25, 40, 60, 80°C)에 따른 침출 거동을 평가하였으며, 반응 후 ICP-OES로 용액 내 리튬 농도를 분석하였다. 그 결과, 침출 효율은 온도 변화보다는 산-첨가제 조합에 의해 더 크게 좌우되었고, 반응 초기 단계에서 대부분의 침출이 빠르게 진행된 후 시간이 증가함에 따라 증가 폭이 완만해졌다. 또한 25 - 80°C 범위에서 온도에 따른 침출 효율 변화는 크지 않아, 본 공정은 비교적 넓은 온도 범위에서 안정적으로 작동함을 확인하였다. 추가적으로 본 공정의 적용 가능성을 확인하기 위해 (1) 리튬 침출 효율이 최대로 나타난 조건과 (2) 효율은 다소 낮지만 시약 소모가 적은 조건의 두 가지 시나리오를 선정하여 LCA와 TEA를 수행하였다. 기존 공정이 단일 지표 중심으로 최적화되던 한계를 넘어 회수 성능, 시약 소모량, 환경영향, 경제성 간의 상충관계를 정량적으로 제시하였다. 따라서 본 연구는 리튬 회수율 향상뿐 아니라 환경성과 경제성을 함께 고려한 평가를 통해, 향후 잔존 리튬 회수 공정의 설계·운전 조건 최적화 및 공정 전환 전략 수립에 활용 가능한 정량적 근거를 제공하는데 의의가 있다.

#### 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<sub>4</sub> cathode materials by hybrid coating of nano Li<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 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.

렌니샤<sup>1</sup>, <sup>1</sup>, <sup>1,2</sup>, <sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> 광운대학교 공과대학 환경공학과, <sup>2</sup> 플라즈마바이오효과학연구센터

## Ar Jet Plasma treated Carbon Felt for High-Performance Fluoride Electrosorption

Reneesha Valiyaveetil Basheer<sup>1</sup>, Jonghun Jeong<sup>1</sup>, Choe Earn Choong<sup>1,2</sup>, Min Jang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering Kwangwoon University, <sup>2</sup>Plasma Bioscience Research Center

\*e-mail : minjang@kw.ac.kr

Fluoride contamination in drinking water causes serious environmental and health problems, so efficient, fast, and scalable removal methods are needed [1]. In this study, argon jet plasma-treated carbon felt electrodes were prepared with treatment times of 5, 10, 15, and 20 minutes, named CF<sub>5</sub>, CF<sub>10</sub>, CF<sub>15</sub>, and CF<sub>20</sub>. These electrodes were tested for electro-assisted fluoride removal. Electrochemical analyses, including cyclic voltammetry, electrochemical impedance spectroscopy, and linear sweep voltammetry, showed that longer plasma treatment improved the electrical conductivity. This improvement was observed as higher current responses, lower charge-transfer resistance, and better onset potentials. CF<sub>10</sub> showed the best fluoride removal performance, decreasing the fluoride concentration from 10.3 mg L<sup>-1</sup> to 1.1 mg L<sup>-1</sup> within 45 minutes under optimized electrosorption conditions. It exhibited clear redox peaks at 0.17 V and -0.70 V vs. Ag/AgCl in 0.5 M NaF at a scan rate of 20 mV s<sup>-1</sup> and had the highest specific capacitance at different scan rates. The contact angles for CF<sub>5</sub>, CF<sub>10</sub>, CF<sub>15</sub>, and CF<sub>20</sub> were 117.4°, 90.7°, 92.3°, and 106.2°, respectively, with CF<sub>10</sub> showing the most suitable wettability. FTIR analysis confirmed the presence of oxygen-containing functional groups, such as C=O and O-H, which support fluoride adsorption through electrostatic interaction and hydrogen bonding. In addition, treatment of real wastewater demonstrated effective fluoride removal, reducing the concentration from 5.62 mg L<sup>-1</sup> to 1.2 mg L<sup>-1</sup> within 90 minutes. Overall, the improved conductivity, proper wettability, and abundant active sites make CF<sub>10</sub> a promising electrode for rapid fluoride electrosorption in water treatment.

### Acknowledgment

본 연구는 2025 년도 한국광해광업공단의 기술개발사업 ‘광산배수 내 불소 제거 및 현장실증 기술개발’ 과제의 지원에 의한 연구임을 밝힙니다.

### References

[1] P. Kumar, M. Kumar, A.B. Barnawi, P. Maurya, S. Singh, D. Shah, V.K. Yadav, A. Kumar, R. Kumar, K.K. Yadav, A. Gacem, A. Ahmad, A. Patel, M.A. Alreshidi, V. Singh, Z.M. Yaseen, M.M.S. Cabral-Pinto, V. Vinayak, S.G. Wanale, A review on fluoride contamination in groundwater and human health implications and its remediation: A sustainable approaches, Environ. Toxicol. Pharmacol., 106 (2024) 104356.

## 광산배수 내 불소 제거효율 향상을 위한 광산배수 슬러지 기반 흡착제 개발 및 최적화

윤소연<sup>1,2</sup>, 유혜진<sup>1,2</sup>, 렌니샤<sup>1,2</sup>, 조윤서<sup>1</sup>, 종초은<sup>1,2</sup>, 장민<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>광운대학교 환경공학과, <sup>2</sup>플라즈마바이오연구센터

### Mine drainage sludge-based adsorbent development and optimization for enhanced fluoride removal in mine drainage

So Yeon Yoon<sup>1,2</sup>, Hye Jin Yoo<sup>1,2</sup>, Reneesha Valiyaveettil Basheer<sup>1,2</sup>, Yunseo Cho<sup>1</sup>, Choe Earn Choong<sup>1,2</sup>, and Min Jang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kwangwoon University, <sup>2</sup>Plasma Bioscience Research Center

Fluoride (F<sup>-</sup>) is considered one of the essential trace elements; however, excessive intake of F<sup>-</sup> (> 1.5 mg L<sup>-1</sup>) for a long time can cause fluorosis, liver damage, and interference with DNA synthesis in the human body [1]. Due to its toxicity, the development of effective F<sup>-</sup> remediation technology in water resources is required. Among the various F<sup>-</sup> removal treatments, the adsorption is considered promising technology due to its simplicity, easy operation, and environmental friendliness. The F<sup>-</sup> treatment in mine drainage (MD) produced a huge amounts of sludge and caused high treatment cost, however, the sludge from MD contains abundant aluminum (Al) and iron (Fe) oxides and hydroxides which can be utilized for F<sup>-</sup> adsorption sites. Therefore, the adsorption process using MD sludge-based adsorbents can be considered one of an economical and efficient F<sup>-</sup> treatment technology. It was found that the sludge-based adsorbents after calcination exhibited enhanced F<sup>-</sup> adsorption capacity compared to raw sludge. Among the several calcination condition including temperature and time, the adsorbent calcined at 700°C and 4 hours (S-700-4) showed the highest F<sup>-</sup> adsorption capacity (109.96 mg g<sup>-1</sup>), which is 2 times higher compared to raw sludge (56 mg g<sup>-1</sup>). Most of removal data of adsorbents was fitted well with Freundlich model and pseudo second-order model, indicating that multi-layer sorption and chemisorption is dominant in their F<sup>-</sup> adsorption behavior. In ionic strength tests, the presence of chloride (Cl<sup>-</sup>) and nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) insignificantly inhibited F<sup>-</sup> adsorption performance of S-700-4, while sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) significantly affected to F<sup>-</sup> adsorption performance of adsorbents. Further, the F<sup>-</sup> removal mechanism of S-700-4 was investigated via various characterization such as XPS and FTIR analysis.

#### 사사

본 연구는 2025년도 한국광해광업공단의 기술개발사업 ‘광산배수 내 불소 제거 및 현장실증 기술개발’ 과제의 지원에 의한 연구임을 밝힙니다.

#### 참고문헌

1. Lin, K. Y. A., Liu, Y. T., & Chen, S. Y., "Adsorption of fluoride to UIO-66-NH<sub>2</sub> in water: stability, kinetic, isotherm and thermodynamic studies," J. Colloid Interface. Sci., 461, 79-87 (2016).

## 아르곤 제트 플라즈마-산화제 연계 공정을 이용한 불소계 오염물질 PFOA의 분해 향상

유혜진<sup>1,2</sup>, 종초은<sup>1,2</sup>, 장민<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>광운대학교 환경공학과, <sup>2</sup>플라즈마바이오연구센터

### Argon jet plasma-oxidant coupling for enhanced degradation of perfluorooctanoic acid (PFOA), a fluorine-containing contaminant

Hye Jin Yoo<sup>1,2</sup>, Choe Earn Choong<sup>1,2</sup>, and Min Jang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Republic of Korea

<sup>2</sup>Plasma Bioscience Research Center/Department of Electrical and Biological Physics, Kwangwoon University, Seoul 01897, Republic of Korea

Perfluorooctanoic acid (PFOA) is a synthetic, highly persistent, and bioaccumulative fluorine-containing contaminant of global concern. It could enter the human body via contact or the food chain, and long-term exposure may cause immunotoxicity, endocrine disruption, or cancer. Currently, the US EPA has set a drinking water advisory level of 4 ng L<sup>-1</sup> for PFOA and PFOS. Due to the strong C - F bond (127 kcal/mol), PFOA is extremely resistant to conventional treatments, making effective removal essential. In this study, PFOA degradation was investigated using an argon (Ar) jet plasma system combined with oxidants—peroxymonosulfate (PMS), peroxydisulfate (PDS), sodium persulfate (SPS), hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), and monochloramine (NH<sub>2</sub>Cl). While sole Ar plasma removed 42.3%, coupling with oxidants improved performance, with PMS (5 mM) achieving the highest removal (66.3%). Varying oxidant concentrations (0.25 - 5 mM) showed strong synergistic effects (> 1). Defluorination was confirmed by ion chromatography, and physicochemical parameters were monitored. Scavenger tests identified dominant reactive species, and electron spin resonance (ESR) spectroscopy was conducted to investigate the radicals generated by the Ar jet plasma system (AP) and AP/oxidant system. pH and water matrix effect results indicated that the PFOA removal efficiency was consistently maintained across a wide pH range and in PFOA spiked-real wastewaters, indicating the robustness and applicability of the process under realistic conditions. Results demonstrate that Ar plasma coupled with oxidants significantly enhances PFOA removal, providing a promising strategy for advanced wastewater treatment.

#### Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (RS-2021-NR060112), and 2025 Technology Development Program of the Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corporation (KOMIR), titled “Development of Fluoride Removal and On-Site Demonstration Technology for Mine Drainage.”

#### 참고문헌

1. Ziwen et al., “Selective Recognition and Activation for Accelerated Decarboxylation and C-F Bond Cleavage of Perfluorooctanoic Acid”, *Applied Catalysis B: Environment and Energy* 379, (2025).

(AMD)

가

(REEs)

\_\_\_\_\_ <sup>1,2</sup>, <sup>1</sup>, <sup>1,2</sup>, <sup>1,2</sup>, <sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>광운대학교 공과대학 환경공학과, <sup>2</sup>플라즈마바이오과학연구센터

## Sustainable heavy metal recovery and purification of rare earth element (REEs) from acid mine drainage (AMD)

Nurhaslina Abd Rahman<sup>1,2</sup>, Bogyong Jung<sup>1</sup>, Kien Tiek Wong<sup>1,2</sup>, Choe Earn Choong<sup>1,2</sup>, Min Jang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering Kwangwoon University, <sup>2</sup>Plasma Bioscience Research Center

\*e-mail : minjang@kw.ac.kr

REEs are critical for sustainable technologies and are widely used in catalysts, magnets, and electronic devices. AMD, once viewed as an environmental hazard, is now recognized as a valuable secondary source of REEs. Recovering REEs from AMD wastewater reduces environmental impacts and promotes efficient resource utilization and sustainability [1]. This study developed a selective precipitation strategy for heavy metal (HMs) recovery and REEs purification from AMD collected in Daejeon, Republic of Korea, under the management of the Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corporation (KOMIR). The raw AMD exhibited an initial pH of 2.8 and a total REE concentration of approximately 1.25 mg L<sup>-1</sup>. A multi-stage treatment process comprising pretreatment, selective HMs recovery, and REE precipitation and purification was proposed. Pretreatment with hydrogen peroxide (300 ppm) oxidized Fe(II) to Fe(III), promoting Fe(OH)<sub>3</sub> formation while suppressing REE co-precipitation. Subsequent pH adjustment using sodium bicarbonate and sodium sulfides enabled effective separation of heavy metals (Fe, Mn, Al, and Cu) from REEs. Process performance was assessed by monitoring pH, oxidation-reduction potential, dissolved oxygen, and conductivity. More than 99% of HMs and REEs were recovered through sequential precipitation at pH 5 and pH 7.5. The concentrated REEs were further purified via oxalic acid precipitation using different oxalate dosages (0.2-1.0 g), achieving a maximum REE purity of 42%. Sodium carbonate was effective for bulk heavy-metal removal, whereas oxalic acid enabled REE purification. Overall, this method represents a simple, sustainable, and scalable approach for AMD remediation and REE resource recovery, offering strong potential for large-scale mine wastewater management.

### Acknowledgment

본 연구는 환경부 산하 한국광해광업공단(KOMIR)에서 지원하는 '광산배수 내 유용금속 동시회수 수질정화 공정개발' 지원을 받아 수행된 연구임.

### References

Hassas, B. V., Shekarian, Y., & Rezaee, M. (2023). *Selective precipitation of rare earth and critical elements from acid mine drainage-Part I: Kinetics and thermodynamics of staged precipitation process*. Resources, Conservation and Recycling, **188**, 106654.

## 광산배수의 적극적 처리 시설 발생 유기고분자 함유 슬러지 내 희토류 분리 공정 개발

김민지<sup>1</sup>, 오동윤<sup>1</sup>, 김연화<sup>1</sup>, 종초은<sup>1,2</sup>, 장 민<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>광운대학교 공과대학 환경공학과, <sup>2</sup>플라즈마바이오효과학연구센터

### Development of rare earth metals recovery process from acid mine drainage sludge generated from active acid mine drainage treatment facility

Min Ji Kim<sup>1</sup>, Dong Yoon Oh<sup>1</sup>, Yeon Hwa Kim<sup>1</sup>, Choe Earn Choong<sup>1,2</sup>, Min Jang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering Kwangwoon University, <sup>2</sup>Plasma Bioscience Research Center

\*e-mail : minjang@kw.ac.kr

Rare earth elements (REE) are essential resources for high-tech industries such as semiconductors, electric vehicles, and defense industries. Rather than mining REE, there is growing interest in REE recovery from waste streams. Especially, acid mine drainage sludge contains high concentrations of REE along with heavy metals, which can potentially be a valuable resource. The AMD sludge generated from the active treatment process contained high organic compounds from the polymer during the coagulation process. However, recovering REE metals from high-organic sludge can be challenging due to the strong metal-polymer interaction during the leaching process. In this study, the REE leaching process was developed for AMD sludge containing high organic polymer. The AMD sludge was collected from the domestic AMD active treatment facility. The total REE (TREE) concentration in the sludge was analyzed by using ICP-OES and the TREE concentration was 1186.1 mg/kg. To optimize the TREE leaching experiments, TREE leaching experiments were conducted under various acid types, acid concentrations, and the presence or absence of hydrogen peroxide. As a result, the use of 1.0 M of hydrochloric acid (HCl) was found to be an optimal condition for REE extraction, and 1025.3 mg/kg of REE was successfully recovered to achieve an extraction efficiency of 86%. To reveal the leaching behavior in the presence of polymer organic matter, excitation-emission matrix (EEM) fluorescence spectroscopy, Fourier-transform infrared (FT-IR) spectroscopy, and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) are performed. It was found that the excess of sulfate and calcium ions could promote the polymerization during the TREE leaching process and inhibit the TREE leaching performance by forming cage-like crosslinked structures. In summary, this finding provides a new approach for TREE recovery from AMD sludge obtained from the active treatment process.

#### Acknowledgment

본 연구는 산업통상부 산하 한국광해광업공단(KOMIR)에서 지원하는 '광산배수 내 유용금속 동시회수 수질정화 공정개발' 지원을 받아 수행된 연구임.

#### References

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.

# Differential Electrolyte pH Control Enabling Sustained Biohydrogen Generation in Dual-Chamber MECs

**Haju Son<sup>1</sup>, Minsoo Kim<sup>1,2</sup>, Eunseo Kim<sup>1</sup>, Jung Rae Kim<sup>1,2\*</sup>**

<sup>1</sup> School of Chemical Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Republic of Korea

<sup>2</sup>Institute for Environmental Energy, Pusan National University, Busan, 46241, Republic of Korea

## Abstract

Hydrogen energy, particularly eco-friendly hydrogen derived from organic waste, is gaining prominence as a sustainable alternative to fossil fuels. Microbial Electrolysis Cell(MEC) utilize Electroactive Bacteria(EAB) to convert organic matter in wastewater into high-value products such as hydrogen, enabling sustainable resource recovery from waste. In this respect, MEC offer distinct environmental advantages over conventional water electrolysis technologies. This study aimed to enhance the stability of hydrogen production by extending the medium replacement cycle of a dual-chamber MEC via electrolyte pH control. The pH of the catholyte was adjusted to ensure the stability of the Hydrogen Evolution Reaction (HER) on the stainless steel cathode, while the pH of the anolyte was regulated to maintain an optimal growth environment for Anode Respiring Bacteria (ARB). The results demonstrated that the reactor with controlled pH in both the catholyte and anolyte achieved a hydrogen production increase of approximately  $115.57 \pm 53.71\%$  compared to the without controlled reactor. This increase was significantly higher than that observed when only the catholyte pH was controlled ( $3.48 \pm 1.00\%$ ) or when only the anolyte pH was controlled ( $70.68 \pm 31.79\%$ ). As the first comparative analysis of the impact of electrolyte pH regulation on actual hydrogen yield enhancement in MEC, this study intends to contribute to the development of sustainable hydrogen production technologies.

## Advancing waste-to-hydrogen technology through strategic surface coordination modulation

Seo-Yong Lee, Seon-Yong Ahn, Beom-Jun Kim, Hyun-Seog Roh\*

Department of Environmental and Energy Engineering, Yonsei University

This study demonstrates that the surface coordination structure was strategically modulated to control the exposure of active sites by regulating the precipitation sequence. Reaction analysis revealed that the number of active Cu sites, determined by N<sub>2</sub>O titration, governed the activity at low temperatures. In contrast, at high temperatures, the oxygen storage capacity complete (OSCC) and the surface concentrations of Ce<sup>3+</sup> and Cu<sup>+</sup> became the key variables. Notably, the one-pot coprecipitated (Co-P) catalyst enhanced the Cu–Ce contact area, thereby providing a lower energy barrier for H<sub>2</sub>O dissociation and optimizing both associative and redox mechanisms. Furthermore, the strategic control of Ce or Al exposure, particularly the migration of Al to the surface as confirmed by HAADF-STEM, played a critical role in protecting active Cu species from sintering-induced deactivation, ensuring superior long-term stability and high-temperature reactivity.

## Process-intensified single-step pretreatment of SCG-derived biocrude oil: Removal of inorganics and emulsified water for sustainable biofuel applications

Ziqiao Liao<sup>1</sup>, SoonHo Cho<sup>1</sup>, Chejarla Venkatesh Reddy<sup>1</sup>, and Byong-Hun Jeon<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, 222-Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Republic of Korea

### <Instructions for abstract>

Upgrading fast pyrolysis biocrude oil into transportation fuels is limited by its high inorganic content and emulsified water, which can lead to catalyst poisoning and reduced distillation efficiency (Agency, [1]). This study proposes a process-level innovation that uses a single-stage, integrated pretreatment to effectively remove inorganics, emulsified water, and water-soluble organics from spent coffee grounds-derived biocrude oil (Jendoubi et al., [2]). The optimized experimental combination of acid washing, ultrasonication, chemical demulsification, and phase separation eliminates the need for a multistage process (Chen et al., [3]; Haider et al., [4]). Under the optimized conditions, the total inorganic removal efficiency was 87%, with high removal of Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, and K<sup>+</sup>, and a 96% reduction in emulsified water from biocrude oil. The pretreatment improved fuel quality, with decreases in total acid number (41%), asphaltene content (80%), and nitrogen content (21%). Overall, the developed pretreatment process reduced chemical use, energy input, and processing time, indicating its suitability for integration with downstream refinery processes.

### References

1. International Energy Agency, *Renewables: Analysis and Reports Forecast to 2023*, IEA, Paris (2024) (accessed 12 January 2025).
2. Jendoubi, N., Broust, F., Commandre, J. M., Mauviel, G., Sardin, M., and Lédé, J., Inorganics distribution in biooils and char produced by biomass fast pyrolysis: The key role of aerosols, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 92(1), 59–67 (2011).
3. Chen, Y., Zhu, S., Ji, Y., Ma, Z., and Wei, H., Oxidation resistance and infrared emissivity of MoSi<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> particles prepared via TEOS hydrolysis self-assembly method, *Journal of Alloys and Compounds*, 810, 151745 (2019).
4. Haider, M. S., Isik, M. A., Castello, D., Pedersen, T. H., and Rosendahl, L. A., Demineralization of miscanthus biocrude obtained from catalytic hydrothermal liquefaction: Conditioning through acid washing, *Processes*, 9(6), 1035 (2021).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 대기환경

(포스터발표 I)

---

2026년 3월 19일(목) 09:00~11:00  
부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비

## Pilot급 복합 열캐리어 연소기의 최적 운전조건 도출 시험

정석우\*, 정기진, 권인구, 전동환  
고등기술연구원 플랜트공정개발그룹

### Test for deriving optimal operating conditions using a pilot-scale direct contact steam generator

Seok Woo Chung\*, Ki Jin Jeong, In Goo Kwon, Dong Hwan Jeon  
Plant Process Development Group, Institute for Advanced Engineering

DCSG(Direct Contact Steam Generator) 방식은 고온의 연소가스 현열을 직접 이용하여 물을 순간적으로 기화시키는 기술로, 열전달 손실이 적고 고압/고온 스팀을 고효율로 생산할 수 있어 오일샌드 회수 공정과 같은 대규모 스팀 수요 공정에 적용 중인SAGD 기술을 대체할 가능성이 높은 기술로 평가받고 있다. 그러나 아직은 고압 조건에서의 연소 안정성, 열전달 효율, 스팀 기화 성능을 동시에 만족하는 연소기 운전조건에 대한 실증 데이터가 매우 제한적인 실정이다

본 연구에서는 DCSG 방식의 Pilot급 복합 열캐리어 연소기를 대상으로 운전압력 20 bar 조건에서 연료로 CNG, 산화제로 산소를 공급하며 최적 운전조건 도출 시험을 진행하고 개선된 연소기 시스템의 성능을 외부 공인시험기관 입회하에 검증하였으며 산소/CNG 공급비 변화에 따른 연소 안정성, 열발생 특성, 스팀 기화율 및 출구온도 특성 등을 분석하였다 운전조건 최적화 시험 결과, Pilot급 복합 열캐리어 연소기의 최적 산소/CNG 공급비는 2.16~2.18 범위에서 형성됨을 확인하였는데, 해당 조건에서 연소는 가장 안정적으로 유지되었으며 연소가스의 온도 분포 및 열전달 특성이 균일하게 형성되어 공급되는 물의 스팀 생성 성능이 극대화되는 것으로 파악되었다 그리고 이는 산소 과잉 및 부족 조건에서 발생하는 화염 불안정 국부 과열, 열손실 증가 등의 문제를 효과적으로 최소화한 결과라 할 수 있다

또한, 다양한 변수시험 결과를 바탕으로 도출된 최적 운전조건을 반영하여 개선된 Pilot급 연소기 시스템에 대해 운전압력 20 bar 조건에서 외부 공인시험기관 입회 성능검증 시험을 수행하였는데, 시험 결과 스팀 기화율 99.9%, 출구온도 328.4 를 달성하여 기술 개발 성능목표를 성공적으로 달성하였다. 특히, 거의 완전 기화에 가까운 스팀 기화율은 복합 열캐리어 구조에 의해 연소가스와 물 간의 열교환 효율이 매우 우수함을 실증하는 결과이다 본 연구는 DCSG 기반 복합 열캐리어 연소기가 고압 조건에서도 안정적인 연소와 탁월한 스팀 생성 성능을 동시에 확보할 수 있음을 Pilot급 실증을 통해 입증한 사례로서 향후 scale-up 규모의 DCSG 시스템 설계 시 핵심 운전 인자 및 설계 기준을 제시할 수 있을 것으로 기대된다

#### 사사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-222-00143541).

## 선속도 유사성 기반의 복합 열캐리어 연소기 스케일업 설계

신은주<sup>1</sup>, 정석우<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>고등기술연구원

### Scale-up Design of a Direct Contact Steam Generator Based on Superficial Velocity Similarity

Eun Ju Shin<sup>1</sup>, Seok Woo Chung<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Institute for Advanced Engineering

탄소중립 사회로의 전환과 함께 지중 열에너지 저장 기술이 확대되면서, 고온 열전달 유체를 활용한 열에너지 공급 및 저장 기술의 필요성이 증대되고 있다. 본 연구에서는 물, 천연가스(CNG) 및 산화제(산소)를 연소기에 동시에 주입하여 연소반응을 유도하고, 노즐 출구에서 생성되는 연소가스와 스팀 혼합물의 거동을 분석하였다. 이를 기반으로 물의 기화율 99% 이상 확보를 성능 목표로 하는 동심관형 연소기를 대상으로 파일럿급 설비를 중규모급으로 스케일업하기 위한 설계 방법론을 제시하였다. 연소기 스케일업 시  $Q = A \cdot V$  관계를 기반으로 파일럿급과 중규모급 연소기에서 선속도가 유사하도록 파이프 규격을 선정하는 실무적 접근을 적용하였으며, 체류시간이나 혼합 강도를 직접적으로 동일하게 맞추기보다는 유량 증가에 대응하여 각 유로의 단면적 및 연소기 길이를 유사 비율로 확대하는 방식으로 설계를 수행하였다. 스케일업 전후 조건에 대해 레이놀즈수, 압력강하 특성을 비교한 결과, 연소가스 유로는 전반적으로 난류 유동 특성을 유지하면서 압력 손실 운전에 큰 영향을 미치지 않는 수준으로 나타났다. 이러한 결과는 본 연구에서 적용한 선속도 유사 기반 설계가 엄밀한 CV 스케일업 조건을 완전하게 충족하는 방식은 아니더라도, 유체역학적 유사성과 열·질량전달 관점에서 큰 편차 없이 연소기 성능을 재현할 수 있는 현실적이고 합리적인 스케일업 전략임을 시사한다. 또한 반응 구간의 길이 확장을 통해 분무된 물의 체류시간이 확보되어 연소가스와의 열교환 및 기화 성능 측면에서도 유리한 조건이 형성되는 경향을 확인하였다. 본 연구 결과는 연소 반응과 물 기화가 동시에 발생하는 고온·고압 연소기 기반 복합 열캐리어 생성 시스템의 스케일업 설계에 있어 실증 기반 설계 프레임워크로 활용될 수 있다.

#### 사사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음. (과제번호 RS-222-00143541)

세라믹 중공사막 기반 혈액투석 모듈의 생체적합성과  
요독물질 제거 특성 연구

황재연, 박정훈\*  
동국대학교 화학생명공학과

**Study on the Biocompatibility and Uremic Toxin Removal  
Characteristics of a Hemodialysis Module based on Ceramic Hollow  
Fiber Membranes**

Jae Yeon Hwang, 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)

## 고순도 리그닌 회수를 위한 염분 제거 기술 최적화

강은희, Xuelong Zhuang, 박정훈\*  
동국대학교 화공생물공학과

### Optimization of Desalination Technology for High-Purity Lignin Recovery

Eun Hee Kang, Xuelong Zhuang, Jung Hoon Park\*  
Department of Chemical & Biochemical Engineering

#### 연구의 배경 및 목적

바이오매스의 핵심 성분인 리그닌은 막대한 잠재력을 가진 천연 고분자 자원이지만 고부가가치 소재로 전환하기 위해서는 원료 내 불순물을 효과적으로 제거하는 분리 기술의 확보가 필수적이다. 특히 알칼리성 리그닌 폐액에 잔류하는 염분은 후속 공정의 효율을 저해하는 고질적인 장애물로 작용해 왔다.

#### 기술적 솔루션

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고자  $\text{-Al}_2\text{O}_3$  중공사막(HF) 지지체 위에 초박형  $\text{-Al}_2\text{O}_3$  층을 정밀하게 코팅한 /  $\text{-HF}$  복합막을 설계하였다. 고온 소성 공정을 통해 최적화된 이 막은 지지체 ( $0.2 \mu\text{m}$ )와 활성층( $1.6 \text{ nm}$ ) 사이의 명확한 기공 구조 차이를 형성하여 알칼리 금속 이온( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  등)과 고분자 리그닌을 동시에 선택적으로 분리하는 세라믹 나노여과 시스템을 구현하였다.

#### 주요 성능 및 결과

실험 결과, 염류 제거 효율은 전해질의 종류에 따라  $\text{Na}_2\text{SO}_4 < \text{MgSO}_4 < \text{NaCl} < \text{KCl} < \text{CaCl}_2 < \text{MgCl}_2 < \text{AlCl}_3$  순으로 뚜렷한 경향성을 보였다. 특히 최적화된 운전 조건에서 나트륨( $\text{Na}^+$ ) 92 %, 칼륨( $\text{K}^+$ ) 85 %라는 우수한 탈염 성능을 기록하였다. 또한, 리그닌의 투과율을 약 19.34 %로 제어함으로써 고농도 리그닌의 회수 가능성을 입증하였으며, 5일간의 연속 운전에서도 투과량과 분리 효율이 일정하게 유지되는 탁월한 화학적·물리적 안정성을 검증하였다.

## -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅 -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 지지체 기반 Pd-Ru 중공사막의 고온 수소 분리 성능 평가

한성우, 신민창, 박상민, 허승희, 박정훈\*  
 동국대학교 화공생물공학과

### Enhanced High-Temperature Hydrogen Separation of Pd-Ru Hollow Fiber Membranes on -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Coated -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Supports

Sung Woo Han, Min Chang Shin, Sang Min Park, Seung Hee Huh and Jung Hoon Park\*  
 Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University

본 연구에서는 -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 중공사(HFM) 지지체 표면에 -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 중간층을 코팅한 후, 이를 기반으로 Pd 및 Pd-Ru 수소 분리막을 무전해 도금법을 이용하여 제조하였다. -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅은 지지체의 표면 거칠기와 기공 구조를 제어하여 치밀하고 균일한 금속막 형성을 유도하였다. 제조된 Pd 및 Pd-Ru 분리막의 미세구조와 기체 투과 특성을 체계적으로 평가하였다. 450°C에서 수행한 수소 투과 실험 결과, Pd-Ru 분리막은 Pd 단일막 대비 약 70% 향상된 수소 플럭스를 나타내었다. 이는 Ru 첨가에 따른 격자 왜곡 효과와 수소의 용해도 및 확산도 증가에 기인한 것으로 판단된다. H<sub>2</sub>:N<sub>2</sub> = 3:1 혼합 기체 조건에서도 Pd-Ru 분리막은 높은 선택도를 유지하였다.

또한 공급 가스 조성 변화에 따른 수소 투과 거동을 분석한 결과, Ru 합금막은 다양한 조건에서 안정적인 투과 특성을 보였으나, 수소 투과 감소 현상이 일부 관찰되었다.

이러한 결과는 -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 중간층 개질과 Pd-Ru 합금화 전략이 중공사막 기반 수소 분리 시스템의 투과 성능 및 선택도 향상에 효과적임을 시사한다. 본 연구에서 개발된 Pd-Ru 분리막은 암모니아 분해 등 고온 수소 생산 및 정제 공정에 적용 가능한 높은 잠재력을 가진다.

## 비정질(amorphous) 합금 분리막의 수소 분리 정제 연구

신민창, 한성우, 허승희, 박상민, 박정훈\*  
동국대학교 화공생물공학과

### Research on Hydrogen Separation-Purification Using Amorphous Alloy Membranes

Min Chang Shin, Sung Woo Han, Seung Hee Huh, Sang Min Park, Jung Hoon Park\*  
Department of Biochemical & Chemical Engineering, Dongguk University

수소를 이용한 에너지 기술은 이산화탄소 배출이 없는 기술로 최근 이산화탄소 배출량을 줄이기 위한 노력의 일환으로 크게 주목받고 있다. 이에 따라 고순도의 수소를 제조정제하는 기술의 필요성 또한 대두되고 있다. 침냉법, PSA(Pressure Swing Adsorption), 분리막 등의 다양한 수소 정제 기술 중에서 분리막을 이용한 수소 정제 기술은 설치 비용이 낮고 공정이 간단하다는 장점이 있다. 그러나 수소 정제용 분리막의 경우 Pd의 의존도가 매우 높기 때문에 공정 비용의 대부분이 Pd가 점유하고 있다.

본 연구에서는 고가의 Pd를 사용하지 않고도 수소 분리를 위해 Ti을 베이스로 하는 조성으로 arc melting을 통해 합금을 만들고 melting spinner 장치로 평막을 만들었다. 수소 투과 실험은 이산화탄소와 수소를 2:8 비율로 조성한 혼합 가스로 진행되었으며 XRD와 SEM 등의 분석 장비를 통해 실험 전후의 분리막 특성 변화를 확인하였다.

사사: This work was supported by the Technology Innovation Program (RS-2024-00469065, Development of manufacturing technology for ceramic composite separation membrane for medium temperature (300~600 ) hydrogen separation) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE, Korea)

## 무전해 도금을 이용한 Pd-Ag-Cu 합금수소 분리막 제조 및 분리 효율 검증

박상민<sup>1</sup>, 한성우<sup>1</sup>, 신민창<sup>1</sup>, 허승희<sup>1</sup>, 박정훈<sup>1\*</sup>  
 동국대학교 화공생물공학과 04620

### Fabrication and Performance Evaluation of Pd-Ag-Cu Hydrogen Separation Membranes Via Multi-Component Alloy Design

Sang-Min Park<sup>1</sup>, Sung-Woo Han<sup>1</sup>, Min-Chang Shin<sup>1</sup>, Seung-Hee Huh<sup>1</sup> and Jung-Hoon Park<sup>1\*</sup>  
 Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University, Seoul 04620, Republic of Korea<sup>1</sup>

본 연구에서는  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 다공성 지지체 상에 무전해 도금(electroless plating) 공정을 이용하여 Pd-Ag-Cu 삼원계 합금 수소 분리막을 제조하였다. 각 금속 성분을 순차적으로 증착한 후 500 수소 분위기에서 18시간 동안 열처리를 수행해 균일한 합금층을 형성하였다. 형성된 분리막의 표면 특성을 확인하기 위해 주사전자현미경(SEM), 에너지 분산형 X-선 분광기(EDS) 및 X-선 회절(XRD) 분석을 진행하였다. 최종 합금 막은 3.54  $\mu\text{m}$ 의 두께와 Pd 막의 두께는 7.82  $\mu\text{m}$ 로 측정되었으며, Pd-78wt%, Ag-8.8wt%, Cu-13.2wt%의 조성비를 가짐을 확인하였다. 수소 투과 및 분리 성능은 350~450 , 1~4 barg 조건에서 단일 수소(H<sub>2</sub>)와 H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 혼합 기체를 대상으로 수행되었다. 성능 평가 결과 단일 수소 조건에서 450 , 4 barg 일때 Pd 분리막의 최대 수소 플럭스는 74.16 ml/cm<sup>2</sup>·min, Pd-Ag-Cu 분리막의 최대 수소 플럭스는 113.64 ml/cm<sup>2</sup>·min으로 나타나 합금막이 더 높은 투과율을 보였다. H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 분리 실험에서 합금막의 분리 계수(separation factor)는 동일조건 기준에서 Pd 막의 2,437에 비해 Pd-Ag-Cu막은 11,032로 나타나 합금막에서 월등히 높은 선택성을 입증하였다. 이러한 결과는 다성분 합금 설계가 Pd 단일막 대비 수소 투과율과 선택성을 동시에 개선할 수 있는 유효한 전략임을 시사한다.

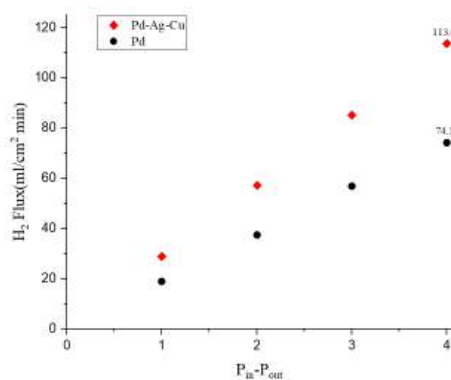


Figure 1. Hydrogen Flux of Pd and Pd-Ag-Cu Membrane at 450°C.

## Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 중공사막을 이용한 암모니아 분해 공정용 수소 분리 특성 비교: 산화물과 Pd 막의 성능 분석

허승희, 한성우, 박정훈\*  
동국대학교 화공생물공학과

### Performance Comparison of Oxide and Pd Hollow Fiber Membranes for Hydrogen Separation in Ammonia Decomposition Systems

Seung Hee Huh, Sung Woo Han, Park Jung Hoon\*  
Department of chemical and biochemical engineering, Dongguk University

암모니아는 높은 수소 함량과 잘 구축된 유통 인프라 덕분에 유망한 수소 저장 및 운송체로 간주되고 있다. 그러나 암모니아 분해를 통해 생산된 수소에는 질소와 잔류 암모니아가 필연적으로 포함되며, 이를 연료전지 등 하류 공정에 응용하기 위해서는 반드시 고순도 정제 과정이 수반되어야 한다. 본 연구에서는 암모니아 분해 가스 환경에서 수소 정제를 수행하기 위해 산화물 기반 및 팔라듐기반의 중공사막을 제조하고 그 성능을 비교 평가하였다. 구체적으로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 중공사 지지체 위에 -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 SiO<sub>2</sub> 산화물층과 Pd 금속층을 각각 증착하여 서로 다른 분리막을 제작하였으며, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> 혼합 가스를 이용해 고온·고압 조건에서의 분리 성능을 조사하였다. 제조된 분리막의 구조적 특성을 분석하기 위해 SEM으로 지지체의 표면 및 단면 구조를 관찰하였고, AFM을 활용하여 표면 거칠기 특성을 정밀하게 평가하였으며, XRD 분석을 통해 Pd 층의 결정 구조와 상 형성 여부를 검증하였다. 연구 결과, 산화물층의 도입은 알루미늄 중공사 지지체의 표면 거칠기를 유의미하게 개선하는 효과를 보였다. 그러나 가스 투과 실험 결과, 산화물 기반 분리막을 통한 수소 분리는 기공 확산(pore diffusion) 메커니즘의 지배를 받아 수소 선택도 향상에 본질적인 한계가 있음을 확인하였다. 반면, Pd 중공사막은 금속막 특유의 용해-확산(dissolution - diffusion) 전달 메커니즘에 기인하여 현저히 높은 수소 순도와 선택도를 나타냈다. 결과적으로 산화물 분리막은 전처리 또는 중간층으로 활용하기에 적합하며, Pd 중공사막은 암모니아 분해 후 고온 수소 정제를 위한 가장 효과적인 대안임을 입증하였다.

## 가시광 활성 블랙 TiO<sub>2</sub> 기반 중공사 광촉매막을 이용한 고효율 암모니아 제거

장학룡, 황재연, 강은희, 한성우, 박정훈  
동국대학교

### High-Efficiency Ammonia Removal Using Visible-Light-Active Black TiO<sub>2</sub>-Based Hollow Fiber Photocatalytic Membranes

Xuelong Zhuang, Jae Yeon Hwang, Eun Hee Kang, Sung Woo Han, Min Chang Shin, Jung Hoon Park  
Dongguk university

실내 공기질 개선은 중요한 공중보건 문제이나 기존 광촉매 막은 가시광 영역에서의 낮은 활성으로 인해 활용에 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 질소 도핑된 블랙TiO<sub>2</sub> (BT550)를 -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 중공사 지지체에 도입하여 가시광 반응성을 향상시킨 광촉매 중공사막을 제조하였다.

질소 도핑은 산소 공공(oxygen vacancy)과 Ti<sup>3+</sup> 종 형성을 유도하여 가시광 흡수 범위를 확장시키고 전자 분리 효율을 향상시켰다. 특히 550 °C에서 열처리한 질소 도핑 TiO<sub>2</sub> 막(BT550M)은 동일 온도에서 공기 분위기 열처리한 TiO<sub>2</sub> 막(T550M) 대비 우수한 암모니아 제거 성능을 나타냈다.

최적 조건(10 sccm)에서 BT550M은 UV 조사 하에서 97.0%, 가시광 조사 하에서 82.8%의 최대 암모니아 제거율을 달성하였다. 이는 동일 조건에서 제조된 T550M 대비 현저히 향상된 결과이다. 또한 6일간의 장기 안정성 평가에서 UV 조건에서는 95.6-97.1%, 가시광 조건에서는 81.3-83.1%의 안정적인 제거율을 유지하여 우수한 내구성을 확인하였다.

본 연구 결과는 질소 도핑 블랙 TiO<sub>2</sub> 기반 광촉매 중공사막이 연속식 공기 정화 시스템에 적용 가능성이 높으며, 특히 실내 암모니아 저감에 효과적인 대안이 될 수 있음을 시사한다.

$\gamma/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 

\_\_\_\_\_ , , , , , \*

## Development of $\gamma/\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ Ceramic Nanofiltration Membranes for Selective Separation

So Hee Park, Eun Hee Kang<sup>1</sup>, Xuelong Zhuang<sup>2</sup>, Min Chang Shin<sup>3</sup>, Jae Yeon Hwang<sup>4</sup> and Jung Hoon Park<sup>\*</sup>

Department of Chemical and Biochemical Engineering

The presence of high concentrations of metal ions in lignin waste streams is a primary constraint hindering the high-value utilization of lignin. Consequently, there is an urgent need for an effective separation process. In this study,  $\gamma/\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic nanofiltration (NF) membranes were fabricated by forming an ultra-thin  $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$  layer on  $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$  hollow fiber supports to simultaneously separate metal ions and lignin from alkaline waste liquids. The membranes were prepared via a sol-gel process and dip-coating method, followed by high-temperature calcination to create a dense selective layer. Characterization results showed that the average pore size of the  $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$  support decreased to approximately 1.6 nm after  $\gamma$  layer coating, successfully achieving NF-range separation properties. Under optimal operating conditions, rejection rates of approximately 92% for  $\text{Na}^+$  and 85% for  $\text{K}^+$  were achieved. Furthermore, a lignin permeation of 19.34% was observed, confirming the feasibility of selective concentration. These results demonstrate the potential of  $\gamma/\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic membranes for the efficient purification of lignin and removal of inorganic impurities in industrial processes.

### References

1. Wang, Zhen, et al. "Preparation, characterization and solvent resistance of  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  inorganic hollow fiber nanofiltration membrane." *Journal of Membrane Science* 503 (2016): 69-80.
2. Naseer, Danyal, et al. "High-performance  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  multichannel tube-type tight ultrafiltration membrane using a modified sol-gel method." *Membranes* 13.4 (2023): 405.
3. Qin, Hang, Wenming Guo, and Hanning Xiao. "Preparation of  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  membranes for ultrafiltration by reverse micelles-mediated sol-gel process." *Ceramics International* 45.17 (2019): 22783-22792.

## The Effect of Binder on Physical Properties and Adsorption Performance in the Structured Adsorbent Coating Process for DAC

Min Ju Kim, Tae Heon Kim, Heon Lee, Wang-Geun Shim \*

Department of Chemical Engineering, Suncheon National University, South Korea

Direct Air Capture (DAC) technology has attracted significant attention as a promising approach to mitigate climate change by effectively removing carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) diluted in the atmosphere. Captured CO<sub>2</sub> can be utilized or stored in various applications such as geological storage (CCS), synthetic fuels and chemical feedstock production (CCU), mineral carbonation, and CO<sub>2</sub> supply for food and greenhouse industries. For practical DAC implementation, binder-coating of adsorbents such as activated carbon and zeolites is essential to ensure high CO<sub>2</sub> capture efficiency and long-term stability under low-concentration conditions. The binder-coating process typically employs organic or inorganic binders that must provide mechanical integrity, maintain porosity, and exhibit thermal and moisture resistance. The binder composition strongly influences the pore structure, diffusion resistance, and thermal conductivity of the adsorbent, thereby affecting CO<sub>2</sub> adsorption performance. Therefore, understanding the relationship between binder properties, mechanical strength, pore characteristics, and adsorption capacity is crucial for designing optimized structured adsorbents. In this study, activated carbon was used as the adsorbent to investigate the influence of organic and inorganic binders on the physicochemical properties, pore characteristics, and CO<sub>2</sub> adsorption performance. Partial blocking of the pore structure was observed depending on the binder type, morphology, and loading ratio, which consequently affected the surface area and pore volume of the activated carbon. These factors were identified as key parameters determining CO<sub>2</sub> adsorption capacity. This work provides fundamental insights into binder-coating strategies for structured adsorbents, offering practical guidelines for the development of DAC systems.

### References

1. Xu H. et al., "A comprehensive review on direct air carbon capture (DAC) technology by adsorption: From fundamentals to applications," *Energy Convers. Manag.*, 322, 119119 (2024).
2. Kummer H. et al., "A Functional Full-Scale Heat Exchanger Coated with Aluminum Fumarate Metal–Organic Framework for Adsorption Heat Transformation," *Ind. Eng. Chem. Res.*, 56(29), 8393-8398 (2017).

## **Trends in Data Processing Automation for Carbon Emission Management: An Initial Mapping Analysis Based on Academic Publications and Public Patents**

Heekyung An

Korea Institute of Industrial Technology

As demand for carbon-emission-related information continues to grow in the manufacturing sector, the need to automate data-processing workflows for carbon emissions management has become increasingly salient [1] [2]. This demand extends beyond conventional life cycle assessment (LCA)-based quantification, expanding to encompass practice-oriented functions such as measurement, reporting, and verification (MRV), greenhouse-gas (GHG) accounting, and the quantification of mitigation outcomes. Carbon-related data are generated across diverse equipment, systems, and process units, resulting in substantial heterogeneity in formats and quality. Consequently, recurring challenges arise in ensuring data consistency, standardization, quality management, traceability, and governance. Because these challenges can affect the credibility and verifiability of carbon information, automation is closely linked not only to operational efficiency but also to the establishment of trust-based carbon management systems. This study aims to provide a overview of trends in data-processing automation by conducting a literature-based mapping analysis of academic publications and patents. The findings are expected to serve as a foundational basis for setting future research directions and identifying practical considerations for industrial deployment.

### **Acknowledgment**

This research was supported by the Korea Institute of Industrial Technology (KITECH) Basic Project [Development and commercialization for clean hydrogen production/storage and CO<sub>2</sub> monitoring system in the field of industrial].

### **References**

1. Bianca, K., Anton, F., Sebastian, S. L., Walter, W. and Bettina, M. S., "Automation of Life Cycle Assessment-A Critical Review of Developments in the Field of Life Cycle Inventory Analysis," *Sustainability*, 15, 5531 (2023).
2. Ioan, P., Amin, A., Ali, G., Andrei, H. and Yacine, R., "Digital twins for dynamic life cycle assessment in the built environment," *Science of the Total Environment*, 993, 179930 (2025).

## MIL-125(Ti)-Derived TiO<sub>2</sub>-Carbon Composite Supports for Enhanced NH<sub>3</sub>-SCR Catalysis

Wonjung Cho<sup>1,2</sup>, Hyejin Kim<sup>1</sup>, Han-Ung Kim<sup>1</sup>, Hee Soo Kim<sup>1\*</sup> and Dong-Ha Lim<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

The selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> with NH<sub>3</sub> (NH<sub>3</sub>-SCR) is a key technology for controlling nitrogen oxide emissions, yet high activity under low- and medium-temperature conditions remains challenging. Beyond active-phase composition, recent studies highlight that support-driven structural and electronic properties critically influence SCR reactivity [1].

Here, MIL-125(Ti) was employed as a precursor to design TiO<sub>2</sub>-carbon composite supports via controlled carbonization (300–600 °C). Carbonization induced framework collapse and anatase TiO<sub>2</sub> formation, accompanied by pore restructuring from micropore-dominated to mesopore-enriched architectures. Increasing carbonization temperature also promoted residual carbon formation and defect-associated oxygen species, leading to improved charge-transfer characteristics at the TiO<sub>2</sub>-carbon interface.

V and W active species were then deposited onto the composites to form VW/TM catalysts. The catalyst derived from high-temperature carbonization retained the anatase phase and showed the most favorable mesoporous accessibility after metal loading. In NH<sub>3</sub>-SCR tests, this catalyst delivered enhanced NO conversion, reaching **73.3% at 200 °C** and **98.4% at 350 °C**, and exhibited stable operation during prolonged testing.

Overall, the results demonstrate that MOF-derived TiO<sub>2</sub>-carbon composites provide an effective support engineering route to enhance SCR performance by coupling hierarchical porosity with defect-enabled interfacial charge transfer.

### **REFERENCES:**

[1] L. Han, S. Cai, M. Gao, J.-y. Hasegawa, P. Wang, J. Zhang, L. Shi, D. Zhang, *Selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> with NH<sub>3</sub> by using novel catalysts: State of the art and future prospects*, **Chemical Reviews**, 119 (2019) 10916–10976.

### **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).

고내구성 CF<sub>4</sub> 가수분해 촉매에 관한 연구이은한<sup>1,2</sup>, 조원섭<sup>1,3</sup>, 조재현<sup>4</sup>, 김한성<sup>2</sup>, 이신근<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>한국에너지기술연구원, 34129 대전광역시 유성구 가정로 152<sup>2</sup>연세대학교 화공생명공학과, 03772 서울특별시 서대문구 연세로 50<sup>3</sup>고려대학교 신소재공학과, 02841 서울특별시 성북구 안암로 145<sup>4</sup>나노화인테크(주), 16954 경기도 용인시 기흥구 흥덕1로 13Research on High-Durability CF<sub>4</sub> Hydrolysis CatalystsEun-Han Lee<sup>1,2</sup>, Won-Seob Cho<sup>1,3</sup>, Jaehyun Cho<sup>4</sup>, Hansung Kim<sup>2</sup>, Shin-Kun Ryi<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>Korea Institute of Energy Research (KIER), 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Republic of Korea<sup>2</sup>Department of Chemical and Biological Engineering, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03772, Republic of Korea<sup>3</sup>Department of Materials Science and Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, Republic of Korea<sup>4</sup>Nano Fine Tech, 13, Heungdeok 1-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea**Abstract**

사불화탄소 (CF<sub>4</sub>)는 지구온난화지수가 CO<sub>2</sub> 대비 6,500으로 높으며, 대기 중 수명이 50,000년으로 매우 높은 온실가스이다. CF<sub>4</sub>는 반도체 및 디스플레이 생산 시설에서 광범위하게 사용하고 있으며, 에칭 (Etching)과 증착(CVD) 공정에서 주로 사용한다. CF<sub>4</sub> 배출을 저감하기 위한 다양한 방식 중 알루미늄 기반 촉매를 활용한 촉매 가수분해는 낮은 에너지 소모, 간단한 공정의 이점이 있다. 하지만, 기존 -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매는 불화수소(HF) 노출 시 구조적 열화와 비가역적 상전리로 인해 촉매 활성이 없는 -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 변하는 문제가 있다. 본 연구에서는 Zn와 P를 도입하여 -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매의 상변화를 완화함과 동시에 성능을 향상하는 초고안정성 ZnAlPO<sub>4</sub> 촉매를 개발하였다. 인은 열역학적으로 안정한 Al-O-P 구조 형성을 통해 HF에 의한 상전이를 억제하여 장기 내구성을 향상하고, 아연은 산점 향상 및 표면 수산화기 형성을 통해 CF<sub>4</sub> 활성을 촉진한다. 본 연구에서 개발한 촉매는 가수분해를 통해 700°C에서 CF<sub>4</sub> 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<sub>4</sub> 저감을 위한 촉매로 적용할 수 있을 것으로 판단한다.

사사 : 저자는 본 연구를 한국에너지기술연구원 주요사업 (C6-2415-58)지원을 통해 수행하였습니다.

## 마이크로웨이브 가열을 위한 촉매 및 이를 이용한 VOCs 산화 반응에 관한 연구

조원섭<sup>1,2</sup>, 이은한<sup>1,3</sup>, 김세호<sup>2</sup>, 이신근<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>한국에너지기술연구원, 34129 대전광역시 유성구 가정로 152

<sup>2</sup>고려대학교 신소재공학과, 02841 서울특별시 성북구 안암로 145

<sup>3</sup>연세대학교 화공생명공학과, 03772 서울특별시 서대문구 연세로 50

## Research on Catalysts for Microwave Heating and Their Application in the VOCs Oxidation

Won-Seob Cho<sup>1,2</sup>, Eun-Han Lee<sup>1,3</sup>, Se-ho Kim<sup>2</sup>, Shin-Kun Ryi<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Energy Research (KIER), 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Materials Science and Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Chemical and Biological Engineering, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03772, Republic of Korea

### Abstract

마이크로웨이브 가열 기반 촉매 공정은 촉매 표면을 직접 선택적으로 가열할 수 있어 매우 빠른 가열 속도와 높은 에너지 효율을 동시에 확보할 수 있는 공정 기술이다. 마이크로웨이브 가열은 기존 전기히터 기반의 가열 방식과 달리 반응기 외벽과 주변 기체의 불필요한 가열을 최소화할 수 있으며, 부하 변동에 유연하게 대응할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 특성으로 작업 시간에 능동적으로 대응해야 하는 중소형 사업장과 간헐적 배출 특성을 가지는 도장 공장과 같은 산업 현장에 적합한 특징을 가진다. 마이크로웨이브 가열 공정에 적용하기 위해서는 촉매 설계가 중요하며, 특히 마이크로웨이브 흡수체와 촉매 지지체의 상관관계를 규명하는 것이 핵심 요소이다. 따라서 본 연구는 가열체인 SiC와 촉매 지지체인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 상관관계를 규명하여 마이크로웨이브 가열에 적합한 촉매를 개발하고, 이를 휘발성 유기 화합물(VOCs) 분해에 적용하여 개발한 촉매의 분해 특성을 확인하였다. 본 연구에서는 압출 공정으로 SiC 함량을 10~30 wt%로 조절한 직경x길이가 5 mm x 5 mm인 펠렛 형태의 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합 지지체를 제조한 후 마이크로웨이브 촉매 반응기에 20 ml 장입 후 120 W 출력 조건에서 가열 특성을 확인하였다. 이후 VOCs 산화를 위하여 Pt를 egg-shell 구조로 코팅한 후 Air 800 sccm, 톨루엔 5,000 ppm을 공급하여 VOCs 분해 성능을 평가하였다. 가열 특성 실험 결과 SiC 함량이 10, 20, 30 wt%일 때 각각 210, 220, 250 °C까지 도달하였으며, SiC 함량이 증가할수록 촉매의 가열 특성이 향상함을 확인하였다. 산업 현장에서 배출되는 대표적인 VOCs인 톨루엔 분해 실험 결과 SiC 함량이 10, 20 wt%인 경우 50 W의 저출력 조건에서도 촉매의 온도가 300 °C에 도달하였고, 이 조건에서 톨루엔의 완전 분해가 가능하였다. SiC 함량이 30 wt%인 경우 낮은 전력으로도 동일한 온도 도달이 가능한 반면 분해 성능이 감소하는 경향을 나타내었고, 이를 통해 마이크로웨이브 가열 환경에서 촉매 지지체의 적정 SiC 함량이 가열 효율과 촉매 성능을 동시에 향상하는 핵심 요소임을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 촉매는 높은 에너지 효율과 우수한 분해 성능을 바탕으로 다양한 산업 공정에서 적용할 수 있을 것으로 판단한다.

사사 : 저자는 본 연구를 한국에너지기술연구원 주요사업 (C6-2415-58)지원을 통해 수행하였습니다.

## Controlling the Surface Roughness of Ceramic Substrates for Gas Separation Membranes

Hong Joo Lee<sup>\*</sup>, Jang-Hoon Ha, Jongman Lee, In-Hyuck Song  
Korea Institute of Materials Science (KIMS), Republic of Korea

Membranes for gas separation play a critical role in carbon dioxide capture, hydrogen recovery, and the generation of high-purity gases. The overall efficiency of these systems depends heavily on the structural characteristics of the underlying support. Specifically, ceramic substrates act as the foundational layer for gas separation films, where their surface topography plays a vital role in determining coating uniformity and preventing defect generation [1]. Excessive surface roughness can cause non-uniform coatings and structural flaws, which ultimately deteriorate the membrane's separation performance [2].

This research presents the development and experimental validation of a precise method to regulate the surface roughness of ceramic membrane substrates. To tailor the microstructural properties, techniques such as particle size tuning, sol-gel deposition, and the optimization of sintering parameters were utilized. The resulting surface features were thoroughly characterized via AFM, SEM, and BET analysis. Experimental outcomes demonstrated that maintaining surface roughness within an optimal range yields a highly uniform microstructure across the ceramic support. Drawing upon these findings, structural design guidelines for fabricating highly efficient supports for gas separation applications are proposed. Ultimately, this work provides valuable insights into the advancement of high-performance gas separation technologies and supports sustainable energy initiatives.

### Acknowledgements

This work was supported by the Technology Innovation Program (RS-2024-00469064, Development of extruded ceramic membrane support, nanopore coating technology and hydrogen membrane module) funded By the Ministry of Trade Industry & Energy (MOTIE, Korea), and This research was supported by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by Ministry of Science and ICT(RS-2024-00445094)

### References

1. Uhlhorn, R. J. R., Keizer, K., and Burggraaf, A. J., "Gas transport and separation with ceramic membranes. Part I. Multilayer diffusion and capillary condensation," *Journal of Membrane Science*, 66(3), 259-269 (1992).
2. Tsuru, T., "Nano/subnano-tuned pore structure of inorganic membranes for molecular separation," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 46(3), 349-361 (2008).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 수소 및 재생에너지

(포스터발표 I)

---

2026년 3월 19일(목) 09:00~11:00  
부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비

## 원자력발전소 연계 수전해 수소 활용 기술 개발

민진원<sup>1</sup>, 나희승<sup>1</sup>, 김경덕<sup>1\*\*</sup>

대전광역시 유성구 대덕대로 1227, 한국가스기술공사 신에너지연구원

### Development of Technology of Carbon-Free Power-integrated Low-temperature electrolysis for Renewable Energy Harminization

JinWon, Min<sup>1</sup>, HeeSeung, Na<sup>1</sup>, Kyungduk, Kim<sup>1\*\*</sup>

Energy Research Center, 1227, Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34007, Korea

#### 요약

지구온난화를 유발하는 대기 중 온실가스(Green House Gas)는 산업혁명 이래 화석연료의 연소 등 인간의 여러 활동에 기인하여 증가하였으며, 이러한 온실가스 효과로 인하여 지구온난화의 지표인 지구 표면 온도가 지난 100년 동안(1906년~2005년)  $0.74 \pm 0.18^\circ\text{C}$  상승하였다. 20세기 말 기후변화라는 환경문제가 점차 인류 생존을 위협하는 요소로 자리매김하게 됨에 따라 국제사회는 범지구적 국제협약을 체결(파리기후협정, 2015)하였고 탄소중립을 추진 주이며 탄소중립 추진을 위한 방법들 중 수소를 활용한 물류, 난방, 운송 및 에너지 저장이 세계적으로 각광받고 있는 추세이다.

수소 생산의 대부분은 현재 화석연료를 사용하는 열화학적 생산 방식으로 천연가스 개질과 부생수소 정화법이 적용되고 있으며, 이러한 방법들은 부차적으로 이산화탄소가 발생하는 Gray 수소로 분류되고 있다. 이산화탄소 발생이 없는 Green 수소 생산 방식은 주로 수전해 방식이 적용되나, 효율이 낮아 생산량이 적고 에너지 손실이 크다. 수전해는 많은 전력이 요구되고, 이산화탄소 배출이 없는 전원을 사용해야 탄소중립 실현이 가능하며 이산화탄소 배출이 거의 없는 전원에는 원자력 및 재생에너지가 대표적이다.

원전은 무탄소 전원이며 발전단가가 저렴하기에 낮은 단가의 청정수소 생산과 대규모 수전해 설비 가동에 적합하며 이행을 위한 현실적인 수단이 될수 있으나 원전 연계 수소 생산 및 활용을 위해서는 전력시스템 사업화 모델 및 원자력 청정수소 관련 기술개발이 필요하다

본 연구 과제에서는 무탄소 전원인 원전의 전력을 이용하여 저온 수전해 발전을 통해 청정수소를 생산 공급한다. 실제 실증을 통해 원전 전력과 저온수전해를 연결하여 수소를 생산하고 한국가스기술공사는 생산된 수소의 타지역 공급을 위해 출하시설 구축에 협력한다. 특히 출하시설의 위험성 평가를 통해 시설의 안전성을 높이며 또한 생산된 수소의 품질검사를 통해 공급될 수소의 품질을 보장한다.

이 논문은 2024년도 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (과제명: 재생에너지 조화형 무탄소 전력 연계 저온 수전해 수소 생산 및 운영 실증, 과제번호: RS-2024-00432233)

#### 참고문헌

- Seiji, F., Shigeo, K., Hiroyuki, Y. Kazuya, Y. Shinichi, M. Kentaro, M., Masato, Y. Tsuneji, K. Takashi, O. and Eiji, H. "Hydrogen Production by high temperature electrolysis with nuclear reactor", *Prog. Nucl. Energy*. 50, 422-426 (2008).
- Rupsha, B., Singh, K., and Grover. R., "Assessing techno-economic uncertainties in nuclear power-to-X processes: The case of nuclear hydrogen production via water electrolysis", *Ind. J. Hydrogen Energy*, 48(38), 14149-14169 (2023).

## Long-term adaptive dynamics of industrial waste–sulfur bioreactors: Linking mineral transformation, microbial ecology, and nutrient removal

Sang-Eun Oh<sup>1,\*</sup>, Sandesh Pandey<sup>1</sup>, Fida Hussain<sup>1</sup>, Suleman Shahzad<sup>1</sup>, Aparna Sharma<sup>1</sup>, Syed Ejaz Hussain Mehdi<sup>1</sup>, Woo-Chang Kang<sup>1</sup>, Ammarah Mushtaq<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Food Biotechnology and Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon-si, Gangwon-do, Hyoja-2-dong, 24341, Republic of Korea

This study explores the performance and microbial ecology of four sulfur-based packed-bed bioreactors enriched with industrial solid co-substrates—desulfurized waste (DSW), acid mine drainage sludge (AMDS), goethite–gypsum mixture (GGM), and gypsum–calcite mixture (GCM)—designed for long-term autotrophic and mixotrophic denitrification. Reactors were operated under continuous flow with intermittent methanol and bi-carbonate addition to probe stability and functional adaptability. High-throughput 16S rRNA sequencing, functional gene prediction, and FTIR mineral analysis were integrated to assess biogeochemical interactions. Results revealed that DSW and AMDS fostered sulfur-oxidizing *Thiobacillus* and methylotrophic *Hyphomicrobium*, enabling robust denitrification and stable pH via pyrite or calcite buffering. GCM achieved effective phosphate removal via in situ apatite precipitation, while AMDS showed iron–phosphate coprecipitation mediated by Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dissolution. GGM, lacking buffering, acidified rapidly and was dominated by *Rhodanobacter*, with suppressed sulfur oxidation but strong denitrification potential. FTIR spectra and XRD confirmed mineral transformations: calcite dissolution, Fe(OH)<sub>3</sub> and FeS<sub>2</sub> cycling, and formation of phosphate-bearing minerals (FePO<sub>4</sub>, Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>OH). Functional profile prediction demonstrated that all systems retained complete denitrification potential (*nar*, *nir*, *nor*, *nos* genes) and sulfur/iron acquisition capacity, but gene enrichment varied with media chemistry. The AMDS system provided optimal microbial stability, buffering, and nutrient removal. This study highlights the role of substrate composition in shaping reactor ecology, performance, and sustainability, and demonstrates the potential of hybrid sulfur–iron–carbon media for integrated nitrogen and phosphorus treatment in wastewater systems.

**Acknowledgment:** This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. RS-2023-00227531)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

## Chemical Looping을 이용한 다종 연료의 수소 생산 기술 연구

강태진<sup>1</sup>, 이지은<sup>1</sup>, 김진호<sup>1</sup>  
고등기술연구원<sup>1</sup>

### A Study on Hydrogen Production from Various Fuels using Chemical Looping

Tae-Jin Kang<sup>1</sup>, Jieun Lee<sup>1</sup>, Jin-Ho Kim<sup>1</sup>  
Institute for Advanced Engineering<sup>1</sup>

Chemical Looping 기술은 고체 산소 운반체(Oxygen Carrier, OC)의 산화-환원 순환 반응을 활용하여 연료와 공기의 직접 접촉 없이 수소를 생산하는 차세대 청정에너지 기술이다. 본 연구에서는 천연가스(CH<sub>4</sub>), 석탄, 바이오매스 등 다종 연료에 대한 Chemical Looping 기반 수소 생산 기술의 반응 원리와 메커니즘을 체계적으로 고찰하였다.

Chemical Looping 시스템은 연료 반응기(FR)와 공기 반응기(AR)로 구성된 이중 반응기 구조를 기본으로 하며, 수소 생산 목적에 따라 Chemical Looping Reforming(CLR)과 Chemical Looping Water Splitting(CLWS)으로 구분된다. CLR은 부분 산화를 통해 합성가스(H<sub>2</sub> + CO)를 생산하며, CLWS는 수증기 반응기(SR)를 추가한 삼중 반응기 구조를 통해 별도의 분리 공정 없이 99.9% 이상의 고순도 수소를 생산할 수 있다.

산소 운반체의 선정은 공정 성능을 좌우하는 핵심 인자로, Fe 계열은 단계적 산화-환원 특성과 우수한 물 분해 능력을 보이며, Ni 계열은 부분 산화 선택성이 높아 CLR에 적합하고, 페로브스카이트(Perovskite) 계열은 격자 산소 이동성 조절과 탄소 침적 저항성에서 우수한 특성을 나타낸다. 반응 메커니즘 분석 결과, 연료 반응기에서의 부분 산화와 완전 산화 경쟁 반응의 제어, 메탄 분해 및 Boudouard 반응에 의한 탄소 침적 억제, 열역학적 설계가 공정 최적화의 핵심 과제임을 확인하였다.

본 연구는 Chemical Looping 기반 수소 생산 기술의 반응기 구성, 산소 운반체 특성, 열역학적 제약 조건 및 열 통합 전략을 종합적으로 검토함으로써 다종 연료 적용 시 공정 설계의 기초 자료를 제공하고 자 한다.

키워드 (Keywords) : 화학적 순환(Chemical Looping), 수소 생산(Hydrogen Production), 산소 전달 입자(Oxygen Carrier), 수증기 물 분해(Chemical Looping Water Splitting), 산화-환원 반응(Redox Reaction)

사사 : 본 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구입니다(2410013700).

**PA-4**

개인 사정으로 인해 발표가 취소되었습니다.

**PA-5**

개인 사정으로 인해 발표가 취소되었습니다.

## Optimization of Electrospray-Deposited Catalyst Layer Architecture for Low-Pt Proton Exchange Membrane Fuel Cells

Vikraman Athira<sup>1</sup>, Soo Hyung Kim<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University, <sup>2</sup>Department of Nanoenergy Engineering College of Nanoscience and Nanotechnology, Pusan National University

Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) are promising clean energy conversion devices; however, high platinum (Pt) loading and mass transport limitations remain major barriers to commercialization. In this study, membrane electrode assemblies (MEAs) with a total Pt loading of  $0.3 \text{ mg cm}^{-2}$  and an active area of  $2.25 \text{ cm}^2$  were fabricated using electrospray deposition to investigate the combined effects of Pt spatial distribution, ionomer content, and flow plate thickness on electrochemical performance.

Four Pt distribution strategies were examined by allocating the catalyst between the Nafion 212 membrane and the carbon paper gas diffusion layer (GDL). The configuration with  $0.2 \text{ mg cm}^{-2}$  on the membrane and  $0.1 \text{ mg cm}^{-2}$  on the GDL exhibited the highest current density and peak power density, indicating an optimal balance between proton conduction and reactant gas diffusion. Excessive Pt loading on a single substrate led to dense agglomeration and reduced porosity, while insufficient loading limited active site availability.

The ionomer content in the catalyst ink was varied from 1 to 20 wt%. A moderate ionomer content of 10 wt% provided well-developed proton-conducting pathways and effective triple-phase boundaries, reducing ohmic resistance and enhancing oxygen reduction reaction kinetics. Both low ( $\leq 5 \text{ wt}\%$ ) and excessive (20 wt%) ionomer contents resulted in performance degradation due to insufficient proton transport and pore blockage.

Additionally, the influence of flow plate thickness was investigated. An optimized thickness of 3mm delivered superior electrochemical performance, whereas thicker plates increased mass transport resistance and pressure drop, leading to voltage losses. These findings demonstrate that simultaneous optimization of Pt distribution, ionomer fraction, and flow field geometry is essential for achieving high-performance, low-Pt PEMFC systems suitable for next-generation clean energy applications.

## Synergistic Light Scattering from Mixed-Size TiO<sub>2</sub> Nanoparticles for High-Performance Perovskite Solar Cells

Raji Radhakrishnan<sup>1</sup>, Jung Keun Cha<sup>2</sup>, and Soo Hyung Kim<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Nano Fusion Technology, College of Nanoscience and Nanotechnology, Pusan National University

<sup>2</sup>Research Center for Energy Convergence Technology, Pusan National University

<sup>3</sup>Department of Nanoenergy Engineering, College of Nanoscience and Nanotechnology, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

**ABSTRACT:** Perovskite solar cells (PSCs) have achieved high power conversion efficiencies (PCEs), but performance enhancement using nanostructured electron transport layers (ETLs) is often limited by complex fabrication and poor reproducibility. In this study, a simple mixed ETL composed of two types of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (NPs) with average sizes of 15 nm (T15) and 250 nm (T250) was introduced to improve photovoltaic performance. The T15 NPs form a mesoporous structure that promotes uniform perovskite infiltration and efficient electron transport. In contrast, the larger T250 NPs act as light-scattering centers, inducing Mie scattering and increasing the optical path length within the active layer. The scattering behavior was analyzed using Rayleigh and Mie scattering principles. The short-circuit current density increased from 21.06 to 25.09 mA/cm<sup>2</sup>, and the PCE improved from 13.62% to 16.90%, corresponding to a 24% enhancement. Excessive T250 content led to performance degradation due to increased recombination and poor perovskite infiltration. These results demonstrate an effective strategy for improving PSC efficiency.

### References

- (1) Cheng, P.; Zhan, X. Stability of organic solar cells: Challenges and strategies. *Chem. Soc. Rev.*, 45 (9), 2544–2582 (2016).
- (2) Tong, Y.; Xiao, Z.; Du, X.; Zuo, C.; Li, Y.; Lv, M.; Yuan, Y.; Yi, C.; Hao, F.; Hua, Y.; et al. Progress of the key materials for organic solar cells. *Sci. China: Chem.*, 63 (6), 758–765(2020)
- (3) Fan, X.; Zhang, M.; Wang, X.; Yang, F.; Meng, X. Recent progress in organic–inorganic hybrid solar cells. *J. Mater. Chem. A*, 1 (31), 8694–8709 (2013)

## 줄열 기반 펄스 반응기에서의 SMR-WGS 순차 반응 구현을 통한 고효율 수소 생산

황다원<sup>1</sup>, 제정호<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 응용화학공학부

### High Efficiency Hydrogen Production via Sequential SMR-WGS Reactions in a Joule Heating Driven Pulsed Reactor

Da-won Hwang<sup>1</sup>, Jeong-ho Jae<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Pusan National University

메탄 수증기 개질(Steam Methane Reforming, SMR)은 전 세계 수소 생산의 대부분을 담당하는 대표적 공정이지만, 화석연료 연소 기반 가열 방식으로 인한 높은 에너지 소모, 온실가스 배출, 탄소 침착에 따른 촉매 열화 등의 한계를 가진다. 본 연구에서는 이러한 문제를 완화하기 위해 줄열 기반 펄스 반응기를 적용한 새로운 메탄 수증기 개질 공정을 제안하였다. 제안된 반응기는 반응기에 국소적으로 열을 인가하고 가열, 냉각을 주기적으로 반복함으로써 SMR 반응과 수성가스 전환반응(Water-Gas Shift, WGS)이 순차적으로 유도되도록 설계되었다. 특히 WGS 반응을 통해 CO 농도를 감소시켜 탄소 침착을 억제하고, 평균 반응 온도 저감을 통해 열적 손상 완화와 에너지 효율 향상을 동시에 도모하였다. 펄스 가열 조건에서는 SMR과 WGS 반응이 균형 있게 진행되며 안정적인 수소 생성이 유지되는 경향을 보였고, 장시간 운전에서도 반응 안정성과 에너지 효율 측면에서 연속 가열 대비 우수한 특성 확인되었다. 반면 연속 가열 조건에서는 고온 유지에 따른 촉매 소결 및 활성 저하가 관찰되었으며, WGS 반응 유도가 제한적인 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 줄열 기반 펄스 반응기가 기존 SMR 공정의 에너지 비효율성과 촉매 열화 문제를 효과적으로 개선할 수 있는 고효율, 고안정성 수소 생산 기술로 활용될 가능성을 시사한다.

## 메탄 건식 개질 반응(DRM)을 위한 CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 지지체를 첨가한 Ni-MgO 촉매의 주요 특성

박진우<sup>1</sup>, 공지현<sup>2</sup>, 김민주<sup>2</sup>, 권재민<sup>2</sup>, 김상민<sup>4</sup>, 장원준<sup>1,2,3\*</sup>  
 아주대학교 에너지시스템학과<sup>1</sup>, 아주대학교 환경공학과<sup>2</sup>, 아주대학교 환경안전공학과<sup>3</sup>, 아주대학교  
 환경연구소<sup>4</sup>

### Key Properties in MgO-Promoted Ni Catalysts Supported on CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> for Dry Reforming of Methane

Jin-Woo Park<sup>1</sup>, Ji-Hyeon Gong<sup>2</sup>, Min-Ju Kim<sup>2</sup>, Jae-Min Kwon<sup>2</sup>, Sang-Min Kim<sup>4</sup>, Won-Jun Jang<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Energy Systems Research, Ajou University

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Ajou University

<sup>3</sup>Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University

<sup>4</sup>Environmental Research Institute, Ajou University

\*corresponding author: wjjang@ajou.ac.kr

본 연구에서는 지지체(CeO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>) 비율에 따른 메탄 건식 개질 반응 성능에 미치는 영향을 평가하고, 우수한 성능을 갖는 촉매를 찾고자 지지체를 적용한 Ni-MgO 촉매를 개발하여 메탄의 개질 반응에 적용하였다. 이때 최적 조성의 촉매를 찾기 위해 CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>를 Ce<sub>0.8</sub>Zr<sub>0.2</sub>O<sub>2</sub>, Ce<sub>0.6</sub>Zr<sub>0.4</sub>O<sub>2</sub>, Ce<sub>0.4</sub>Zr<sub>0.6</sub>O<sub>2</sub>, Ce<sub>0.2</sub>Zr<sub>0.8</sub>O<sub>2</sub>의 비율로 제조하였다. 촉매는 공침법을 이용해 제조되었으며 BET, XRD, H<sub>2</sub>-TPR, XPS, Chemisorption(H<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>), Reduction degree 분석을 통해 특성 분석이 수행되었다. 제조된 촉매의 성능을 평가하기 위해 800°C, CH<sub>4</sub>:CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=1:1:1, GHSV 1,620,000 mL/h·g<sub>cat</sub> 조건에서 안정성 테스트를 진행하였고 반응 결과 Ni-Ce<sub>0.8</sub>Zr<sub>0.2</sub>O<sub>2</sub> 촉매가 가장 우수한 촉매 활성을 나타내었다. 높은 환원성과 작은 Ni 입자의 크기로 인해 이러한 결과가 나타났다. 따라서, DRM 반응에서 Ni-MgO 촉매에 CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 지지체가 80:20의 비율로 첨가된 촉매가 가장 작은 Ni 입자의 크기와 높은 환원성으로 가장 우수한 성능을 나타내는 촉매임을 확인했다.

이 연구는 2024년도 산업통산자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비(RS-2024-00432109) 지원과 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(RS-2025-00559638)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## NCM 양극재 재활용 공정에서의 결정 입자 크기 제어를 통한 공침 공정의 경제성 최적화

박경근, 김정동<sup>1</sup>, 김정환\*

연세대학교 화공생명공학과, <sup>1</sup>Massachusetts Institute of Technology

최근 휴대용 전자기기 및 전기차 보급 확대에 따라 리튬이온 배터리 수요가 급증하면서, 사용 후 배터리의 효율적 재활용 기술에 대한 중요성이 커지고 있다.[1] 특히 NCM(니켈 - 코발트 - 망간) 양극재는 높은 에너지 밀도로 인해 전기차에 널리 활용되고 있으나, 핵심 금속 자원의 공급망 불안정성과 환경 부담으로 인해 자원 순환 기반 재활용 공정 개발이 요구된다.[2] 이 중 전구체 재합성 공정은 폐배터리 슬러리로부터 전구체를 직접 합성함으로써 공정을 단순화하고 에너지 및 시약 사용을 절감할 수 있는 방법이다.[3] 그러나 공침 기반 전구체 합성 공정에서는 슬러리 조성, pH, 온도, 반응 시간 등의 운전 조건에 따라 결정 입자 크기 분포 및 불순물 생성이 크게 달라지며, 이는 후속 소성 공정 효율과 최종 양극재 물성, 나아가 공정 비용에 직접적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 결정화 반응을 정량적으로 해석하기 위해 입자 간 상호작용을 고려한 입자 크기 분포의 시간적 변화를 모델링하였다. 이를 통해 운전 조건 변화에 따른 입자 크기 변화를 분석하였으며, 이를 공정 비용 모델과 연계하여 전구체 합성 단계에서의 최적 운전 조건 영역을 도출하였다. 그 결과, 동일한 양극재 생산량 대비 시약 소비량 및 에너지 요구량을 유의미하게 절감할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 NCM 양극재 재활용 공정에서 결정 입자 크기 제어가 공침 공정의 경제성과 공정 안정성을 동시에 향상시킬 수 있음을 수치적으로 제시하며, 향후 데이터 기반 공정 최적화 및 제어 전략 수립을 위한 모델로의 적용 가능성을 제시한다.

### 참고문헌

- [1] Gao, Wenfang, et al. "Lithium carbonate recovery from cathode scrap of spent lithium-ion battery: a closed-loop process." *Environmental science & technology* 51.3 1662-1669 (2017).
- [2] Wu, Jiawei, et al. "Direct recovery: A sustainable recycling technology for spent lithium-ion battery." *Energy Storage Materials* 54 120-134 (2023).
- [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).

CO<sub>2</sub> 포집 공정 내 아민 부식 속도 예측을 위한 머신러닝 모델링

김세영, 정재빈, 김민재, 김정환\*  
연세대학교 화공생명공학과

탄소 중립(Net-Zero) 실현을 위한 핵심 기술인 아민 화학 흡수법은 고온 및 고농도 CO<sub>2</sub> 환경에서 발생하는 설비 부식 문제가 공정의 경제성과 안정성을 저해하는 주요 요인으로 지적되어 왔다.[1] 기존의 부식 예측 모델은 복잡한 전기화학적 실험 변수를 필요로 하거나, 특정 아민 데이터에 한정되어 있어 실험 데이터가 부족한 신규 아민 흡수제 부식 속도를 예측하는 데 한계가 있었다.[2, 3] 본 연구에서는 아민의 분자 구조적 특성과 공정 변수를 통합적으로 학습하여, 실험 없이도 부식 속도를 정량적으로 예측할 수 있는 머신러닝 프레임워크를 제안한다. 본 연구에서는 문헌 조사를 통해 수집된 12종의 단일 아민 및 6종의 혼합 아민 부식 데이터를 활용하였다. 예측의 물리적 타당성을 확보하기 위해 최고 점유 분자 궤도(HOMO), 최저 비점유 분자 궤도(LUMO), 쌍극자 모멘트 등의 양자 화학적 기술자와 분자량, 위상학적 극성 표면적(TPSA), 분배 계수(LogP) 등의 물리화학적 기술자를 주요 입력 변수로 채택하였다. 이를 기반으로 Tree 기반 모델(Random Forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost)과 Deep neural network 모델을 구축하고 성능을 비교 분석하였다. 연구 결과, 개발된 모든 모델이 결정계수( $R^2$ ) 0.9 이상의 우수한 예측 성능을 달성하였으며, 아민 분자의 다양한 공정 조건(온도, CO<sub>2</sub> loading, 금속 재질 등) 간의 비선형적 상관관계를 효과적으로 학습함을 확인하였다. 특히, 온도와 CO<sub>2</sub> loading 변화에 따른 부식 속도의 물리적 상승 경향을 정확히 학습함으로써 모델의 신뢰성을 입증하였다. 본 연구에서 제안한 모델은 방대한 실험 없이도 신규 아민 후보 물질의 부식 위험도를 선제적으로 스크리닝(Screening) 할 수 있는 도구로서, 차세대 저부식성 흡수제 개발을 가속화하고 공정 설계의 효율성을 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

**참고문헌**

1. C. Chao, Y. Deng, R. Dewil, J. Baeyens, and X. Fan, "Post-combustion carbon capture," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 138, p. 110490, 2021.
2. J. Narku-Tetteh, E. Mensah, P. Muchan, T. Supap, S. Lisawadi, and R. Idem, "Development of experimental error-driven model for prediction of corrosion rates of amines based on their chemical structures," *Heliyon*, vol. 9, p. e22050, 2023.
3. J. Narku-Tetteh, E. Mensah, P. Muchan, T. Supap, S. Lisawadi, and R. Idem, "Predicting CO<sub>2</sub> loaded amine corrosion through machine learning," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 104, p. 103211, 2021.

## Tuning structural defects in Co/CeO<sub>2</sub> catalysts for high-temperature water–gas shift reaction using waste-derived syngas

Su-Jin Ryu<sup>1</sup>, Beom-Jun Kim<sup>1</sup>, Ho-Ryong Park<sup>1</sup>, Hyun-Seog Roh<sup>1\*</sup>

Yonsei University<sup>1</sup>

In this study, defect-engineered Co/CeO<sub>2</sub> catalysts were developed for the high-temperature water–gas shift (HTS) reaction by tailoring the morphology and calcination atmosphere. CeO<sub>2</sub> supports were prepared by precipitation or spray pyrolysis, followed by calcination under air or N<sub>2</sub> atmospheres to systematically tune their crystallinity and defect structure. Notably, spray pyrolysis combined with N<sub>2</sub> calcination generated defect-rich CeO<sub>2</sub> with pronounced lattice distortion, leading to enhanced oxygen storage capacity (OSC). The defect-induced OSC facilitated higher Co<sup>0</sup> dispersion through an anchoring effect, thereby strengthening metal–support interaction [1, 2]. As a result, the Co/CeO<sub>2</sub>-SP-N<sub>2</sub> catalyst exhibited the highest CO conversion under HTS condition, owing to the synergistic effect between enhanced OSC and highly dispersed Co<sup>0</sup>.

### References

1. Hong, G.-R., Shin, B.-G., Kim, K.-J., Lee, Y.-L., Ju, E.-Y., and Roh H.-S, “Modulating metal–support interactions via heat treatment atmospheres in sulfur–tolerant catalysts for the water–gas shift reaction”, *Catal. Today*, 461. 115513 (2026)
2. 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<sub>0.8</sub>Zr<sub>0.2</sub>O<sub>2</sub> support through hydrogen heat-treatment”, *J. CO<sub>2</sub> Util.*, 57. 101903 (2022)

## 전구체 농도가 공침법으로 합성된 CuZnMgAl 촉매의 물리화학적 특성 및 메탄올 직접 합성 반응에 미치는 영향

장정균, 김민경, 이승우, 권병찬<sup>1</sup>, 박노국<sup>1\*</sup>, 권재현<sup>2</sup>, 배종욱<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>영남대학교, <sup>2</sup>영남대학교 청정기술연구소<sup>1</sup>, 성균관대학교<sup>2</sup>

### Effects of Precursor Concentration on Co-precipitated CuZnMgAl Catalysts for Direct Methanol Synthesis

Jung Gyu Jang, Min Gyeong Kim, Seung Woo Lee, Byoung Chan Kwon<sup>1</sup>, No-kuk Park<sup>1\*</sup>,  
 Jae Hyun Kwon<sup>2</sup>, Jong Wook Bae<sup>2</sup>

Yeungnam University, Yeungnam University Institute of Clean Technology<sup>1</sup>, SungKyunKwan University<sup>2</sup>

#### Abstract

메탄올은 핵심 화학 원료이자 차세대 친환경 에너지 캐리어로 주목받고 있으며, 효율적인 메탄올 직접 합성을 위한 고성능 촉매 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 기존 상업용 Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 촉매의 성능을 개선하기 위해 조촉매로 마그네슘(Mg)을 첨가한 다성분계 CuZnMgAl 촉매를 공침법으로 합성하고, 메탄올 직접 합성 반응에 대한 활성을 평가하였다. Mg는 촉매 표면의 염기성을 증진시켜 메탄올 선택도를 향상시키기 위해 첨가되었다.

본 연구에서 촉매를 합성하기 위해 금속 전구체로는 질산염(Nitrate)을, 침전제로는 Ammonium Bicarbonate를 사용하였다. 촉매의 금속 몰 비율은 (Cu+Zn)/(Mg+Al)=9, CuO/ZnO=2.33, Mg/Al=0.5로 고정하였으며, 전구체 용액의 농도를 0.1 M, 0.3 M, 0.5 M로 변화시켜 농도가 촉매의 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 침전제의 농도는 1.0 M로 고정하였다. 공침은 70 °C에서 진행되었으며, 110 °C에서 12시간 건조 후 350 °C에서 4시간 동안 소성(Calcination)하여 촉매 합성을 완료하였다. 합성된 촉매의 물리화학적 특성은 SEM, XRD, BET 분석을 통해 확인하였다. 메탄올 합성 반응은 고정상 반응기에 0.4 g의 촉매를 충전한 후, 300 °C에서 5 vol% H<sub>2</sub> 가스로 환원 처리하여 진행하였다. 반응은 5.0 MPa, GHSV 5,000 h<sup>-1</sup> 조건 하에서 CO/CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> (21/7/9/63 vol%) 혼합 가스를 주입하여 230, 250, 270, 290 °C 총 4가지의 온도 조건에서 40시간 동안 수행되었다.

특성 분석 결과, 전구체 용액의 몰농도가 낮을수록 활성점인 Cu의 결정 크기가 감소하는 경향을 XRD와 SEM을 통해 교차 확인하였다. 반면, BET 비표면적은 전구체 농도에 따른 뚜렷한 경향성을 나타내지 않았다. 메탄올 직접 합성 반응 결과, 세 종류의 촉매 모두 230 °C에서 가장 높은 활성을 보였으며, 그 중 0.3 M 농도로 합성된 촉매가 전반적인 메탄올 합성 활성이 가장 우수한 것으로 확인되었다.

#### 참고문헌

1. Binglian Liang et al., "Investigation on Deactivation of Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst for CO<sub>2</sub> Hydrogenation to Methanol", Industrial & Engineering Chemistry Research, 58(21), 9030-9037 (2019).
2. M. Kittel et al., "Understanding the Complexity of a Catalyst Synthesis: Co-precipitation of Mixed Cu, Zn, Al Hydroxycarbonate Precursors", ChemCatChem, 5(12), 3711-3721 (2013).

## Reduced-Order Mathematical Modelling of an Electrified Reverse Water Gas Shift Reactor

Dong-Gi Lee<sup>a</sup>, Jin-Ju Lee<sup>b,c</sup>, Mansurbek Urol ugli Abdullaev<sup>b</sup>, Seung-Jun Baek<sup>c</sup>, Yong-Tae Kim<sup>b,d</sup>, In-Hyoup Song<sup>c</sup> and Boram Gu<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> School of Chemical Engineering, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, 61186, Republic of Korea

<sup>b</sup> Hydrogen & C1 Gas Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon, 34114, Republic of Korea

<sup>c</sup> Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seoul 03722, Republic of Korea

<sup>d</sup> Chemical Process Solution Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon, 34114, Republic of Korea

Electrification of chemical processes is recognised as a key strategy for reducing direct CO<sub>2</sub> emissions associated with combustion-based heat supply in the chemical industry [1]. Replacing conventional fired heaters with electrically heated catalytic reactors enables tighter thermal control and compatibility with renewable electricity sources. Among carbon utilisation pathways, the reverse water gas shift (RWGS) reaction offers an attractive route for converting captured CO<sub>2</sub> and green hydrogen into synthesis gas, serving as an intermediate to produce synthetic fuels and chemicals.

In this study, an integrated modelling framework is developed for an electrified RWGS reactor. A two-dimensional energy balance is algorithmically coupled with a convection-diffusion-reaction model. To enhance computational efficiency without compromising predictive capability, the catalyst layer thickness is neglected, assuming negligible internal temperature and concentration gradients within the catalytic phase. The proposed approach enables accurate representation of strong temperature gradients and reaction-transport coupling observed under electrically heated conditions, while significantly reducing computational demand compared with fully coupled multidimensional numerical solvers.

The model is validated against experimental data. Detailed parametric analyses are conducted to investigate the influence of electrical power input, inlet composition, and flow rate on reactor performance. The proposed framework provides a computationally efficient and physically consistent tool for reactor design and optimisation, facilitating the identification of operating strategies that maximise CO<sub>2</sub> conversion and energy efficiency in electrified catalytic systems.

### References

1. Thor Wismann S, Larsen KE, Mølgaard Mortensen P. Electrical Reverse Shift: Sustainable CO<sub>2</sub> Valorization for Industrial Scale. *Angew Chem Int Ed Engl* (2022).

## Screening of CaO–TM Dual Functional Materials for Improving Calcium Looping Efficiency

Jae Won An<sup>1</sup>, Wong Min Jin Karen<sup>1</sup>, Solanki, Bhanupratap S<sup>1</sup> and See Hoon Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Environment and Energy, Jeonbuk National University, 567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeonbuk State, Republic of Korea

<sup>2</sup> Department of Mineral Resources and Energy Engineering, Jeonbuk National University, 567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeonbuk State, Republic of Korea

\*e-mail address (Corresponding author): donald@jbnu.ac.kr

### <Abstract>

Calcium looping (CaL) process is promising as a high-temperature CO<sub>2</sub> capture technology, but there is a limit to improving process efficiency due to the decrease in reaction rate and deterioration of absorption performance due to sintering in the repeated carbonation/firing cycle. The purpose of this study is to implement a dual function catalyst/medium that simultaneously performs oxygen transfer and CO<sub>2</sub> capture by doping transition metals (Fe, Co, Ni, Mn, and Cu) on a CaO basis, and to select promising candidates suitable for CaL conditions. A powder sample with a composition of 95 wt%–transition metal 5 wt% was prepared by coprecipitation, and the structural/reactive change and electron co-formation induced by the CaO–metal oxide interaction according to the transition metal species were set as key evaluation factors. The evaluation consisted of (i) the formation of an XRD-based crystal phase and the generation of an irreversible phase, (ii) SEM-EDS-based microstructure and metal dispersion uniformity, (iii) the reversibility and reactivity of oxygen transfer through TPR and oxidation-reduction cycle tests, and (iv) the amount of CO<sub>2</sub> absorption through the TGA-based carbonation/firing cycle, reaction rate, and retention rate. Finally, by integrating and comparing common indicators such as absorption, retention rate, carbonation rate, redox conversion rate, we derive the top 1-2 promising candidate metals and verify the possibility of improving CaL process efficiency by optimizing metal content and synthesis conditions in subsequent steps.

### References

1. Ling, J. L. J., Nam, H., Lee, D., Liu, Z., Lee, H. E., Wong, K. M. J. and Lee, S. H., Recent innovations in chemical looping: Fluidized bed design and oxygen carrier performance, *Renewable Energy*, 256, 124575 (2026).
2. Park, H. J., Wong, K. M. J., Solanki, B. S., Lee, H. E., Ling, J. L. J. and Lee, S. H., Carbonation Conversion Rate Investigation of Alternative Low-Cost and Sustainable Calcium-Based Waste through a Carbonation/Calcination Process toward Carbon Dioxide Capture, *ACS Sustainable Resour. Manage.*, in press (2026).

## Scalable Porous Metal Oxide–Functionalized Silica Adsorbents for Residual Ammonia Removal

May Zaw Win<sup>1</sup>, Dong Myung Kim<sup>2</sup>, Wathone Oo<sup>1</sup>, Shoon Pa Pa Aung<sup>1</sup>, Ngwe Soe Han<sup>1</sup>, Phyu Phyu Han<sup>2</sup>, Ei Thandar Aung<sup>2</sup>, Kwang Bok Yi<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Republic of Korea<sup>3</sup>

<sup>2</sup>Department of Convergence Systems Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Chemical Engineering Education, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Republic of Korea

[\\*cosy32@cnu.ac.kr](mailto:*cosy32@cnu.ac.kr)

The removal of trace ammonia from hydrogen fuel streams is critical to ensure reliable fuel cell operation. In this study, regenerable adsorbents with high ammonia affinity were developed by functionalizing mesoporous silica with transition metal oxides using a modified Stöber sol-gel approach [1]. Metal species (Cu, Fe, Mn, and Zr) were introduced from chloride precursors, while CTAC and triethanolamine served as structure-directing agent and coordination promoter, respectively. A combined low-temperature calcination and ethanolic reflux treatment effectively improved the textural properties and surface functionality of the composites. Among the synthesized materials, Mn oxide-functionalized silica demonstrated the highest NH<sub>3</sub> adsorption capacity (~ 2 mmol g<sup>-1</sup>) under VTSA conditions and enabled efficient regeneration under mild conditions. This enhanced performance was associated with abundant oxygen vacancies and uniform nanoscale metal oxide dispersion. Furthermore, the optimized adsorbent was successfully scaled up and pelletized, retaining high adsorption capacity after CuCl<sub>2</sub> activation. These results highlight the strong potential of the developed materials for practical ammonia removal in hydrogen purification systems.

### References

Garrido, M.D., El Haskouri, J., Vie, D., Beltrán, A., Ros-Lis, J.V., Marcos, M.D., Moliner, N., Amorós, P., " Generalized one-pot preparative strategy to obtain highly functionalized silica-based mesoporous spherical particles," *Microporous Mesoporous Mater.*, 337 (2022) 111942

## Mechanistic Investigation of Covalently PEI-Grafted Silica-Coated Carbon–Zeolite Composites for Humidity-Resilient CO<sub>2</sub>-Selective Direct Air Capture

Wathone Oo, Dong Myung Kim<sup>1</sup>, May Zaw Win and Kwang Bok Yi<sup>2\*</sup>

Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Republic of Korea

<sup>1</sup>Department of Convergence Systems Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering Education, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Republic of Korea

The continuous rise in atmospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentrations demands the development of efficient Direct Air Capture (DAC) technologies. A central limitation of polyethyleneimine (PEI)-based sorbents is the trade-off between high CO<sub>2</sub> uptake and sustained structural integrity under humid operating conditions. In this work, a structurally robust CO<sub>2</sub> adsorbent, PCZS@PEI\_Gfn, was synthesized via covalent surface grafting using 1,2-epoxybutane pre-functionalized PEI and systematically compared with its conventionally impregnated analogue, PCZS@PEI\_Imp. This design integrates an N<sub>2</sub>-phobic carbon–zeolite core coated with a thin silica layer and site-specific amine engineering, thereby overcoming the diffusion and stability constraints typical of bulk PEI-loaded systems. Comprehensive structural analyses confirmed that covalent grafting preserved the intrinsic porosity of the support while enabling controlled incorporation of secondary and tertiary amine functionalities, effectively mitigating the pore blockage observed in the impregnated material. Such molecular-level control translated into significant kinetic and thermodynamic advantages. PCZS@PEI\_Gfn exhibited an approximately fourfold enhancement in the pseudo-second-order rate constant ( $K_2 \approx 0.243 \text{ g mmol}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ) and a lower isosteric heat of adsorption ( $Q_{st} \approx 29.5 \text{ kJ mol}^{-1}$ ) relative to the impregnated counterpart, facilitating improved mass transport and regeneration at moderate temperatures. Consequently, the grafted composite delivered superior CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> selectivity ( $\sim 15$ ) and equilibrium uptake ( $\sim 1.9 \text{ mmol g}^{-1}$  at 25 °C and 100 kPa), while sustaining  $\sim 1.0 \text{ mmol g}^{-1}$  under dynamic flow conditions with trace CO<sub>2</sub> in highly humid, N<sub>2</sub>-competitive environments. Importantly, PCZS@PEI\_Gfn demonstrated pronounced cyclic durability, retaining 88% of its regeneration efficiency over ten adsorption–desorption cycles, whereas the impregnated sample declined to  $\sim 41\%$ , primarily due to moisture-induced amine degradation and restricted desorption kinetics. Collectively, these results highlight covalent grafting as a mechanistically decisive strategy for harmonizing adsorption kinetics, thermodynamic efficiency, and long-term stability—key parameters for the realization of commercially viable DAC sorbents.

## Tailoring Support-Metal Interaction via pH-Regulated Precursor Evolution for Toluene Hydrogenation over Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Ye Eun Kim<sup>1</sup>, Seonju Park<sup>1</sup>, Anna Hwang<sup>1,2</sup>, and Man Sig Lee<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) technology offers a sustainable approach for efficient hydrogen storage. Toluene is widely regarded as a promising candidate due to its abundant productivity from petrochemical industry, high hydrogen capacity, and cost-effectiveness. In this study, we investigated the influence of synthesis pH (ranging from 3.5 to 10.5) on the performance of Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts prepared via the impregnation–chemical reduction method using Ru(NO)(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> precursor. The point of zero charge (PZC) of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> support was determined to be 8.0 by pH drift method, providing a baseline for understanding the pH-dependent adsorption behavior of Ru species. The catalytic activity was found to be highly sensitive to the synthesis pH, with the highest performance achieved at pH 9.5. At near-neutral pH conditions, the formation of ruthenium hydroxides led to visible turbidity in the precursor solution, resulting in significantly diminished activity. This suggests that modulating the pH alters the chemical environment of Ru complexes and their subsequent interaction with the support surface. Furthermore, the optimized Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst exhibited superior hydrogenation activity compared to a commercial 5 wt% Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst, demonstrating the effectiveness of pH-controlled synthesis in enhancing active site dispersion and support-metal interaction.

1. Zhang, Y., "On understanding the effect of metal-support interactions on plasma-catalytic CO<sub>2</sub> hydrogenation over the Ru/ZrO<sub>2</sub> catalysts," *Chem. Eng J.*, **518**(15), 164799 (2025).
2. El-Kadi, J., "Continuous synthesis of ruthenium nanoparticles with tuneable sizes using ruthenium nitrosyl nitrate precursor," *React. Chem. Eng.*, **9**, 1145 (2024).

## 해상풍력 하부구조물 자동 용접을 위한 기초 용접 조건 도출

하을용<sup>1</sup>, 김영현<sup>1</sup>, 이송은<sup>1</sup>, 안기주<sup>2</sup>, 정유일<sup>2</sup>, 진상훈<sup>3</sup>, 임수희<sup>3</sup>, 김재웅<sup>1,\*</sup>  
한국생산기술연구원<sup>1</sup>, (주)유일<sup>2</sup>, 건주테크<sup>3</sup>

### Derivation of basic welding conditions for automatic welding of offshore wind power substructure

Eulyong Ha<sup>1</sup>, Younghyun Kim<sup>1</sup>, Songeun Lee<sup>1</sup>, Giju Ahn<sup>2</sup>, Yuil Jung<sup>2</sup>, Sean Jin<sup>3</sup>, Suhee Lim<sup>3</sup>,  
Jaewoong Kim<sup>1</sup>  
Korea Institute of Industrial Technology<sup>1</sup>, Yuil Co.,Ltd<sup>2</sup>, Gunju Tech Co.,Ltd<sup>3</sup>

#### 초록

Driven by the growing interest in renewable energy, the demand for eco-friendly power sources, such as wind and solar energy, is steadily increasing. In particular, offshore wind power offers superior generation capacity compared to onshore alternatives, leading to industry expansion across various regions, including Europe and China. As power capacities grow, offshore wind substructures are becoming larger, requiring materials that can withstand harsher environments. Consequently, Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) steel is increasingly being utilized. This study aimed to establish fundamental Submerged Arc Welding (SAW) parameters for S355ML-a type of TMCP steel used in offshore wind structures-to facilitate the implementation of an automated welding system. Following the welding process, cross-sectional observations, tensile tests, hardness tests, and low-temperature impact tests were conducted to verify compliance with industry standards. The experimental results demonstrated a tensile strength of 548.5 MPa, surpassing that of the base material. Furthermore, the low-temperature impact strength exceeded 57 J, meeting the requirements of the EN 10025-4:2004 standard. These findings serve as a basis for determining optimal welding conditions for future automated applications.

#### 참고문헌

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

1. Reisgen, U et al., "Development of a robust welding process for electron beam welding of thick plates for construction of offshore wind turbines", *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 55(6), 900-909 (2024)
1. Ren R et al., "Study on the Influence of Welding Sequence on the Mechanical Properties and Microstructure of Flange Circumferential Welded Joints in Large-Capacity Offshore Wind Power Towers", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* (2025)

## Effect of Feedback-Based Flow Rate Control on the Efficiency of Proton Exchange Membrane Water Electrolysis Systems

Jeongha Kim<sup>1,2</sup>, Se Hun Kwon<sup>2</sup> and Dong-Ha Lim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Low-carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan, Korea,

<sup>2</sup>School of Electronics Engineering, Pusan National University, Korea,

The rapid expansion of renewable energy deployment has created increasing demand for water electrolysis technologies that can operate efficiently under variable power conditions. In this work, the influence of feed-water flow rate on the electrochemical performance of a proton exchange membrane (PEM) water electrolyzer was systematically investigated under dynamically changing current-density operation. A transparent visualization cell incorporating a parallel flow field was designed to enable in situ observation of bubble dynamics, while chronopotentiometry (CP), electrochemical impedance spectroscopy (EIS), and polarization distribution analysis (PDA) were applied to distinguish ohmic, charge-transfer, and mass-transport overpotential contributions.

The analysis revealed that the optimal flow rate is not constant but strongly dependent on current density. Under low current-density conditions, performance was primarily governed by charge-transfer processes, resulting in an optimal flow rate of approximately 30 mL·min<sup>-1</sup>. In contrast, at elevated current densities, increased mass-transport limitations and higher ohmic resistance shifted the optimal operating condition toward about 90 mL·min<sup>-1</sup>. Suboptimal low flow rates led to bubble accumulation and inadequate reactant supply, whereas excessively high flow conditions caused hydrodynamic disturbances, including backflow phenomena, which also degraded cell performance.

Furthermore, a real-time adaptive flow-control strategy was implemented to assess its effectiveness under fluctuating electrical loads. Compared with constant-flow operation, the adaptive approach consistently improved system efficiency by continuously adjusting the flow rate in response to changing operating conditions. These findings highlight the importance of dynamic flow-rate regulation for maintaining high efficiency in PEM water electrolysis systems integrated with intermittent renewable energy sources.

### **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)

## Stable Hydrogen Production from Catalytic Methane Decomposition over Waste-Derived Ni/Red Mud Catalysts Using Inert Particle-Assisted Fixed-Bed Operation

Minsang Jo<sup>1,2</sup>, Jungho Jae<sup>2</sup>, Hee Soo Kim<sup>1\*</sup> and Dong-Ha Lim<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Low-Carbon Energy R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

Traditional fuel production processes, including hydrocarbon reforming and the water–gas shift reaction, inevitably generate CO<sub>x</sub> along with hydrogen, requiring additional separation processes. Catalytic methane decomposition (CMD) is considered a promising alternative for producing high-purity hydrogen without CO<sub>x</sub> emissions while simultaneously generating value-added carbon materials. Red mud, a hazardous industrial waste generated during aluminum hydroxide production from bauxite, has attracted attention as a potential catalyst for CMD owing to its high iron content. In addition, nickel and iron are well-known active metals that promote filamentous carbon formation during methane decomposition.

In this study, waste-derived Ni catalysts were synthesized using red mud and evaluated in a fixed-bed CMD reactor. To mitigate pressure build-up caused by carbon accumulation and to improve gas–solid contact characteristics, the catalyst was physically mixed with inert fluidizing particles during the reaction. Catalytic activity and operational stability were systematically investigated.

The results indicate that mixing the catalyst with inert particles contributed to alleviating pressure increase during reaction and enabled more stable operation under CMD conditions. This study demonstrates the practical applicability of waste-derived CMD catalysts and provides meaningful insights into process design strategies for the stable production of turquoise hydrogen.

### **References**

Kim, N.Y., Choi, D.S., Kim, J., Kim, D.W., Joo, J.B., "Synthesis of waste-derived nickel-supported red mud catalysts containing various Ni–Fe alloy species for fixed-bed catalytic methane decomposition," *J. Environ. Chem. Eng.*, 13, 118461 (2025).

### **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-26-0001).

## 암모니아 직접 주입 산화물 연료전지에서 암모니아 슬립 절감 촉매 개발

심기동<sup>1</sup>, 권성민<sup>1,2</sup>, 김영민<sup>1</sup>, 임영환<sup>1\*</sup>, 채호정<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>한국화학연구원 수소공정연구센터, <sup>2</sup>고려대학교 화공생명공학과

### Development of Catalysts for Reducing Ammonia Slip in Direct Ammonia-Fed Oxide Fuel Cells

Gi Dong Sim<sup>1</sup>, Sung Min Kwon<sup>1,2</sup>, Youngmin Kim<sup>1</sup>, Younghwan Im<sup>1\*</sup>, Ho-Jeong Chae<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>Hydrogen Process Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology  
<sup>2</sup>Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University

수소 에너지는 화석연료를 대체할 수 있는 지속 가능한 에너지원으로 환경 오염과 기후 위기에 대응할 수 있어 주목받고 있다. 그러나 수소는 단위 부피당 낮은 저장 밀도와 저장 기간의 제한성으로 저장 및 운송 과정에서 어려움이 있다. 암모니아는 액체수소보다 높은 수소 저장 밀도(약 1.7배)를 지니며 기존 인프라를 통한 저장 및 운송이 유용해 수소 캐리어로 활용 가능성이 크다. 수소 캐리어인 암모니아를 사용하기 위해서는 암모니아 분해 과정( $2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{N}_2$ )이 필요하며, 정제된 수소는 연료전지 및 산업 분야에 활용된다. 암모니아 분해 과정에서 잔류하는 미량의 암모니아는 환경 오염 및 산업 분야에 배출이 제한되며, 이를 제거하기 위한 연구 개발이 요구된다.

본 연구에서는 암모니아 직접 주입 연료전지에서 슬립되는 미량의 암모니아 배출을 절감하기 위한 촉매 개발을 목표로 하였다. 암모니아 분해 전환률과 연료 활용비에 따른 배출 가스 조성과 수분 함량을 조절하여 잔류 암모니아를 제거하는 연구를 수행하였다. 500~700 °C 조건에서 암모니아 전환율(99.8%, 99.4%, 및 98%)에 따른 조성을 형성하고, H<sub>2</sub>O 비율에 따른 잔류 암모니아 분해 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 촉매는 Ru 기반 상용 촉매와 Ru 기반 개발 촉매를 통해 촉매별 활성을 비교하였으며, 반응 전, 후 촉매 특성 분석을 통해 수분하 잔류 암모니아 분해 반응에 따른 영향을 확인하였다.

**Keywords:** Ammonia decomposition, Hydrogen production, bead catalyst

## 암모니아 분해를 이용한 고효율 수소 생산용 줄 가열(Joule-Heating) 반응기

고유진<sup>1</sup>, 김민식<sup>1</sup>, 임영환<sup>1</sup>, 김영민<sup>1</sup>, 채호정<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국화학연구원 수소공정연구센터

hjchae@kriect.re.kr

## Joule-Heated Reactor for Efficient Hydrogen Production via Ammonia Decomposition

You Jin Go<sup>1</sup>, Min Sik Kim<sup>1</sup>, Younghwan Im<sup>1</sup>, Youngmin Kim<sup>1</sup>, Ho-Jeong Chae<sup>1\*</sup>

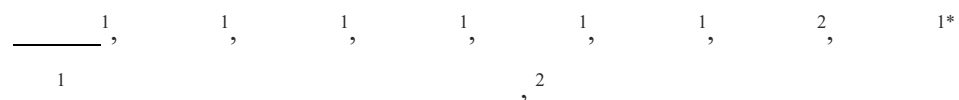
<sup>1</sup>Hydrogen & C1 Gas Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology

탄소 중립 달성을 위한 수소 에너지 생성 관점에서, 암모니아(NH<sub>3</sub>)는 높은 수소 저장 밀도와 우수한 운송 효율 덕분에 핵심적인 수소 운반체로 주목받고 있습니다. 본 연구에서는 기존 외부 가열 방식의 고유한 열전달 한계를 극복하기 위해, 줄 가열(Joule-heating)을 활용한 전기화 반응기 기반의 암모니아 분해 공정을 제안합니다. 촉매가 충전된 반응기에 전기 에너지를 직접 공급함으로써 에너지 손실을 획기적으로 줄였으며, 이를 통해 상온에서 500 °C 이상의 반응 활성화 온도까지 신속하게 도달할 수 있었습니다. 수소 생산 효율을 극대화하기 위해 반응기 길이와 공간 속도(Space Velocity, SV) 등 주요 설계 및 운전 변수가 암모니아 전환율에 미치는 영향을 체계적으로 조사하였습니다. 또한, 단열재 구성을 최적화하여 열적 성능을 더욱 강화하였습니다. 실험 결과, 국부적 열 분포를 최적화하기 위한 정밀한 전력 제어를 통해 높은 암모니아 전환율과 탁월한 에너지 이용 효율을 달성할 수 있음을 확인하였습니다. 결과적으로 본 연구는 분산형 수소 생산 인프라에 최적화된 고효율 전기화 공정 설계를 위한 견고한 기술적 토대를 제공합니다.

### 참고문헌

1. Zhao, Z., He, W., Guo, B., Yu, J., Wang, Z., and Yu, H., "A Comprehensive Review of Ammonia Decomposition for Hydrogen Production," *Energy Fuels*, 39, 29, 13825-13847 (2025).
2. Zheng, L., Ambrosetti, M., and Tronconi, E., "Joule-Heated Catalytic Reactors toward Decarbonization and Process Intensification: A Review," *ACS Engineering Au*, 4, 1, 1-25 (2023).
3. Badakhsh, A., Kwak, Y., Lee, Y.-J., Jeong, H., Kim, Y., Sohn, H., Nam, S. W., Yoon, C. W., Park, C. W., and Jo, Y. S., "A compact catalytic foam reactor for decomposition of ammonia by the Joule-heating mechanism," *Chem. Eng. J.*, 426, 130802 (2021).

## Ru



(NH<sub>3</sub>) (17.6 wt%), 가 , .  
 가 , .  
 (Haber–Bosch)  
 (400–500 ), (100–300 bar)  
 1-2 %  
 (Smith et al. [1]).

(Chen et al. [2]).

CeO<sub>2</sub> Ba Ru , CeO<sub>2</sub>  
 Ba (Feng et al. [3], Baik et al. [4]).

### References

1. Smith, C., Hill, A. K., and Torrente-Murciano, L., "Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape", *Energy Environ. Sci.*, **13**, 331–344 (2020).
2. 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).
3. Feng, J., Liu, L., Ju, X., Jiang, Q., Wang, J., Guo, J., He, T., and Chen, P., "Decoration of Ru nanoparticles on  $\gamma$ -alumina with sub-nanometer ceria species for efficient catalytic ammonia synthesis", *Catal. Sci. Technol.*, **13**, 4156–4166 (2023).
4. Baik, Y., Kwen, M., Lee, K., Chi, S., Lee, S., Cho, K., Kim, H., and Choi, J., "Splitting of Hydrogen Atoms into Proton–Electron Pairs at BaO–Ru Interfaces for Promoting Ammonia Synthesis under Mild Conditions", *J. Am. Chem. Soc.*, **145**, 11364–11374 (2023).

## 암모니아 기반 수소 생산을 위한 고성능 Ru Bead 촉매 설계

권성민<sup>1,2</sup>, 심기동<sup>1</sup>, 김영민<sup>1</sup>, 이기봉<sup>2\*</sup>, 임영환<sup>1\*</sup>, 채호정<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>수소공정연구센터, 한국화학연구원, <sup>2</sup>화공생명공학과, 고려대학교

암모니아는 높은 수소 저장 밀도와 용이한 액화 특성을 지녀 탄소 중립 실현을 위한 유망한 수소 운반체로 주목받고 있다[1]. 암모니아로부터 고순도 수소를 생산하기 위해서는 높은 활성과 내구성을 갖춘 촉매가 필수적이며, 루테튬(Ru) 기반 촉매가 가장 우수한 성능을 보이는 것으로 알려져 있다[2]. 그러나 Ru 촉매는 질소 원자의 재결합 및 탈착 단계( $2N(ad) \rightarrow N_2(g)$ )가 반응 속도 결정 단계(rate-determining step)이며, 산업적 적용을 위해서는 기존 파우더 형태가 아닌 기계적 강도가 우수하고 압력 손실이 낮은 성형 촉매(Shaped catalyst)의 개발이 요구된다[3]. 이에 본 연구에서는 상용 알루미나( $Al_2O_3$ ) 비드 지지체의 표면 개질을 위한 새로운 촉매 제조 전략을 제안한다. 이 방법은 비드 표면에 얇고 균일한 La-Ce 복합 산화물층을 형성함과 동시에 K 조촉매 효과를 극대화하도록 설계되었다. 개발된 촉매 제조 전략은 Ru 입자의 분산도를 최적화할 뿐만 아니라, 지지체의 염기성을 향상시켜 활성 금속인 Ru로의 전자 공여를 촉진한다. 이러한 구조적·전자적 제어는 반응 속도 결정 단계인 질소 탈착을 가속화하여 암모니아 분해 효율을 크게 향상시킨다. 결론적으로, 본 연구는 표면 개질을 통해 산업적 수소 생산 공정에 적합한 고성능/고내구성 Ru 기반 비드 촉매를 개발하였다.

### 참고문헌

1. Spatolisano, Elvira, et al. "Ammonia as a carbon-free energy carrier:  $NH_3$  cracking to  $H_2$ ." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 62.28 (2023).
2. Boisen, Astrid, et al. "Why the optimal ammonia synthesis catalyst is not the optimal ammonia decomposition catalyst." *Journal of Catalysis* 230.2 (2005).
3. Hansgen, Danielle A., Dionisios G. Vlachos, and Jingguang G. Chen. "Using first principles to predict bimetallic catalysts for the ammonia decomposition reaction." *Nature chemistry* 2.6 (2010)

## 소뼈 유래 Hydroxyapatite 촉매를 이용한 폐식용유의 열적 유도 전이에스테르화에 의한 바이오디젤 생산

김민영<sup>1</sup>, 권일한<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 자원환경공학과

### Biodiesel Production via Thermally Induced Transesterification of Waste Cooking Oil Using Hydroxyapatite Derived from Bovine Bone as a Catalyst

Minyoung Kim<sup>1</sup>, Eilhann E. Kwon<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Resource and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

기후변화 대응과 탄소중립 실현을 위한 노력으로 화석연료 의존도를 낮추고 재생에너지로 전환하려는 움직임이 전 세계적으로 가속화되고 있다. 이 가운데 바이오디젤은 기존 디젤 엔진과의 높은 호환성, 인프라 활용 가능성, 그리고 상대적으로 낮은 환경부하로 인해 유망한 대체 연료로 평가받고 있다. 이에 따라 지속 가능성과 경제성을 동시에 확보할 수 있는 바이오디젤 생산 기술의 개발이 중요한 과제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 폐 소뼈로부터 유래한 hydroxyapatite를 저비용·친환경 다공성 촉매로 활용하여, 열적 유도 전이에스테르화 반응을 통해 폐식용유로부터 바이오디젤을 생산하는 공정의 가능성을 체계적으로 평가하였다. 고순도의 hydroxyapatite 상을 확보하기 위하여 소뼈를 500, 600, 650 °C에서 각각 소성하였으며, 이후 이를 촉매로 사용하여 폐식용유와 메탄올 간 전이에스테르화 반응을 수행하였다. 반응 적용에 앞서 소성된 소뼈의 물리화학적 특성을 분석한 결과, 발달된 메조·매크로 기공 구조와 높은 칼슘 함량을 확인하였다. 이와 같은 구조적 및 조성적 특성은 반응물인 폐식용유와 메탄올의 확산 및 계면 접촉을 촉진하여, 기존 균일계 촉매 공정 대비 빠른 반응 속도와 높은 전환 효율을 달성하는 데 기여하였다. 특히 소성 온도는 바이오디젤 수율과 최적 반응 조건에 결정적인 영향을 미쳤다. 소성 온도가 상승함에 따라 칼슘 인산염 상이 점진적으로 화학양론적 hydroxyapatite로 전환되었으며, 이에 따라 촉매 표면의 활성점 밀도가 증가하여 전이에스테르화 반응의 촉진 효과가 강화되었다. 그 결과, 650 °C에서 소성한 소뼈 촉매는 140 °C 조건에서 1분 이내에 97.7 wt.%의 높은 바이오디젤 수율을 달성하였다. 반면, 500 °C에서 소성한 시료는 동일 조건에서 거의 전환이 관찰되지 않아, 소성 온도에 따른 상 구조 변화와 촉매 활성의 상관관계를 명확히 보여주었다. 종합적으로 본 연구는 폐 소뼈의 자원화를 통해 고부가가치 촉매를 제조하고 이를 바이오디젤 생산에 적용함으로써, 폐자원 순환과 에너지 전환을 동시에 실현할 수 있는 지속 가능하고 효율적인 공정 전략을 제시한다.

**사사:** 본 연구성과는 2023년도 정부(교육기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2023-NR077231). 본 연구성과는 2024년도 정부(교육기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2024-00412457).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 에너지 저장

(포스터발표 I)

---

2026년 3월 19일(목) 09:00~11:00  
부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비

## Spray pyrolysis-derived cobalt compound yolk–shell microspheres from waste solutions for Li- and Na-ion storage

Yeong Beom Kim<sup>1,2</sup>, Jaewon Lee<sup>3</sup>, Jihong Park<sup>2</sup>, Yun Chan Kang<sup>1,\*</sup> and Gi Dae Park<sup>2,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Anam-Dong, Seongbuk-Gu, Seoul 136-713, Republic of Korea.

<sup>2</sup>Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-Gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Republic of Korea.

<sup>3</sup>Department of Urban, Energy, and Environmental Engineering, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-Gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Republic of Korea.

<sup>4</sup>Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-gu, Cheongju 28644, Republic of Korea.

The sustainable utilization of critical metals is becoming increasingly important for the advancement of alkali-ion battery technologies. Cobalt, despite its outstanding electrochemical functionality, faces supply and cost challenges that limit its large-scale application. Herein, cobalt was selectively recovered from cemented tungsten carbide waste and transformed into yolk–shell structured cobalt oxide and cobalt selenide anodes via a facile leaching process followed by spray pyrolysis. Trace metallic species inherently present in the waste acted as in situ multi-heteroatom dopants, tailoring the electronic structure and reaction kinetics of the resulting compounds. The cobalt oxide yolk–shell microspheres exhibited enhanced performance in lithium-ion batteries, while the cobalt selenide counterparts delivered improved sodium storage behavior. This waste-to-value strategy demonstrates a practical pathway for converting industrial residues into high-performance electrode materials while addressing resource sustainability.

### 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).

## Spray pyrolysis derived CNT-integrated multi-voids microspheres with ZnO and Sn-doped NiO lithiophilic seeds for stable lithium metal anodes

Hyo Yeong Seo<sup>1</sup>, Hyebin Yoon<sup>2</sup>, Yun Chan Kang<sup>1\*</sup>, Gi Dae Park<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Korea University

<sup>2</sup>Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University

<sup>3</sup>Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University

Spray pyrolysis derived multi-void microspheres provide an effective structural framework for stabilizing lithium metal anodes by simultaneously reducing local current density, providing internal lithium reservoirs, and buffering large volume changes during cycling. In particular, CNT-integrated multi-void architectures enable continuous electronic pathways and uniform Li<sup>+</sup> flux distribution, allowing lithium to be deposited preferentially inside internal voids. This scalable one-step process offers precise control over microsphere morphology, porosity, and nanocrystal dispersion, making it suitable for practical lithium metal host design.

Based on this structural framework, two representative lithiophilic nanocrystal systems were introduced to regulate lithium nucleation behavior. First, multi-void ZnO-C-CNT microspheres containing uniformly dispersed ZnO nanocrystals act as lithiophilic nucleation seeds, promoting homogeneous lithium deposition and suppressing dendrite formation while delivering stable Coulombic efficiency and robust full-cell cycling performance. Second, Sn-doped NiO-C-CNT multi-void microspheres were designed to exploit coupled conversion-alloying reactions. During initial lithiation, Sn-doped NiO forms Li-Sn alloys, metallic Ni conductive pathways, and a Li<sub>2</sub>O buffering matrix, which together regulate lithium nucleation and multi-void accommodation, this host delivers ~97% Coulombic efficiency over 300 cycles and stable symmetric cell operation exceeding 2000 h.

These results demonstrate that CNT-integrated multi-void microspheres synthesized via spray pyrolysis provide a generalizable framework that couples structural design with lithiophilic seed engineering, offering a scalable strategy toward dendrite-free lithium metal batteries.

### 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).

## Rapid and Sustainable Lithium Recovery from Spent LiFePO<sub>4</sub> Cathodes via K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>-Assisted Mechanochemical Solid-State Oxidation

Junhee Kim<sup>1</sup>, Min Hyuk Choi<sup>2</sup>, Dong Won Kim<sup>3</sup> and Kyeong-Ho Kim<sup>1,3,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea.

<sup>2</sup>Department of Physics, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea.

<sup>3</sup>Department of Eco-Friendly Energy Technology, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea.

### <Instructions for abstract>

The rapid commercialization of lithium-ion batteries (LIBs) employing LiFePO<sub>4</sub> (LFP) cathodes has led to a growing volume of end-of-life LFP waste, creating an urgent need for efficient lithium recycling strategies. Conventional hydrometallurgical processes rely on strong acids or sodium persulfate oxidants, generating large amounts of sulfate-rich wastewater. In this study, we present an acid-free mechanochemical route for selective lithium extraction from spent LFP black powder using potassium persulfate (K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) as a solid-state oxidant.<sup>1</sup>

High-energy ball milling induces the solid-state oxidation of LFP to FePO<sub>4</sub> through Fe<sup>2+</sup> to Fe<sup>3+</sup> conversion while forming a water-soluble LiKSO<sub>4</sub> phase.<sup>2</sup> Mechanical activation enhances interfacial contact between reactants, enabling rapid lithium release without aqueous oxidation or corrosive reagents. Under optimized conditions (600 rpm, 20 min, ball-to-powder ratio of 20:1), a lithium extraction efficiency of 99.81% was achieved.

Subsequent water leaching selectively dissolved the LiKSO<sub>4</sub> phase, leaving FePO<sub>4</sub> as a recyclable solid residue for LFP resynthesis.<sup>1</sup> Lithium was recovered as Li<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> via chemical precipitation, and the process generates K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> instead of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> as the main by-product. Unlike Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, which often requires costly wastewater treatment, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> can be directly utilized as a fertilizer, highlighting the potential of K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>-assisted mechanochemical strategy as a simple and sustainable route for LFP recycling.

### References

1. Liu, K., Liu, L., Tan, Q., and Li, J., "Selective Extraction of Lithium from a Spent Lithium Iron Phosphate Battery by Mechanochemical Solid-Phase Oxidation," *Green Chem.*, **23**(3), 1344-1352 (2021).
2. Zhang, J., Hu, J., Liu, Y., Jing, Q., Yang, C., Chen, Y., and Wang, C., "Sustainable and Facile Method for the Selective Recovery of Lithium from Cathode Scrap of Spent LiFePO<sub>4</sub> Batteries," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **7**(6), 5626-5631 (2019).

## A Multiscale Thermal Simulation Framework for Lithium-Ion Battery Cells under Mechanical Impact

Raghda Mansour Kamel Noureldin<sup>1,2</sup>, Jeong Keun Cha<sup>1,2</sup> and Soo Hyung Kim<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Research Center for Energy Convergence Technology, Pusan National University

<sup>2</sup>Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University

<sup>3</sup>Department of Nanoenergy Engineering, Pusan National University

In this study, a multiscale thermal simulation framework is developed to analyze the thermal response of a lithium-ion cylindrical battery cell subjected to mechanical impact. First, a one-dimensional lumped thermal model is implemented in MATLAB® [1] to capture the time-dependent temperature evolution of the cell under impact-induced heat generation. To capture spatial temperature non-uniformity, two-dimensional and three-dimensional finite element models are constructed using COMSOL Multiphysics® [2], in which localized heat generation is applied at the impact region.

To improve simulation accuracy, key thermal parameters are estimated using a deep learning–inspired framework, where the parameters are learned and calibrated based on experimental results. The combined results demonstrate that while the lumped model provides rapid insight into global thermal trends, higher-dimensional models are essential for capturing localized hot-spot formation and thermal gradients that may trigger thermal runaway. Overall, the proposed multiscale modeling approach offers an efficient and physically consistent framework for evaluating lithium-ion battery safety under mechanical abuse conditions.

### References

1. MathWorks, MATLAB, <https://www.mathworks.com> (accessed Feb. 2026).
2. COMSOL, COMSOL Multiphysics, <https://www.comsol.com> (accessed Feb. 2026).

## 기계적 충격 조건에서 충전 상태에 따른 원통형 리튬이온전지의 열·전기적 응답 및 변형 특성

차정근<sup>1</sup>, 김수형<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 에너지융합기술연구소, <sup>2</sup>부산대학교 나노융합기술학과, <sup>3</sup>부산대학교 나노에너지공학과

### Thermal-electrical responses and deformation characteristics of cylindrical lithium-ion cells under mechanical impact as a function of state of charge

Jeong Keun Cha<sup>1</sup>, Soo Hyung Kim<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Research Center of Energy Convergence Technology, Pusan National University, <sup>2</sup>Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University, <sup>3</sup>Department of Nanoenergy Engineering, Pusan National University

전기차 및 ESS 보급 확대에 따라 리튬이온전지의 기계적 손상에 따른 열폭주 위험성 정량화의 필요성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 서로 다른 충전상태(SOC: 50%, 100%)의 원통형 셀(18650)을 대상으로 배터리 충돌 시험을 수행하고, 열화상 카메라 및 전압 동시계측을 통해 전압 변화( $\Delta V$ ), 최대 온도( $T_{max}$ ), 온도 상승률( $dT/dt$ )을 정량적으로 분석하였다. 실험 결과, SOC 증가에 따라 충격 직후 전압 급강하 폭과 온도 상승률이 유의하게 증가하였다. 50% SOC 조건에서는 동일 충격에서도 최대 온도 및 압력 상승이 제한적이었으며, 발열 반응이 자기 소멸되는 거동이 관찰되었다. 반면 100% SOC 조건에서는 기계적 변형에 따른 전극 접촉 또는 집전체 변형으로 내부 단락 가능성이 높아졌으며, 발열 거동이 더욱 뚜렷하게 나타났지만 열폭주로 전이되지는 않았다. 이러한 결과는 SOC 증가에 따른 저장 에너지 증가와 전극 전위차 확대가 열폭주 개시 임계조건을 낮춘다는 것을 시사한다. 분리막의 인장 및 관통 시험 결과, A 및 B 배터리 간 기계적 강도 차이는 통계적으로 유의미하지 않았다. 그러나 충격 이후 일부 시편에서 분리막 미세기공의 부분적 폐색(Pore Clogging) 및 국부 변형이 공통적으로 관찰되었다. 이러한 미세구조 변화는 직접적인 파손은 아니더라도 이온 수송 저항 증가와 전류 밀도 불균일을 초래하여 국부 발열을 증폭시키는 보조적 요인으로 작용할 수 있다. 다만, 부분적 폐색 단독으로 내부 단락을 유발한다고 단정하기는 어렵고, 전극 변형, 집전체 접촉 및 리튬 석출 등과 복합적으로 작용하는 것으로 판단된다. 본 연구는 기계적 충격에 따른 발열 거동 및 열폭주 개시가 단순 구조 파손 여부가 아니라, SOC에 따른 전기화학적 반응 구동력과 충격 이후 미세구조 변화가 결합된 복합 현상임을 규명하였다. 이는 사용후 배터리의 운송 및 해체 과정에서 SOC 기반 위험도 분류와 충격 허용 기준 설정에 중요한 기초 자료를 제공한다.

## Aerosol-Assisted Synthesis of Three-Dimensional Carbon-Composited Metal Sulfide Microspheres with Numerous Empty Nanorooms for High-Capacity Sodium-Ion Batteries

Ji Myeon PARK<sup>1</sup>, Seul JEONG<sup>1</sup>, Jin Hyeong LEE<sup>1</sup>, Dong Hwi Kim<sup>1</sup>, Jin-Sung PARK<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Energy Systems Research Ajou University Suwon 16499, Korea

<sup>2</sup> Department of Material Science and Engineering Ajou University Suwon 16499, Korea

Transition metal chalcogenides have emerged as promising anode materials for sodium-ion batteries due to their high theoretical capacities. Nevertheless, their practical application is limited due to rapid capacity fading caused by large volume fluctuations and poor electrical conductivity. In this study, we report a one-pot spray pyrolysis synthesis of carbonaceous microspheres consisted of heterostructured metal sulfide nanoparticles and cubic nanorooms. Spray pyrolysis of a precursor solution that contains metal nitrates, NaCl, and dextrin results in the formation of microspheres in which NaCl nanoparticles are embedded within. Here, NaCl is employed as a template which can be removed from a simple washing process with water, resulting in the formation of cubic nanorooms distributed within the microspheres. Subsequent one-step sulfidation process results in the formation of 3D carbon-composited metal sulfide microspheres with numerous empty nanorooms and heterogeneous crystal structures. When employed as anode for sodium-ion batteries, the microspheres with unique structural characteristics can accommodate stress from drastic volume exchanges, enlarge the electrode/electrolyte interface, and enhance Na<sup>+</sup> diffusion kinetics. Here, the formation of the heterointerface plays a crucial role by creating a built-in electric field at the interface, which enhances Na<sup>+</sup> adsorption energy and reduces its diffusion barrier, thereby significantly accelerating reaction kinetics. The nanosized sulfide particles also effectively reduce the Na<sup>+</sup> ion diffusion length. The synthesized heterostructured metal sulfide microspheres exhibited high reversible capacity, excellent cycle stability, and rate capability. This scalable and simple spray pyrolysis is expected to provide a useful strategy for next-generation sodium-ion battery anode materials with cubic nano rooms and carbon matrix.

### References:

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).

## Rational Engineering of Yolk-Shell Sn/Sn-Chalcogenide@Carbon Architectures toward Advanced Lithium-Ion Storage

Jin Hyeong Lee<sup>1</sup>, Byeong Chan Kim<sup>1</sup>, Jin-Sung Park<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Energy Systems Research, Ajou University

<sup>2</sup>Department of Materials Science and Engineering, Ajou University

Yolk-shell nanostructures have attracted considerable attention as advanced platforms for high-performance lithium-ion battery anodes because their distinctive architecture can effectively mitigate volume variation and preserve electrode structural stability during repeated cycling [1]. Herein, we present a rationally engineered Sn/Sn-chalcogenide@C yolk-shell heterostructure designed to improve the electrochemical behavior of tin-based anode materials. Building on earlier studies that employed hollow carbon spheres to confine Sn nanoparticles for enhanced mechanical stability and capacity retention [2], chalcogen species were additionally incorporated to create heterointerfaces that facilitate electron/ion transport while alleviating mechanical degradation.

The heterostructured particles were fabricated through a one-pot spray pyrolysis process followed by thermal treatment, producing uniform yolk-shell morphologies with closely integrated Sn, Sn-chalcogenide, and carbon components. Electrochemical evaluations demonstrated markedly enhanced specific capacity, cycling durability, and rate performance relative to conventional Sn@C counterparts. These improvements stem from the synergistic effects of interface modulation by the chalcogenide phase and the internal void space of the yolk-shell configuration, which accommodates volume expansion and preserves electrical connectivity. This work highlights an effective design strategy for constructing yolk-shell heterostructures as next-generation anode materials for lithium-ion batteries.

### 참고문헌

1. Hongwei Zhang et al, "Tailored Yolk-Shell Sn@C Nanoboxes for High-Performance Lithium Storage," *Advanced Functional Materials*, 27(8), 1606023 (2017)
2. 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)

## Coupled 2D-2D Heterostructures in Porous Metal Chalcogenide–Graphene Oxide Composites for Enhanced Alkali-Ion Storage

Hwa Young CHOI<sup>1</sup>, Jin Hyeong LEE<sup>1</sup>, Jin-Sung Park<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>*Department of Energy Systems Research, Ajou University, Suwon, 16499, Korea*

<sup>2</sup>*Department of Materials Science and Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Korea*

\* *jinsung@ajou.ac.kr*

**Keywords:** Lithium-Ion Battery, Sodium-Ion Battery, Heterostructure, Anode, Porous Network, Two-Dimensional Layered Structures

The design of porous two-dimensional (2D–2D) heterostructures has emerged as a promising strategy to enhance the electrochemical performance of alkali-ion battery anodes. In this study, we synthesized a three-dimensional porous metal chalcogenide-graphene oxide composite featuring abundant coupled 2D–2D heterostructures via a template-assisted spray pyrolysis approach. A precursor solution containing NaCl, dextrin, graphene oxide, and metal salts was atomized and pyrolyzed to produce composite powders. Subsequent washing effectively removed the NaCl template, generating a highly porous architecture. Through a selenization process, the as-prepared powders were converted into metal chalcogenide–reduced graphene oxide composites incorporating coupled two-dimensional layered domains into a conductive porous framework.

The resulting composite featured coupled layered domains forming coherent 2D–2D heterostructures, thereby facilitating efficient interfacial charge transfer. This structure provides high structural stability and abundant active sites while effectively reducing polarization, leading to superior lithium/sodium storage performance. This work demonstrates the effectiveness of spray pyrolysis combined with template-assisted porosity and selenization in tailoring the microstructure of chalcogenide–carbon composites, providing a promising pathway for next-generation alkali-ion battery anodes.

### References:

1. Choi, Seung Ho, and Yun Chan Kang. *Nanoscale*, 7, 3965-3970, (2015).

LMR

1, 1,2, 1,2, 1,2, 1,2, 1,2\*

250 mAh g<sup>-1</sup> (LMR) (voltage decay) 가 (LIBs) 가 가 Li and Mn rich layered oxide LMR Li<sub>2</sub>MnO<sub>3</sub> 가

LMR Li<sup>+</sup> cation mixing Li<sup>+</sup>

LMR (Metal = 0, 0.2, 1 mol%) 가 , 300 가

Metal = 0.2 mol% 가 LMR

LMR

References:

1. Panpan Zhang, Xinhua Zhai, Hui Huang, Jianfeng Zhou, Xiaobo Li, Yapeng He, Zhongcheng Guo “Synergistic Na<sup>+</sup> and F<sup>-</sup> co-doping modification strategy to improve the electrochemical performance of Li-rich Li<sub>1-20</sub>Mn<sub>0-54</sub>Ni<sub>0-13</sub>Co<sub>0-13</sub>O<sub>2</sub> cathode” *Ceramics International* **46**, 24723–24736 (2020).

## Dendrite Suppression in Anode-Free Lithium Metal Batteries via Nanoscale LiF-Induced Nanorod Growth

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 metal batteries (AFLMBs), which utilize a bare current collector rather than a lithium metal anode, are garnering significant interest as next-generation energy storage systems owing to their simple cell design and high energy density. To overcome challenges caused by the lack of an initial lithium source, such as uneven lithium plating and stripping, lithium inventory loss, and fast capacity fade from continuous electrolyte side reactions, researchers have attempted to build an artificial solid electrolyte interphase (SEI) on the copper (Cu) current collector (CC) using electrolyte additives, solution-based techniques, or gas-phase reactions. However, these methods often yield non-uniform SEI layers with poorly controlled thicknesses, making it difficult to clearly understand the mechanisms underlying SEI effects in AFLMBs. Here, we systematically explore the role of the SEI by employing a vacuum deposition method to coat Cu CCs with thickness-controlled LiF thin films. Interestingly, a fully continuous LiF layer restricts uniform lithium plating and stripping due to its naturally low Li-ion conductivity. Conversely, a partially covered LiF film facilitates uniform lithium deposition through the gaps between LiF domains. This pattern LiF-modified surface encourages the growth of a nanorod-like lithium morphology, which minimizes dendrite formation and maintains a smoother interface than bare Cu CCs, leading to substantially improved cycling stability. These findings highlight that precisely controlled, uniform SEI thin films can effectively govern lithium plating and stripping dynamics, presenting a promising approach to boost the performance and longevity of AFLMBs.

**Keywords:** Anode-free lithium metal batteries, surface modification, solid electrolyte interphase, LiF thin film, lithium nanorods

## Enabling Dense $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ (LLZO) Garnet Electrolytes at 1000 °C without Pressure via Cooperative Template and Dopant Design

Seung Hoon Chun and Sangbaek Park\*

Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134  
Korea

Garnet-type  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  (LLZO) has emerged as a leading solid electrolyte for solid-state lithium batteries due to its high ionic conductivity and chemical stability against lithium metal. Nevertheless, fabrication of highly dense LLZO ceramics generally demands elevated temperatures or external pressure. In this work, we introduce a template–dopant cooperative strategy that enables pressureless densification at 1000 °C using conventional sintering. A  $\text{La}_{2.4}\text{Zr}_{1.2}\text{Ta}_{0.4}\text{O}_7$  (LZT) template facilitates early cubic-phase formation and uniform particle refinement, while Ga and Si co-addition induces transient Li–Ga–O and Li–Si–O liquid phases that promote pore elimination and grain-boundary integration. Notably, the formation of Li–Si–O mitigates Ga segregation and contributes to structural stabilization of the cubic garnet phase. Through this synergistic design, LLZO pellets with 95.4% relative density and an ionic conductivity of  $0.58 \text{ mS cm}^{-1}$  are achieved without pressure-assisted processing. The resulting electrolyte demonstrates stable lithium stripping/plating for over 1200 h in symmetric cells without liquid electrolytes, and full cells exhibit 99% capacity retention after 300 cycles. This study provides a scalable processing strategy and deeper insight into grain-boundary engineering for next-generation garnet solid electrolytes.

## **Improving High-Rate Capability of Graphite//NCM811 Lithium-ion Battery via Interface Control**

Gwangyong Ko, Kihun An, Dung Tien Tuan Vu, Seung-wan Song\*

Department of Chemical Engineering & Applied Chemistry, Chungnam National University

Fast charging of Li-ion batteries (LIBs) with graphite anode is highly desirable for applications such as electric vehicles. However, under fast charging rates, intrinsically sluggish Li-ion intercalation kinetics and non-uniform and unstable solid electrolyte interphase (SEI) layer of graphite anode lead to Li dendrites formation and growth. Dendrites can penetrate soft separator, causing performance failure and internal short-circuits followed by thermal runaway. Herein, we present improved fast charging performance enabled by a designed electrolyte formulation that stabilizes the SEI layer of graphite anode, compared to conventional rate of 0.3C taking 3.3hours, and enhanced cycle life of high-nickel-based LIBs. The correlation between fast charging performance and interfacial stability will be discussed.

## **Ga(FSI)<sub>3</sub>-Derived Core–Shell Liquid Metal Interlayer Enabling Uniform Lithium Deposition in Anode-Free All-Solid-State Batteries**

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-Ga(FSI)<sub>3</sub> 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:** Sulfide solid electrolytes; Anode free; All-solid-state batteries; Liquid metal; Salt

## Femtosecond Laser-Engineered Coffee Waste as a Sustainable Anode for Lithium-Ion Batteries

Si Eun PARK<sup>1</sup>, Ju young Oh<sup>1</sup>, Su hyun Park<sup>1</sup>, Tongmei JING<sup>2</sup>, Han Ku NAM<sup>3</sup>, Sangbaek PARK<sup>1\*</sup> and Young-Jin KIM<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 34141, Republic of Korea

<sup>3</sup>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. Herein, 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<sup>-1</sup> at 0.1 C and exhibits a high reversible capacity of 273 mAh g<sup>-1</sup> after 250 cycles at 1 C, representing an improvement of approximately 54% compared to 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.

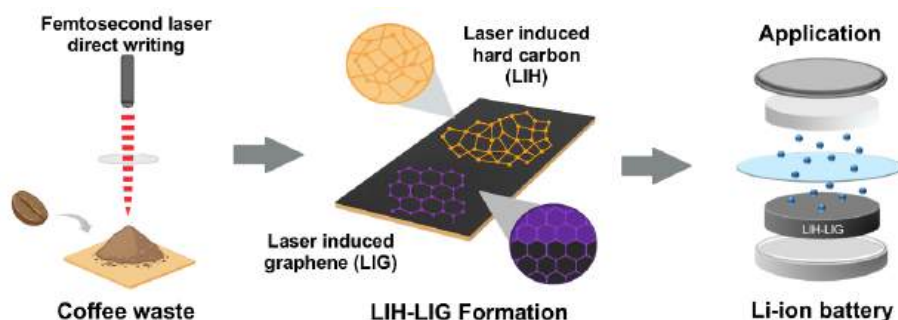


Figure 1. Schematic illustration of femtosecond laser-induced carbonization of spent coffee waste into LIH/LIG composite for LIB anodes.

## One-Dimensional Zeolitic Imidazolate Framework-Based Separator Regulating Li<sup>+</sup> Transport in Semi-Solid-State Lithium Metal Batteries

Jiwoo Yoon, Jin-ung Kim, Jung-sang Cho\* and Sangbaek Park\*

*Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University,  
Daejeon 34134, Republic of Korea*

### Abstract

Semi-solid-state lithium metal batteries (SSSLMBs) offer a safer operating environment than conventional liquid-electrolyte systems by incorporating only a minimal amount of liquid electrolyte within a host framework, thereby providing a promising route toward next-generation lithium batteries capable of meeting stringent requirements for safety, stability, long cycle life, and robust performance under harsh conditions, including elevated temperatures. Among host frameworks, metal-organic frameworks (MOFs)-based separators have attracted considerable attention because they can confine liquid electrolytes within their porous structures, enabling safe operation at high temperature (e.g., > 90 °C) in SSSLMBs. Here, we report an electrospun polyacrylonitrile (PAN) separator integrated with zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) architectures (1D ZIF@PAN) for SSSLMBs. The 1D ZIF@PAN separator delivers an ionic conductivity on the order of  $10^{-4}$  S cm<sup>-1</sup> at room temperature with a relatively low activation energy, indicating continuous ion-conduction pathways through an interconnected porous structure. In addition, it exhibits improved thermal robustness, as evidenced by reduced thermal shrinkage and enhanced combustion tolerance compared with conventional polyolefin separators. Furthermore, it suppresses the cycling-induced increase in interfacial resistance and stabilizes Li plating/stripping. Post-mortem observations confirm uniform Li deposition on the Li metal after cycling, which is attributed to a homogenized Li<sup>+</sup> flux enabled by the MOF-based architecture. Therefore, by simultaneously enhancing thermal tolerance and interfacial stability through MOF-guided ion transport, the 1D ZIF@PAN separator provides a practical pathway toward safer, longer-lived, and high-performance SSSLMBs.

## 전이금속 셀렌화물/질소-도핑 탄소 복합 다공성 나노섬유의 합성 및 포타슘 이차전지 음극 성능 평가

곽영신<sup>1</sup>, 조중상<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>충북대학교 공업화학과

### Synthesis of Transition Metal Selenide/N-doped Carbon Composite Porous Nanofibers and Evaluation of Anodes for Potassium-Ion Battery

Young Shin Gwak<sup>1</sup>, Jung Sang Cho<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>Department of Engineering Chemistry, Chungbuk National University

최근 리튬 이온전지의 대안으로 리튬 대비 저렴하고 리튬과 유사한 물리화학적 성질을 가지는 포타슘 이온전지가 주목받고 있다. 그러나 포타슘 이온전지는 포타슘의 큰 이온반경 때문에 낮은 에너지밀도 및 구조적 불안정성을 가지며 상용화에 큰 어려움을 겪고 있다. 본 연구에서는 전기방사 및 후 열처리 공정을 통해 전이 금속 셀렌화물과 질소-도핑 탄소가 복합된 다공성 나노섬유를 합성하고, 이를 포타슘 이온전지의 음극 소재로 적용하였다. 전이 금속 셀렌화물은 높은 이론 용량을 가지며 에너지밀도 향상에 기여하고, 질소-도핑 탄소는 구조적 안정성 및 전기전도성을 제공한다. 또한 다공성 구조의 1차원 나노섬유는 큰 중횡비와 넓은 비표면적으로 전해질 침투 및 전하 이동을 촉진한다. 전기화학 특성 평가 결과, 1.0 A/g의 전류밀도에서 1000 cycle 후 250 mAh/g의 우수한 방전 용량을 나타내었다.

## 분무 열분해법 기반 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{rGO}/\text{CNT}@\text{HNCN}$ 마이크로스피어 합성 및 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 결정 성장 제어를 통한 고용량 음극 소재 개발

김태현<sup>1</sup>, 조중상<sup>1\*</sup>  
충북대학교 공업화학과<sup>1</sup>

최근 고에너지 밀도와 고출력, 장주기 특성을 동시에 만족하는 에너지 저장 장치에 대한 관심이 증가함에 따라 리튬 이온 배터리의 수요 역시 꾸준히 확대되고 있다. 리튬 이차전지의 주요 음극 소재인 흑연은 이론용량과 에너지 밀도가 낮다는 한계를 가진다. 이에 비해 전이 금속 산화물은 에너지 밀도가 높고 가격이 저렴하여 유망한 음극 소재로 주목받고 있다. 하지만 반복적인 충·방전 과정에서 발생하는 전이 금속의 부피 팽창과 낮은 리튬 이온 확산 속도로 인해 전극 안정성이 저하되며, 이는 장기 사이클 성능 저하로 이어진다. 본 연구는 분무열분해 공정과 ZIF-8 코팅 및 후열처리 공정을 통해 질소 도핑 탄소 나노케이지가 형성된 중공형  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  마이크로스피어를 합성하고 이를 리튬 이온 배터리용 음극 소재로 적용한다. rGO/CNT 전도성 골격은 3차원 전자 전달 네트워크를 제공하여 전기 전도도와 구조적 안정성을 향상시켰다. 탄화 과정에서 ZIF-8 코팅층은 중공 질소 도핑 탄소 나노케이지로 변환되어  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 결정 성장을 제어하고 균일한 입자 분산을 유도하였다. 더불어 Kirkendall 효과에 의해 형성된 중공  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  구조는 부피 변화에 대한 완충 역할을 수행하여 전극의 사이클 안정성을 향상시켰다. 이러한 다차원 전도성 중공 구조를 기반으로 한 음극 소재는  $0.5 \text{ A g}^{-1}$ 에서 500 사이클 이후에도  $932 \text{ mAh g}^{-1}$ 의 용량을 유지하였으며,  $10 \text{ A g}^{-1}$ 의 고율 조건에서도  $296 \text{ mAh g}^{-1}$ 의 용량을 보여 우수한 장기 안정성과 고속 충방전 특성을 나타냈다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00217581).

본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다. (2026-RISE-11-014-01)

### 참고문헌

1. J. S. Cho et al.[1], "Preparation of Hollow  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  Nanorods and Nanospheres by Nanoscale Kirkendall Diffusion, and Their Electrochemical Properties for Use in Lithium Ion Batteries", Sci. Rep., 6, 38933 (2016)

## 안티모니 셀레나이드/질소-도핑 탄소 복합 나노섬유 합성 및 소듐 이온 전지 음극 소재로의 적용

염혜원<sup>1</sup>, 조중상<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>충북대학교 공업화학과

### Synthesis of Antimony Selenide/N-doped Carbon Composite Nanofibers and Application of Sodium-ion Battery as a Anode Material

Hye won Yeom<sup>1</sup>, Jung Sang Cho<sup>1\*</sup>,  
<sup>1</sup>Department of Engineering Chemistry, Chungbuk National University

에너지 저장 장치 및 전기차 분야의 핵심 동력원인 리튬 이온 전지(LIB)는 우수한 에너지 밀도와 충·방전 효율을 자랑하지만, 리튬 자원의 희소성에 따른 수급 불안정과 고비용 문제가 심화되고 있다. 이에 대한 대안으로, 자원이 풍부하고 리튬과 유사한 물리화학적 특성으로 기존 기술을 적용 가능한 소듐 이온 전지(SIB)가 주목받고 있다. 그러나 SIB는 LIB 대비 에너지 밀도가 낮고, Na<sup>+</sup>의 큰 반경으로 인해 충/방전 시 전극 내부의 부피 변화 및 구조적 불안정을 유발한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 전기방사 공정 및 후열처리 공정을 통해 소듐 이온 전지 음극 소재용 안티모니 셀레나이드/질소-도핑 탄소 복합 나노섬유를 합성하였다. 안티모니 셀레나이드는 conversion 및 alloying 반응으로 소듐 이온 전지에서도 670 mAh/g의 높은 이론 용량을 가져 전체적인 에너지 밀도 향상에 기여하였다. 또한, 전기방사 공정으로 구현된 1차원 나노섬유 구조는 높은 중형비를 바탕으로 활물질-전해질 간 유효 접촉 면적을 극대화하였으며, 전하의 고속 이동이 용이한 연속적 전도성 네트워크를 구축하였다. 질소-도핑 탄소는 소재 내 효율적인 전자 이동 경로로서 소재 전반의 전기전도도 향상 및 안티모니 셀레나이드의 부피팽창을 억제하여 구조적 무결성을 향상시킨다. 그 결과, 합성된 소재는 0.5 A/g의 전류 밀도에서 200 사이클 후 410 mAh/g의 방전용량 유지 및 68.2 %의 용량 유지율을 달성하였다.

본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(2026-RISE-11-014-01)  
 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00217581).

## 프러시안 블루 유사체 유래 이성분계 전이금속 셀렌화물/그래핀 산화물/탄소 복합 섬유의 구조 설계 및 소듐 이온 전지 음극 소재 특성 평가

권현지<sup>1</sup>, 조중상<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>충북대학교 공업화학과

### Structural Design of Prussian Blue Analogue Derived Binary Transition Metal Selenide/Graphene Oxide/Carbon Composite Fibers for Sodium-Ion Batteries Anodes

Hyeon Ji Kwon<sup>1</sup>, Jung Sang Cho<sup>1\*</sup>  
 Department of Engineering Chemistry, Chungbuk National University

소듐 이온 전지(SIBs)는 풍부한 매장량과 낮은 비용으로 인해 리튬 이온 전지를 대체할 수 있는 유망한 이차전지 시스템으로 평가된다. 기존 리튬 기반 시스템과 유사한 삽입-탈삽입 반응 메커니즘을 공유한다는 점에서 상용화 측면에서도 높은 잠재력을 지닌다. 그러나 Na<sup>+</sup>의 큰 이온 반경은 전극 내부에서의 과도한 부피 변화와 느린 이온 확산을 초래하여 반응 속도 및 구조적 안정성을 저하시킨다. 따라서 높은 전자전도도와 단축된 Na<sup>+</sup> 확산 경로를 확보할 수 있는 구조 설계가 요구된다. 본 연구에서는 전기방사 공정과 후열처리 과정을 통해 1차원(1D) 다공성 (Co,Fe)Se<sub>2</sub>/환원 그래핀 산화물/탄소 복합 섬유를 합성하였다. CoFe 프러시안 블루 유사체 (CoFe-PBA)는 후열처리 과정에서 균일하게 분산된 이성분계 전이금속 셀렌화물 나노결정을 형성하기 위한 주형(template)으로 작용하였으며 환원 그래핀 산화물이 포함된 1차원 섬유 구조는 연속적인 전자 전달 경로를 형성하고 이온 확산 거리를 단축시킨다. 또한, 폴리스티렌(PS) 나노비드의 열분해로 인해 섬유 구조 내에 형성된 기공은 비표면적 증가를 통해 전해질과의 접촉 면적을 확대한다. 제조된 (Co,Fe)Se<sub>2</sub>/rGO/C 복합 섬유는 0.5 A g<sup>-1</sup>에서 474 mA h g<sup>-1</sup>의 초기 방전 용량을 나타내었으며 50회 충방전 이후에도 292 mA h g<sup>-1</sup>의 용량을 유지하였다. 종합적으로, 본 연구에서 제안한 설계 전략은 고성능 소듐 이온 전지 음극 소재 개발을 위한 효과적인 접근법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 사사

1. 본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(2026-RISE-11-014-01)
2. 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00217581).

## 주석 황화물이 내장된 계층적 다공성 질소 도핑 탄소 마이크로스피어의 합성 및 소듐 이차전지 음극 소재로의 적용

우석진<sup>1</sup>, 최윤서<sup>1</sup>, 조중상<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 공업화학과

### Synthesis of Tin Sulfide-Embedded Hierarchically Porous N-doped Carbon Microspheres and Their Application as Anode Materials for Sodium-Ion Batteries

Seok Jin Woo<sup>1</sup>, Yun Seo Choi<sup>1</sup>, Jung Sang Cho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Engineering Chemistry, Chungbuk National University

최근 소듐의 풍부한 매장량과 낮은 비용으로 인해 소듐 이차 전지(Sodium-ion batteries, SIBs)는 차세대 에너지 저장 시스템으로 주목받고 있다. 하지만 충·방전 과정 시 소듐 이온의 큰 이온 반경으로 인한 느린 이온 확산 속도와 구조적 불안정성은 전지의 수명 안정성을 저해한다는 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 분무 건조 공정 후 다단계 열처리를 통해 주석 황화물이 내장된 계층적 다공성 질소 도핑 탄소 마이크로스피어를 합성하였다. 계층적 다공 구조는 효율적인 전해질 침투를 촉진하여 소듐 이온의 확산을 원활하게 하였다. 또한 질소 도핑된 탄소 구조체는 충·방전 중 주석 황화물의 부피 팽창을 효과적으로 억제하였다. 전기화학 평가 결과, 해당 구조체를 적용한 음극은 0.5 A g<sup>-1</sup>의 전류밀도에서 20 사이클 후 655 mAh g<sup>-1</sup>의 방전 용량을 나타내었으며, 5.0 A g<sup>-1</sup>의 높은 전류 밀도에서는 367 mAh g<sup>-1</sup>의 용량을 유지하며 우수한 방전 용량을 나타내었다.

본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(2026-RISE-11-014-01) 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00217581) 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00217581)

## 분무열분해 공정을 활용한 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 조성의 단결정

### 리튬이온배터리 양극소재 합성 전략

Tae Ha Kim<sup>1</sup>, Seung Yub Baek<sup>1</sup>, Jun Hwan Kwon<sup>2</sup>, Gi Dae Park<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Urban, Energy, and Environmental Engineering, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-gu, Cheongju 28644, Republic of Korea

<sup>3</sup>Advanced Energy Research Institute, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-gu, Cheongju 28644, Republic of Korea

Single-crystal Ni-rich layered cathode materials have attracted significant attention due to their high energy density and improved structural stability by suppressing particle cracking. However, conventional synthesis methods for single-crystal cathode materials are predominantly based on co-precipitation followed by high-temperature calcination, which require additional Li-mixing processes, prolonged calcination time, and generate wastewater. Therefore, to address these limitations, we introduce a synthesis strategy for single-crystal Ni-rich cathode materials ( $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ ) using Li-containing precursors prepared via spray pyrolysis, followed by short-time calcination. As a result, single-crystal cathode materials were successfully synthesized at 900 °C for 3 h without any additional Li-mixing process. Compared with polycrystalline cathode materials, single-crystal cathode exhibits excellent cycling stability. This study provides an effective strategy to reduce the process cost for cathode material synthesis and can be extended to the preparation of various energy-related materials.

#### 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).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 청정생산

(포스터발표 I)

---

2026년 3월 19일(목) 09:00~11:00  
부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비

## NiO-Mo/ZSM-5 촉매의 성형 조건이 메탄 탈수소 방향족화 반응 성능에 미치는 영향

김주은<sup>1</sup>, 김민희<sup>1</sup>, 강제욱<sup>1</sup>, 김가은<sup>1</sup>, 김예주<sup>1</sup>, 이강현<sup>1</sup>, 오현택<sup>1</sup>, 이연진<sup>1</sup>, 조예진<sup>1</sup>, 김도희<sup>2</sup>, 전종기<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>국립공주대학교 화학공학부

<sup>2</sup>서울대학교 화학생명공학부

### The effect of catalyst molding conditions on methane dehydroaromatization over NiO-Mo/ZSM-5 catalysts

Jooeun Kim<sup>1</sup>, Minhee Kim<sup>1</sup>, Jaek Kang<sup>1</sup>, Gaeun Kim<sup>1</sup>, Yeju Kim<sup>1</sup>, Kanghyun Lee<sup>1</sup>,  
Hyuntaek Oh<sup>1</sup>, Yeonjin Lee<sup>1</sup>, Yejin Jo<sup>1</sup>, Do Heui Kim<sup>2</sup>, Jong-Ki Jeon<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Chemical Engineering, Kongju National University

<sup>2</sup>Dept. of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University

지속적인 산업 발전은 온실가스 배출량의 증가를 초래하였으며 이에 따라 기후 변화 대응과 탄소 중립의 필요성이 전 세계적으로 강조되고 있다. 온실가스의 주요 성분인 메탄(methane)을 탈수소 방향족화 반응(MDA)을 통해 석유 화학 산업에서 중요한 기초 유분인 벤젠(benzene), 톨루엔(toluene), 자일렌(xylene)으로 전환하는 기술이 주목받고 있다. 메탄 탈수소방향족화 반응에서 powder 형태의 촉매는 압력 강하로 인해 성형이 필수적이다. 본 연구에서는 NiO-Mo/HZSM-5(Si) 촉매를 효과적으로 성형하기 위해 바인더의 함량을 변화시켜 최적의 바인더 함량을 찾고자 하였다. 무기 바인더인 pseudo boehmite sol과 ludox의 함량을 다르게 하여 최적의 촉매를 선정 후, bead, extrudate, granule 형태를 다르게 촉매를 제조하였다. 질소흡착실험, temperature-programmed desorption (NH<sub>3</sub>-TPD), pyridine FT-IR 및 압축강도 측정기를 이용하여 제조한 촉매의 물리·화학적 특성을 분석하였으며, 성형한 촉매를 fixed-bed reactor에 장착하여 MDA 반응실험을 통해 최적 촉매를 선정하였다.

#### 참고문헌

1. Mirshafiee et al. "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).
2. Kosuge et al. "Temperature-programmed reduction study on the migration of molybdenum species into alumina sol during catalyst preparation," *Applied Catalysis A: General*, 362(1-2), 202-210 (2009).

## ZSM-5 촉매에서 Mo 소성 조건과 NiO 담지 최적화가 메탄 탈수소방향족화반응에 미치는 영향

김가은<sup>1</sup>, 김지연<sup>1</sup>, 강재욱<sup>1</sup>, 김예주<sup>1</sup>, 김주은<sup>1</sup>, 이강현<sup>1</sup>, 오현택<sup>1</sup>, 이연진<sup>1</sup>, 조예진<sup>1</sup>, 김도희<sup>2</sup>, 전종기<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>국립공주대학교 화학공학부

<sup>2</sup>서울대학교 화학생물공학부

## The Effect of Mo Calcination Conditions and NiO Loading Optimization on Methane Dehydroaromatization over ZSM-5 Catalysts

Gaeun Kim<sup>1</sup>, Jiyeon Kim<sup>1</sup>, Jaek Kang<sup>1</sup>, Yeju Kim<sup>1</sup>, Jooeun Kim<sup>1</sup>, Kanghyun Lee<sup>1</sup>, Hyuntaek Oh<sup>1</sup>, Yejin Jo<sup>1</sup>, Do Heui Kim<sup>2</sup>, Jong-Ki Jeon<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Chemical Engineering, Kongju National University

<sup>2</sup>Dept. of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University

온실가스 배출로 인한 기후 문제가 전 세계적인 문제로 부각됨에 따라, 온실가스의 주요성분인 메탄을 직접 전환하여 벤젠(benzene), 톨루엔(toluene), 자일렌(xylene)(BTX)과 같은 고부가가치 화합물을 생산하는 기술인 메탄 탈수소방향족화 반응(Methane Dehydroaromatization, MDA)이 주목받고 있다. NiO-Mo/ZSM-5(Si) 촉매는 MDA 공정에서 가장 유망한 촉매 중 하나로 보고되고 있으나, 해당 촉매는 몰리브덴(Mo) 종의 분산도 및 제올라이트의 Brønsted 산점 특성에 크게 의존하여 낮은 수율을 나타내며, 몰리브덴 종의 거동과 산점 변화에 대한 연구는 제한적인 실정이다.

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 Mo/ZSM-5(Si) 촉매의 소성 조건을 우선적으로 최적화한 후, 이를 기반으로 rotary ball mill을 통해 NiO 담지 시간 및 속도에 따른 NiO-Mo/ZSM-5(Si) 촉매를 제조하였다. 제조된 촉매는 질소흡착실험, pyridine FT-IR, NH<sub>3</sub>-TPD 및 H<sub>2</sub>-TPR을 통해 촉매의 물리·화학적 특성을 분석하였으며, MDA 반응은 촉매의 활성을 평가하기 위해 고정층 반응기에서 수행되었다.

### 참고문헌

1. Methane dehydroaromatization over Mo/HZSM-5 catalysts: The reactivity of MoC<sub>x</sub> species formed from MoO<sub>x</sub> associated and non-associated with Brønsted acid sites, 253, 117247 (2005).
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).

## 바이오매스-폐플라스틱 혼합물 열분해 반응용 HZSM-5 Extrudate와 Sphere 성형촉매 특성분석

김예주<sup>1</sup>, 이중엽<sup>1</sup>, 강제욱<sup>1</sup>, 김가은<sup>1</sup>, 김주은<sup>1</sup>, 이강현<sup>1</sup>, 오현택<sup>1</sup>, 이연진<sup>1</sup>, 조예진<sup>1</sup>, 임효석<sup>2</sup>, 박영권<sup>2</sup>,  
진중기<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>국립공주대학교 화학공학부

<sup>2</sup>서울시립대학교 환경공학부

### Characteristics of Molded HZSM-5 Extrudate and Sphere Catalysts for Biomass-Waste Plastic Mixture Pyrolysis

Yeju Kim<sup>1</sup>, Jungyeop Lee<sup>1</sup>, Jaek Kang<sup>1</sup>, Gaeun Kim<sup>1</sup>, Joeun Kim<sup>1</sup>, Kanghyun Lee<sup>1</sup>, Hyuntaek Oh<sup>1</sup>,  
Yeonjin Lee<sup>1</sup>, Yejin Jo<sup>1</sup>, Hoesuk Yim<sup>2</sup>, Youngkwon Park<sup>2</sup>, Jong-Ki Jeon<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Chemical Engineering, Kongju National University

<sup>2</sup>Dept. of Environmental Engineering, University Of Seoul

환경 문제를 일으키는 플라스틱 폐기물은 바이오매스와의 반응을 통해 안정성과 발열량을 향상시킬 수 있다. 바이오매스와 폐플라스틱 혼합물에서 BTX를 추출하는 과정은 기존 화석 연료 기반 공정에 비해 수율과 효율성이 낮다는 문제점이 있다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위한 방법 중 하나로 HZSM-5에 금속을 담지하는 방법이 미치는 영향을 확인하기 위하여 Rotary Ball Milling과 Vibratory Ball Milling, Water Impregnation으로 나누어 촉매를 제조한 후 Extrudate 및 sphere 형태로 성형하여 특성을 비교 분석하였다. 압축강도측정, 질소흡착실험, NH<sub>3</sub>-TPD 및 Pyridine FT-IR 등을 통해 촉매의 물리·화학적 특성을 분석하였다.

#### 참고문헌

1. Al-Salem, S. M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G. & Dutta, A. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *J. Environ. Manage.* 197, 177–198 (2017).
2. Yang, Z., Kumar, A., Apblett, A. W. & Moneeb, A. M. Co-Pyrolysis of torrefied biomass and methane over molybdenum modified bimetallic HZSM-5 catalyst for hydrocarbons production. *Green Chem.* 19, 757–768; 10.1039/C6GC02497A (2017).
3. Li, J. et al. Maximizing carbon efficiency of petrochemical production from catalytic co-pyrolysis of biomass and plastics using gallium-containing MFI zeolites. *Appl. Catal., B* 172, 154–164 (2015)

## Binder 함량에 따른 실란처리한 NiO-Mo/HZSM-5 촉매 재생 성능 평가 및 성형 촉매 대량 생산을 위한 Scale-up 최적화

강재욱<sup>1</sup>, 김주은<sup>1</sup>, 김가은<sup>1</sup>, 김예주<sup>1</sup>, 이강현<sup>1</sup>, 오현택<sup>1</sup>, 조예진<sup>1</sup>, 이연진<sup>1</sup>, 김도희<sup>2</sup>, 전종기<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>국립공주대학교 화학공학부

<sup>2</sup>서울대학교 화학생물공학부

### Effect of Binder Content on the Regeneration Performance of Silane-Treated NiO-Mo/HZSM-5 Catalysts and Scale-Up Optimization for Mass Production

Jaeuk Kang<sup>1</sup>, Joeeun Kim<sup>1</sup>, Gaeun Kim<sup>1</sup>, Yeju Kim<sup>1</sup>, Kanghyun Lee<sup>1</sup>, Hyuntaek Oh<sup>1</sup>, Yejin Jo<sup>1</sup>, Yeonjin Lee<sup>1</sup>, Do Heui Kim<sup>2</sup>, Jong-Ki Jeon<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Chemical Engineering, Kongju National University

<sup>2</sup>Dept. of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University

메탄 탈수소 방향족화 (MDA)는 메탄을 직접 BTX로 전환하는 반응이다. Mo/ZSM-5 촉매가 MDA 공정에 주로 적용되며 그중 실란처리한 NiO-Mo/ZSM-5가 가장 유망한 촉매로 보고되고 있다. Powder 형태의 촉매를 공정에 사용할 경우 압력 강하로 인한 운전상의 문제가 발생하므로, 실제 공정에서는 성형 촉매를 사용해야 한다. 또한, MDA 반응을 통해 BTX를 대량 생산하기 위해서는 대량의 촉매가 필요하며, 성형 촉매는 재생 과정을 거치며 반복적으로 반응 환경에 노출된다. 따라서 성형 촉매의 반응 활성, 압축강도, 재생 성능은 공정 경제성평가에 중요한 요소가 된다. 본 연구에서는 촉매 제조 공정의 경제성을 향상하기 위해 제조 과정을 대용량으로 최적화하였다. 또한, binder 함량을 변화시켜 제조한 bead 성형 촉매의 압축강도 및 재생 성능을 평가하였다. Binder는 무기 바인더인 pseudoboehmite sol, Ludox, Kaolin을 사용하여 성형하였다. 제조된 촉매의 물리, 화학적 특성은 질소 흡착 실험, NH<sub>3</sub>-TPD, Pyridine FT-IR, XRD 및 압축강도 측정을 통해 분석하였다. 또한 고정층 석영 반응기를 이용한 반응 및 재생실험을 수행하여 촉매 활성과 재생 성능을 평가하였다. 실험 결과 대용량 최적화를 위하여 NiO를 대량으로 담지한 촉매의 경우 소량으로 담지한 촉매에 비하여 비교적 낮은 활성을 보이는 것을 확인하였다. 또한, binder 함량을 변화하여 제조한 bead 촉매의 활성 및 재생 성능을 평가한 결과, binder 함량이 적을수록 반응 활성은 높으나 압축강도가 낮게 측정됨을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. Nam et al. "Enhanced reactivity and stability in methane dehydroaromatization over Mo/HZSM-5 physically mixed with NiO," Appl. Catal., B, 296, 120377 (2021).
2. Lee et al. "Optimization of the manufacturing procedure of Mo/HZSM-5 catalysts for methane dehydroaromatization" Catalysis Today, 461, 115527 (2026).
3. Gao et al. "Reaction regeneration cycle of Mo/HZSM-5 catalyst in methane dehydroaromatization with the addition of oxygen-containing component" Appl. Catal, A, General, 647, 118916 (2022).

## Molecular dynamic simulations to estimate the solubility of long-chain fatty acids in water at elevated temperatures

Jeongho Park<sup>1</sup>, Wonbin Seo<sup>1</sup>, and Tae Jun Yoon<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University, Institute of Chemical Processes, Seoul, 08826, Republic of Korea

<sup>2</sup>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, we investigate the mutual solubility between water and selected fatty acids (palmitic, stearic, oleic, and linoleic acids) and elucidate the solvation mechanism of fatty acids in water. Free energy perturbation was employed to estimate solubility at elevated temperature, and the calculated solubilities showed good agreement with experimental results. Through structural analyses, we confirmed how fatty acids form solvation structures in water at the molecular level, and by calculating thermodynamic properties, we quantitatively evaluated the solvation mechanisms in each phase (water in the oil-rich phase or fatty acids in the water-rich phase).

## Hydrothermal Leaching Behavior of NMC Cathodes with Varying Compositions using Organic Acids

Wonbin Seo<sup>1</sup>, Hajin Kim<sup>1</sup> and Tae Jun Yoon<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Chemical and Biological Engineering, Institute of Chemical Processes, Seoul National University, Seoul, 08826, Republic of Korea

<sup>2</sup>School of Transdisciplinary Innovations, Seoul National University, Seoul, 08826, Republic of Korea

\*e-mail: [tyoon124@snu.ac.kr](mailto:tyoon124@snu.ac.kr)

With the growing demand for lithium-ion batteries (LIBs), increasing attention has been directed toward the recycling of valuable metals contained in spent batteries. Conventional recycling processes commonly employ sulfuric acid for metal leaching; however, such methods raise environmental concerns. In addition, the metal composition of LIB cathode materials varies depending on the NMC ( $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ ) composition, which results in differences in electrochemical performance and leaching behavior. Therefore, the development of an environmentally friendly recycling process tailored to NMC compositions is required.

In this study, organic acids were investigated as eco-friendly leaching agents to evaluate the leaching efficiencies of lithium, nickel, manganese, and cobalt from LIB cathode materials with different NMC compositions. Leaching experiments were conducted at 423.15K, with reaction times monitored at 10-minute intervals up to 50 minutes. Acetic acid, formic acid, and citric acid were used as leaching agents, each at a fixed concentration of 0.2 M.

Among the organic acids tested, citric acid exhibited the highest leaching efficiencies for all NMC compositions. Furthermore, under the investigated conditions, higher overall leaching efficiencies were observed in the absence of glucose compared to systems in which glucose was added as a reducing agent. These results indicate that the leaching behavior strongly depends on both the NMC composition and the choice of organic acid. This study identifies optimal leaching conditions according to NMC composition and suggests a promising pathway for the development of environmentally benign LIB recycling technologies.

## The study calculates the precise solubility of propylene carbonate in dilute scCO<sub>2</sub> using the FEP method of MD at 313, 333, and 353 K.

Bomin Kim,<sup>1</sup> and Tae Jun Yoon<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Chemical and Biological Engineering, Institute of Chemical Processes, Seoul National University, Seoul, 08826, Republic of Korea

<sup>2</sup>School of Transdisciplinary Innovations, Seoul National University, Seoul, 08826, Republic of Korea

Lithium-ion batteries (LIBs) are essential for energy storage, and their global demand is growing. This growth increases spent LIB waste, making recycling a major research topic. Most studies focus on cathode and anode materials. However, electrolyte recycling is often ignored due to a lack of standard protocols and high fire risks. Electrolytes contain flammable organic solvents that are usually discarded during pretreatment. Supercritical carbon dioxide (scCO<sub>2</sub>) extraction is a promising recycling method because it suppresses flammability and prevents thermal degradation. Accurate vapor-liquid equilibrium (VLE) data between CO<sub>2</sub> and solvents are required to optimize this process.

Propylene carbonate (PC) is a high-polarity cyclic carbonate commonly used in electrolytes. The strong polarity of PC results in very low solubility in the CO<sub>2</sub>-rich vapor phase. This low concentration leads to high uncertainty in experimental measurements. While Molecular Dynamics (MD) simulations are a powerful tool for VLE calculations, the common Direct Coexistence Method faces limitations. In small-scale simulations, the number of solute molecules in the dilute phase is often statistically insignificant, making direct counting unreliable for PC solubility.

To overcome these limitations, this study adopts a simulation protocol integrating the Direct Coexistence Method and Free Energy Perturbation (FEP). Instead of direct counting, we calculate the residual chemical potential ( $\mu_{res}$ ) of PC at the infinite dilution limit using FEP to predict precise solubility.

The protocol is applied to the binary CO<sub>2</sub>-PC system at 313, 333, and 353 K. We verify the force fields by comparing them with pure component properties and available experimental data. This study provides precise vapor phase solubility data for dilute PC. These computational results complement experimental data to provide refined parameters for electrolyte recycling processes.

## Kinetics of MgCO<sub>3</sub> Decomposition in Subcritical and Supercritical Water

Hyo Jung Kim<sup>1</sup> and Tae Jun Yoon<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> School of Chemical and Biological Engineering, Institute of Chemical Processes, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

<sup>2</sup>School of Transdisciplinary Innovations, Seoul National University, Seoul, 08826, Republic of Korea

### **Abstract**

Thermochemical energy storage (TCES) based on the carbonation–decarbonation cycle of metal oxide/carbonate systems is a promising approach for storing and reusing industrial waste heat [1]. MgCO<sub>3</sub> is a potential candidate for intermediate-temperature TCES because it decarbonates at moderate temperatures. The reaction medium can influence carbonate decomposition pathways and kinetics. Giammaria and Lefferts [2] reported that steam dissociatively adsorbs on the CaCO<sub>3</sub> surface and lowers the apparent activation energy. This observation motivates a closer examination of MgCO<sub>3</sub> decomposition in aqueous environments.

Most MgCO<sub>3</sub> decomposition studies have focused on dry air, N<sub>2</sub>, or CO<sub>2</sub> atmospheres. Subcritical and supercritical water environments remain less explored. We examined MgCO<sub>3</sub> decomposition by varying temperature (200–400 °C), CO<sub>2</sub> partial pressure (1–5 bar), and reaction time (10 min–24 h). We applied representative solid-state kinetic models, including nucleation, diffusion-controlled, and geometrical contraction models, to analyze reaction rates and identify the rate-controlling mechanism.

We conducted decomposition experiments in a batch reactor using our synthesized MgCO<sub>3</sub> under subcritical and supercritical water conditions. We quantified the decomposition extent by XRD based on the conversion to Mg(OH)<sub>2</sub>. Temperature and CO<sub>2</sub> partial pressure significantly affected the decomposition rate, and the results indicate a possible shift in the rate-controlling step. These findings provide insights into MgCO<sub>3</sub> decomposition under aqueous environments and support the design of TCES processes under subcritical and supercritical water conditions.

### **References**

1. Mahon, D., Claudio, G., and Eames, P., "An Experimental Study of the Decomposition and Carbonation of Magnesium Carbonate for Medium Temperature Thermochemical Energy Storage", *Energies*, 14(5), 1316 (2021).
2. Giammaria, G., and Lefferts, L., "Catalytic Effect of Water on Calcium Carbonate Decomposition," *J. CO<sub>2</sub> Util.*, 33, 341-356 (2019).

## Life Cycle Assessment of On-board e-Methane Systems with Thermal Integration for Marine Applications

Joon-Gi Yoon, Taehoon Han\*

Department of Mechanical Engineering, University of Suwon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 18323.

e-Methane, synthesized from renewable hydrogen and captured CO<sub>2</sub>, has emerged as a promising low-carbon fuel for the maritime sector. The onboard Carbon Capture and Utilization (CCU) approach—capturing CO<sub>2</sub> generated during ship operation and converting it directly into synthetic methane—offers practical advantages for long-distance routes by reducing reliance on external fuel supply while mitigating carbon emissions. This study investigates an integrated onboard e-methane production, utilization, and recycling carbon-circulating system consisting of PEM (Proton Exchange Membrane) electrolysis, MEA-based CO<sub>2</sub> absorption, the Sabatier methanation processes, and powertrain. The thermal integration strategy was applied to recover waste heat within the system, and the impact was evaluated through Aspen Plus process simulations. Life cycle assessment (LCA) was conducted to quantify greenhouse gas emissions, focusing on the Global Warming Potential (GWP) using the GREET database. The results indicate that the thermal integration strategy significantly decreases external energy demand, enhances overall energy efficiency, and leads to reductions in GWP. The research findings highlight the importance of thermal management to improve both the process efficiency and environmental performance in the on-board e-methane production system. Also, the results demonstrate the potential for growth of e-methane-based energy conversion technologies in maritime applications.

### **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 H<sub>2</sub> and point-source or atmospheric CO<sub>2</sub> in the United States” *J. CO<sub>2</sub> Util.*, 83, 102791 (2024).
2. Salomone, F., Gandiglio, M., Lanzini, A., Santarelli, M., and Leone, P., “Process simulation and energy analysis of synthetic natural gas production from water electrolysis and CO<sub>2</sub> capture in a waste incinerator,” *Appl. Energy*, 332, 120322 (2023).

## Impact of Alcoholic Solvents and Reaction Temperatures on Biochar production via Hydrothermal Carbonization (HTC)

Woojin Kim, Taehoon Han\*

Department of Mechanical Engineering, University of Suwon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 18323.

The world is facing serious environmental issues, such as large-scale wildfires and extreme weather events caused by global warming. Carbon neutrality is an emerging way to reduce greenhouse gases to address global warming, and one of the solutions could be the biochar production from biomass. Biochar can store carbon through its micropore structure and reduces greenhouse gas emissions, such as methane and nitrogen oxides. Biochar can also increase soil organic matter and suppress pathogenic microorganisms, and its high calorific value makes it a viable heat source. Hydrothermal Carbonization (HTC) is an emerging method for biochar production. HTC is a thermochemical conversion process that carbonizes biomass using water at lower temperatures (180-300°C) and pressures than the conventional pyrolysis process for producing high-carbon biochar (also known as hydrochar). *Phleum pratense*, a lignocellulose-rich grass, thrives in cold climates and is non-edible biomass, so it is getting interest as a promising biomass source and biochar production. In this study, the reaction time was held at 30 minutes, and the water and ethanol were used as a single solvent. The temperature varied from 150°C to 300°C to investigate the changes in biochar quality at different reaction temperatures. This experiment confirmed that the yield and quality of biochar varied by the solvent type. It suggests that the hydrogen-donating effect of the solvent during the carbonization process could be due to the solvent's ability to donate hydrogen, and that solvent and temperature can significantly affect the decomposition of lignin in biomass. This study confirmed that the solvent in the HTC process significantly affects the biomass decomposition and biomass quality, suggesting the potential for utilizing large-scale biomass as liquid and solid fuels.

### Acknowledgement

This research was supported by Korea Basic Science Institute (National research Facilities and Equipment Center) grant funded by the Ministry of Science and ICT (No. RS-2024-00404469)

### References

- [1]. Youn et al. "Enhancing the characteristics of hydrochar via hydrothermal carbonization of Korean native kenaf: The effect of ethanol solvent concentration as co-solvent and reaction temperature." *Fuel* 331 (2023): 125738.

## Molecular Design of Bio-Based Diesters for Targeted Lubricant Applications

Hye Jin Lee, Jayeon Baek, and Yong Jin Kim \*

Korea Institute of Industrial Technology

As industries move toward carbon neutrality, high-performance bio-based lubricant base oils are increasingly required. This study proposes a molecular design strategy for structurally tailored diesters to meet distinct performance demands in high-temperature lubrication and advanced thermal management applications. Various THF-based cyclic diesters have been synthesized to enhance thermal stability in our lab. Their rigid heterocyclic backbone and strengthened intermolecular interactions led to increased kinematic viscosity and high viscosity index, supporting applications such as gear and compressor lubrication. In this session, linear  $\alpha,\omega$ -diacid-based diesters incorporating branched alcohols were designed for low-viscosity systems. Disrupted molecular packing reduced viscosity and pour point while preserving fluidity, making them suitable for immersion cooling fluids and low-VOC metal forming oils. Physicochemical characterization confirmed that controlled backbone rigidity and branching enable application-specific property differentiation. These results will demonstrate that bio-based diesters constitute a structure-tunable platform spanning high-temperature industrial lubrication to low-viscosity cooling and forming applications.

초임계 CO<sub>2</sub> 추출을 이용한 녹차의 디카페인 공정 연구임지선<sup>1,2</sup>, 천현준<sup>1</sup>, 김재훈<sup>2,3,4</sup>, 조훈태<sup>1</sup>, 이홍식<sup>1,5\*</sup><sup>1</sup>한국생산기술연구원 저탄소전환연구부, <sup>2</sup>성균관대학교 화학공학과, <sup>3</sup>성균관대학교 기계공학과, <sup>4</sup>성균관대학교 나노과학기술원, <sup>5</sup>중앙대학교 공과대학Study on the Decaffeination Process of Green Tea using Supercritical CO<sub>2</sub> ExtractionJi Sun Lim<sup>1,2</sup>, Hyeon Jun Cheon<sup>1</sup>, Jaehoon Kim<sup>2,3,4</sup>, Heuntae Jo<sup>1</sup>, Hong-shik Lee<sup>1,5\*</sup><sup>1</sup>Low-Carbon Transition R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology<sup>2</sup>School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University<sup>3</sup>School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University<sup>4</sup>SKKU Advanced Institute of Nano Technology, Sungkyunkwan University<sup>5</sup>College of Engineering, Chung-Ang University

최근 건강 지향적 식생활과 카페인 섭취에 대한 우려가 증가함에 따라, 카페인이 제거된 음료에 대한 소비자 수요가 전 세계적으로 증가하고 있다. 특히 불면, 심혈관 질환, 불안 등의 카페인 관련 부작용에 대한 인식이 높아지면서 디카페인 제품 시장은 지속적인 성장세를 보이고 있으며, 글로벌 디카페인 음료 시장은 연평균 약 7 % 이상의 성장률이 예상되고 있다[1,2]. 실제로 일부 국가에서는 디카페인 음료 판매가 전년 대비 30 % 이상 증가하는 등 소비자 선호 변화가 뚜렷하게 나타나고 있다[3]. 녹차는 카테킨과 같은 생리활성 물질을 풍부하게 함유하고 있어 항산화 및 만성질환 예방 효과가 보고되었다[4]. 그러나 녹차에 포함된 카페인 성분은 카페인에 민감한 소비자의 섭취를 제한할 수 있어 디카페인 녹차에 대한 수요가 점차 증가하고 있다.

기존의 디카페인 공정으로는 물 추출, 유기용매 추출, 흡착 공정 등이 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 공정들은 유용 성분의 동시 추출, 풍미 저하, 그리고 유기용매 사용에 따른 환경 및 안전 문제 등의 한계를 가진다[5]. 특히 물 기반 공정에서는 카페인과 함께 수용성 생리활성 성분이 손실될 수 있으며, 용매 기반 공정은 추가적인 정제 공정과 용매 잔류 문제를 야기할 수 있다. 이러한 한계를 보완하기 위한 대안으로 초임계 이산화탄소(SC-CO<sub>2</sub>)를 이용한 디카페인 공정이 주목받고 있다. SC-CO<sub>2</sub>는 기체와 같은 높은 확산성과 액체와 같은 용해력을 동시에 가지며, 운전 조건에 따라 카페인을 선택적으로 추출할 수 있는 친환경 공정이다[6]. 특히 물은 녹차 조직을 팽윤시켜 세포 구조를 열어주고, 카페인의 용출을 촉진하는 중요한 인자로 작용하는 것으로 알려져 있다. 또한 소량의 물을 공용매로 사용할 경우 SC-CO<sub>2</sub>의 추출 선택성을 조절하여 카페인 제거 효율을 향상시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 SC-CO<sub>2</sub>를 이용한 녹차 디카페인 공정에서 물을 주요 공정 인자로 설정하여, 추출 전 침지를 통해 녹차 조직의 팽윤 효과를 유도하고, 공용매로서의 물 첨가 여부에 따른 카페인 제거 효율과 유효 성분 보존 특성을 비교·평가하였다.

## 참고문헌

1. BCC Research, Global decaffeinated products market trends, 2024.
2. Fortune Business Insights, Decaffeinated tea market report.
3. Maeil Business News, 2025.
4. Khan & Mukhtar, Tea and Health, Nutrients, 2013.
5. Bahar et al., Decaffeinated black tea, Food Bioprod. Process., 2013.
6. Park et al., SC-CO<sub>2</sub> decaffeination of green tea, Food Chemistry, 2007.

초임계 CO<sub>2</sub> 기반 식품 건조 효율 향상 공정 최적화 연구임지선<sup>1,2</sup>, 오인환<sup>1</sup>, 김재훈<sup>2,3,4</sup>, 조훈태<sup>1</sup>, 이홍식<sup>1,5\*</sup><sup>1</sup>한국생산기술연구원 저탄소전환연구부, <sup>2</sup>성균관대학교 화학공학과, <sup>3</sup>성균관대학교 기계공학과, <sup>4</sup>성균관대학교 나노과학기술원, <sup>5</sup>중앙대학교 공과대학Process Optimization for Improving Food Drying Efficiency Using Supercritical CO<sub>2</sub>Ji Sun Lim<sup>1,2</sup>, In Hwan Oh<sup>1</sup>, Jaehoon Kim<sup>2,3,4</sup>, Heuntae Jo<sup>1</sup>, Hong-shik Lee<sup>1,5\*</sup><sup>1</sup>Low-Carbon Transition R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology<sup>2</sup>School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University<sup>3</sup>School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University<sup>4</sup>SKKU Advanced Institute of Nano Technology, Sungkyunkwan University<sup>5</sup>College of Engineering, Chung-Ang University

건조는 식품 산업에서 미생물 성장을 억제하고 영양 성분을 보존하여, 식품의 품질과 특성을 유지하면서 장기 저장을 가능하게 하는 널리 사용되는 방법이다[1]. 초임계 건조는 열풍 건조나 동결 건조와 같은 기존 방법에 비해 열 손상 없이 품질을 보존할 수 있고, 건조 시간이 짧으며, 에너지 소비가 낮다는 장점을 가진다[2,3]. 표면장력의 영향을 최소화하기 위해, 본 공정은 먼저 임계 압력을 초과한 후 임계 온도에 도달하도록 설계하였다. 이를 통해 기-액 계면 형성으로 인한 표면 수축을 방지하고 구조적 변형을 줄일 수 있었다.

본 연구는 초임계 유체 추출 장치를 이용하여 식품으로부터 수분을 효과적으로 제거함으로써 건조 효율을 극대화하는 것을 목표로 하였다. 추출 압력과 온도는 각각 10 MPa와 40 °C로 유지하였다. 추출 전에는 식품 시료를 기상 CO<sub>2</sub>에 침지하여, 가스 분자가 표면 전반에 충분히 침투하고 확산되도록 함으로써 초임계 상태에서의 효율적인 수분 제거가 가능하도록 하였다. 또한 유량과 레이놀즈 수를 주요 변수로 설정하여 수분 제거 및 건조 효율에 미치는 영향을 평가하였다. 실험 결과, 최적의 유량과 레이놀즈 수 조건에서 식품의 형태를 유지하면서 최대 99.7 %의 수분을 효과적으로 제거할 수 있음을 확인하였다.

## 참고문헌

1. A. Zambon, R. Zulli, F. Boldrin, S. Spilimbergo, Microbial inactivation and drying of strawberry slices by supercritical CO<sub>2</sub>, *J. Supercrit. Fluids* 180 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105430>.
2. M. Vetralla, G. Ferrentino, A. Zambon, S. Spilimbergo, A Study about the Effects of Supercritical Carbon Dioxide Drying on Apple Pieces, *Int. J. Food Eng.* (2018). <https://dx.doi.org/10.18178/ijfe.4.3.186-190>.
3. K. Pravallika, S. Chakraborty, R. S. Singhal, Supercritical drying of food products: An insightful review, *J. food Eng.* 343 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111375>.

## Analysis of Alignment between Building Envelope Technology and Carbon Neutrality Technology Innovation Strategy

Seongkon LEE<sup>1\*</sup>, Gento MOGI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Energy Policy Research Team, Korea Institute of Energy Research, Daejeon, Republic of Korea

<sup>2</sup>Dept. Technology Management for Innovation, The Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan

The importance of global carbon neutrality and climate change response continues to be emphasized for the sustainable growth and maintaining quality of life through economic development. Through climate change conventions and various energy policies, both advanced and advancing economies are focusing on implementing carbon neutrality policies that suit their respective circumstances. In the case of Korea, it has established a Carbon Neutrality Technology Innovation Roadmap to respond to carbon neutrality and industrial transformation, and is focusing on building an industrial ecosystem that considers the entire value chain including technology development, demonstration, dissemination, and commercialization of related core energy technologies. This research aims to promote the technology classification of building energy technology among carbon neutrality response technologies, and to derive implications through an analysis of the linkage between R&D projects in the building envelope technology field and the Technology Innovation Strategy Roadmap.

**Key words:** Building energy technology, Alignment analysis, Carbon neutrality technology innovation strategy

### Acknowledgements

This research was supported by KIER basic R&D funds (C6-2412-54, C4-2447-01)

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 청정융합

(포스터발표 I)

---

2026년 3월 19일(목) 09:00~11:00  
부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비

## 폐탈황제 기반 황 복합 탈질 시스템을 이용한 침출수 처리수 내 질소·인 제거 특성 및 적용성 평가

오상은<sup>1,3</sup>, 강우창<sup>2</sup>, 후세인 피다<sup>2</sup>, 판디 산데시<sup>3</sup>, 샤희자드 슬레만<sup>3</sup>, 메흐디 시드 예자즈 후세인<sup>3</sup>, 샤프마 아파르나<sup>3</sup>, 무슈타크 아마라<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>강원대학교 환경융합학부, <sup>2</sup>강원대학교 환경연구소, <sup>3</sup>강원대학교 식품환경융합학과

### Evaluation of Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics and Applicability of a Desulfurized Waste Based Sulfur Denitrification System for Landfill Leachate

Sang-Eun Oh<sup>1,3</sup>, Woo-Chang Kang<sup>2</sup>, Fida Hussain<sup>2</sup>, Sandesh Pandey<sup>3</sup>, Suleman Shahzad<sup>3</sup>, Syed Ejaz Hussain Mehdi<sup>3</sup>, Aparna Sharma<sup>3</sup>, Ammarah Mushtaq<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Department of Biological Environment, Kangwon National University,  
<sup>2</sup>Institute of Environmental Research at Kangwon National University,  
<sup>3</sup>Department of Food Science and Biotechnology, Kangwon National University

수산화철(Fe(OH)<sub>3</sub>) 기반 탈황제는 높은 황화수소(H<sub>2</sub>S) 제거 효율로 바이오가스 전처리 및 악취 저감 공정에 널리 사용되고 있다(Raabe et al.[1]). 그러나 사용 후 발생하는 폐탈황제는 주로 매립 처리되며, 운반 및 매립 비용(약 30~40만 원/톤)이 소요되어 경제적·환경적 부담이 발생한다. 폐탈황제는 황을 함유하고 있어 이를 황 기반 독립영양 탈질 공정에 재활용할 경우 매립 비용 절감과 환경영향 최소화가 가능하다(Kim et al.,[2]). 다만, 황 이용 독립영양 탈질 과정에서는 황 산화에 따른 수소이온 생성으로 pH가 감소하고 알칼리도가 소모되어 공정 효율 저하가 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 황(S<sup>0</sup>)과 CaCO<sub>3</sub>, 폐탈황제(DSW), Suldena의 혼합비가 질소 및 인 제거 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 240 mL 컬럼 반응기를 이용하여 S<sup>0</sup>:CaCO<sub>3</sub>(5:5), S<sup>0</sup>:DSW(5:5), DSW 100%, S<sup>0</sup>:Suldena(5:5), Suldena 100% 조건으로 장기 운전을 수행하였으며, 초기 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도는 100 mg/L로 설정하였다. 또한 EBCT 및 에탄올 주입 조건을 단계적으로 조정하여 운전 인자의 영향을 분석하였다. 실험 결과, Suldena 100% 및 S<sup>0</sup>:CaCO<sub>3</sub>(5:5) 조건에서 질산성질소가 거의 완전 제거되었으며, 아질산성질소의 축적 또한 최소화되었다. 인산염인의 경우 Suldena를 포함한 조건에서 가장 높은 제거율을 나타냈다. 2T 에탄올 주입 시 pH 감소 및 전기전도도 증가가 관찰되었으며, 이는 유기탄소 산화에 따른 CO<sub>2</sub> 생성 및 알칼리도 소모에 기인한 것으로 판단된다. 실제 침출수 처리수 적용 실험에서도 Suldena 100% 조건이 S<sup>0</sup>:DSW 조건 대비 우수한 질소·인 제거 성능을 보였다. 온실가스 분석 결과, 메탄올을 주입한 종속영양 조건에서 N<sub>2</sub>O 발생량이 가장 높게 나타났으며, 황 기반 독립영양 조건에서는 상대적으로 낮은 수준을 유지하였다. 이는 폐탈황제 기반 황 복합 탈질 시스템이 질소·인 동시 제거뿐만 아니라 온실가스 저감 측면에서도 적용 가능성이 있음을 보여준다.

#### 사사

본 연구는 “수요기반 탄소중립 물기술 실증 지원사업”의 지원을 받아 진행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Raabe, T., Mehne, M., Rasser, H., Krause, H., and Kureti, S., “Study on Iron-based Adsorbents for Alternating Removal of H<sub>2</sub>S and O<sub>2</sub> from Natural Gas and Biogas,” *Chem. Eng. J.*, 371, 738-749 (2019).
2. Kim, S., Kim, W., Lee, J., Kim, Y., and Oh, S., “A Study on the Applicability of Waste Desulfurization Agents to the Sulfur Denitrification Process: Demonstration of RO Concentrated Wastewater from Sewage Reuse,” *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 38(5), 283-294 (2024).

## Sustainable Desulfurized Waste-Derived Sulfur Composite for Coupled Nitrogen and Phosphorus Removal from Landfill Leachate

Sang-Eun Oh<sup>1\*</sup>, Fida Hussain<sup>1</sup>, Sandesh Pandey<sup>1</sup>, Ammarah Mushtaq<sup>1</sup>, Suleman Shahzad<sup>1</sup>, Aparna Sharma<sup>1</sup>, Syed Ejaz Hussain Mehdi<sup>1</sup>, and Woochang Kang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Biological Environment, Kangwon National University, Kangwondaehakgil-1, Chuncheon-si, Gangwon-state, 24341, Republic of Korea

The sustainable treatment of mature landfill leachate requires cost-effective materials capable of simultaneous nitrogen and phosphorus removal. In this study, two desulfurized waste-derived sulfur composites were evaluated for coupled autotrophic denitrification and phosphate removal under continuous operation at 12 h hydraulic retention time (HRT). The first composite consisted of desulfurized waste amended with elemental sulfur (DSW+S<sup>0</sup>), while the second (Suldena) was a pre-formulated sulfur-incorporated desulfurized waste composite. Real landfill leachate containing approximately 93–110 mg/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and 0.7–3.3 mg/L PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P was used as influent. Both composites demonstrated rapid nitrate removal during the initial operational phase. The DSW+S<sup>0</sup> system achieved effluent nitrate concentrations as low as 1–4 mg/L, corresponding to >95% removal efficiency during stable periods (day 21–28), whereas Suldena reached 2–6 mg/L during optimal performance. However, performance fluctuations were observed over long-term operation, with DSW+S<sup>0</sup> generally maintaining higher nitrate removal efficiency than Suldena. Transient nitrite accumulation was observed in the DSW+S<sup>0</sup> reactor (peaking at ~20 mg/L), indicating temporary imbalance in the denitrification pathway, while Suldena showed comparatively lower nitrite buildup. Phosphate removal was successfully coupled with denitrification. The DSW+S<sup>0</sup> composite reduced PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P to below 1 mg/L during stable operation, achieving up to ~70–80% removal efficiency, whereas Suldena demonstrated moderate but consistent phosphate removal. Sulfate production confirmed sulfur-based autotrophic denitrification, with effluent SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentrations increasing proportionally to nitrate reduction, reaching up to 4,829 mg/L (DSW+S<sup>0</sup>) and 5,088 mg/L (Suldena). Alkalinity consumption and slight pH decline (final pH 6.2–6.9) were observed, consistent with sulfur-driven denitrification stoichiometry. Overall, both desulfurized waste-derived composites effectively supported autotrophic denitrification in real landfill leachate, with DSW+S<sup>0</sup> showing superior nitrate and phosphate removal performance, while Suldena exhibited more stable nitrite control but higher sulfate accumulation. The findings demonstrate the feasibility of utilizing industrial desulfurized waste-based sulfur composites as sustainable, circular-economy materials for integrated nitrogen and phosphorus removal from high-strength wastewaters.

### **Acknowledgement**

This work was carried out with the project of Demonstrating Carbon-Neutral Water Technologies supported by the Korea Water Cluster (B0080409002198).

## 폐기물 기반 흡착제를 이용한 수중 불소 흡착 연구

이준호<sup>1</sup>, 윤도경<sup>1</sup>, 권동혁<sup>2</sup>, 소웅<sup>2</sup>, 안용태<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>경기대학교 사회에너지시스템공학과, <sup>2</sup>경기대학교 환경에너지공학과

### Fluoride Adsorption in Aqueous Systems Using Waste-Derived Adsorbents

Junho Lee<sup>1</sup>, Dokyung Yoon<sup>1</sup>, Donghyeok Kwon<sup>2</sup>, Woong So<sup>2</sup>, Yongtae Ahn<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil & Energy System Engineering, Kyonggi University, <sup>2</sup>Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University

불소는 주로 음식물 섭취와 음용수를 통해 인체에 유입되며, 위장관을 통해 흡수된 후 비장과 신장과 같은 연조직뿐만 아니라 골조직에도 점차 축적되는 것으로 알려져 있다. 불소에 장기간 과도하게 노출될 경우 치아 및 골격 불소증, 신경독성, 당뇨병, 내분비계 교란 등 다양한 건강상의 부정적 영향이 발생하는 것으로 보고되고 있다[1]. 불소 관련 건강 위험을 최소화하기 위해 세계보건기구(WHO)는 음용수 중 불소 농도를 0.5-1.0 mg/L로 유지할 것을 권고하고 있으며, 최대 허용 기준치는 1.5 mg/L로 제한하고 있다. 수중 불소 제거를 위한 기존 처리기술로는 막 공정, 응집 및 산화 공정, 생물학적 처리법 등이 활용되고 있으나, 이들 공정은 높은 운영 비용, 공정의 복잡성, 그리고 2차 오염물 발생 가능성과 같은 한계를 지니고 있다[2]. 최근에는 탄소 기반 흡착제, 나노물질 흡착제, 바이오 흡착제 및 무기 흡착제 등 다양한 흡착 소재를 활용한 불소 제거 연구가 활발히 진행되고 있으며, 흡착 공정은 기술적으로 단순하고 비용 효율적이며 환경친화적인 방법으로 주목받고 있다[3]. 이에 따라 저비용이면서 재활용 가능한 소재를 활용한 신규 흡착제 개발 연구가 활발히 진행중에 있다. 따라서 본 연구에서는 폐기물을 원료로 자체 제작한 흡착제를 활용하여 수중 불소를 효과적으로 제거하고자 하였다[4]. 실험에서는 불소 표준용액을 제조한 후 pH 5로 조정하였으며, 흡착제 투입량(0-1 g)을 변화시키면서 40 mL의 표준용액과 2시간 동안 반응시켰다. 반응 종료 후 필터링 후 이온 크로마토그래피(IC)를 이용하여 분석하였으며, 이를 통해 불소 제거율 및 흡착 특성을 평가하였다. 또한 산처리 여부에 따른 흡착 성능 차이를 비교분석하였다. 그 결과, 산처리를 하지 않은 흡착제는 불소 제거 효율이 상대적으로 낮았으나, 산처리를 수행한 흡착제의 경우  $q_e$  값이 3배 이상 향상된 수치를 나타냈다. 이러한 결과는 산처리를 통해 흡착제 표면 특성이 변화하면서 불소와의 결합 능력이 증대되었기 때문으로 판단된다. 본 연구는 폐기물 기반 흡착제가 수중 불소 제거에 적용 가능성을 제시하며, 향후 최적 운전 조건 도출을 통해 수처리 공정에서의 실용적 활용 가능성을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. Johnston, N. R., & Strobel, S. A., Principles of fluoride toxicity and the cellular response: a review. Archives of Toxicology, 94, 1051-1069 (2020).
2. Rashid, R., Shafiq, I., Akhter, P., Iqbal, M. J., & Hussain, M., A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques: the effectiveness of adsorption method. Environmental Chemistry Letters, 19, 4799-4822 (2021).
3. Ghosh, S., Malloum, A., Igwegbe, C. A., Ighalo, J. O., Ahmadi, S., Dehghani, M. H., Othmani, A., Gökkus, Ö., & Mubarak, N. M., New generation adsorbents for the removal of fluoride from water and wastewater: A review. Journal of Molecular Liquids, 346, 118257 (2022).
4. Lee, H., Kim, D., Kim, J., Ji, M.-K., Han, Y.-S., Park, Y.-T., Yun, H.-S., & Choi, J., As(III) and As(V) removal from the aqueous phase via adsorption onto acid mine drainage sludge (AMDS) alginate beads and goethite alginate beads. Journal of Hazardous Materials, 292, 146-154 (2015).

## Anchoring Site Formation through Controlled Reduction of CeO<sub>2</sub> for Durable Ni/CeO<sub>2</sub> Catalysts in Coupled DRM–RWGS

Beom-Jun Kim <sup>1,a</sup>, Hyeon-Seok Kang <sup>2,a</sup>, Geon-Hyeong Lee<sup>2</sup>, Hyun-Seog Roh <sup>1,\*</sup>, Yeol-Lim Lee <sup>2,\*</sup>

<sup>a</sup> These authors contributed equally to this work.

<sup>1</sup> Department of Environmental and Energy Engineering, Yonsei University, 1 Yonseidae-gil, Wonju-si, Gangwon-do 26493, South Korea

<sup>2</sup> Department of Chemical Engineering, Keimyung University, 1095 Dalgubeol-daero, Dalseo-gu, Daegu 42601, South Korea

The integrated dry reforming of methane (DRM) and reverse water-gas shift (RWGS), often referred to as synergistic coupled DRM-RWGS (SCDR), is an attractive platform for CO<sub>2</sub> utilization. Nevertheless, conventional Ni catalysts typically suffer from sintering and carbon deposition under high-temperature operation. Here, we propose a support-engineering strategy in which the CeO<sub>2</sub> support is pre-reduced in H<sub>2</sub> at different temperatures prior to Ni impregnation. Among the various H<sub>2</sub> heat-treatment conditions, a mild pre-reduction at 200 °C (Ni/CeO<sub>2</sub>\_LT) delivered the most favorable catalytic behavior compared with higher-temperature treatments. The various characterization results of XRD, Raman spectroscopy, XPS, and H<sub>2</sub>-TPR indicates that low-temperature reduction promotes the formation of oxygen vacancy-rich surfaces while enhancing Ni-O-Ce interfacial bonding, thereby enabling high Ni dispersion and improved structural robustness against thermal sintering. As a result, Ni/CeO<sub>2</sub>\_LT exhibited a CH<sub>4</sub> conversion of 84% at 750 °C with stable performance and negligible coke formation. These results highlight the importance of controlled support reduction for constructing durable Ni/CeO<sub>2</sub> catalysts for coupled DRM-RWGS processes.

## HEFA 기반 수첨 촉매공정을 이용한 항공/도로/해운 수송분야 연료제조 실증 사례

한기보\*, 장정희, 이지은, 장현성, 윤여진, 이재홍, 조윤희  
고등기술연구원

### Demonstration Case of Fuel Manufacturing for Air/Road/Shipping Transportation Field in HEFA-Based Hydroprocessing Process

Gi Bo Han\*, Jung Hee Jang, Ji Eun Lee, Hyun Sung Jang, Yeojin Yoon, Jae Hong Lee, Yun Hae Jo  
Institute for Advanced Engineering

HEFA(Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) 기술은 동/식물성 오일에 준하는 폐식용유 등의 바이오 원료에 대하여 촉매를 적용한 가운데 수소를 첨가한 다양한 화학반응을 통해 화석 연료와 유사한 파라핀계 탄화수소로 전환하는 핵심 친환경 기술이다. 이 공정을 통해 지속가능항공유(sustainable aviation fuel, 이하 SAF), HVO(hydrotreated vegetable oil) 및 바이오 납사(bio-naphtha) 등이 생산되며, 이들은 모두 국제 표준 규격을 충족하여 제품화되는 것으로 알려져 있다. 이러한 특징을 지니는 HEFA 기술을 통해 현재 석유 원유로부터 유래하는 다양한 정유 및 석유화학 제품들이 생산되는 정유 공정을 대신하는 산업분야로 적용 가능한 제품군 또한 그 맥락이 유사한 부분이 많다. 우선, 식물성 오일, 폐식용유(UCO), 동물성 지방 등의 원료를 이용하여 고온/고압 환경에서 수소를 투입하여 원료 내 산소를 제거하고 불포화 탄화수소를 포화시키는 수첨 전환, 그리고 수소화된 파라핀을 구조적으로 이성질화하여 저온 흐름성 등을 개선하고, 분자량을 조절, 분해하는 등의 업그레이딩 등의 촉매 적용 수첨 기술들을 동반하고 이들로부터 주로 재생 디젤(HVO)과SAF가 생산되며, 부산물로 바이오 납사 등이 생성되는 것이다. 본 연구에서는 이러한 HEFA 기술을 통하여 SAF, HVO 및 바이오 납사 등이 생산되는 과정을 국내에서 입증한 실증 결과를 제시하고자 한다.

## 방향족 화합물 기반 LOHC 소재 적용 촉매수소화 반응특성

한기보\*, 장정희, 이지은, 장현성, 윤여진, 이재홍, 조윤희  
고등기술연구원

### Reaction Characteristics for Catalytic Hydrogenation of LOHC Materials Based on Aromatic Compounds

Gi Bo Han\*, Jung Hee Jang, Ji Eun Lee, Hyun Sung Jang, Yeojin Yoon, Jae Hong Lee, Yun Hae Jo  
Institute for Advanced Engineering

액상 유기물 수소 저장 기술(liquid organic hydrogen carriers, 이하 LOHC)은 톨루엔 같은 유기 화합물을 기반으로 수소를 화학적으로 붙여 액체 형태로 저장·운송하고, 필요시 다시 촉매를 활용해 수소를 방출시키는 기술이다. 기존 고압/극저온 방식보다 안전성이 높고 석유 인프라를 활용할 수 있어 장거리 대용량 수소 운송에 유리한 것으로 알려졌다. LOHC 기술에 필요한 핵심 프로세스 중 하나는 화학적 수소 저장을 위한 수소화 공정으로써 톨루엔 등의 탄화수소 기반 불포화 화합물에 준하는 LOHC 소재와 촉매를 적용하여 수소를 반응물로 반응시켜 메틸사이클로hex산 등의 포화 탄화수소 화합물 형태로 전환하는 공정이다. 또 하나는 화학적 수소 방출을 위한 탈수소화 공정으로 포화 상태로 저장된 LOHC 소재에 촉매 적용 하에 에너지를 가하여 수소를 분리해 내고, 수소가 빠진 화합물은 다시 재사용할 수 있는 공정이다. 이 때, 수소화에 사용되는 촉매 및 이를 적용한 반응효율을 극대화하기 위한 반응조건 최적화 등의 과정이 필요하다. 본 연구에서는 귀금속계 촉매를 적용한 가운데, 수소화 과정에서의 효율성을 향상시키기 위한 일환으로 다양한 반응조건에서의 수소화 반응특성 및 생성물 특징이 조사되었다.

## Photoreduction-Assisted Synthesis of Cu-Doped Hydrogenated TiO<sub>2</sub> from MOF Templates for Advanced Water Purification

Kyubeom Lee<sup>1</sup>, Yujeong Jeong<sup>1</sup>, and Sungwook Chung<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>School of Chemical Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Republic of Korea

<sup>2</sup>School of Chemical and Biomolecular Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Republic of Korea

(\*Email address: sungwook.chung@pusan.ac.kr)

This study presents a novel approach for synthesizing Cu-doped hydrogenated TiO<sub>2</sub> derived from metal-organic frameworks (MOFs) using a photoreduction-assisted strategy. While TiO<sub>2</sub> is a gold standard in photocatalysis, its wide bandgap limits visible-light utilization. To overcome this, we integrated Cu-doping and hydrogenation via controlled photoreduction. The MOF precursor provides a high-surface-area template, while the subsequent photoreduction process induces oxygen vacancies and Ti<sup>3+</sup> states, significantly enhancing charge carrier separation. The photocatalytic efficiency was evaluated through the degradation of organic dyes under visible light. Our results demonstrate that the synergy between the Cu co-catalyst and hydrogenated TiO<sub>2</sub> structure leads to a superior degradation rate compared to pristine TiO<sub>2</sub>. This work provides a scalable pathway for engineering MOF-derived catalysts with optimized electronic structures for advanced wastewater treatment and environmental remediation.

# CO<sub>2</sub>-Based Microbial Electrosynthesis for Waste Valorization: Engineering the Cathodic Microbiome

Eunseo kim<sup>1</sup>, Minsoo Kim<sup>1</sup>, Jung Rae Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> School of Chemical Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Republic of Korea

## Abstract

Microbial electrosynthesis (MES) has recently attracted attention as a promising strategy of carbon capture and utilization, enabling the biosynthesis of valuable products such as methane (CH<sub>4</sub>) and acetate from wastewater-derived carbon. MES has considerable potential in future waste valorization, carbon footprint reduction, and the development of alternatives to fossil fuels. Nevertheless, its practical implementation requires rapid system start-up and stable, efficient operation. This review outlines the fundamentals of MES with a focus on CH<sub>4</sub> and acetate production, aiming to provide a comprehensive understanding of the system. Special emphasis is placed on the role of cathodic microbial communities, highlighting their influence on product selectivity and system stability. Various strategies have been assessed to enhance MES performance, including selecting the inoculum source, inhibiting competing microbial pathways, and optimizing operational parameters to promote the development of electroactive biofilms. This review discusses the recent advances in electrode materials and configurations. Future research directions are proposed to improve the feasibility of scaled-up MES.

## 미생물 연료전지 및 탈염전지 데이터 기반 최적화를 위한 합성 다중모달 벤치마크 데이터셋

김후\*, 자히드 올라, 정나현, 손문  
한국과학기술연구원 물자원순환연구단

### Synthetic Multi-Modal Benchmark Datasets for Data-Driven Optimization of Microbial Fuel and Desalination Cells

Hoo Hugo Kim\*, Zahid Ullah, Nahyeon Jeong, Moon Son  
Center for Water Cycle Research, Korea Institute of Science and Technology

Microbial fuel cells (MFCs) and microbial desalination cells (MDCs) couple wastewater treatment with energy recovery and desalination. Machine learning applications to MFC/MDC performance prediction remain limited by small, heterogeneous datasets lacking paired electrochemical and microbial community data, and no standardized benchmark exists for BES community design. To address this gap, we constructed a synthetic benchmark through three simulation layers. A Butler–Volmer–Monod electrochemical simulator [1] generated MFC/MDC operating conditions validated against published meta-analysis data. COMETS [2] flux-balance analysis modelled a multi-species electrode-respiring community with genome-scale models from CarveMe [3] across a stratified subset, yielding abundance trajectories and flux distributions. CAMISIM [4] generated several hundred paired Illumina and Nanopore synthetic metagenomes with gold-standard annotations linked to community compositions. Cross-layer traceability maps each read to its source organism, community state, and reactor condition.

Electrochemical outputs matched published ranges for power density, coulombic efficiency, and salt removal. Community simulations reproduced key dynamics: *Geobacter* dominance under direct electron transfer conditions and methanogen suppression at high current draw. Synthetic metagenomes passed quality checks (k-mer spectra comparable to real MFC data). Preliminary ESM-2 [5] analysis shows embeddings separate extracellular electron transfer proteins from non-EET homologues. This is the first integrated synthetic benchmark linking electrochemistry, community metabolism, and metagenomics for BES. All data and code are to be openly released to support AI-driven microbial community engineering for clean energy.

#### 참고문헌

1. Hamelers, H. V. M. et al., "Butler–Volmer–Monod model for describing bio-anode polarization curves," *Bioresour. Technol.*, **102**(1), 381–387 (2011).
2. Dukovski, I. et al., "A metabolic modeling platform for the computation of microbial ecosystems in time and space (COMETS)," *Nat. Protoc.*, **16**, 5030–5082 (2021).
3. Machado, D., Andrejev, S., Tramontano, M., and Patil, K. R., "Fast automated reconstruction of genome-scale metabolic models for microbial species and communities," *Nucleic Acids Res.*, **46**(15), 7542–7553 (2018).
4. Fritz, A. et al., "CAMISIM: Simulating metagenomes and microbial communities," *Microbiome.*, **7**(1), 17 (2019).
5. Lin, Z. et al., "Evolutionary-scale prediction of atomic-level protein structure with a language model," *Science.*, **379**(6637), 1123–1130 (2023).

## HFC 가스 하이드레이트 기반 담수화 공정 특성 연구

홍소희<sup>1,2</sup>, 조상규<sup>1,3</sup>, 서성덕<sup>1</sup>, 전창수<sup>1</sup>, Burla Sai Kiran<sup>1</sup>, Subhash Kumar Sharma<sup>1</sup>, 이주동<sup>1\*</sup>  
 한국생산기술연구원 해양플랜트기자재R&D센터<sup>1</sup>, 부경대학교<sup>2</sup>, 동아대학교<sup>3</sup>

담수 자원의 안정적 확보는 기후 변화와 산업화의 가속화에 따라 중요한 기술적 과제로 대두되고 있다. 현재 상용화된 증발법 및 역삼투법은 대규모 담수 생산이 가능하나, 에너지 집약적 특성과 운전·유지 비용 부담이 지속적으로 제기되고 있다. 이에 따라 구조적 염 배제 특성을 갖는 가스 하이드레이트 기반 담수화 기술이 대안 공정으로 주목받고 있다.

가스 하이드레이트는 저분자 가스가 저온·고압 조건에서 물 분자와 결합하여 형성되는 고체 수화물 구조로, 결정 형성 과정에서 염이 구조 내부에 포함되지 않는 특성을 가진다. 이러한 선택적 포획 특성을 활용하면 담수화 과정에서 염을 구조적으로 배제할 수 있다. 가스 하이드레이트 기반 담수화는 비교적 낮은 에너지 요구와 고염수 적용 가능성 측면에서 장점을 가지나, 형성 속도의 한계와 고체-액체 분리 단계의 비효율성은 여전히 개선이 필요한 요소로 남아 있다.

본 연구에서는 HFC 계열 가스를 적용한 하이드레이트 기반 담수화 공정의 열역학적 거동을 비교하였다. 다양한 염분 농도 조건에서 HFC-125a, HFC-134a, HFC-152a의 하이드레이트 형성 특성을 분석하여 가스별 적용 가능성을 검토하였다. 또한 생성된 하이드레이트를 펠릿 형태로 제조한 후 유도 용융 기법을 적용하여 염 제거 특성의 변화를 평가하였다. 이를 통해 하이드레이트 기반 담수화 공정의 적용 조건을 정리하고, 공정 효율 개선을 위한 방향성을 제시하고자 하였다.

### 사사의 글

본 연구는 정부(행정안전부, 과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 소방청)의 재원으로 한국산업기술기술평가원의 지원을 받아 수행되었습니다 (과제명: 난접근성 화재 대응을 위한 가스하이드레이트 소화탄 및 화재 진압 기술개발사업, 과제번호 : RS-2023-00255479).

## Enhanced exopolysaccharide production from isolated novel soil bacterium using integrated RSM and ANN optimization approaches

Rahul Tanpure<sup>1</sup>, Shiv Shankar Prasad<sup>2</sup>, Swabhiman Mohanty<sup>1</sup>, Ramesh Kumar<sup>1</sup>, Aliya Alvi<sup>1</sup>, Deok-Won Kim<sup>1</sup>, Sriya P Dash<sup>1</sup> and Byong-Hun Jeon<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763,

<sup>2</sup>Department of Biotechnology, St. Xavier's College, Ranchi-834001, Jharkhand, India

Republic of Korea, E-mails: [bhjeon@hanyang.ac.kr](mailto:bhjeon@hanyang.ac.kr)

### Abstract

Microorganisms produce structurally diverse exopolysaccharides (EPS), which are synthesized intracellularly and secreted extracellularly to form protective matrices that enhance surface attachment, cell aggregation, and stress tolerance [1]. EPS production is strongly influenced by medium composition and physicochemical parameters such as carbon and nitrogen sources, temperature, and pH. In this study, a novel EPS-producing bacterium was isolated from soil and identified using biochemical characterization and 16S rRNA gene sequencing. Culture conditions and medium components were optimized using response surface methodology (RSM) implemented in Design Expert software to achieve cost-effective EPS production. Optimal conditions were determined as peptone (7.5 g/L), yeast extract (1.5 g/L), glucose (10 g/L), temperature (32.5 °C), and pH 7, resulting in a maximum EPS yield of 0.79 g/L. Artificial neural network (ANN) modeling demonstrated excellent predictive performance, with correlation coefficients exceeding 0.9997, and effectively captured nonlinear relationships between process variables. Comparative analysis showed that ANN outperformed conventional statistical methods in optimizing EPS production. These findings highlight the potential of the novel strain and ANN-assisted optimization for enhanced EPS production with applications in pharmaceutical, environmental, and industrial biotechnology.

### Acknowledgment

This study was supported by the National Research Foundation (NRF) of the Republic of Korea through the Midcareer Research Program (Grant No.RS-2025-00520940) of the Ministry of Education and Government of Republic of Korea.

### Reference

1. Liu X, Yao T. Types, synthesis pathways, purification, characterization, and agroecological physiological functions of microbial exopolysaccharides: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;281:136317.

## Analysis of field-scale soil and plant characteristics using waste stone sludge

Kil-Hong Seol, Ju-Hyeok Kwon, Chejarla Venkatesh Reddy, Byong-Hun Jeon\*

Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763,  
South Korea

The growing concerns over resource depletion and environmental pollution have increased the relevance of reutilizing sludge-type industrial by-products, such as stone waste, as secondary resources. This study assessed the feasibility of stone waste as a soil amendment to mitigate environmental and social challenges associated with its disposal. Based on initial laboratory-scale investigations, field soils were amended with stone waste under four conditions: positive control soil, negative control soil (acidic soil), 20% stone waste mixture, and 50% stone waste mixture. Three model plant species (kidney bean, basil, and lettuce) were cultivated, and their germination rates and growth characteristics were periodically monitored. To assess the effects of interfacial electrochemical properties on plant growth, the zeta potential of the soil suspensions was determined over a pH range of 5 to 8. Although fluoride concentrations were greater than the soil contamination threshold before planting, they decreased following the cultivation process. Concentrations of heavy metals (Cr, Cd, Cu, Pb, As, Zn, Ni, Hg, F) were analyzed in soils before and after planting, and bioconcentration factors (BCF) and translocation factors (TF) were calculated based on metal contents in plant tissues. No excessive accumulation of heavy metals in plant tissues was observed. Furthermore, increasing stone waste mixing ratios resulted in a continuous decrease in BCF, indicating that stone waste effectively reduces the bioavailability of metals in soil. These findings demonstrate that stone waste is an effective soil amendment and has significant potential as a value-added material within a resource-circulation framework.

**Keywords:** Waste stone sludge, Solid waste management, Heavy metal bioavailability

### References

1. Kaya, A., & Yukselen, Y. (2005). Zeta potential of soils with surfactants and its relevance to electrokinetic remediation. *Journal of hazardous materials*, 120(1-3), 119-126.

## Ultrasonic-assisted Mild Alkaline Treatment for Separation of FePO<sub>4</sub> from Spent LFP Cathodic Material

Hye-Lim Kwon<sup>1</sup>, Ramesh Kumar<sup>1</sup>, Ju-Hyeok Kwon<sup>1</sup> and Byong-Hun Jeon<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Republic of Korea

### Abstract

Lithium-ion batteries (LIBs) have become essential power sources across multiple sectors, including transportation, renewable energy systems, and advanced portable electronics such as laptops and smartphones [1]. The global demand for LIBs, especially LiFePO<sub>4</sub> for electric vehicles, is projected to increase dramatically to ~25,500 tons/year due to its low cost, excellent electrochemical performance, and thermal stability [1]. Because of the limited lifespan of these batteries, the global retired batteries are expected to accumulate 11 million tons by 2030, of which 35 wt.% are LFP batteries, which require eco-friendly methods such as repurposing and direct or indirect recycling for their sustainable management. To address this challenge, this study investigated an ultrasonic-assisted mild alkaline treatment for the efficient separation and recovery of FePO<sub>4</sub> from spent LFP (delithiated cathodic materials). The effects of different mild alkaline reagents (NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, and KOH) on FePO<sub>4</sub> recovery efficiency and purity were systematically examined, along with the role of multi-stage ultrasonic processing in achieving high-purity separation, while preserving FePO<sub>4</sub> structure. Iron dissolution during the treatment process remained below 0.02 wt% under all conditions, with the lowest Fe loss observed under KOH treatment at pH 7 and 8, demonstrating effective structural preservation of FePO<sub>4</sub>. Fe recovery exceeded 98.9% in all cases, and a high FePO<sub>4</sub> purity of 95.5% was achieved. These results demonstrate that mild alkaline-assisted ultrasonication is a stable and efficient pretreatment strategy and provide a basis for environmentally friendly and scalable recycling processes for LFP cathodes.

### Acknowledgement

This work was supported by the Technology Innovation Program (Industrial Strategic Technology Development Program-Development of advanced technologies for improved recycling of spent batteries) (RS-2024-00435527, 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. Golmohammadzadeh, R., Dimachki, Z., Bryant, W., Zhang, J., Biniiaz, P., Banaszak Holl, M.M., Pozo-Gonzalo, C., Banerjee, P.C., 2023. Removal of polyvinylidene fluoride binder and other organics for enhancing the leaching efficiency of lithium and cobalt from black mass. *J. Environ. Manag.* 343, 118205.

## Sulfur Enrichment via Desulfurization Sludge Reconfigures Acetoclastic Methanogenic Networks in Anaerobic Co-Digestion

Donggyu Bang, Soonwoong Chang<sup>1</sup>, Woojin Chung<sup>1</sup> and Byong-Hun Jeon \*

Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, South Korea, <sup>1</sup>Department of Civil & Energy System Engineering, Kyonggi University, Suwon, South Korea

Anaerobic digestion (AD) performance is governed by complex microbial interactions that regulate carbon flow and terminal metabolic pathways. In sulfur-enriched systems, these interactions may be reshaped by changes in substrate composition and redox balance. Here, DS–RS ratios were systematically adjusted to establish a sulfur–COD gradient, and microbial responses were evaluated using metataxonomic profiling and network analysis.

Increasing the proportion of desulfurization sludge (DS), characterized by elevated sulfur and COD concentrations, induced a directional restructuring of the anaerobic digestion microbiome. While dominant fermentative groups remained relatively stable, Cloacimonadota increased progressively along the DS gradient. In contrast, acetoclastic methanogens, including *Methanosaeta* and *Methanosarcinia*, declined with increasing DS incorporation, accompanied by selective enrichment of sulfur-associated taxa. Genus-level CLR analysis confirmed marked depletion of *Methanosaeta* and *Smithella* and enrichment of *Lentimicrobium* and WCHB1-02 under high-DS conditions. Bray Curtis dissimilarity and principal coordinates analysis revealed discrete clustering across low-, intermediate-, and high-sulfate regimes, demonstrating deterministic  $\beta$ -diversity shifts driven by DS proportion. Network analysis further indicated that low-sulfate conditions supported a tightly connected acetate-dependent syntrophic module centered on *Methanosaeta*, whereas increasing DS proportion weakened this structure and promoted antagonistic interactions involving *Anaerovorax*. Mantel analysis further linked *Methanosaeta* strongly to methane production metrics, underscoring its role as a structural and functional keystone taxon.

Collectively, these findings show that DS enrichment reorganizes microbial composition and interaction topology, shifting the anaerobic digestion microbiome from an acetate-centered methanogenic configuration toward a sulfur-responsive assemblage.

### **Acknowledgement**

This study was supported by the National Research Foundation (NRF) of the Republic of Korea through the Midcareer Research Program (Grant No.RS-2025-00520940) of the Ministry of Education and Government of Republic of Korea.

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

**특별세션(I):**  
**[원광대학교 RISE사업단]**  
**미래형모빌리티 융합기술개발**  
**세미나**  
(포스터발표 I)

---

2026년 3월 19일(목) 09:00~11:00  
부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비

## 탈산소 반응 기반 탄화수소계 바이오연료 생산 및 실제 적용 평가

김창현<sup>1</sup>, 전이정<sup>1</sup>, 윤채민<sup>1</sup>, 전경원<sup>2</sup>, 심재오<sup>1\*</sup>  
원광대학교<sup>1</sup>, 국립군산대학교<sup>2</sup>

### Production of Hydrocarbon Biofuels via Deoxygenation Reaction and Evaluation of Practical Applicability

Chang-Hyeon Kim<sup>1</sup>, I-Jeong Jeon<sup>1</sup>, Chae-Min Yoon<sup>1</sup>, Kyung-Won Jeon<sup>2</sup>, Jae-Oh Shim<sup>1\*</sup>  
Wonkang University<sup>1</sup>, Kunsan National University<sup>2</sup>

#### 초록

화석연료 사용에 따른 환경 문제와 자원 고갈 우려가 심화되면서 이를 대체할 수 있는 지속가능 연료 개발의 필요성이 확대되고 있다. 그러나 기존 바이오연료 생산 공정은 높은 수소 소비와 복잡한 공정 구성으로 인해 경제성과 실용성 확보에 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 수소를 사용하지 않는 탈산소 반응을 통해 탄화수소계 바이오연료를 생산하고, 공정 확장성과 실제 적용 가능성을 단계적으로 검증하였다. 올레산을 기반으로 한 자유지방산을 원료로 사용하여 반응 특성과 생성물 분포를 분석하였으며, 화석연료와 유사한 조성의 연료를 확보하였다. 또한, 반응 규모를 확장하여 생산 안정성과 재현성을 확인하였으며, 생산된 바이오연료를 소형 디젤 경운기에 적용해 엔진 적용 평가를 수행함으로써 실제 연료로서의 적용 가능성을 검토하였다.

#### Keywords

탈산소 반응, 탄화수소계 바이오연료, 자유지방산, 엔진 적용 평가

## 초소형 농약분사 차량의 구조 강건성 해석

김준성<sup>1</sup>, 홍정욱<sup>1</sup>, 이윤서<sup>1</sup>, 이상욱<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>원광대학교 기계공학부, \*원광대학교 기계공학부

### Structural Integrity Analysis of a Small-Scale Pesticide Spraying Vehicle

Jun Sung Kim<sup>1</sup>, Jeong Wook Hong<sup>1</sup>, Yun Seo Lee<sup>1</sup>, Sang Wook Lee<sup>2\*</sup>  
<sup>1</sup>Div. Mechanical Engineering (Undergraduate Program), Wonkwang University,  
<sup>2\*</sup>Div. Mechanical Engineering, Wonkwang University

초소형 농약분사 차량은 태양광 발전기, 메인 바디, 언더바디 등 다양한 기능성 부품으로 구성되며, 각 부품은 형상과 하중 조건이 서로 달라 구조적 취약 거동 또한 다르게 나타난다. 그러나 차량 전체를 대상으로 일괄 구조해석을 수행할 경우 해석 규모와 복잡도가 증가하여 해석 효율이 저하될 수 있으므로, 설계 초기 단계에서는 주요 모듈을 분리하여 개별 구조 건전성을 우선 검토하는 접근이 필요하다.

이에 본 연구에서는 초소형 농약분사 차량의 구조 강건성을 확보하기 위해 태양광 발전기, 메인 바디 및 언더바디를 대상으로 모듈별 정적 구조해석과 모드해석을 수행하였으며, 언더바디에는 경량화 가능성을 검토하기 위해 위상최적 설계를 적용하였다. 각 해석은 모듈의 형상적 특성과 예상 취약 거동을 반영하여 수행되었다. 태양광 발전기는 외팔보 형상으로 인해 굽힘에 취약할 수 있으므로 자중 조건에서 구조 안정성을 평가하였고, 해석 결과 매우 낮은 변형과 응력을 보였으며 1차 고유진동수 또한 높은 영역에서 형성되어 정적, 동적 안정성이 충분한 것으로 확인하였다. 메인 바디는 개구부를 포함한 open sell 형상으로 인해 비틀림과 국부 변형 가능성이 예상되었으며, 정적 강도 측면에서는 충분한 안전 여유를 보였으나 모드해석에서는 개구부를 중심으로 한 변형 모드가 확인되어 구체적인 국부 강성 보강이 필요한 것으로 판단되었다. 또한 언더바디는 차량 하중을 직접 지지하는 핵심 구조체로서, 위상최적설계를 통해 약 2.1kg 수준의 경량화된 형상으로 재구성되었고, 이 경우에도 낮은 응력 수준과 높은 고유진동수를 유지하여 경량화와 구조 안전성을 동시에 효과적으로 확보할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 각 주요 부품에 대해 모드 해석을 수행하여 구조물의 동적 안정성을 중점적으로 검토하였다. 태양광 발전기와 언더바디는 비교적 높은 1차 고유진동수를 보여 전반적으로 안정적인 거동을 나타낸 반면, 메인 바디의 1차 고유진동수는 27.956Hz로 상대적으로 낮게 도출되었으며, 개구부를 중심으로 한 변형 모드가 확인되었다. 이는 메인 바디가 다른 부품에 비해 진동에 상대적으로 민감할 가능성이 있음을 시사하며, 해당 부위의 국부 강성 보강이 필요함을 보여준다.

따라서 본 연구는 각 부품의 정적 안전성을 확인하는 동시에, 모드 해석을 통해 동적 거동의 차이를 검토함으로써 구조적으로 안전한 부품과 추가 보강이 필요한 부품을 구체적으로 구분할 수 있음을 제시하였다.

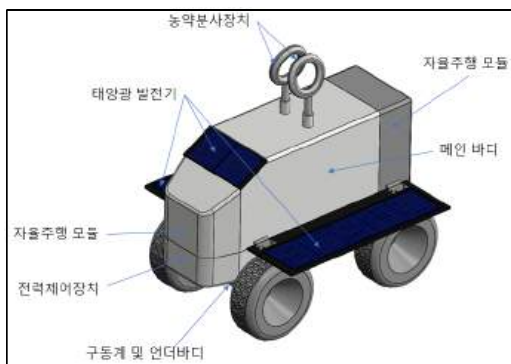


Figure 1. Small-Scale Pesticide Spraying Vehicle

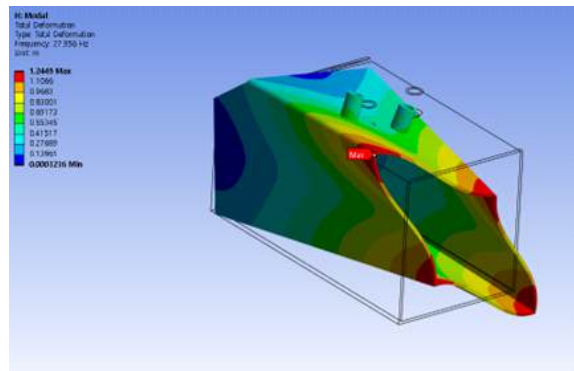


Figure 2. Mode 1<sup>st</sup> Shape of the Main Body

#### 후기

본 연구는 2025년도 교육부 및 전북특별자치도의 재원으로 전북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다. (2025-RISE-13-WKU)

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 공정시스템

(포스터발표 II)

---

2026년 3월 19일(목) 13:00~15:00  
부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비

**Sustainable Production of Bio-Methanol via Integrated CO<sub>2</sub>-Assisted Catalytic Pyrolysis Process: Techno-economic analysis and Life cycle assessment**

$\frac{1}{1}$ ,  $1$ ,  $1$ ,  $1, *$

CO<sub>2</sub> 가 : A(N<sub>2</sub>), B(CO<sub>2</sub>), C(가)

C(가) : CO<sub>2</sub> (LCOP) CO<sub>2</sub> C 가 LCOP A 가

, 가 가 (-0.2 USD kgCO<sub>2</sub>e<sup>-1</sup>) 가



## Enhancing the Efficiency of Mobile LNG Refueling Systems: Strategies for BOG Minimization

**Hyunjin Kang<sup>a</sup>, Hyungtae Cho<sup>a,\*</sup>, Jaewon Lee<sup>b,\*</sup>**

<sup>a</sup> *Department of Chemical Engineering, Kyung Hee University*

<sup>b</sup> *Department of Materials Science and Chemical Engineering, Hanyang University*

### <abstract>

LNG is a vital low-carbon fuel for the energy transition. While research on stationary refueling is common, studies on reducing Boil-Off Gas (BOG) in mobile systems are still lacking. To bridge this gap, we developed a skid-type mobile LNG refueling system based on an ISO container platform, designed to maximize speed and minimize gas loss. We conducted real-world refueling tests and used the empirical data to fine-tune our Aspen HYSYS model for better accuracy. As a result, the model predicted BOG levels with high precision, achieving 95.4% in summer and 98.8% in winter. Our findings also show that increasing the flow rate from 1,800 kg/h to 2,400 kg/h reduces BOG by 24.4%. Ultimately, this study provides a practical roadmap for optimizing mobile LNG infrastructure through improved insulation and smarter operational strategies.

## 복합 플라스틱의 열분해 기반 친환경 에너지 원료화

길진우<sup>1</sup>, 최동호<sup>1</sup>, 이재원<sup>2</sup>, 조형태<sup>1\*</sup><sup>1</sup>경희대학교 화학공학과, <sup>2</sup>한양대학교 재료화학공학과

대부분의 복합 플라스틱이 소각 또는 매립에 의존하여 처리되고 있으며, 이는 자원 손실 및 환경 부담을 초래한다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 복합 플라스틱 중 신발 폐기물을 열분해하여 친환경 에너지 원료로 전환하는 공정을 제안하였다.

제안된 공정에서는 CO<sub>2</sub> 기반 촉매 열분해를 통하여 폐기물을 합성 가스로 전환하였으며, 생성된 합성가스는 이후 메탄올 및 DME를 최종 생산물로 설정하여 공정을 설계하였다. 그 결과, 연간 11,000 ton, 8,000 ton의 메탄올과 DME를 각각 960 USD/ton, 1,500 USD/ton에 생산할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 도출된 메탄올과 DME의 생산 단가는 기존 화석 연료 기반의 공정 대비 높은 수준이나 재생 에너지 기반으로 생산되는 메탄올 및 DME의 일반적인 생산 단가(각 800-2400 USD/ton 및 2400-2500 USD/ton)보다는 낮은 것으로 평가된다. 이러한 결과는 복합 플라스틱 열분해 기반 에너지 전환 공정이 기존 화석연료 기반 에너지 시스템을 보완할 수 있는 잠재력을 지니며, 폐기물 저감과 에너지 생산을 동시에 달성할 수 있는 유의미한 대안이 될 수 있음을 시사한다.

## Real-time prediction and restoration of temperature field through PCA–DNN-based soft sensing in battery electrode drying process

Yunju Yu<sup>c</sup>, Yup Yoo<sup>a</sup>, Jaewon Lee<sup>a</sup>, Hyungtae Cho<sup>b</sup>, Seongbin Ga<sup>c\*</sup>

<sup>1</sup>Kyunghee University, <sup>2</sup>University of Ulsan

In the lithium-ion battery manufacturing process, the drying process is a critical unit that directly determines electrode quality and overall cell performance. To ensure uniform binder distribution and prevent defects, precise monitoring of the internal 3D temperature distribution is essential. Traditionally, computational fluid dynamics (CFD) is employed to simulate these complex thermal dynamics. However, CFD-based analysis is difficult to apply in real-time due to high computational costs. Furthermore, a major practical constraint exists within the drying process: the real-time temperature measurements to merely a several number of locations. Extracting the full 3D thermal behavior from such limited number of hard sensors remains a significant challenge. To overcome these limitations, this study proposes a soft sensing framework utilizing a deep neural network (DNN) and inverse principal component analysis (PCA) for real-time 3D temperature field prediction from highly restricted sensor data. In this approach, the DNN model is trained to predict low-dimensional latent variables (PC scores) using temperature information obtained from the minimal measurement points. Subsequently, the inverse PCA reconstructs the entire 3D temperature field in real-time based on the predicted PC scores. The proposed method accurately predicts the full spatial temperature distribution despite relying on limited sensor inputs, thereby supporting reliable monitoring and anomaly detection of the drying process. Finally, this study comprehensively analyzes the influence of the number and specific positions of these temperature sensors on model accuracy, offering practical guidelines for optimal sensor placement.

### References

- [1] Li, BangJun, HaoRan Liu, and RuZhu Wang. "Data-driven sensor placement for efficient thermal field reconstruction." *Sci China Tech Sci* 64 (2021): 1981–1994.
- [2] Lang, Sebastian, Mario Zorzini, Stephan Scholze, Josef Mayr, and Markus Bambach. "Sensor placement utilizing a digital twin for thermal error compensation of machine tools." *Journal of Manufacturing Systems* 80 (2025): 243-257.

## 파과 실험 기반 다성분 등온 매개변수 및 물질전달계수 동시 추정

진석환<sup>1</sup>, 진현석<sup>2</sup>, 박재현<sup>2</sup>, 이찬현<sup>2\*</sup>, 가성빈<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 화학공학과, <sup>2</sup>울산대학교 화학공학과

### Simultaneous Estimation of Multi-component Isotherm parameters and Mass Transfer Coefficients based on Breakthrough Experiment

Seokhwan Jin<sup>1</sup>, Hyeonseok Jin<sup>2</sup>, Jaehyeon Park<sup>2</sup>, Chanhyun Lee<sup>2\*</sup>, Seongbin Ga<sup>2\*</sup>  
Kyunghee University<sup>1</sup>, University of Ulsan<sup>2</sup>

고정층 흡착 공정의 정확한 모사는 평형 및 동역학 파라미터를 분리하여 추정하는 기존 절차로 인해 한계가 있다. 일반적으로 흡착 시뮬레이션에서는 등온선 실험으로 평형 파라미터를 먼저 추정하고, 파과 실험으로부터 물질전달 계수를 독립적으로 산정한다. 그러나 이러한 접근은 혼합 기체 평형을 충분히 반영하지 못하며, 부정확한 평형 파라미터에 기반한 물질전달 계수 산정으로 인해 실제 공정 운전 예측의 정확도를 저하시킨다. 본 연구에서는 파과 실험 데이터를 직접 적합하여 물질전달 계수와 다성분 등온선 파라미터를 동시에 추정하는 방법을 제안함으로써, 상호 일관적인 평형-동역학 파라미터 조합을 도출하였다. 동적 모델은 선형 구동력(LDF) 모델에 다양한 등온선 모델을 결합하여 구성하였으며, 모델별 추정 성능을 비교·평가하였다. 또한 동시 추정 과정에서 발생하는 수치적 불안정성과 정확도 저하 문제를 완화하기 위해 격자 탐색(grid search)과 경사 기반 최적화 기법을 순차적으로 적용하였다. 제안 방법은 기존 분리 추정법 대비 오차를 현저히 감소시켜 평균제곱오차(MSE)를 0.01% 미만 수준으로 저감하였고, 파과 곡선을 정확히 재현함으로써 흡착 컬럼의 정밀 시뮬레이션을 가능하게 하였다. 본 방법은 압력/온도 스윙 흡착(PSA/TSA) 및 모사 이동층(SMB) 공정을 포함한 다양한 산업 흡착 공정에 적용될 수 있다.

#### 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.

## 양자 금속-유기 골격체 기반 Xe/Kr 분리 소재의 multiscale high-throughput screening 및 기술경제성 평가

정민주<sup>1</sup>, 진석환<sup>1</sup>, 진현석<sup>2</sup>, 안나현<sup>3</sup>, 가성빈<sup>2\*</sup>  
<sup>1</sup>경희대학교, <sup>2</sup>울산대학교, <sup>3</sup>조지아 공과대학교

### Multiscale high-throughput screening and Techno-economic assessment of Quantum metal-organic framework for Xe/Kr separation

Minju Jung<sup>1</sup>, Seokhwan Jin<sup>1</sup>, Hyeonseok Jin<sup>2</sup>, Nahyeon An<sup>3</sup>, Seongbin Ga<sup>2\*</sup>  
<sup>1</sup>Kyunghee University, <sup>2</sup>University of Ulsan, <sup>3</sup>Georgia Institute of Technology

본 연구는 Xe과 Kr의 고순도 분리를 위한 고부가가치 희귀기체 회수 공정에 적용 가능한 흡착 소재를 선별하기 위해, multiscale high-throughput screening (HTS)에 기반한 계산적 접근법을 사용하였다 [1]. HTS의 일환으로 분자 수준의 시뮬레이션과 공정 모델링을 수행하여 metal-organic frameworks (MOFs)의 분리 성능과 경제성을 통합적으로 평가하고, 흡착 및 탈착 단계의 압력·온도 조건을 최적화하였다. 본 접근을 통해 실험 수행 이전 단계에서 고성능·저비용의 흡착 소재 후보를 선별하고 공정 설계를 위한 정량적 기준을 제시하고자 한다. Quantum MOF (QMOF) 데이터베이스에 포함된 20,375개 MOF 가운데 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. 이후 pyAPEP 패키지의 isofit 모듈을 사용하여 등온선 모델을 구축한 뒤, simide 모듈을 통해 이상적 PSA 공정 (VSA 및 계단식 PSA 포함) 조건에서 각 소재의 Xe/Kr 분리 성능을 순도 및 회수율을 계산하여 고려하였다 [2]. 특히 본 연구에서는 탈착 단계에서 컬럼 출구로 배출되는 tail gas의 주성분을 기준으로, Xe이 tail gas로 회수되는 경우와 Kr이 tail gas로 회수되는 경우를 각각 독립적으로 고려하여 Xe/Kr 분리에 대한 순도 및 회수율을 계산하였다. 또한, 최종 선별된 흡착 소재에 대하여 압축기, 진공 펌프, 열교환기와 같은 주요 공정 요소의 CAPEX 및 OPEX를 고려하고, 설정한 목표 분리 비용을 기준으로, 경제성을 확보하기 위한 소재의 가격 상한을 도출함으로써 경제성을 정량적으로 평가하였다. 본 HTS 기반 분석을 통해 소재의 분리 성능과 비용 측면을 종합적으로 고려함으로써 상위 성능의 유망 후보 10 종을 도출하였으며, 이와 같은 종합적 평가 접근을 통하여 선별된 후보군은 향후 Xe/Kr 분리 공정에 적합한 흡착 소재를 선택하는 과정에서 실험 합성 및 구조 분석의 우선순위를 설정하는 기준으로 활용될 수 있다. 더 나아가 고성능·저비용 분리 기술 개발을 위한 흡착 소재 탐색과 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.

## 순환 정상상태 조건에서 층상형 흡착강화 수성가스전환 반응기의 설계 및 운전 인자 영향에 대한 동적 시뮬레이션

양다빈<sup>1</sup>, 가성빈<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 화학공학과, <sup>2</sup>울산대학교 화학공학부

### Dynamic Simulation of Layered Sorption-Enhanced Water-Gas Shift Reactors: Influence of Different Design and Operating Factors under Cyclic Steady State

Dabin Yang<sup>1</sup>, Seongbin Ga<sup>2\*</sup>

Kyung Hee University<sup>1</sup>, University of Ulsan<sup>2</sup>

흡착강화 수성가스전환(SE-WGS) 반응기는 촉매 반응과 반응기 내 CO<sub>2</sub>의 동시 흡착을 결합함으로써 고순도 수소를 생산할 수 있는 유망한 공정이다. 특히 반응과 분리를 하나의 시스템에서 동시에 수행함으로써 열역학적 평형 한계를 극복할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 순환 정상상태(CSS) 조건에서 층상형 충전 구조가 공정 성능에 미치는 영향과 그 공간적 상호작용 메커니즘은 아직 충분히 규명되지 않았다.

본 연구에서는 다구간(multi-section) 층상 반응기를 대상으로 한 동적 시뮬레이션 모델을 개발하고, 4 단계 압력 스윙(PSA) 사이클 하에서 촉매 및 흡착제의 축 방향 분포를 명시적으로 고려하였다. 제안된 모델은 반응기 내부의 성분 농도 분포와 흡착 거동을 시간 및 공간적으로 해석하며, 출구 가스 조성의 주기적 변화를 추적함으로써 CSS 조건에서의 수소 순도 및 전환 성능을 정량적으로 평가할 수 있도록 구성되었다. 이를 통해 반복 순환 과정에서 발생하는 반응-흡착 상호작용과 축 방향 농도 구배의 영향을 체계적으로 분석하였다.

또한 충전 구조, 흡착제 선택성, 퍼지 가스 종류, 각 공정 시간 등 주요 설계 및 운전 인자의 영향을 정량적으로 평가하였으며, 이들을 동시에 변화시키는 다변수 분석을 수행하였다. 그 결과, 공정 성능을 종합적으로 표현하는 다변수 성능 맵을 구축하여 설계 변수와 수소 정제 성능 간의 상호작용 관계를 체계적으로 도출하였다. 본 연구는 층상형 SE-WGS 반응기의 성능 예측 및 최적화를 위한 동적 모델링 기반 설계 지침을 제시하며, 향후 고효율 수소 생산 공정 설계에 기초 자료를 제공한다.

#### 참고문헌

1. Lee, C. H., and Lee, K. B., "Sorption-enhanced water gas shift reaction for high-purity hydrogen production: Application of a Na-Mg double salt-based sorbent and the divided section packing concept," *Applied Energy*, 178, 256–269 (2016).
2. Hu, Y., Cui, H., Cheng, Z., and Zhou, Z., "Sorption-enhanced water gas shift reaction by in situ CO<sub>2</sub> capture on an alkali metal salt-promoted MgO-CaCO<sub>3</sub> sorbent," *Chemical Engineering Journal*, 377, 119823 (2019).
3. Najmi, B., Bolland, O., and Eichhorn Colombo, K., "A systematic approach to the modeling and simulation of a Sorption Enhanced Water Gas Shift (SEWGS) process for CO<sub>2</sub> capture," *Separation and Purification Technology*, 157, 80–92 (2016).

## Techno-Economic Evaluation for Glycerol-Derived Product Separation of Cost-Effective DHA Production

Junki Son, Yuchan Ahn \*

Department of Chemical Engineering, Keimyung University, Daegu, Republic of Korea

This study presents an integrated process design combining Pt/Sb catalyst-based electrochemical oxidation of glycerol with downstream product separation and heat exchanger network (HEN) integration. Lee et al. [1] did electrochemical reaction conducted under acidic electrolyte conditions, and the formation trends of key products, including dihydroxyacetone (DHA), glyceraldehyde (GLA), glyceric acid (GAD), and hydroxyacetone (HPA), were briefly evaluated. Because the reaction products form a multicomponent aqueous mixture, a distillation-based separation process was designed and integrated with a Heat Exchanger Network to minimize energy consumption. Aspen Energy Analyzer was employed to optimize internal heat recovery among process streams, enabling effective thermal integration between reactor effluent streams and downstream separation units. The significant heat demand of the distillation section was mitigated through internal heat reuse, leading to improved overall process energy efficiency. A techno-economic analysis was subsequently performed to estimate the minimum selling price (MSP) of DHA as the final performance metric. The HEN-integrated configuration demonstrated reduced production costs compared with a non-integrated process, indicating enhanced economic feasibility. This work highlights a comprehensive process-integrated strategy that combines electrochemical glycerol valorization, product separation, heat integration, and economic evaluation toward sustainable DHA production.

### References

1. Lee, S., Kim, H. J., Lim, E. J., Kim, Y., Noh, Y., Huber, G. W., and Kim, W. B., Highly selective transformation of glycerol to dihydroxyacetone without using oxidants by a PtSb/C-catalyzed electrooxidation process, *Green Chemistry*, 18, 2877-2887 (2016).
2. 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 Chemistry & Engineering*, 5, 6626-6634 (2017)

## Upcycling Strategy for Battery-Industry Sodium Sulfate Byproduct: Integrated Process and Techno-Economic Assessment

Duyeon Kim, Yuchan Ahn \*

Keimyung University, Department of Chemical Engineering

Waste sodium sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) is formed and accumulates in the mother liquor during the co-precipitation process for lithium-ion battery cathode precursor production, where metal sulfate feedstocks and NaOH are employed, and is subsequently recovered via downstream concentration and crystallization. Kim et al. [1] However, due to the increasing demand for secondary batteries and the limited utilization pathways, a large proportion is still disposed of via landfilling, thereby exacerbating environmental pollution and disposal burdens, which underscores the need for valorization technologies. Dhanabalan et al. [2] Accordingly, this study proposes an integrated  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  valorization scheme for producing sodium bicarbonate ( $\text{NaHCO}_3$ ) and ammonium sulfate ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ). Process design and integration were carried out using Aspen Plus. In the proposed flowsheet,  $\text{CO}_2$  gas and  $\text{NH}_3$  are introduced to produce  $\text{NaHCO}_3$ , considering  $\text{NaHCO}_3$  solubility and solution pH, and the resulting spent liquor is subsequently utilized for  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  production. A techno-economic assessment was performed to evaluate process feasibility. The proposed process is expected to mitigate landfill disposal and reduce raw material costs through by-product utilization, while enabling operation under mild conditions and maximizing internal reuse of waste streams, thereby providing a potentially advantageous alternative in terms of economic viability and operational reliability.

### References

1. Kim, C.-H., Kim, M.-J., Jeon, K.-W., *et al.*, "Advancing sustainable treatment of sodium sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )-containing wastewater: Recent advances in electrochemical technologies," *Chem. Eng. J.*, **524**, 169100 (2025).
2. Dhanabalan, K., Aruchamy, K., Sriram, G., Sadhasivam, T., and Oh, T. H., "Recent recycling methods for spent cathode materials from lithium-ion batteries: A review," *J. Ind. Eng. Chem.*, **139**, 111-124 (2024).

## Recycling of Sodium Sulfate from Secondary Battery Waste: Process Design and Techno-Economic Assessment

Sejung Kim<sup>1</sup> and Yuchan Ahn\*

Department of Chemical Engineering, Keimyung University, Daegu, Republic of Korea

The rapid growth of the secondary battery industry has led to a surge in sodium sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) waste, creating significant disposal challenges and saline wastewater issues (Kim et al. [1]). This study proposes an integrated valorization process to convert  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  waste into two marketable products—sodium bicarbonate ( $\text{NaHCO}_3$ ) and gypsum ( $\text{CaSO}_4$ )—while establishing a closed ammonia loop to minimize nitrogen discharge. The process involves  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dissolution, ammonia-buffered carbonation to form  $\text{NaHCO}_3$ , and CaO-assisted treatment of the filtrate to precipitate  $\text{CaSO}_4$  and recover ammonia (Lee et al. [2]).

The process was simulated in Aspen Plus using the electrolyte-NRTL (ELECNRTL) model to accurately represent electrolyte speciation and phase equilibria (Min et al. [3]). Mass-balance feasibility was validated at an industrial scale, targeting an annual production of 100,000 tons of  $\text{NaHCO}_3$  and 128,000 tons of  $\text{CaSO}_4$  with purities exceeding 99%. Additionally, the process achieves 90% ammonia recovery, significantly reducing make-up requirements. Based on the simulation data, a techno-economic analysis (TEA) is being performed to quantify capital and operating costs, identifying key economic drivers for commercial deployment. This integrated approach offers a sustainable circular pathway for valorizing battery-industry byproducts, simultaneously addressing wastewater burdens and resource recovery.

### References

1. Kim, C.-H., et al., "Advancing sustainable treatment of sodium sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )-containing wastewater: Recent advances in electrochemical technologies," *Chem. Eng. J.*, 524, (2025).
2. Lee, D., et al., "Regeneration of sodium bicarbonate from industrial Na-based desulfurization waste using ammonium hydroxide," *J. Ind. Eng. Chem.*, 122, 500-510 (2023).
3. Min, J. G., et al., "Comprehensive process for valorization of sodium sulfate byproduct into sodium bicarbonate: Integrated approach toward sustainable battery material production," *Chem. Eng. J.*, 523, (2025).

## Upcycling Waste PVC for Sustainable Gold Recovery: An Integrated Techno-Economic and Environmental Assessment

Seungho Lee, Wangyun Won \*

Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University

As the generation of electronic waste, particularly printed circuit boards (PCBs), continues to surge globally, urban mining has emerged as a vital and sustainable alternative to conventional gold mining. Traditional primary mining faces escalating environmental footprint constraints, including high energy consumption and toxic emissions, alongside increasing economic burdens. To address these challenges, this study proposes an innovative, integrated gold recovery process utilizing novel adsorbents synthesized through the functionalization of waste PVC films. This approach simultaneously mitigates two pressing environmental issues: the hazardous accumulation of plastic waste and the urgent need for a sustainable supply chain for critical precious metals.

To evaluate the industrial viability of this proposed process, a comprehensive Techno-Economic Analysis (TEA) was conducted. We determined the minimum selling price (MSP) of the recovered gold to demonstrate its cost-competitiveness against current market values. Furthermore, a detailed Life Cycle Assessment (LCA) was performed to quantify the net environmental benefits, highlighting significant reductions in ecological impacts when compared to traditional mining practices. Ultimately, our findings validate the feasibility of integrating waste-derived materials into advanced resource recovery systems, offering a tangible, economically viable, and eco-friendly pathway toward a circular economy.

### References

1. Ding, Y., Zhang, S., Liu, B., Zheng, H., Chang, C. C., and Ekberg, C., "Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: A review," *Resour. Conserv. Recycl.*, **141**, 284-298 (2019).
2. Işıldar, A., Rene, E. R., van Hullebusch, E. D., and Lens, P. N. L., "Electronic waste as a secondary source of critical metals: Management and recovery technologies," *Resour. Conserv. Recycl.*, **135**, 296-312 (2018).
3. He, Y., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Kiehbardrouinezhad, M., Peng, W., Tabatabaei, M., and Aghbashlo, M., "Environmental footprint analysis of gold recycling from electronic waste: A comparative life cycle analysis," *J. Clean. Prod.*, **432**, 139675 (2023).

## Dynamic Simulation and Rigorous Parameter Estimation of an Industrial 2-Bed PSA Process for CO<sub>2</sub> Capture

Seungho Lee, Wangyun Won \*

Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University

Pressure Swing Adsorption (PSA) is widely recognized as a mature and energy-efficient technology for industrial carbon capture. In this study, conducted in close collaboration with an industrial partner, we present a comprehensive computational model of a 2-bed, 4-step PSA process designed specifically for CO<sub>2</sub> capture. To capture the complex dynamic behavior of the adsorption beds with high fidelity, a robust set of governing equations based on mass, energy, and momentum conservation was established. The model's accuracy is further enhanced by incorporating the Ergun equation to account for pressure drop and the Wakao and Funazkri correlation for precise heat and mass transfer estimation. Additionally, adsorption equilibrium parameters were derived by fitting experimental isotherm data to the extended Langmuir model.

The simulation results provide critical insights into the internal column dynamics, elucidating spatiotemporal variations in temperature, gas composition, and interstitial velocity throughout the cycle. Finally, the system's performance was rigorously evaluated at the cyclic steady-state (CSS), with a specific focus on optimizing the trade-off between CO<sub>2</sub> purity and recovery rates, thereby validating the process model for practical industrial application.

### References

1. Ko, D., Siriwardane, R., and Biegler, L. T., "Optimization of a pressure swing adsorption process using zeolite 13X for CO<sub>2</sub> sequestration," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **42**(2), 339-348 (2003).
2. Haghpanah, R., Majumder, A., Nilam, R., Rajendran, A., Mazzotti, M., and Karimi, I. A., "Multiobjective optimization of a four-step adsorption process for postcombustion CO<sub>2</sub> capture via finite volume simulation," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **52**(11), 4249-4265 (2013).
3. Grande, C. A., and Rodrigues, A. E., "CO<sub>2</sub> capture from flue gas by pressure swing adsorption," *Chem. Eng. Sci.*, **63**(19), 5035-5047 (2008).

## **Influence of Acceleration Intensity on Boil-Off Gas Generation in Cryogenic Liquid Hydrogen Transport**

Jingyeong Im, Boram Gu<sup>1\*</sup> and Wangyun Won

School of Chemical Engineering, Chonnam National University, Korea

<sup>1</sup>Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University, Korea

Hydrogen is widely regarded as a promising clean energy carrier due to its high energy density and carbon-free utilisation. However, cryogenic storage during transportation inevitably leads to boil-off gas (BOG) generation caused by heat ingress and motion-induced fluid dynamics [1]. While previous studies have largely focused on insulation performance and steady-state storage conditions, detailed analyses of internal flow and evaporation behaviour within transport trailers under realistic transient driving scenarios remain limited [2,3]. Quantifying evaporation behaviour under such dynamic conditions is therefore essential for minimising hydrogen loss.

This study employs three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) simulations to investigate evaporation and interphase mass transfer in an unbaffled cryogenic liquid hydrogen tank subjected to controlled acceleration and deceleration scenarios. Vehicle motion was prescribed over speed ranges of 0-40 km/h, 0-80 km/h, and 40-0 km/h, with two distinct acceleration magnitudes imposed for each range. By maintaining identical terminal speeds while varying acceleration intensity, the study enables a systematic assessment of transient driving effects on internal tank dynamics. A time-dependent multiphase thermal flow model coupled with vapour-liquid mass transfer was used to resolve sloshing behaviour, interfacial deformation, and thermodynamic field evolution.

The simulations suggest that acceleration magnitude influences evaporation intensity within the tank. Cases with higher acceleration or deceleration levels exhibited stronger internal fluid motion and more pronounced interfacial deformation, which were associated with increased interphase mass transfer and BOG generation under comparable speed limits. These observations indicate that transient driving intensity may play an important role in cryogenic evaporation behaviour and warrants further quantitative investigation when developing liquid hydrogen transportation strategies.

### **References**

1. M. Aziz, Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety, *Energies*, 14(18), 5917 (2021).
2. SJ Jeong et al., Williams, CFD Thermo-Hydraulic Evaluation of a Liquid Hydrogen Storage Tank with Different Insulation Thickness in a Small-Scale Hydrogen Liquefier, *Fluids*, 8(9), 239 (2023).
3. Y Jiang et al., CFD simulation of heat transfer and phase change characteristics of the cryogenic liquid hydrogen tank under microgravity conditions, *Int. J. Hydrog. Energy.*, 48(19), 7076-7037 (2023).

## Polyolefin Waste Upcycling via LOHC-Based Hydrogen Delivery

Taeun Kwon<sup>1</sup>, Seoyoung Ahn<sup>1</sup>, Insoo Ro<sup>1</sup> and Wangyun Won<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University

Polyolefins such as polyethylene (PE) and polypropylene (PP) dominate global plastic production but remain difficult to recycle sustainably. Although catalytic upcycling offers a promising pathway to convert polyolefin waste into fuels and chemical feedstocks, conventional hydrogenolysis and hydrocracking processes rely on externally supplied fossil-derived hydrogen, raising concerns regarding carbon emissions, hydrogen logistics, and overall process feasibility [1]. This study proposes an LOHC-assisted process enabling *in situ* hydrogen supply during catalytic polyolefin hydrocracking [2]. Three configurations were evaluated: (i) a one-step tandem process in which decalin functions as a hydrogen carrier in a single reactor, (ii) a two-step process separating decalin dehydrogenation and hydrocracking, and (iii) an H<sub>2</sub>-direct process using externally supplied hydrogen. Techno-economic analysis (TEA) indicates that the reactor-based plastic waste valorization subsystem is the dominant capital cost contributor due to high-throughput continuous operation (10,000 kg/h). The minimum selling price (MSP) was estimated at \$3.5/GGE for the one-step process, compared to \$4.9/GGE and \$4.4/GGE for the two-step and H<sub>2</sub>-direct processes, respectively. The two-step configuration suffers from excessive decalin consumption (4608 kg/h), whereas the one-step process achieves superior cost performance with significantly lower decalin demand (986 kg/h). Life cycle assessment (LCA) shows that the one-step process achieves the lowest global warming potential (0.413 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg liquid fuel), outperforming the two-step (1.059) and H<sub>2</sub>-direct (0.448) cases. Sensitivity analysis further highlights the strong influence of heat and electricity sources on environmental performance. Overall, the tandem LOHC-based process demonstrates the most favorable balance between economic viability and environmental sustainability by reducing external hydrogen dependency and maximizing fuel productivity.

### References

1. Kwon, T. et al., “Hydrogen-Free Catalytic Strategies for the Upcycling of Polyolefin Plastics”, *Korean J. Chem. Eng.*, **43**, 109–146 (2026)
2. Kwon, T. et al., “Sustainable polyolefin upcycling using liquid organic hydrogen carrier based hydrogen delivery and hydrocracking”, *Nat. Commun.*, **17**, 918 (2026)

## Catalytic Upcycling of Polyolefin Plastics via Water–Catalyst Interactions

Taeun Kwon<sup>1</sup>, Byeongchan Ahn<sup>1</sup>, Insoo Ro<sup>1</sup> and Wangyun Won<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University

The rapid growth in global plastic production has led to an increase in plastic waste generation, motivating extensive efforts to upcycle waste plastics into high-value chemicals and fuels. Despite significant progress, the catalytic recycling rate remains below 0.1%. One major barrier is that post-consumer plastic waste contains various contaminants. Specifically, washing and pretreatment steps can leave residual water in the feedstock, and water is generally regarded as detrimental to polyolefin upcycling due to the hydrophobic nature of plastics [1]. However, the addition of water enhances polyolefin upcycling over Ru/zeolite-Y catalysts, attributed to the Brønsted acid sites of hydrophilic zeolites [1,2]. In this study, the process-level impact of this water-promoted reactivity on catalytic polyolefin upcycling is evaluated by integrating mechanistic insights with techno-economic analysis (TEA) and life cycle assessment (LCA). Given that product distribution depends on both the presence of water and Ru loading, six different operating conditions were analyzed [3]. TEA results indicate that water-assisted conditions improve conversion and shift the product slate toward heavier hydrocarbons, thereby reducing the minimum selling price of fuel-range products. LCA further revealed that the optimized condition reduces greenhouse gas emissions by 17.7% compared to operation without water. Uncertainty analysis confirmed that the same condition exhibits the narrowest minimum selling price distribution and the lowest mean value, demonstrating robust economic competitiveness even under fluctuations in feedstock cost and market prices of diesel and LPG. These results highlight that residual water, traditionally considered a critical process impurity, can serve as a key process lever to improve both economic and environmental feasibility of catalytic polyolefin upcycling.

### References

1. Kwon, T. et al., “Unraveling the role of water in mechanism changes for economically viable catalytic plastic upcycling”, *Nat. Commun.*, **15**, 10239 (2025)
2. Kwon, T. et al., “Influence of Zeolite Hydrophilicity and Hydrophobicity on Water-assisted Polyethylene Hydrocracking”, *Catal. Today* **462**, 115578 (2026)
3. Byeongchan, A. et al., “Valorization of plastic waste into drop-in fuels: Economic and environmental perspectives”, *Chem. Eng. J.*, **526**, 171143 (2025)

## 메탄 건식 개질 촉매 성능 예측을 위한 머신러닝 모델 개발

김승한, 김민재, 최현준, 김정환\*  
연세대학교 화공생명공학과

메탄 건식 개질(Dry Reforming of Methane, DRM)은 주요 온실가스인 메탄( $\text{CH}_4$ )과 이산화탄소( $\text{CO}_2$ )를 고부가가치의 합성가스로 전환하는 유망한 기술로, 탄소 중립 실현을 위한 공정으로 주목받고 있다.[1] 그러나 전통적인 촉매 개발은 시행착오에 따른 시간 및 비용 부담이 크고[2], 밀도범함수 이론(Density Functional Theory, DFT)은 시간이 많이 걸리고 계산 비용이 많이 든다.[3] 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자 DRM 촉매 성능을 예측할 수 있는 머신러닝 모델을 제안한다. 제안된 모델은 네 가지 알고리즘(DNN, Random Forest, CatBoost, XGBoost)으로 구성되며, 촉매의 조성 및 운전 조건에 따른 메탄 전환율( $\text{CH}_4$  conversion)을 정량적으로 예측한다. 126개의 실험 논문으로부터 총 5908개의 문헌 데이터를 기반으로 모델을 학습하였으며,  $R^2$  score와 RMSE를 평가지표로 활용하여 예측 정확도를 평가하였다. 제안된 모델은 기존 메탄 전환율 예측 모델과 비교하여 평균적으로 향상된  $R^2$  score와 낮은 RMSE를 달성하였으며, 특히 다양한 촉매 조성 및 반응 조건에 대해 일관된 성능을 보였다. 이를 통해 본 모델은 다양한 촉매 성분 및 조합 설계 시 복잡한 실험 없이도 메탄 전환율과 같은 촉매 성능을 정량적으로 예측할 수 있어, 저비용 및 고효율 DRM 촉매 설계에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. N.A.K. Aramouni, J.G. Touma, B.A. Tarboush, J. Zeaiter, M.N. Ahmad. "Catalyst design for dry reforming of methane: Analysis review". *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 82 (2018), pp. 2570-2585
2. Y.X. Yu, J. Yang, K.K. Zhu, Z.J. Sui, D. Chen, Y.A. Zhu, X.G. Zhou. "High-Throughput Screening of Alloy Catalysts for Dry Methane Reforming". *ACS Catal.*, 11 (2021), pp. 8881-8894
3. H. park, J. Roh, H. Cho, I. Ro, J. Kim. "Accelerating active catalyst discovery: a probabilistic prediction-based screening methodology with applications in dry reforming of methane". *J. Mater. Chem. A*, 12 (2024), pp. 1629-1641

**Multi-regional techno-economic assessment of Power-to-Olefin Pathway**

Hira Mahmood, Jay Liu\*

Pukyong National University, Busan, Republic of Korea.

The transition away from fossil-based olefin production requires alternative synthesis routes that can integrate renewable electricity and non-fossil carbon sources while remaining economically competitive. Power-to-Olefins (PtO) pathway based on renewable hydrogen and captured CO<sub>2</sub> represent a promising route, however, their techno-economic performance is strongly dependent on regional renewable electricity prices. In this study, a spatial techno-economic assessment of a methanol-mediated Power-to-Olefins process is conducted for three countries—the United States, Australia, and South Korea—using PEM electrolyzer powered by hybrid renewable electricity. The detailed process modeling and techno-economic assessment are performed to quantify production costs, energy requirements, and key economic drivers based on country-specific renewable electricity prices and financial parameters. The minimum olefin selling price spans 1.93–2.49 \$/kg, with the lowest values in the United States and the highest in South Korea, reflecting its comparatively higher electricity cost and less favorable conditions for large-scale deployment. Process integration through byproduct utilization and internal heat recovery reduces overall energy demand by approximately 20%, thereby improving energy efficiency and cost competitiveness. The results indicate that viability of PtO systems is governed by where they are deployed and how effectively the process is integrated, underscoring the importance of geographically informed deployment of light olefin production.

## **A Multi-Criteria Blue Hydrogen Suitability Index for Regional Screening Under Uncertainty**

Muhammad Ansub Khan, Jay Liu\*

Pukyong National University, Busan, Republic of Korea.

\*E-mail: jayliu@pknu.ac.kr

This paper develops a Blue Hydrogen Suitability Index (BHSI) as a screening-level, multi-criteria framework to identify regions most suited for near-term blue hydrogen deployment under heterogeneous regional conditions. BHSI integrates 15 indicators grouped into five factors—economic feasibility, resource endowment, emissions performance, CCS readiness, and geopolitical and trade positioning—standardizing indicators to a common 0–1 scale, and aggregating factor scores into a composite index using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) to derive factor weights. A global comparative assessment is conducted across 10 regions (97 countries aggregated based on data coverage) to balance spatial resolution with data availability. To ensure robustness, Monte Carlo simulation is coupled with FAHP to propagate both preference uncertainty and data uncertainty, generating distributions of BHSI scores and rankings rather than point estimates. Results show pronounced regional differentiation across factors: North America, Central Asia, and the Middle East perform strongly on the economic factor, Russia leads on the resource factor, and North America and Oceania score highly on CCS readiness. Across the 10-region screening, composite BHSI values span roughly 0.32–0.91, identifying North America (highest)—followed by the Middle East and Oceania—as the most favorable near-term blue hydrogen hubs, while Africa and Latin America (lowest) face the strongest multi-criteria constraints. Practically, the BHSI provides a decision-support shortlisting tool for governments and investors to prioritize early CCS-enabled hydrogen hubs, target infrastructure bottlenecks (CO<sub>2</sub> transport/storage and export systems), and avoid overcommitting capital to regions where suitability is not robust under uncertainty.

## 타르 제거 및 수소-탄소 비 조절 방식에 따른 폐플라스틱 기반 합성천연가스 생산 공정의 기술-경제성 평가

안도영<sup>1</sup>, 전하늘<sup>1</sup>, 이인규<sup>1,\*</sup>  
부산대학교<sup>1</sup>

플라스틱 폐기물(plastic waste, PW)의 화학적 재활용은 연료 형태로 폐플라스틱의 에너지를 회수할 수 있다는 장점이 있다[1]. 그중 합성천연가스(synthetic natural gas, SNG) 생산은 기존의 천연가스 인프라를 변경하지 않고도 PW를 널리 사용되는 에너지 운반체로 전환할 수 있다는 점에서 매력적인 재활용 경로 중 하나이다[2]. 그러나 PW-to-SNG 공정에는 두 가지 한계점이 존재한다. 첫째, 상당량의 타르가 생성되어 후단 공정 장치에서 운전상의 문제를 유발한다. 둘째, 생성된 합성가스의 수소-탄소 비가 천연가스 합성에 요구되는 수준에 미치지 못한다.

본 연구에서는 두 가지 타르 제거 방식과 두 가지 수소-탄소 비 증가 방식을 조합하여 총 네 가지 공정 시나리오를 제안하고, 이들의 환경적 및 경제적 성능을 비교하였다. 타르 제거는 오일 기반 스크러빙(oil-based scrubbing, OS)과 수증기 개질(steam reforming, SR)을 통해 수행하였으며, 수소-탄소 비 증가는 산성가스 제거 공정을 통한 CO<sub>2</sub> 제거(CO<sub>2</sub> removal, CR)와 외부 수소 주입(hydrogen addition, HA) 방식을 적용하였다. 분석 결과, OS-HA 시나리오는 온실가스 배출량이 가장 낮은 반면, 균등화 SNG 생산비용은 가장 높은 것으로 나타났다. 이와 반대로 SR-CR 시나리오는 가장 낮은 균등화 SNG 생산비용을 보였으나 온실가스 배출량이 가장 높았다. 민감도 분석 결과, HA를 적용한 시나리오에서만 균등화 SNG 생산비용이 기존 화석연료 기반 천연가스 비용 이하로 감소할 수 있음을 나타내었다.

### 참고문헌

1. Afzal, S, et al., "Techno-economic analysis and life cycle assessment of mixed plastic waste gasification for production of methanol and hydrogen.", *Green Chemistry*, 25(13), 5068-5085 (2023).
2. Arena, U., Parrillo, F., and Ardolino, F., "An LCA answer to the mixed plastics waste dilemma: Energy recovery or chemical recycling?", *Waste Management*, 171, 662-675 (2023).

## Low-Carbon Olefin Production Processes with Liquid Hydrogen Cold Energy Recovery and Electric Heating

Hyunju Cho<sup>1</sup>, Jeongheon Kim<sup>1</sup> and Inkyu Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Pusan National University

Light olefin is key building blocks for a wide range of chemical products, and its production process needs to shift toward renewable resource-based pathways to achieve carbon neutrality. The CO<sub>2</sub>-to-olefins (CTO) process, converting CO<sub>2</sub> and green hydrogen into light olefins, has emerged as a promising technology [1]. However, the availability of green hydrogen varies significantly across regions, and hydrogen importation is required in green hydrogen limited regions. For long-distance transportation, it should be converted into high-density hydrogen carriers. Among various hydrogen carriers, liquid hydrogen (LH<sub>2</sub>) is particularly suitable for the CTO process due to its potential for cold energy utilization. The LH<sub>2</sub> cold energy can be utilized for cryogenic olefin separation and additional power generation. Therefore, this study proposes LH<sub>2</sub>-based CTO processes and compares them with gaseous hydrogen-based CTO processes. In addition, CO<sub>2</sub> reduction required in CTO process operates under high temperature conditions [2] and reducing carbon emissions associated with process heating is also important. Comparative designs of hydrogen combustion and electric heating are analyzed. Energy and economic assessments revealed that the LH<sub>2</sub>-based CTO process with electric heating offers the best performance, demonstrating the highest energy efficiency and lowest levelized cost of olefins.

### References

1. Zhang, L., Gao, R., Wang, L., Zhang, C., Jun, K. W., Kim, S. K., Zhao T., Wan H., and Guan G., Carbon-neutral light olefins production for energy decarbonization: Process development and techno-economic-environmental analysis, *Chem. Eng.*, 471, 144611 (2023).
2. Becka, R., Bajohr, S., and Kolb, T., Review on CO<sub>2</sub> Activation via Catalytic Reverse Water-Gas Shift Reaction, *Chemie Ingenieur Technik.*, 97, 860-881 (2025).

## 비용-효과적인 그린 수소 공급을 위한 액화 수소-암모니아 통합 가치사슬 설계

이예진<sup>1</sup>, 조서연<sup>1</sup>, 이인규<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>부산대학교

신재생 에너지의 지역적 불균형을 해소하기 위해 에너지 캐리어를 활용한 수송이 고려되고 있다 [1]. 액화 수소와 암모니아는 유망한 에너지 캐리어로 주목받고 있지만, 각 가치사슬의 구성 공정에는 한계점이 존재한다. 액화 수소 가치사슬에서는 수소 액화에 많은 전력이 소모되고, 재기화 과정에서 수소의 극저온 냉열이 회수되지 않고 버려진다. 암모니아 가치사슬에서는 암모니아 합성 시 고순도 질소 생산과 가압에 많은 전력이 필요하며, 암모니아 분해 시 반응 전 암모니아 기화를 위해 많은 잠열을 공급해야 한다. 본 연구는 액화 수소-암모니아 가치사슬을 통합하여 개별 가치사슬의 한계를 극복하고자 하였다. 제안 가치사슬에서는 공기 분리 장치를 통해 생산한 질소의 액화에 액화 수소의 냉열을 활용한다. 이후 수출 지역으로 수송된 액화 질소는 수소 액화 공정의 예냉 과정에 냉열을 제공한 후, 암모니아 생산의 원료로 사용된다. 또한, 공기 가압 과정에서 발생한 압축열을 이용해 암모니아 일부를 기화시키고 공기는 수소와의 열교환을 통해 추가로 냉각된다. 제안 가치사슬에 대해 열역학적 및 경제적 분석을 진행한 결과, 에너지 및 경제성 측면에서 제안 가치사슬이 모두 우수한 것으로 나타났다.

### 참고문헌

1. Spatolisano, E., Restelli, F., Pellegrini, L. A., Cattaneo, S., de Angelis, A. R., Lainati, A., and Roccaro, E., "Liquefied hydrogen, ammonia and liquid organic hydrogen carriers for harbour-to-harbour hydrogen transport: A sensitivity study" *Int. J. Hydrog. Energy.*, **80**, 1424-1431 (2024).

## 페타이어 열분해 기반의 방향족 물질을 활용한 지속가능한 항공유 합성 공정의 기술-경제성 평가

김정현<sup>1</sup>, 이인규<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>부산대학교

지속가능 항공연료(Sustainable Aviation Fuel, SAF)에 관한 기존 연구들은 ASTM D7566에서 규정된 방향족 함량을 간과해 왔다. 전 세계적으로 매년 약 15억 개의 타이어가 생산되며, 이로 인해 약 1,700만 톤의 페타이어가 발생하는 것으로 추정된다. 이들 중 일부는 재활용되거나 에너지 회수에 활용되고 있으나, 상당량의 페타이어가 매립되고 있다. 이는 심각한 환경적 영향을 초래한다 [1]. 그러나 페타이어는 열분해를 통해 상당한 양의 방향족 물질을 생산할 수 있다 [2]. 해당 방향족 물질은 높은 에너지 밀도를 가지며, ASTM D7566에서 규정하는 SAF의 방향족 함량치를 충족시키는 데 효과적으로 활용될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 페타이어의 열분해 반응과 Fischer-Tropsch 반응을 활용하여, ASTM D7566 규격을 만족시키는 SAF 생산 공정을 설계 및 평가하였다. 비교를 위해 합성가스를 통해 방향족 물질을 생산하는 공정을 Base case로 설정하였다. 에너지 및 경제성 평가 결과, 페타이어 기반 공정은 합성가스 기반 경로 대비 에너지 효율이 더 높고 경제적 성능 또한 우수함을 보여주었다.

### 참고문헌

1. Czajczyńska, D., Krzyżyńska, R., Jouhara, H., & Spencer, N., Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review, *Energy*, 134, 1121-1131 (2017).
2. Zhang, G., Chen, F., Zhang, Y., Zhao, L., Chen, J., Cao, L., ... & Xu, C., Properties and utilization of waste tire pyrolysis oil: A mini review, *Fuel Processing Technology*, 211, 106582 (2021).

## Integration of LH<sub>2</sub>- and NH<sub>3</sub>-based hydrogen value chain via LN<sub>2</sub> circulation and improved H<sub>2</sub> productivity

Seoyeon Cho<sup>1</sup>, Yejin Lee<sup>1</sup> and Inkyu Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Pusan National University

To balance geographically distributed renewable energy generation and enhance its penetration, both liquid hydrogen (LH<sub>2</sub>) and ammonia (NH<sub>3</sub>) have been considered as promising green hydrogen carriers. In the LH<sub>2</sub>-based value chain, gaseous H<sub>2</sub> is liquefied at the hydrogen export site and LH<sub>2</sub> is regasified at the hydrogen import site [1]. In the NH<sub>3</sub>-based value chain, NH<sub>3</sub> is synthesized from H<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> at the export site, then NH<sub>3</sub> is converted into H<sub>2</sub> at the import region [2]. However, each process in a standalone value chain faces inherent challenges that ultimately hinder the economic performance of the overall value chain. H<sub>2</sub> liquefaction process is energy-intensive, while the cold energy released during LH<sub>2</sub> regasification is inefficiently utilized. NH<sub>3</sub> synthesis process requires substantial compression energy for air separation and nitrogen supply, while NH<sub>3</sub> decomposition process wastes of N<sub>2</sub> and unrecovered H<sub>2</sub> during the purification step. To address each limitation, this study proposes a novel scheme of integrating the LH<sub>2</sub>- and NH<sub>3</sub>-based value chains. In the integrated value chain, the LH<sub>2</sub> cold energy is utilized to produce LN<sub>2</sub> and additional H<sub>2</sub> at the import site. The produced LN<sub>2</sub> is then transported to the export site. LN<sub>2</sub> is used for H<sub>2</sub> pre-cooling in the H<sub>2</sub> liquefaction process and utilized as the feed stream for the NH<sub>3</sub> synthesis process. Compared with standalone value chains, the proposed scheme exhibited reduced power consumption and a lower levelized cost of hydrogen.

### References

1. Mun, H., Kim, Y., Park, J., and Lee, I., "Power generation system utilizing cold energy from liquid hydrogen: Integration with a liquid air storage system for peak load shaving," *Energy*, 306, 132351 (2024).
2. Cho, S., Mun, H., Park, J., and 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).

## Integration of Waste Plastic Gasification and CO<sub>2</sub> Electrolysis for Sustainable Hydrogen Production

Dongyeop Yeom<sup>1</sup>, Doyeong Ahn<sup>1</sup> and Inkyu Lee<sup>1\*</sup>

School of Chemical Engineering, Pusan National University<sup>1</sup>

As the global energy paradigm shifts towards sustainable systems, hydrogen production via waste plastic gasification has emerged as a promising alternative [1]. This approach has the potential to simultaneously mitigate the environmental burden of waste plastics and address the escalating demand for clean hydrogen [2]. However, several critical challenges remain: (i) CO<sub>2</sub> is inevitably generated during gasification and must be captured to be considered a low-carbon hydrogen production pathway; (ii) conventional amine-based carbon capture method consumes significant energy; and (iii) previous studies have primarily focused on gasification-based hydrogen production as a standalone process, with limited exploration of system-level integration to alleviate the carbon capture burden.

To overcome these limitations, this study proposes an integrated system that couples waste plastic gasification with CO<sub>2</sub> electrolysis (CO<sub>2</sub>EL). In the proposed process, the generated CO<sub>2</sub> undergoes electrolysis to produce carbon monoxide and oxygen. The produced carbon monoxide is utilized in the water-gas shift (WGS) reaction to enhance hydrogen production. In addition, the generated oxygen is employed in oxy-fuel combustion instead of air, eliminating the need for amine-based carbon capture units. Consequently, the proposed process achieves a 120% higher hydrogen yield and improves the thermal efficiency by 2.97%p to 50.56% compared with the conventional standalone gasification-based process. The levelized cost of hydrogen is reduced by 5.20% to \$2.55/kg-H<sub>2</sub>.

### References

1. Lan, K., and Yao, Y., "Feasibility of gasifying mixed plastic waste for hydrogen production and carbon capture and storage." *Comm. Ear. Env.*, 3(1), 300 (2022).
2. Zhu, J., Cai, N., Zhao, C., and Yang, H., "Research Progress on Thermochemical Conversion Technologies for Hydrogen Production from Waste Plastics." *Appl. Ene. Comb. Sci.*, 25, 100451 (2026).

## Vapor-Liquid Phase Coexistence and Interfacial Properties of CO<sub>2</sub> and Short-Chain Alcohols by Molecular Dynamics

Dongho Yoo<sup>1</sup>, Tae Jun Yoon<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Chemical and Biological Engineering, Institute of Chemical Processes, Seoul National University, Seoul, 08826, Republic of Korea,

<sup>2</sup>School of Transdisciplinary Innovations, Seoul National University, Seoul, 08826, Republic of Korea.

### Abstract

As semiconductor devices continue to scale below the 22-nm node, capillary forces associated with the surface tension of conventional liquid-based processing have emerged as a dominant cause of pattern collapse, posing a critical bottleneck in device fabrication and integration. Supercritical carbon dioxide (scCO<sub>2</sub>) is a promising alternative because its gas-like viscosity and high diffusivity enable efficient penetration into nanoscale features, and operation above the mixture critical point eliminates the liquid–vapor interface, yielding an effectively near-zero surface tension that mitigates collapse[1,2]. Nonetheless, the limited solvating power of scCO<sub>2</sub> for many process-relevant species typically necessitates the use of polar co-solvents, for which thermodynamic behavior can be substantially altered under nanoscale confinement.

Here, we employ molecular dynamics (MD) simulations to elucidate the dependence of vapor–liquid equilibrium (VLE) and interfacial tension on nanoslit width for CO<sub>2</sub>–co-solvent mixtures confined within graphite slits, with short-chain alcohols (methanol, ethanol, and 1-propanol) as representative cosolvents. The results reveal a systematic downward shift of the VLE coexistence envelope relative to bulk behavior, accompanied by pronounced, width-dependent shifts in the critical point and measurable changes in interfacial tension. These confinement-induced thermodynamic trends provide quantitative guidance for selecting operating conditions and co-solvent formulations that suppress pattern collapse while enabling scCO<sub>2</sub>-assisted cleaning and deposition in advanced semiconductor manufacturing.

### References

1. G. T. Mulhern, D. S. Soane, and R. T. Howe, “Supercritical Carbon Dioxide Drying of Microstructures,” 7th International Conference on Solid State Sensors and Actuators (Transducers '93), Yokohama, Japan, 296-299 (June, 1993).
2. Romang, Alvin H., and James J. Watkins. "Supercritical fluids for the fabrication of semiconductor devices: emerging or missed opportunities?." *Chemical reviews* 110.1 (2010): 459-478.

## Vapor-liquid Equilibria of Ethylene Carbonate (EC)-Containing Electrolyte Solvents with CO<sub>2</sub>: Molecular Dynamics Simulation and Experimental Analysis

Soomin Gee, Bomin Kim and Tae Jun Yoon\*

School of Chemical & Biological Engineering, Institute of Chemical Processes, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

School of Transdisciplinary Innovations, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

The rapid expansion of the lithium-ion battery (LIB) market has intensified the need for sustainable recycling technologies, particularly for volatile organic electrolytes. Supercritical CO<sub>2</sub> extraction (SFE) has emerged as an eco-friendly and efficient alternative for electrolyte recovery due to its non-flammability and tunable solvating power. (Liu et al. [1] ) However, among the key electrolyte components, ethylene carbonate (EC) poses a significant technical challenge in SFE process design. Its high melting point ( $T_m \approx 312$  K) and strong molecular interactions often lead to complex phase transitions and limited solubility data when mixed with other carbonates. Despite its critical role as a core solvent, high-pressure vapor–liquid equilibrium (VLE) data for EC-containing ternary systems remain remarkably scarce, which hinders the precise optimization of fractionation and recovery units. To bridge this gap, this study provides a comprehensive investigation into the phase behavior of C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>3</sub> (EC) + C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub> (PC) + CO<sub>2</sub> and C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>3</sub> (EC) + C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>O<sub>3</sub> (DEC) + CO<sub>2</sub> systems.

We employed a hybrid approach combining high-pressure visual cell measurements with molecular dynamics (MD) simulations to provide both experimental validation and a microscopic understanding of the molecular interactions. Bubble pressures were systematically measured at three isotherms (333 K, 343 K, and 353 K) across varying liquid-phase compositions. By integrating MD simulation results with experimental VLE data, we analyzed the local solvation structure and the effect of EC concentration on CO<sub>2</sub> solubility. These findings will be fitted into advanced thermodynamic models to provide a robust predictive framework. We expect this integrated approach to serve as a reliable thermodynamic basis for the design, scale-up, and optimization of CO<sub>2</sub>-based recovery processes for EC-containing electrolyte systems.

### References

1. Liu, Y., Mu, D., Zheng, R., and Dai, C., “Supercritical CO<sub>2</sub> Extraction of organic carbonate-based electrolytes of lithium-ion batteries,” *RSC Adv.*, **4**, 54525-54531 (2014).

## Measurement and thermodynamic modeling of $\text{Cu}(\text{acac})_2$ solubility in supercritical $\text{CO}_2$ and $\text{CO}_2$ -cosolvent system

Donghwi Kim<sup>1</sup>, Tae Jun Yoon<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Chemical and Biological Engineering, Institute of Chemical Processes, Seoul National University, Seoul, 08826, Republic of Korea

<sup>2</sup>School of Transdisciplinary Innovations, Seoul National University, Seoul, 08826, Republic of Korea

### Abstract

This study presents experimental measurement and thermodynamic modeling of the solubility of copper acetylacetonate ( $\text{Cu}(\text{acac})_2$ ) in supercritical carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) and  $\text{CO}_2$ -cosolvent systems to support the design of supercritical deposition processes. Solubility was determined by using static gravimetric method [1] over a range of temperatures and pressures. The experimental dataset provides reliable phase-equilibrium information for both binary (solute- $\text{CO}_2$ ) and ternary (solute- $\text{CO}_2$ -cosolvent) systems relevant to precursor delivery in supercritical media.

Measured binary solubility data were correlated using the Peng-Robinson equation of state (PR EoS) [2], with the binary interaction parameter fitted to experimental results. The model successfully reproduced pressure dependence and the characteristic crossover behavior of temperature effects on solubility. These results confirm that density-driven solvent strength and solute volatility jointly govern dissolution behavior in supercritical fluids.

For ternary systems, solubility was evaluated using two approaches: a fitted calculation using an optimized solute-cosolvent interaction parameter and a predictive calculation assuming zero interaction parameter. Comparison between the two demonstrated the extent to which cosolvent-solute interactions influence phase behavior. The modeling framework and dataset provide practical thermodynamic inputs for process design and illustrate how predictive versus correlated parameters affect solubility estimation in multicomponent supercritical systems.

### References

1. G. Sherman, S. Shenoy, R. A. Weiss, and C. Erkey, "A Static Method Coupled with Gravimetric Analysis for the Determination of Solubilities of Solids in Supercritical Carbon Dioxide," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 39, 846–848 (2000).
2. D.-Y. Peng and D. B. Robinson, "A New Two-Constant Equation of State," *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 15, 59–64 (1976).

## 양자 시계열 인공지능 모델을 이용한 증류탑의 출력 온도 예측 모델 개발

정재빈<sup>1,a</sup>, 권혁원<sup>1,a</sup>, 이창원<sup>1,b</sup>, 박경덕<sup>1†,b</sup>, 김정환<sup>1†,a</sup>

a. 연세대학교 화공생명공학과

b. 연세대학교 응용통계학과

증류탑은 화학 공정에서 가장 에너지 집약적인 단위 공정 중 하나로, 전체 공정 에너지 소비의 상당 부분을 차지한다[1]. 따라서 증류탑 출력물을 실시간으로 모니터링하고 예측하는 것은 운전 효율 향상 및 에너지 최적화 측면에서 매우 중요하다. 그러나 증류탑은 온도, 압력, 유량 등 다양한 공정 변수 간의 복잡하고 비선형적인 상관관계를 가지며, 이로 인해 출력물에 대한 정확한 예측이 어렵다. 더불어 실제 플랜트 운전 환경에서 수집된 데이터에는 센서 오류, 측정 불확실성 등에 기인한 노이즈가 불가피하게 포함되어 있으며, 이는 기존 머신러닝 기반 예측 모델의 성능을 크게 저하시키는 주요 원인으로 작용한다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 양자 컴퓨팅 원리를 기반으로 노이즈에 강건한 특성[2]을 지니는 양자 머신러닝 모델을 기반으로 하여, 시계열 데이터의 시간적 의존성을 효과적으로 학습할 수 있는 QLSTM(Quantum Long Short-Term Memory) 모델을 적용하였다. QLSTM은 기존 LSTM의 게이트 구조 내 고전적 신경망 레이어를 variational quantum circuit로 대체한 하이브리드 양자-고전 모델로, 적은 수의 파라미터로도 높은 표현력을 발휘할 수 있다는 장점을 가진다. 학습 데이터로는 n-부탄과 이소부탄을 분리하는 실제 산업용 증류탑의 운전 데이터를 활용하였으며, 5회 반복 학습을 통해 모델의 재현성과 안정성을 검증하고 기존 LSTM 모델과 성능을 비교하였다. 그 결과, QLSTM은 현저히 적은 수의 파라미터를 사용함에도 불구하고  $R^2$   $0.8970 \pm 0.0402$ 를 달성하여 높은 예측 정확도와 일관된 안정성을 보였다. 본 연구의 결과는 QLSTM이 노이즈가 포함된 실제 공정 데이터 환경에서도 신뢰성 높은 예측 성능을 발휘할 수 있음을 보여주며, 산업용 증류 공정의 출력물 예측 및 에너지 최적화를 위한 유망한 대안 모델로서의 가능성을 제시한다.

## 참고문헌

1. Kiss, A. A. and Smith, R. "Rethinking energy use in distillation processes for a more sustainable chemical industry". *Energy*, 203, 117788 (2020)
2. Ahmed, T. et al. "A comparative analysis and noise robustness evaluation in quantum neural networks", *Scientific Reports*, 15, 33654 (2025)

## 실제 데이터 기반 Bio-E 메탄올 공급망의 단·장기 운영 계획 및 설비 용량 설계

정세민, 최현준, 김정동<sup>1</sup>, 김정환\*

연세대학교 화공생명공학과, <sup>1</sup>Massachusetts Institute of Technology

바이오메스 기반의 bio-메탄올 및 재생에너지 기반의 e-메탄올은 탈탄소 전환의 유력한 대안이지만, 재생에너지 출력·전력가격·수요의 변동성과 지역적 불균형으로 인해 안정적인 생산과 공급망 설계가 필수적이다. 기존 연구는 연 단위 투자 또는 시간 단위 운영 중 한 스케일에 집중하거나, 정적 용량 가정 및 실제 시계열·GIS 데이터 반영의 제약으로 인해 장기 투자 - 단기 운영의 상호 작용을 일관되게 다루는 데 한계가 있다. 본 연구는 미국을 대상으로 바이오메스·재생에너지·전력 시장·탄소가격·수요 데이터를 통합하여, 장기(5년 단위) 설비 투자 의사결정과 단기(시간 단위) 운영 최적화, 그리고 생산지 - 수요지 간 운송을 연계하는 다기간·다중 시간 스케일 최적화 프레임워크를 제안한다. 장기 설계는 강화학습(예: DQN, PPO)을 통해 설비 용량의 증설/교체를 결정하고, 단기 운영은 MILP 기반으로 발전·저장·전력/수소 거래를 최적화한다. 또한 미래 연도 불확실성을 반영하기 위해 시계열 시나리오 생성 및 계산 복잡도 완화를 위한 대표일 기반 축약을 적용한다. 제안 프레임워크는 2025 - 2050년 기간 동안 bio/e-메탄올을 상호 보완적으로 결합한 하이브리드 메탄올 공급 시스템에서, 지역별 생산·수요 역할과 투자·운영 포트폴리오의 전략적 조합을 규명하고, 환경성 및 경제성을 평가할 수 있는 기반을 제공한다.

### 참고문헌

1. Kim et al, "Multi-period, multi-timescale stochastic optimization model for simultaneous capacity investment and energy management decisions for hybrid Micro-Grids with green hydrogen production under uncertainty", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 190, 114049 (2024).
2. Karatepe, S., Corcadden, K. W., "Wind Speed Estimation: Incorporating Seasonal Data Using Markov Chain Models", *International Scholarly Research Notices*, 657437, 1-9 (2013).
3. Shin, J. et al, "Operational planning and optimal sizing of microgrid considering multi-scale wind uncertainty", *Applied Energy*, 195, 616-633 (2017).
4. Scott, I. J. et al, "Clustering representative days for power systems generation expansion planning: Capturing the effects of variable renewables and energy storage", *Applied Energy*, 253, 113603 (2019).

## 국내 수소 수입 기반 액화수소 공급망의 터미널 선택 및 다기간 확장 최적화

최현준, 김영근, 권휘웅<sup>1\*</sup>, 김정환\*  
연세대학교 화공생명공학과, <sup>1</sup>순천향대학교 나노화학공학과

전 세계적으로 수소경제로의 전환이 가속화되면서, 수입의존형 국가들은 경제적으로 경쟁력 있는 수소 공급망 구축에 직면해 있다. 이러한 시스템에서 수입 터미널의 전략적 배치와 전국 규모 배송 네트워크 설계는 장기적인 경제성을 결정하는 핵심 요소이다. 본 연구는 액화수소 인프라를 위한 통합 다기간 혼합정수선형계획법(MILP) 프레임워크를 개발하여, 하역 터미널 입지 선정, 단계적 용량 확장, 공정 기반 증발가스(BOG) 관리, 그리고 지역 간 수송과 지역 내 수소충전소로의 배송을 포함하는 2단계 배송망을 동시에 최적화하였다. 2025-2050년 한국 로드맵을 대상으로 적용한 결과, 분산형 다중터미널 전략이 운송 거리 단축과 물류 유연성 제고를 통해 상당한 경제적 이점을 제공하는 것으로 나타났다. 수소 균등화 비용(LCOH)은 단일터미널(케이스 1) 2.86 USD/kg에서 2개 터미널(케이스 2) 2.71 USD/kg, 3개 터미널(케이스 3) 2.66 USD/kg으로 감소하였으며, 이는 중앙집중형 단일터미널 대비 분산형 3터미널 구성이 평균 LCOH 7.0% 감소 및 최대 연간총비용 6.76% 절감을 달성함을 의미한다. 경기도 지역의 상세 타당성 분석을 통해 교통수단별 최적 운영구간을 도출하였다. 몬테카를로 불확실성 분석 결과, ±20% 비용 변동 시나리오에서도 2050년 목표단가 (2.15-2.86 USD/kg) 달성 확률이 91.6%로 나타나 시스템의 경제적 견고성을 입증하였다. 이러한 결과는 수소 수입국에서 단계적 수소 인프라 구축 및 증거 기반 정책 설계에 실행 가능한 지침을 제공한다.

### 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., Ghezalbash, 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).

## 아레니우스 방정식 기반 배터리 열화 예측 모델 개발

박훈<sup>1</sup>, 김찬호<sup>2</sup>, 이나은<sup>1</sup>, 김정환<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>연세대학교 이차전지융합공학 협동과정, <sup>2</sup>연세대학교 화공생명공학과

전기차의 안전한 운용과 효율적인 에너지 관리를 위해서는 배터리 관리 시스템(BMS)에서 셀의 충전상태(SOC) 및 단자 전압을 실시간으로 정확하게 추정할 수 있는 모델이 필수적이다. 하지만 실차 환경에서는 광범위한 온도 조건에서 배터리가 운용되며, 온도 변화에 따른 내부 저항 및 시정수 등 등가회로 파라미터의 비선형적 변동은 추정 정확도를 크게 저하시키므로, 이를 물리적으로 반영한 온도 보상 기법이 요구된다.

본 연구에서는 셀 수준의 실험 데이터를 기반으로 등가회로 파라미터의 온도 의존성을 물리적으로 모델링하고, 이를 적응형 상태 추정기와 결합하여 광온도 범위에서의 실시간 SOC 및 전압 추정 방법론을 제안한다.

먼저 60.3Ah급 NMC 리튬이온 셀에 대해 7개 온도 조건(-20, -10, 0, 10, 25, 35, 45°C)에서 충방전 최대 3C의 HPPC 실험을 수행하여 동적 응답 데이터를 확보하고, 이로부터 1-RC Thevenin 등가회로 모델의 파라미터를 온도 및 SOC별로 도출하였다. 도출된 파라미터의 온도 의존성을 아레니우스(Arrhenius) 방정식으로 모델링하여, 기준 온도 대비 임의의 온도에서의 파라미터 값을 활성화 에너지 기반으로 보상하는 구조를 구성하였다. 온도 보상된 파라미터를 상태공간 모델에 반영한 뒤, 확장 칼만 필터(EKF)를 적용하여 SOC와 RC 과도 전압을 실시간으로 추정하였다.

추가적으로, 제안된 모델의 실차 적용 가능성을 검증하기 위해 실제 전기차 운행 중 수집된 전압, 전류, 온도 데이터를 활용하였다. 검증 결과, 전 온도 범위 평균 기준으로 SOC 추정 오차 약 0.5%, 전압 추정 오차 약 0.02V 수준의 높은 정확도를 달성하였다.

이를 통해 아레니우스 기반 온도 보상이 광범위한 운용 조건에서 등가회로 모델의 물리적 일관성을 유지하면서 추정 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 셀 실험, 물리 기반 온도 모델링, 적응형 상태 추정, 실차 검증을 연계한 통합적 방법론을 제시함으로써, 차량용 BMS의 SOC 추정 정확도 및 신뢰성 향상에 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. Weng, Suting, et al. "Temperature-dependent interphase formation and Li<sup>+</sup> transport in lithium metal batteries." Nature communications 14.1, 4474 (2023).
3. Pradhan, Pratik, Dipanjan Pradhan, and Aurobinda Panda. "HPPC-Based ECM Parameter Optimisation of Lithium-ion Battery: A Comparative Analysis of Non-Linear Least Squares Methods." 2025 IEEE Energy Conversion Congress & Exposition Asia (ECCE-Asia). IEEE, (2025).
4. Liaw, Bor Yann, et al. "Correlation of Arrhenius behaviors in power and capacity fades with cell impedance and heat generation in cylindrical lithium-ion cells." Journal of power sources 119, 874-886 (2003).

## 친환경 수소 운송과 저장 효율 향상을 위한 LNG-액화 수소 결합 공정 설계

송경민<sup>1</sup>, 변주영<sup>1</sup>, 고진<sup>1</sup>, 김정환<sup>1,\*</sup>  
연세대학교 화공생명공학과<sup>1</sup>

최근 기후변화에 따른 지구온난화 심화와 탄소배출 저감 요구가 확대됨에 따라, 2050년 탄소중립(Net-Zero) 달성을 목표로 한 탈탄소 에너지 산업이 빠르게 고도화되고 있다. 특히 수소는 산업·발전·모빌리티 등 다분야 적용성이 높아 저탄소 에너지 시스템 구축을 위한 핵심 에너지원으로 평가된다. 이에 수소 기반 에너지망 구현을 위해서는 생산 기술뿐 아니라 저장·운송 단계의 효율 향상을 위한 저장 기술 확보가 필수적이다. 본 연구는 액화천연가스(LNG) 공정에서 발생하는 냉열을 액화수소(LH<sub>2</sub>) 공정에 연계하는 통합 공정을 제안하여, 수소의 생산 및 저장을 동시에 고효율로 구현하고자 하였다. 제안 공정은 LNG를 원료로 스팀메탄개질(SMR, Steam Methane Reforming)을 통해 수소를 생산한 후, 생산된 수소를 저장 목적의 액화 공정으로 이송하는 구조로 구성된다. 이때 LNG 기화 과정에서 발생하는 냉열(-5360.55 kJ/kg, -160.54°C)을 수소 예냉각(pre-cooling)에 활용함으로써, 액화 공정의 냉열 요구량을 저감하고 동시에 열역학적으로 안정한 para-수소로의 전환을 촉진하였다. ortho-para 전환 공정에는 Fe(OH)<sub>3</sub> 촉매를 적용하였으며, 99.8%의 전환 효율을 달성하였다. 또한 액화수소 공정의 극저온 헬륨 냉매는 재순환(recycle) 시스템으로 구성하여 냉동 사이클의 엑서지 효율을 향상시켰다. 결과적으로, LNG-SMR-액화수소 통합 공정에 LNG 냉열 재활용 및 헬륨 냉매 재순환을 도입함으로써, 친환경 수소의 생산과 저장을 통합적으로 달성하는 에너지 효율적 공정 모델을 제시하였다. 본 연구는 수소 기반 탄소중립 이행을 위한 공정 통합 전략의 기술적 타당성을 제시하며, 향후 수소 경제 활성화를 위한 공정 설계·운영 측면의 활용 가능성을 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.

## 국가별 조건에 따른 태양구동 담수화 도입 전략 비교·평가: 5개국 사례연구

김민지<sup>a,1</sup>, 장지은<sup>a</sup>, 최종두<sup>a</sup>, 임종훈<sup>b</sup>, 김정훈<sup>a,†</sup>, 김정환<sup>a,†</sup>

a연세대학교 화공생명공학과,

b고등기술연구원

지속적인 인구 증가와 기후변화로 인해 담수 부족이 심화되고 있다. 본 연구는 다중벽 탄소나노튜브 / 셀룰로오스 나노섬유 기반 광열 증발기를 통합한 태양구동 담수화(SD)를 단효 증발, 다효 증발, 열·기계식 증기 재압축, 역삼투와 비교하여 기술경제(TEA)·환경성(LCA)을 종합 평가한다. 제안 SD 시스템은 태양 조사 하에서 외부 에너지 입력 없이  $1.52 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 의 증발 속도를 달성하고, 높은 내염성을 보인다. 미국·한국·중국·사우디아라비아·페루 5개국을 대상으로 한 경제성 평가는 탄소세가 높고 에너지 비용이 상승하는 조건에서 SD가 소·중규모 운영에서 비용 경쟁우위를 확보함을 보여준다. 환경성 평가 결과, SD가 기존 시스템 대비 지구온난화 잠재력을 75% 이상 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 한편 증발기 원자재의 영향으로 담수 생태독성과 물 소비의 개선 폭은 상대적으로 제한된다. 2020-2050년 탄소가격과 에너지 시장 변동을 반영한 시나리오 분석은 SD의 무배출 담수화 해법으로서의 장기 타당성을 지지한다. 지역별 경제·환경 여건을 반영한 맞춤형 도입이 요구되며, 증발기 소재의 대체·재활용 전략 수립이 향후 과제로 남는다.

### 참고문헌

1. A. J. Lynch, S. J. Cooke, A. H. Arthington, C. Baigun, L. Bossenbroek, C. Dickens, I. Harrison, I. Kimirei, S. D. Langhans and K. J. Murchie, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2023, 10, e1633.
2. S. J. Khan, D. Murchland, M. Rhodes and T. D. Waite, *Critical reviews in environmental science and technology*, 2009, 39, 367-415.

## Quantum-prior기반 Conditional-VAE를 이용한 목표 물성 대상 신규 윤활유 레시피 생성

김찬호<sup>1)</sup>, 이창원<sup>2)</sup>, 박경덕<sup>\*2)</sup>, 김정환<sup>\*1)</sup><sup>1)</sup>연세대학교 화공생명공학과<sup>2)</sup>연세대학교 응용통계학과

공정과 장치의 원활한 작동을 위해선 상황에 적합한 물성을 지닌 윤활유의 사용이 필수적이다. 윤활유의 물성은 구성 요소의 조성비에 의해 결정되므로 조건에 알맞은 윤활유 레시피 설계가 요구된다. 일반적으로 새로운 윤활유 레시피는 기존 데이터를 기반으로 전문가가 샘플 생성 후 물성 측정을 반복하는 식으로 이루어지며 이는 비용과 시간 소모가 크다는 한계가 있다. 이러한 레시피 생성 비용 문제 해결을 위해 근래 여러 연구에서는 생성형 AI를 통해 시간 및 비용 효율적으로 레시피를 샘플링하는 방법론을 채택하였다. 그러나, 이러한 연구들은 요구되는 물성을 지니도록 레시피 생성을 유도하지 못해 무작위로 대량 생성 후 스크리닝하는 비효율적인 접근법을 취하거나, 생성을 위한 Prior 분포  $Z$ 를 정규 분포에서 추출해 실제 데이터 분포와 일치하지 않는 문제가 있다. 본 연구에서는 양자 회로 자체의 확률적 특성을 이용해 정규 분포가 아닌 양자 회로를 통해 실제 데이터 분포와 유사하며 High temperature high shear stress (HTHS) 점도가 높은 레시피를 생성하는 Quantum-prior 기반 cVAE를 개발하였다. 본 연구의 결과를 통해 요구 조건에 적절한 윤활유 레시피의 탐색 비용과 시간 소모를 절감하리라 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).

## 배터리 팩 내 셀 전압 시계열 기반 비지도 통계적 이상 거동 탐지 기법 개발

이나은<sup>1</sup>, 김찬호<sup>2</sup>, 박훈<sup>1</sup>, 김정환<sup>1,2,\*</sup>  
연세대학교 이차전지융합공학협동과정<sup>1</sup>  
연세대학교 화공생명공학과<sup>2</sup>

배터리 팩에서 셀 간 미세한 거동 차이는 팩 성능 저하와 화재 등 안전사고로 이어질 수 있어, 데이터 기반의 조기 이상 징후 탐지가 필수적이다. 최근 딥러닝 기반 방법<sup>1)</sup>도 제안되고 있으나, 현장에서는 라벨 부족과 계산 자원·해석 가능성 제약으로 적용이 용이한 통계적 기법이 요구된다. 본 연구는 25 °C 환경에서 수행된 배터리 팩 내 다수 셀의 전압 시계열 데이터<sup>2)</sup>를 활용하여 별도의 라벨링 없이도 이상 거동을 탐지할 수 있는 통계적 알고리즘을 제안한다. 본 방법은 셀 전압 시계열을 동일 길이로 정렬한 뒤, 동일 팩 내 셀 집합을 그룹으로 보고 그룹 통계를 이용해 셀별 이상도를 산출한다. 이상도는 (1) 평균 기반 Z-score, (2) 전압 변화율(차분) 기반 스코어, (3) IQR과 min-max를 결합한 하이브리드 밴드 위반 누적 스코어로 구성되며, 목적에 따라 단일 지표 또는 앙상블로 확장 적용 가능하다. 또한 정상 데이터에 랜덤 노이즈 및 부분 이상치를 주입해 이상 셀을 합성하고, 지표의 성능을 평가한다. 평가 결과, Z-score 기반 점수에서 정상 셀은 1.2 - 1.5 범위인 반면 이상 셀은 약 1.7 수준으로 관측되었고, 변화율 기반 스코어는 outlier를 주입한 이상 셀에서 약 3 수준의 점수를 나타내 급격한 변화에 민감하게 반응함을 확인했다. 밴드 기반 스코어는 거동이 지속적으로 편이되는 이상 유형(eps\_plus)에 대해 상대적으로 높은 점수를 보여, 이상 형태에 따라 지표 선택 또는 앙상블 구성이 유효함을 시사한다. 본 연구는 라벨이 부족한 현장 환경에서도 통계만으로 이상 징후를 정량화해 모니터링 체계에 적용할 수 있으며, 향후 배터리 관리 시스템의 실시간 상태 진단 및 예지보전 기술로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. Lee, H., & Kim, J. (2022-06-22). Trends in Anomaly Detection using Reinforcement Learning. Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences.
2. Zhang, Xu, Yujie Wang, Duo Yang and Zonghai Chen. "Behavior data of battery and battery pack SOC estimation under different working conditions." Data in Brief 9 (2016): 737 - 740.

## 건식전극용 PTFE 바인더의 제조 및 재활용 공정에 관한 기술경제성 평가

김은서<sup>1,a</sup>, 이상영<sup>1,b</sup>, 김정환<sup>1,a</sup>  
<sup>a</sup>연세대학교 화공생명공학과  
<sup>b</sup>연세대학교 배터리공학과

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. 해당 분석을 통해 원재료 구매 비용, 공정 에너지 소비량, 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).

## 넷제로 정책 프레임워크 기반 호주 수소 생산의 경제성·환경성 평가

김동현<sup>1</sup>, 김유림<sup>2</sup>, 변주영<sup>1</sup>, 이성민<sup>1</sup>, 김정환<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 화공생명공학과, <sup>2</sup>메사추세츠 공과대학교 화학공학과

글로벌 탄소 중립 목표 달성을 위해 청정 수소의 역할이 점차 강조됨에 따라, 본 연구는 호주의 그린, 블루, 그레이 수소 생산에 대한 통합적인 경제성 및 환경성 평가를 수행하였다. 넷제로 시나리오를 바탕으로 2030년, 2040년, 2050년을 목표 연도로 설정하였으며, 특히 재생에너지 발전 설비의 내재 탄소 배출량을 포함함으로써 전과정 평가의 정밀도를 높였다. 경제성 평가를 위해 호주의 탄소세 및 수소 생산 세액 공제 정책을 적용하여 탄소 비용이 반영된 수소 균등화 원가를 산출하였다. 분석 결과, 2050년 기준 수소 균등화 원가 중간값은 그린 수소(태양광) \$1.43/kgH<sub>2</sub>, 그린 수소(풍력) \$2.14/kgH<sub>2</sub>, 블루 수소 \$2.63/kgH<sub>2</sub>, 그레이 수소 \$1.78/kgH<sub>2</sub>로 나타났다. 정책 효과를 반영한 경우, 그레이 수소의 비용은 탄소 비용으로 인해 \$1.97/kgH<sub>2</sub>로 상승한 반면, 그린 수소는 각각 \$1.42/kgH<sub>2</sub>와 \$2.09/kgH<sub>2</sub>로 감소하여 가격 경쟁력이 강화됨을 확인하였다. 본 연구는 호주의 수소 정책이 그레이 수소의 단계적 퇴출과 청정 수소 보급에 미치는 영향을 정량적으로 입증하였으며, 향후 정책 수립 시 재생에너지의 전주기 탄소 배출량 관리의 중요성을 강조하였다.

### 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.

## 해석 가능한 머신러닝 프레임워크 기반 Furfural의 THFA 수소화 반응 촉매 설계

김영근, 최현준, 김예은<sup>1</sup>, 이용희<sup>1</sup>, 이만식<sup>1\*</sup>, 김정환<sup>\*</sup>  
연세대학교 화공생명공학과, <sup>1</sup>한국생산기술연구원

지속 가능한 화학 산업 구축을 위해 바이오매스 유래 화합물인 Furfural을 고부가가치 화학물질인 THFA (Tetrahydrofurfuryl alcohol)로 전환하는 기술이 주목받고 있다[1]. 그러나 Furfural 수소화 반응은 복잡한 반응 경로와 고온, 고압의 반응 조건으로 인해 최적의 촉매 조성 및 공정 조건을 규명하는 데 있어 상당한 자원 집약적 시행착오가 요구된다. 본 연구에서는 문헌 기반 데이터셋과 해석 가능한 머신러닝 (Interpretable machine learning) 프레임워크를 사용하여 THFA 수율 극대화를 위한 촉매 설계 및 최적 공정 조건을 제시한다[2]. 하이퍼파라미터 최적화를 통해 구축된 Catboost 모델은 약 0.94의 높은  $R^2$  score를 달성하며 우수한 수율 예측 성능을 보여주었다. 학습된 모델을 기반으로 SHAP (Shapley Additive Explanations) 분석을 수행한 결과, 전체 변수 중 공정 조건 관련 변수들이 높은 비중을 차지함을 확인하였고, 이를 기반으로 THFA 수율 확보에서는 촉매 조성만큼이나 정밀한 공정 조건을 제안하는 것이 필수적임을 규명하였다. 또한, Partial Dependence Value (PDV) 분석을 통해 공정 인자와 수율 간의 상호작용을 시각화하였고, 최적 공정 조건 범위를 판단하였다. 최종적으로, 기존 문헌에 보고되지 않은 13가지의 bi-metal 촉매 조합을 제안하고 Optuna 기반 최적화를 통해 각 조합의 이론적 최대수율과 최적 공정조건을 도출하였다. 본 프레임워크는 블랙박스 모델의 한계를 극복하고 촉매 설계의 인과관계를 명확히 함으로써, Furfural 수소화 촉매 개발을 가속화할 수 있는 유망한 도구가 될 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. Kim, Y. E., Lee, K. Y., and Lee, M. S., "Morphology-dependent wrinkled silica-supported Pd catalysts for hydrogenation of furfural under mild conditions," *Catalysis Today*, 426, 114392 (2024)
2. Roh, J. W., Park, H. D., and Kim, J. H., "Interpretable machine learning framework for catalyst performance prediction and validation with dry reforming of methane," *Applied Catalysis B: Environmental*, 343, (2024).

## Integrated hydrogen storage systems with cold energy from LNG regasification: Exergy and techno-economic analysis

고진<sup>1</sup>, 변주영<sup>1</sup>, 송경민<sup>1</sup>, 김정환<sup>1\*</sup>  
연세대학교 화공생명공학과<sup>1</sup>

Liquefied natural gas (LNG) cold energy can be integrated into hydrogen systems to lower cooling loads and enhance process efficiency, yet its system-level benefits across production and storage stages remain insufficiently explored. To address this gap, four hydrogen supply configurations combining two production routes (SMR and ATR) with two storage pathways (LOHC and NH<sub>3</sub>) were modeled, and exergy and techno-economic analyses were performed both with and without LNG cold-energy integration. LNG cold energy reduced cooling and conditioning demands in the storage section, providing moderate improvements in exergy efficiency and operating costs across all cases. LOHC-based systems delivered the highest efficiencies and the lowest levelized hydrogen costs, with the SMR-LOHC configuration exhibiting the most favorable performance. In contrast, NH<sub>3</sub>-based systems presented lower efficiencies and higher costs due to irreversibility and substantial energy demands associated with high-pressure synthesis and multi-stage compression. This study offers a quantitative assessment of LNG cold-energy utilization across both production and storage stages and demonstrates its potential to improve the efficiency and economic viability of LNG-based hydrogen systems, while clarifying system-level trade-offs between LOHC and NH<sub>3</sub> storage routes.

### 참고문헌

1. A.O. Oni, K. Anaya, T. Giwa, G. Di Lullo, A. Kumar, "Comparative assessment of blue hydrogen from steam methane reforming, autothermal reforming, and natural gas decomposition technologies for natural gas-producing regions", *Energy Convers. Manag.*, 254, 0196-8904 (2022).
2. Hanna Breunig, Fabian Rosner, Syed Saqline, Dionissios Papadias, Elenya Grant, Kriston Brooks, Thomas Autrey, Rajesh Ahluwalia, Jennifer King, Steve Hammond, "Achieving gigawatt-scale green hydrogen production and seasonal storage at industrial locations across the U.S.", *Nat. Commun.*, 15, 2041-1723 (2024).
3. Manhee Byun, Dongjun Lim, Boreum Lee, Ayeon Kim, In-Beum Lee, Boris Brigljević, Hankwon Lim, "Economically feasible decarbonization of the Haber-Bosch process through supercritical CO<sub>2</sub> Allam cycle integration", *Appl. Energy*, 307, 0306-2619 (2022).

## 탄소가격 조건에서 폴리스티렌 해중합 재활용과 버진 PS의 기술·경제성 비교 분석

변주영<sup>1</sup>, 김동현<sup>1</sup>, 김은서<sup>1</sup>, 황동원<sup>2</sup>, 윤광남<sup>2</sup>, 김정환<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup> 연세대학교 화공생명공학과  
<sup>2</sup> 한국화학연구원

폴리스티렌(Polystyrene, PS)은 전 세계 플라스틱 사용량의 5-6%를 차지하며, 연간 생산량은 2,000만 톤을 상회한다[1]. 그러나 막대한 생산량에 비해 PS 폐기물의 대부분은 매립되거나 소각되어 심각한 환경 부하를 야기하고 있다. 기계적 재활용(Mechanical Recycling)은 물성 저하라는 근본적 한계가 존재하므로, PS를 단량체인 스티렌으로 되돌려 무한 순환하는 해중합 기술은 지속 가능한 순환 경제 구축을 위해 필수적인 대안이다[2-3]. 본 연구에서는 정밀 반응 속도식을 적용한 공정 시뮬레이션을 통해 PS 해중합 재활용 공정과 기존 Virgin PS 생산 공정의 기술적 타당성 및 경제성을 정량적으로 비교 분석하였다. 두 공정 모두 1 TPD 규모를 기준으로 설계하여 비용 구조를 산출하였으며, 특히 탄소세 부과 시나리오에 따른 가격 경쟁력을 확인하였다. 민감도 분석 결과, 두 공정 모두 전체 생산 비용 결정에 있어 원료의 가격이 가장 지배적인 영향 인자인 것으로 나타났다. 본 연구는 PS 해중합 기술이 환경적 이점 뿐만 아니라, 향후 탄소 정책 변화에 따라 Virgin PS 대비 경제적 우위를 확보할 수 있는 잠재력을 규명함으로써 상용화를 위한 기초 자료를 제공한다.

**참고문헌**

1. Grand View Research, "Polystyrene Market Size, Share & Trends Analysis Report 2025-2030" (2024)
2. Lei, H., et al., "Recent advancements in the chemical recycling... of polystyrene waste", Green Chem., 27, 9357-9413 (2025)
3. Zayoud, A., et al., "Pyrolysis of end-of-life polystyrene... Maximizing styrene production", Waste Manag., 139, 85-95 (2022)

## 작용기 선호도 정량화 및 방향성 작용기 네트워크 기반 OLED 분자 탐색 방법론

양태욱, 김민지, 김영근, 김정환\*  
연세대학교 화공생명공학과

다양한 분야에서 신규 분자 탐색에 소요되는 시간과 계산 자원을 줄이는 인공지능 기반 접근이 활발히 연구되고 있다. OLED 분야에서도 구조-물성의 정량적 관계(Quantitative Structure-Property Relationship)[1] 가설에 입각하여 목표 파장의 빛을 방출하는 물질을 설계하는 등의 방식으로 이러한 접근이 활용되고 있다. 이를 위해 조합적 탐색 및 변분 오토인코더와 같은 생성 기법이 활용되고 있으나, OLED 분자들이 실제로 제한된 작용기 조합 내에서 특정한 연결 맥락을 반복적으로 공유한다는 점이 생성 탐색 과정에 명시적으로 고려되지 못하는 한계가 있다. 또한 재료 역할별로 이러한 편향이 어떻게 달라지는지에 대한 정량화 시도도 부족했다. 본 연구에서는 OLED의 서로 다른 역할 (공통층, 호스트, 형광 발광체)에 해당하는 분자 데이터베이스를 각각 구축하고, 근본 작용기 라이브러리를 정의하였다. 이후 작용기 간 공동 출현 빈도에 기반한 점별 상호 정보량 (Pointwise Mutual Information)[2]을 도출하여 작용기 간 구성 선호도를 정량화하였다. 더 나아가 분자를 방향성 비순환 그래프로 표현함으로써, 작용기 간 결합이 형성되는 연결 방향성과 문맥을 구조적으로 추출하였다. 그 결과, 각 물질군마다 선호되는 작용기 조합 및 연결 맥락이 통계적으로 구분됨을 확인하였다. 제안된 방법론은 향후 분자 생성 단계에서 역할에 적합한 작용기 결합을 우선 평가 및 선택하는 구조적 prior로 활용되어, 탐색 공간을 축소하고 계산 비용을 절감하는 데에 기여할 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. Katritzky et al., "QSPR: The Correlation and Quantitative Prediction of Chemical and Physical Properties from Structure", Chemical Society Reviews, 24, 279-287 (1995).", Chemical Society Reviews, 24, 279-287 (1995).
2. Isola et al., "Crisp Boundary Detection Using Pointwise Mutual Information", ECCV 2014, Part III, LNCS 8691, 799-814 (2014).
3. Schölkopf et al., "Towards Causal Representation Learning", arXiv:2102.11107, (2021)

## 혼합 아민의 CO<sub>2</sub> 기액평형 예측을 위한 도메인 지식 기반 머신러닝 모델링

김민재, 주종효<sup>1</sup>, 송호준<sup>2</sup>, 김정환\*

연세대학교 화공생명공학과, <sup>1</sup>University College London, <sup>2</sup>한국생산기술연구원 저탄소에너지그룹

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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 용해도(CO<sub>2</sub> loading)를 정량적으로 예측한다. DEA/AMP, MDEA/AMP, AMP/PZ 세 종류의 혼합 아민 조합에 대해 총 616개의 문헌 데이터를 기반으로 모델을 학습하였으며, R<sup>2</sup> score를 평가지표로 활용하여 예측 정확도를 평가하였다. 제안된 모델은 기존 혼합 아민 예측 모델과 비교하여 평균적으로 향상된 R<sup>2</sup> 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<sub>2</sub> 용해도와 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. "CO<sub>2</sub> capture using monoethanolamine (MEA) aqueous solution: Modeling and optimization of the solvent regeneration and CO<sub>2</sub> desorption process". In: Energy 45.1 (2012), pp. 1042-1058.
2. Ugochukwu E Aronu et al. "Solubility of CO<sub>2</sub> 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 Jürgen 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.

## 광촉매 기반 인공광합성 수소 생산·저장 통합 공정 설계

고진<sup>1</sup>, 조은비<sup>2</sup>, 최현준<sup>1</sup>, 김정환<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 화공생명공학과

<sup>2</sup>건국대학교 화학공학부

인공광합성 수소 생산 중 광촉매 기반 물 분해 방식은 태양광을 직접 이용하여 물을 분해함으로써, 전기적 중간 변환 단계 없이 태양 에너지를 화학 에너지로 전환할 수 있어 에너지 손실 저감 측면에서 높은 잠재력을 가진다. 그러나 낮은 수소 전환 효율과 태양광의 간헐성으로 인해 수소 생산의 변동성은 저장 및 운송 단계의 비용과 에너지 손실을 증가시켜 시스템의 안정적 운용에 한계를 초래한다. 특히 수소는 낮은 부피 에너지 밀도로 인해 별도의 저장 공정이 요구되며, 이에 따른 추가적인 에너지 소비와 설비 비용은 전체 시스템의 경제성을 저해한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 생산된 수소를 안정적으로 저장 및 활용할 수 있는 시스템이 필요하다. 본 연구에서는 메탄(CH<sub>4</sub>), 메탄올(CH<sub>3</sub>OH), 암모니아(NH<sub>3</sub>)와 같은 화학적 수소 캐리어를 활용한 인공광합성 기반 수소 생산과 저장을 통합한 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 수소를 직접 저장하는 대신 수소 캐리어를 활용함으로써 운영 부담을 완화하고 공정 통합 관점에서의 경제성 향상 가능성을 보여준다. 더불어 광합성 수소 기술의 구조적 한계를 보완할 수 있는 공정 설계 방향을 도출하고, 향후 에너지 시장에서의 경쟁력 확보가 가능할 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. Yamada, T., Nishiyama, H., Akatsuka, H., Nishimae, S., Ishii, Y., Hisatomi, T., and Domen, K., "Production of methane by sunlight-driven photocatalytic water splitting and carbon dioxide methanation as a means of artificial photosynthesis", ACS Eng. Au, 3, 352-363 (2023).
2. Imran, S., and Hussain, M., "Emerging trends in water splitting innovations for solar hydrogen production: Analysis, comparison, and economical insights", Int. J. Hydrogen Energy, 77, 975-996 (2024).
3. Zhou, P., Navid, I.A., Ma, Y. et al., "Solar-to-hydrogen efficiency of more than 9% in photocatalytic water splitting". Nature, 613, 66-70 (2023).

## TBP-FeCl<sub>3</sub>-Diethyl Succinate 기반 시너지 SX 염수 리튬 회수 공정 모델링과 경제성 평가

김민지<sup>1</sup>, 김은수<sup>1</sup>, 김정환<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 화공생명공학과

본 연구는 염수(brine)로부터 리튬을 회수할 때 증발지 기반 공정의 장시간 체류, 대면적, 낮은 선택성 등의 한계를 보완하기 위해, TBP-FeCl<sub>3</sub>-diethyl succinate 기반의 시너지 용매추출(SX) 공정을 Aspen Plus로 모델링하고 염수 조성 변화에 따른 공정 성능을 비교 및 평가하였다. 추출-세정-2단 역추출-재생(유기상 리사이클)으로 구성된 PFD를 구축하고 TBP/회석제 부피비, Fe<sup>3+</sup>/Li<sup>+</sup> 몰비, O/A 비, 세정액의 총 Cl<sup>-</sup> 농도 스트리핑액의 H<sup>+</sup> 및 Cl<sup>-</sup> 농도, 재생 조건(MgCl<sub>2</sub> 3.6 M 및 Mg(OH)<sub>2</sub> 첨가) 등 실험 기반으로 최적 공정 설계를 진행하여 주요 변수를 설정한 결과, Mg/Li 가 높은 Great salt lake brine에서 Li 회수율 약 88%를 도출했다. 이때, Mg/Li 비는 276.97에서 3.43까지 크게 저감되어 후단 탄산화 공정에서 리튬이 원활히 추출되었다. SX 공정 이후 증발 기반 농축법(MED,MVR)을 추가로 도입해 탄산화 공정의 capacity를 감소시켜 경제성을 확보했으며, 담수 생산을 통해 추가적인 부가생산물 이익을 도출했다. SX-증발기반 농축-탄산화 통합 공정을 통해 염호 조성별 에너지, 물질의 경제적 최적 공정운전 변수를 도출하였으며, 환경성 평가 및 정책 기반 평가 지표 반영을 통해 통합 공정의 환경 영향 저감 효과를 확인했다. 제안된 통합 공정은 향후 정책 변화에 따라 유동적으로 대응이 가능한 상용화 및 스케일업 후보 공정으로 기대된다.

# 효과적인 폭발 과압 예측을 위한 DMD-CNN-LSTM 기반 예측 모델 개발

이찬우<sup>1</sup>, 김정환<sup>1\*</sup>  
연세대학교 화공생명공학과<sup>1</sup>

## Development of a DMD-CNN-LSTM-Based Prediction Model for Effective Blast Overpressure Prediction

Chanwoo Lee<sup>1</sup>, Junghwan Kim<sup>1\*</sup>

Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University

수소는 무독성이지만 낮은 인화하한계(LFL 4 vol%)와 넓은 인화범위(4~75 vol%), 매우 낮은 최소점화에너지(0.02 mJ)로 인해 정전기 방전 등 미소 점화원에도 폭발 위험이 존재한다[1]. 수소 공급시스템 표준 및 가이드에서는 본딩·접지 등을 통해 정전기 위험을 관리하도록 제시하지만, 본딩·접지 미체결, 장치 부식과 같은 관리적 실패 요인과 유지보수 단계에서의 산소 유입은 정전기 점화로 인한 폭발 사고로 이어질 수 있다[2]. 따라서 수소 폭발 영향평가는 필수적이지만, 다양한 저장·취급 용량 및 시나리오를 포괄하는 CFD 기반 영향 해석은 높은 계산 비용으로 인해 반복 수행에 한계가 있다.

본 연구는 먼저 CFD 프로그램인 OpenFOAM 폭발 해석 솔버인 blastFoam을 Chenwei Wu(2025) TNT 폭발 실험 기반으로 검증을 진행하였다[3]. 검증된 솔버를 이용하여 산업용 수소가스용기의 수소 저장량을 TNT 등가법으로 TNT 질량으로 환산하고 밀폐공간 내부 폭발 시나리오에 대한 수치해석을 수행하였다. 시뮬레이션으로부터 time step별 과압(Overpressure) 분포 데이터를 추출한 뒤, Dynamic Mode Decomposition(DMD)과 CNN-LSTM 기반 머신러닝 모델을 적용하여 다음 time step의 과압 분포를 예측하였다. 예측 결과는 CFD 계산 결과와의 비교를 통해  $R^2$  등 지표로 성능을 평가하였다.

본 연구는 다수의 시나리오 및 대규모 데이터 셋을 기반으로 학습하는 방식이 아니라, 검증된 솔버로 생성한 단일 사고 시나리오의 과압장을 활용해 다음 time step 예측 문제로 모델을 구성하고, 이를 통해 예측 정확도를 확보하면서 전체 시뮬레이션 수행에 필요한 시간적 비용을 절감할 수 있다.

### 참고문헌

1. Dincer, I., & Aydin, M. I. (2023). New paradigms in sustainable energy systems with hydrogen. *Energy Conversion and Management*, 283, 116950.
2. Asia Industrial Gases Association. (2024). Standard procedures for hydrogen supply systems (AIGA 126/24). Asia Industrial Gases Association.
3. Wu, C et al. Zhang, G., He, Y., Liu, L., Liu, J., & Yang, X. (2025). Dynamic response of blast doors enhanced by enclosed-space TNT explosions: Experimental and numerical study. *Defence Technology*, 48, 173-186.

## 폐플라스틱 기반 수소 생산 공정의 단위 공정별 운전 조건 민감도 분석: 열분해, 가스화, SMR 및 SE-WGS

차윤서, 김선우, 배성환, 이지희, 임세영, 허준우, 가성빈\*

울산대학교 화학공학부

본 연구는 열분해, 가스화, SMR, SE-WGS로 구성된 폐플라스틱 수소 생산 통합 공정의 시뮬레이션 프레임워크를 제시하여, 단위 공정의 운전 변수 변화가 시스템 전반에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 원료 종류(PP 및 PE), S/F ratio, 코킹 제약 조건을 변수로 하는 90가지 시나리오의 매개변수 연구를 통해 그 영향을 평가하였다. 물질 흐름 분석 결과, 전체 수소 생산 속도는 초기 열분해 가스 생산량보다는 후단 가스화 및 개질 공정의 운전 조건에 의해 지배적으로 결정됨을 확인하였다. 1 kg 투입 기준, PP가 더 많은 초기 열분해 가스를 발생시켰음에도 불구하고 최종 수소 생산량은 오히려 PE(76.60g)가 PP(69.81g)보다 9.7% 더 높았다. 이러한 차이는 PE 시나리오에서 주입된 더 많은 양의 스팀이 타르 생성을 효과적으로 억제하고 탄소 전환율을 극대화하여 SMR 공정에 더 많은 합성가스를 전달했기 때문이다(99.99% 순도 기준, 최대 수소 생산 속도: PE 98.28, PP 97.32mol/hr). 또한, 시뮬레이션을 통해 개별 단위 공정의 최적화가 전체 공정의 최종 성능을 보장하지 않음을 입증하였다. 즉, 가스화기에서의 중간 생성물( $C_1 - C_3$ ) 생산량을 극대화하는 기준으로 선정된 S/F ratio는 최종 수소 생산 속도를 극대화하는 기준으로 선정한 S/F ratio와 불일치를 보였다. 결과적으로 수소 생산성을 극대화하기 위해서는 개별 단위 공정 관점에 기반한 순차적 최적화가 아닌, 전체를 시스템 레벨의 민감도 분석이 필수적이다. 본 프레임워크는 향후 목적 지향적 공정 설계 및 운전 전략 수립을 위한 정량적 기반을 제공한다.

### 참고문헌

1. Alshareef, R., et al., "Hydrogen Production by Three-Stage (i) Pyrolysis, (ii) Catalytic Steam Reforming, and (iii) Water Gas Shift Processing of Waste Plastic," *Energy & Fuels*, 37, 3894-3907 (2023).
2. Ayuso-Díaz, I., et al., "Progress on waste plastics gasification process: A review of operating conditions, reactors and catalysts for clean syngas production and tar abatement," *International Journal of Hydrogen Energy*, 148, 150000 (2025).
3. Abbas, S. Z., Dupont, V., and Mahmud, T., "Modelling of H<sub>2</sub> production via sorption enhanced steam methane reforming at reduced pressures for small scale applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 1505-1513 (2019).
4. Gokhale, A. A., et al., "On the Mechanism of Low-Temperature Water Gas Shift Reaction on Copper," *Journal of the American Chemical Society*, 130, 1402-1414 (2008).
5. Lee, E., et al., "Numerical Study on Thermochemical Conversion of Non-Condensable Pyrolysis Gas of PP and PE Using 0D Reaction Model," *Clean Technology*, 30, 37-46 (2024).

## **DNN trained dynamic optimization model and adsorbent material comparison for high-purity green hydrogen production by Pressure Swing Adsorption process from DMC-derived Streams**

Dipta Pal and Seongbin Ga \*

School of Chemical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Republic of Korea

### **Abstract:**

Despite of having economic and technological challenges, Direct Methane Cracking (DMC) has strong potential to emerge as a viable alternative to conventional Steam Methane Reforming (SMR) in the near future, primarily due to its inherent advantage of producing hydrogen without CO and CO<sub>2</sub> by-products.

In this study, a detailed dynamic Pressure Swing Adsorption (PSA) process model was developed and simulated until a cyclic steady state was achieved. A data-driven optimization framework was then constructed using a Deep Neural Network (DNN), trained on a large dataset comprising more than 10,000 operating scenarios. Single-objective optimization was performed under a strict purity constraint (>99.99%), targeting maximum hydrogen recovery. Notably, the large-scale training dataset ensured stable predictions within the interior of the edge of the search space, avoiding edge-domain bias.

To evaluate material analysis, in a single-layer and multi-layer PSA bed, the separation process was configured with zeolite 13X and activated carbon in a 1:1 ratio, and compared with a single material. After trained by DNN, the single-layer and multi-layer bed model is capable of predicting optimal operating conditions over specified input parameter ranges, including adsorption pressure, feed velocity, and purge velocity. This integrated approach provides a practical pathway toward more robust and industrially scalable hydrogen purification for DMC-based hydrogen production systems.

### **References:**

1. Tong et al. "Artificial neural network-based optimization of a six-step two-bed pressure swing adsorption system for hydrogen purification", ELSEVIER, 2021
2. Zhang et al. "Optimization of pressure swing adsorption in a three-layered bed for hydrogen purification using machine learning model", Nature, 2025
3. Boscherini et al. "The relevance of thermal effects during CO<sub>2</sub> adsorption and regeneration in a geopolymer-zeolite composite: Experimental and modelling insights", Chemical Engineering Journal, 2021
4. Yang et al. "Experimental and simulation study on efficient CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> separation by pressure swing adsorption on silicalite-1 pellets", ELSEVIER, 2020

## **Dynamic Modeling of Continuous-Bipolar Membrane Electrodialysis: Energy Optimisation and Pulsed Operation**

Jiun Yun<sup>1</sup>, Boram Gu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea

Bipolar membrane electrodialysis (BMED) is an efficient, environmentally friendly technology for producing high-purity acids and bases from salt solutions. While batch processes are well-established, transitioning to continuous operation (cBMED) is essential for industrial scale-up. In this study, we developed a dynamic model for a two-stage cBMED system to simulate the transition from initial transient states to steady state.

Using this dynamic framework, we investigated energy optimisation strategies focused on the system's physical configuration. We performed a systematic analysis of stage-wise membrane area allocation. Optimising the relative membrane area between the first and second stages significantly reduced specific energy consumption while maintaining target product concentration and recovery. Furthermore, the model evaluated the feasibility of pulsed operation in a continuous flow environment. This research underscores the importance of stage-wise design in multi-stage cBMED systems and provides a validated simulation tool for designing energy-efficient, continuous production processes.

## Coupled Equilibrium-Transport Modeling of Ammonia Recovery from Wastewater using Air Gap Membrane Distillation

Sunyoung Oh, Boram Gu\*

School of Chemical Engineering, Chonnam National University

\*Corresponding author: boram.gu@jnu.ac.kr,

### Abstract

Ammonia nitrogen in wastewater is a major pollutant and a recoverable resource. Conventional biological treatment is energy intensive and often unstable under high-ammonia conditions. Membrane distillation (MD) enables selective transfer of volatile ammonia using low-grade heat and has been investigated as an alternative recovery technology [1]. Direct contact membrane distillation (DCMD) provides high water flux but suffers from conductive heat loss and an increased risk of membrane wetting during long-term operations. Air gap membrane distillation (AGMD) introduces a stagnant air layer between the membrane and the condensation surface, which reduces conductive heat transfer and improves thermal efficiency [2]. In AGMD, vapor diffuses across the air gap and condenses on a cooled surface, where a condensate film forms and contributes additional heat and mass transfer resistance. The permeate solution does not directly contact the membrane, which improves operational stability under high-pH and high-salinity conditions relevant to ammonia recovery. This study developed a one-dimensional AGMD model that incorporates ammonia–ammonium equilibrium, Henry’s law-based vapor pressure calculation, vapor transport through membrane pores, diffusion across the air gap, and resistance associated with condensate film formation. The model can be used to quantify the effects of feed temperature, pH, and flow rate on ammonia flux and recovery efficiency. Performance was compared with a DCMD model under identical operating conditions to evaluate thermal efficiency, ammonia selectivity, and operational stability. The results demonstrate that AGMD offers structural and thermodynamic advantages for energy-efficient ammonia recovery from high-strength wastewater. The model provides a mechanistic framework for process design and operating condition optimization.

### References

1. Lawson, K. W., and Lloyd, D. R., "Membrane distillation," *Journal of Membrane Science*, 124(1), 1-25 (1997).
2. Alklaibi, A. M., and Lior, N., "Transport analysis of air-gap membrane distillation," *Journal of Membrane Science*, 255(1-2), 239-253 (2005).
3. Shi, M., He, Q., Xu, R., Sheng, Z., Luo, H., Meers, E., and Yan, S., "Ammonia recovery from anaerobic digestion effluent using membrane distillation: Membrane fouling at different water vapor transfer scenarios," *Chemical Engineering Journal*, 505, 159098 (2025).

## Hybrid Modeling for Predicting Membrane Fouling in Industrial Reverse Osmosis Processes: Integrating First-Principles and Deep Neural Networks

Dongkyu Kim<sup>1</sup>, Sunyoung Oh<sup>1</sup>, Woo Hyung Park<sup>2</sup>, Ik-Jong Choi<sup>2</sup>, Ye Seol Lee<sup>3\*</sup>, Boram Gu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Chemical Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea

<sup>2</sup>CJ BIO Research Institute, CJ CheilJedang Corp., Gyeonggi-do 16495, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Chemical Engineering, University College London, Torrington Place, London, WC1 E 7JE, United Kingdom

<sup>1\*</sup>Corresponding author: boram.gu@jnu.ac.kr,

### Abstract

The rapid advancement of artificial intelligence (AI) and machine learning has initiated a significant paradigm shift in chemical engineering, offering powerful tools for analyzing complex industrial systems. However, a critical gap remains between high-accuracy data-driven models and physically consistent first-principles models (FPM). Deep neural network (DNN) approaches often lack physical interpretability and are highly sensitive to the quality of industrial data. Conversely, traditional FPMs, while robust, struggle to account for complex, time-varying phenomena such as membrane fouling in reverse osmosis (RO) systems.

To bridge this gap, this study proposes a series-structured hybrid model (HBM) that integrates DNN with a mechanistic FPM. The framework utilizes the DNN to estimate unobservable, time-varying fouling parameters such as water permeability, solute permeability, and friction coefficients. These parameters are then fed into an FPM that describes the physical transport of species within a two-stage RO system. The model was trained and validated using 251 days of operational data from an industrial plant in Kerteh, Malaysia.

The results demonstrate that the HBM tracks long-term performance decline. This trend effectively captures the physical phenomenon of decreasing permeability due to fouling and shows a similarity to results reported in previous pilot-scale RO processes. The HBM compares with purely data-driven benchmarks (DNN, LSTM, and SVM) in predictive accuracy. Finally, this research not only improves the understanding of fouling but also offers a transferable framework that could be used for monitoring other complex industrial separation processes.

## Dynamic BOG prediction in LNG holding mode with recirculation

Kang Lee<sup>1</sup>, Boram Gu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Chemical Engineering, Chonnam National University, Korea

As global energy systems shift toward carbon neutrality, LNG is widely used because it serves as low-carbon bridge fuel [1]. However, cryogenic storage at near 111 K, which corresponds to the atmospheric boiling point of methane [2], inevitably generates boil-off gas (BOG). BOG accumulation can increase tank pressure and operational hazards, lead to LNG losses and increased re-liquefaction/compression costs, and raise methane emissions. Moreover, BOG should be evaluated under time-varying conditions since ambient conditions and operating schedules vary in practice,

This study developed a dynamic model of an LNG storage tank in holding mode with a recirculation loop. LNG is pumped out and partially returned; heat ingress into the loop is coupled to tank vapor-liquid mass and energy balances to predict BOG generation. Time-dependent inputs such as ambient temperature, tank level, return flow rate, and effective heat transfer are considered to capture practical scenarios. Simulation results under time-varying conditions are compared with a time-invariant baseline result [3]. The dynamic simulations reveal how time-dependent disturbances affect the magnitude and timing of BOG generation relative to a constant-boundary baseline. These insights can provide a basis for optimizing recirculation schedules to reduce LNG losses and mitigate elevated BOG rates.

### References

1. Usiagu, G. S., Adekoya, O. O., Okoli, C. E., Daudu, C. D., Ekemezie, I. O., and Ayorinde, O. B., "LNG as a bridge fuel in the transition to renewable energy: A global perspective," *World J. Adv. Res. Rev.*, 21 (2), 856-866 (2024).
2. Dobrota, Đ., Lalić, B., and Komar, I., "Problem of Boil - off in LNG Supply Chain," *Trans. Marit. Sci.*, 2 (2), 91-100 (2013).
3. Effendy, S., Khan, M. S., Farooq, S., and Karimi, I. A., "Dynamic modelling and optimization of an LNG storage tank in a regasification terminal with semi-analytical solutions for N<sub>2</sub>-free LNG," *Comput. Chem. Eng.*, 99, 40-50 (2017).

## 문헌 검증 키네틱 기반 암모니아 크래킹 반응기의 1차원 모델링 (One-Dimensional Reactor Modeling of Ammonia Cracking Based on Literature-Validated Kinetics)

Hohyeon Rho, Jinsu Kim\*

Department of Petrochemical Materials, Chonnam National University, Yeosu-si, Republic of Korea.

\* Jinsu.kim@jnu.ac.kr

현재 전세계 에너지 산업은 탄소중립 달성을 목표로 구조적 전환 국면에 있으며, 수소는 차세대 핵심 에너지원으로 주목받고 있다. 특히 암모니아는 높은 체적 에너지 밀도와 기존 인프라 활용 가능성으로 인해 유망한 수소 캐리어로 평가된다. 그러나 암모니아 크래킹 반응은 강한 온도 의존성과 평형제약을 동시에 가지는 비선형 반응계로, 단순 상관식으로는 반응기 거동을 정량적으로 설명하기 어렵다. 따라서 반응 메커니즘을 기반으로 한 물리 기반 모델링 접근이 요구된다.

본 연구는 루테늄 기반 촉매를 사용하는 고정층 반응기를 대상으로, 문헌으로부터 확보한 반응 속도 데이터를 기반으로 키네틱 모델을 검증하고 이를 1차원 반응기 모델로 확장하였다. 모델은 정상상태 및 동적 거동 해석이 가능하도록 구성되었으며, 촉매 질량에 따른 구배를 고려한 1차원 물질수지 방정식을 기반으로 한다. 반응 속도를 우선적으로 파악하기 위하여 단순화된 등온, 등압의 조건을 가정하였다. 검증된 모델을 통해 온도, 압력 및 공간속도 변화에 따른 전환율 및 반응 속도 특성을 정량적으로 분석하였다.

본 연구는 암모니아 크래킹 반응기의 키네틱 검증을 출발점으로 하여, 향후 다성분 질량 수지, 에너지 수지 및 운동량 방정식을 결합한 1차원 비정상 반응기 모델로 확장하기 위한 기초 물리 기반 모델링 프레임워크를 제시한다. 또한 본 모델은 반응 속도 파라미터의 불확실성과 운전 조건 변동성을 고려한 2단계 확률계획 기반 최적 반응기 설계 문제로 확장 가능한 결정론적 기반 모델로 활용될 수 있다.

## 메탄 열분해 반응기 유형별 에너지 성능 비교와 용융 금속 반응기 평가 (Energy Performance Comparison of Methane Pyrolysis Reactor Configurations and Evaluation of Molten Metal Reactors)

Yeonghun Jang, Jinsu Kim\*

Department of Petrochemical Materials, Chonnam National University, Yeosu-si, Republic of Korea.

\* Jinsu.kim@jnu.ac.kr

천연가스 기반 수소 개질 공정에서 수반되는 이산화탄소문제를 해결하기 위한 대안으로, 이산화탄소를 직접 배출하지 않는 메탄 열분해(청록수소) 기술이 주목받고 있다. 기존 문헌은 개별 반응기 성능 연구에 치중되어 있어, 형태별 시스템의 에너지 효율을 비교 및 분석한 연구는 공백이 존재한다. 본 연구에서는 반응기 유형에 기인한 운전 특성 차이를 고려하여 고정층, 유동층 및 용융 금속 반응기를 대상으로 비교 분석을 수행하였다. 특히 연속 탄소 제거가 가능한 용융 금속 반응기의 상용화 잠재성에 주목하였다. 열역학 상수를 기반으로 반응 엔탈피와 미반응 가스 재순환에 따른 현열 부하를 고려하여 시스템 전체의 이론적 에너지 수지를 산출하였다. 분석 결과, 고정층과 유동층은 탄소 침착에 따른 촉매 비활성화로 재순환 에너지가 급격히 증가하는 한계를 보였다. 반면 용융 금속 반응기는 액체 매체 기반의 연속 탄소 제거를 통해 고전환율을 유지하며, 에너지 집약도 측면에서 상대적으로 우수한 공정 타당성을 보였다.

## 습도의 영향을 고려한 DAC의 열역학적 최소 에너지 비교와 분석 (Comparative Analysis of the Thermodynamic Minimum Energy of DAC Considering Humidity Effects)

Juhyeong You, Jinsu Kim\*

Department of Petrochemical Materials, Chonnam National University, Yeosu-si, Republic of Korea.

\* Jinsu.kim@jnu.ac.kr

본 연구는 직접공기포집(Direct Air Capture, DAC) 공정에서 습도를 명시적으로 고려하여 열역학적 최소 에너지를 비교·분석한다. 실제 대기 조건에서 존재하는 습도는 흡착·분리 공정의 열역학적 거동과 최소 에너지 요구량에 중요한 영향을 미치지만, 기존 DAC 에너지 분석에서는 습도를 단순화하거나 부차적인 변수로 취급하기도 한다.

이에 본 연구에서는 습도의 영향을 명시적으로 고려한 DAC 공정의 열역학적 최소 에너지를 정식화하고, 기존의 DAC 공정과 습도를 고려한 DAC 공정에 대한 최소 에너지 요구량을 비교·분석한다. 또한 상대습도와 온도 변화에 따른 최소 에너지의 변화를 정량적으로 평가함으로써, 향후 DAC 및 유사 분리 공정의 에너지 효율적 공정 설계를 위한 지침을 제시한다.

더 나아가, 습도를 고려한 서로 다른 DAC 공정 구성에 대한 상대습도와 온도 변화에 따른 최소 에너지를 비교·분석함으로써, 실제 대기 조건에서 습도가 최소 에너지에 영향을 미칠 뿐만 아니라 공정 설계 및 운전 전략 선택에 있어서도 구조적인 제약과 기회를 동시에 제공하는 핵심 설계 변수임을 보인다. 이를 통해 DAC 기술의 에너지 효율 향상을 위해 습도를 명시적으로 고려한 습도-인지(humidity-aware) 공정 설계가 필수적임을 시사한다.

## 인공지능 융합 인공후각 센서 시스템을 위한 가스 센서 시계열 특성 추출 및 단조성 검증 (AI-Integrated Olfactory Sensor System: Feature Extraction and Monotonicity Validation of Gas Sensor Time-Series Data)

Moonju Ju, Jinsu Kim\*

Department of Petrochemical Materials, Chonnam National University, Yeosu-si, Republic of Korea.

\* Jinsu.kim@jnu.ac.kr

본 연구는 인공지능 융합 인공후각 센서 시스템 개발을 위한 데이터 분석 단계로서, 가스 센서 응답 시계열의 주요 특징 값을 정의하고 정량적으로 분석하였다. 반도체 가스 센서 저항 시계열 데이터를 기반으로 분석을 수행하였다. 해당 데이터는 혼합 가스 조건에서 세 가지 성분 (아세톤, 에탄올, 벤젠)의 농도를 변화시키는 실험 설계에 따라 확보되었다. 전처리 과정에서는 퍼지 구간과 가스 주입 구간을 구분하여 센서 응답을 분리하였다.

이후 저항 변화, 초기 및 후기 기울기, 구간 평균 및 표준편차 등 센서 응답을 대표할 수 있는 특징 값을 정의하고 계산하였다. 특히 두 성분의 농도를 고정하고 다른 한 성분만 단계적으로 변화시키는 조건에서, 각 특징 값의 농도의존성을 수치적으로 비교·분석하였다. 분석 결과 일부 특성 지표는 농도 증가에 따라 일관된 단조 경향을 보였으며, 특정 특징은 분산이 제한적이거나 농도 변화에 대한 민감도가 낮은 것으로 나타났다. 이를 통해 향후 가스 성분 분류 및 농도 예측을 위한 특징 선별 기준을 도출하였다. 본 연구는 가스 성분 판별 모델 구축을 위한 기초 데이터 분석 결과를 제공한다.

## Development of Deep Neural Network-based Tube Metal Temperature Prediction Model and Real-Time Monitoring for Naphtha Cracking Center

권혁원<sup>1,2</sup>, 이재원<sup>3</sup>, 한승필<sup>4</sup>, 김도형<sup>4</sup>, 조형태<sup>5</sup>, 백재호<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국생산기술연구원, <sup>2</sup>연세대학교, <sup>3</sup>한양대학교ERICA, <sup>4</sup>GS칼텍스, <sup>5</sup>경희대학교

Naphtha cracking center (NCC)는 전 세계 에틸렌 생산의 45% 이상을 차지하는 석유화학 산업의 핵심 공정이다. 에틸렌은 납사를 800°C 이상의 고온에서 열분해하여 생산되는데, 이 과정에서 부산물인 코크가 분해관 내부에 침착된다. 이는 열전달 효율 저하로 인한 생산성 감소와 핫스팟 형성에 따른 공정 안정성 저하를 함께 유발한다. 관 내부에 침착된 코크를 제거하기 위해 주기적으로 디코킹을 실시한다. 디코킹 시점은 관 표면 온도(Tube metal temperature; TMT)를 모니터링하여 결정되나, 실시간 측정의 어려움으로 인해 현장 운전원이 4~5일 주기로 직접 측정하고 있다. 그러나 이러한 수동 측정 방식은 측정자 간 편차가 존재하며, 작업자가 고온 환경에 노출되는 위험이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 실제 공정 데이터를 기반으로 TMT를 예측할 수 있는 머신 러닝 기반 Deep Neural Network (DNN) 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 대상 공정 내 36개 지점의 TMT를 예측하였으며, 성능 평가 결과 평균 R<sup>2</sup> 0.95를 달성하였다. 본 연구는 개발된 모델을 가상 센서로 활용하여 미측정 구간의 온도를 실시간으로 모니터링 함으로써, 공정 운전 효율을 극대화하고 현장 안전성을 확보하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords: Naphtha cracking center, Tube temperature, Deep neural network

## 연속식 가스하이드레이트 생산 공정의 설계 및 구현과 응용 가능성 평가

조상균<sup>1,2</sup>, 홍소희<sup>1,3</sup>, 서성덕<sup>1</sup>, Burla Sai Kiran<sup>1</sup>, Subhash Kumar Sharma<sup>1</sup>, 전창수<sup>1</sup>, 사정훈<sup>2\*</sup>, 이주동<sup>1\*</sup>

한국생산기술연구원 해양플랜트기자재R&D센터<sup>1</sup>, 동아대학교<sup>2</sup>, 부경대학교<sup>3</sup>

가스하이드레이트는 저온·고압 조건에서 물과 저분자 가스가 결합하여 형성되는 포집화합물로, 에너지 저장, 소화약제, 수처리 등 다양한 산업 분야에서 활용 가능성이 높다. 그러나 기존 하이드레이트 생산 공정은 대부분 batch 타입 반응기를 기반으로 운전되고 있어, 생성 - 성장 - 회수 단계가 단속적으로 이루어지며 생산성 저하, 열·물질전달 제한, 운전 안정성 확보의 어려움 등의 구조적 한계를 가진다. 특히 대량 생산 및 산업적 스케일업 관점에서 batch 운전은 공정 효율성과 경제성 측면에서 제약 요소로 작용한다. 이에 본 연구에서는 하이드레이트의 생성, 고체 - 액체 분리, 해리 및 회수 단계를 연속적으로 수행할 수 있는 연속식 생산 공정을 설계하고 이를 구현하였다. 설계된 시스템은 반응 영역과 분리 영역을 기능적으로 분리하고, 슬러리 이송 및 압력·온도 제어를 통합함으로써 정상상태 steady state하였다. 이를 통해 기존 batch 공정 대비 생산 연속성 및 공정 안정성을 확보하고자 하였다. 개발된 연속식 공정의 응용 가능성을 두 가지 분야에서 평가하였다. 첫째, 소화가스를 이용한 하이드레이트 기반 고체 소화약제 제조 공정에 적용하여, 연속 생산을 통한 약제 형상 균일성 및 생산성 향상 가능성을 검토하였다. 둘째, 하이드레이트의 선택적 결정화 특성을 활용한 수처리 시스템에 적용하여, 오염물질이 배제된 수화물 상의 연속적 생성 및 분리를 통한 공정 적용 가능성을 분석하였다. 본 연구에서 제안한 연속식 가스하이드레이트 생산 공정은 단순 생산 개념을 넘어, 소화약제 및 수처리 시스템과 연계 가능한 플랫폼형 공정 기술로 확장 가능성을 가진다. 이는 향후 하이드레이트 기반 산업 공정의 상용화 및 스케일업을 위한 핵심 기반 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 사사의 글

본 연구는 정부(행정안전부, 과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 소방청)의 재원으로 한국산업기술기술평가원의 지원을 받아 수행되었습니다 (과제명: 난접근성 화재 대응을 위한 가스하이드레이트 소화탄 및 화재 진압 기술개발사업, 과제번호 : RS-2023-00255479).

## A Study on the Characteristics of RSR Random Packing in the Packing Column

Sungjin Kang<sup>1\*</sup> and Hayoon Park<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Korea Polytechnics University

<sup>2</sup>Low-Carbon Energy Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Republic of Korea

<sup>3</sup>Major of PNU-KITECH Hydrogen and Next Energy Convergence, Department of Carbon Neutrality and Climate Change, Pusan National University, Republic of Korea

In recent years, packing column is widely used as separation processes, such as absorption, desorption, distillation, extraction etc. in the petrochemical, fine chemistry, environmental industries. Packing column is used as a contacting facility for gas-liquid and liquid-liquid systems filled with random packed materials in the column. In special, packing column has the various advantages such as a low pressure drop, economical efficiency, thermally sensitive liquids, easy repairing restoration, and treating noxious gas. The performance of a packing column is highly dependent on the maintenance of good gas and liquid distribution throughout a packed bed, thus this is an important consideration in a design of packing column.

In this study, to study of the geometrical characteristic for RSR random packing experimented dry pressure drop, hydraulic pressure drop, hold-up as a function of liquid load and gas capacity factor in the air, air/water, air-NH<sub>3</sub>/Water systems. Then, based on the results, we can obtained design factors and operating conditions to handle noxious gases. The dry pressure drop of the random packing RSR random packing was linearly increased as a function of gas capacity factor with various liquid load in Air/Water system. This result is lower than those of 35 mm Pall-ring, which is most commonly used in industrial field. And also, it can be shown that the hydraulic pressure drop of RSR random packing is consistently increased by gas capacity factor with various liquid load. Specially, when gas capacity factor with various liquid load is increase from 1.855 to 2.323 kg<sup>-1/2</sup> m<sup>-1/2</sup> S<sup>-1</sup>, hydraulic pressure drop increases around 17%. Finally, the liquid hold-up related to packing volume, which is parameter of specific liquid load depending on gas capacity factor, shows consistently increased by around 3.84 kg<sup>-1/2</sup> m<sup>-1/2</sup> S<sup>-1</sup> of gas capacity factor. However, liquid hold-up significantly increase above it.

### References

1. Billet, R., Packed Towers in Processing and Environment Technology, Wiley-VCH, (1995).
2. McCabe, W. L., Smith, J. C., and Harriott, P., Unit Operations of Chemical Engineering, 7th ed., McGraw-Hill, (2018).
3. Kim, T. S., "The Study of Absorption and Hydraulic character in Packing Tower," *Korean J. Sanitation*, **15**, 4-13 (2000).

## Controlled Synthesis of Monodisperse Spherical Microsilica from Rice Husk via Precipitation Process

Yu bin Lee<sup>1,2</sup>, Su Yeon Ha<sup>1,3</sup>, Ji Yeon Park<sup>1,3</sup>, Byoung-In Sang<sup>3</sup>, Jin Hyung Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Cheongju-si, 28160, Republic of Korea

<sup>2</sup> Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul 08308, Republic of Korea

<sup>3</sup> Department of Chemical Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Republic of Korea

\* leejinh1@kicet.re.kr

### <Instructions for abstract>

Spherical microsilica was synthesized from rice husk-derived silica via a precipitation-based process. The effects of key synthesis parameters, including PEG characteristics, nitric acid concentration, aging temperature and time, were systematically investigated to identify the dominant factor governing particle morphology. Aging time was found to be the most critical parameter, with effective spheronization occurring within a narrow time window around 35.5 h. Under optimized conditions, uniform spherical silica particles with an average diameter of approximately 5.8  $\mu\text{m}$ , narrow size distribution, and high purity (99.7%) were obtained. Structural analyses confirmed that the synthesized silica was amorphous and porous. These results demonstrate that rice husk can be converted into high-quality spherical microsilica through a simple and controllable process without complex pretreatment, indicating its potential applicability in morphology- and purity-sensitive functional material applications.

### References

1. Hwang, J. K., Lee, J. H., and Chun, J., "Facile approach for the synthesis of spherical mesoporous silica nanoparticles from sodium silicate," *Mater. Lett.*, 283, 128765 (2021).
2. Zulfiqar, U., Subhani, T., and Husain, S. W., "Towards tunable size of silica particles from rice husk," *J. Non-Cryst. Solids*, 429, 61–69 (2015).

## Hydrogen and Methanol Generation from Nonwoven Polymer Waste through CO<sub>2</sub>-Assisted Pyrolysis: Techno-Economic and Life-Cycle Assessment

이세영<sup>a</sup>, 조형태<sup>b</sup>, 이재원<sup>a,†</sup>

<sup>a</sup>한양대학교 ERICA, <sup>b</sup>경희대학교

([jwlee11@hanyang.ac.kr](mailto:jwlee11@hanyang.ac.kr))

Indoor PM<sub>2.5</sub> control is expanding, increasing disposal of mask/HEPA-derived nonwoven polymer waste (NPW), while incineration can emit harmful pollutants. We evaluate CO<sub>2</sub>-assisted NPW pyrolysis and observe 6.5× higher CO than N<sub>2</sub>-assisted operation. Using these data, we develop three integrated options: waste-to-hydrogen (WtH), waste-to-methanol with multi-pressure pressure-swing adsorption (WtM<sub>MPSA</sub>), and waste-to-methanol with a pre-reformer and a single pressure-swing adsorption unit (WtM<sub>SPSA</sub>). In the waste-to-hydrogen (WtH) route, CO<sub>2</sub>-pyrolysis syngas is supplemented by syngas from steam methane reforming and upgraded to H<sub>2</sub> via water-gas shift and PSA purification. For methanol production, the waste-to-methanol with multi-pressure PSA (WtM<sub>MPSA</sub>) route uses staged compression, pre-reforming to mitigate CH<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, and multi-pressure PSA for selective CO<sub>2</sub> removal from an H<sub>2</sub>/CO/CO<sub>2</sub> stream (supported by dynamic simulation), whereas the waste-to-methanol with single-PSA (WtM<sub>SPSA</sub>) route adopts a simpler separation scheme. Techno-economic analysis (TEA) and life-cycle assessment (LCA) across grid and renewable electricity show that WtM<sub>SPSA</sub> achieves the lowest LCOE (0.327–0.504 USD/kWh) and, with renewable electricity, the lowest GWP (−4.77 to −5.33 kg CO<sub>2</sub>-eq.), enabling net-negative emissions and supporting CO<sub>2</sub>-assisted NPW pyrolysis as an alternative to incineration.

**Keywords:** Nonwoven polymer waste (NPW), CO<sub>2</sub>-assisted Pyrolysis, Steam Methane Reforming (SMR), Methanol synthesis, TEA&LCA

## CO<sub>2</sub> 보조열분해를 통한 고분자 섬유 폐기물의 메탄올 전환: 기술·경제성 및 환경성 평가

신창범, 고태연, 이재원\*  
Hanyang University ERICA

\*jwlee11@hanyang.ac.kr

메탄올은 대체 연료로서 관심이 증가하고 있으며, 폐기물 흐름과 포집 탄소 같은 재생가능한 자원에서 유래한 그린 메탄올은 이산화탄소(CO) 배출량을 줄일 수 있다. 본 연구는 폴리머계 섬유 폐기물의 CO<sub>2</sub> 보조 열분해(CO<sub>2</sub>-assisted pyrolysis) 합성가스와, 바이오가스수증기개질(BSR, biogas steam reforming)을 통해 생산되는 수소가 풍부한 가스를 이용한 그린 메탄올 통합생산경로를 제안한다.

제안된 공정은 열분해 합성가스 내 부족한 수소 공급을 보완하여 메탄올 합성에 필요한 화학양론적 수소 요구량을 더 효과적으로 맞추도록 설계되었다. 또한 열분해 과정에서 생성되는 CO<sub>2</sub> 를 포집 냉각한 뒤 저장할 수 있도록 구성했다.

실용 가능성을 평가하기 위해 기존의 석탄 및 천연가스를 이용한 메탄올 생산시나리오와 비교해 기술 경제성분석(TEA) 과 전과정평가(LCA)를 수행함. 제안된 경로는 폴리머계 섬유 폐기물을 부가가치 연료로서 순환적 자원 이용 가능성을 제시하며, 원료의 경제적 특성, 에너지 공급 구조, 탄소 관리 및 규제 조건이 유리하게 주어질 경우, 본 시스템은 폐기물 업사이클링과 저탄소 메탄올 생산을 동시에 달성할 수 있는 잠재적 경로임을 시사한다.

### 참고문헌

1. Yu, Z.-Q., et al., Investigation in the pyrolysis of polyester coated on aluminum-based beverage: Thermodynamic properties, product and mechanism, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 185 (2025).
2. Kim, Y., et al., Using CO<sub>2</sub> in pyrolysis to neutralise toxic aromatic compounds derived from blended textile waste, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 183 (2024).

## LSTM-Transformer Autoencoder-Based Anomaly Detection for Multimode Chemical Processes

권혁인<sup>1</sup>, 권혁원<sup>2</sup>, 황상필<sup>3</sup>, 이재원\*  
한양대학교, <sup>1</sup>한국생산기술연구원, <sup>2</sup>GS칼텍스  
\*jwlee11@hanyang.ac.kr

다중모드 화학 공정은 운전 조건, 제품 등급, 원료 특성 변화에 따라 정상 운전 패턴이 지속적으로 변화하는 특성을 가진다. 실제 산업 현장에서는 촉매 활성도 변화, 원료 조성 변동, 제품 등급 전환 등 다양한 요인으로 인해 동일 공정 내에서도 복수의 운전 모드가 공존하며, 각 모드마다 공정 변수의 정상 분포와 시간적 거동이 상이하게 나타난다. 이러한 환경에서 단일 모드 가정을 기반으로 한 기존 통계적 및 데이터 기반 이상 탐지 기법은 모드 전환 구간에서 정상 상태를 이상으로 오인하는 높은 오탐률(False Alarm Rate, FAR) 문제를 유발할 수 있으며, 이는 공정 운전자의 신뢰도를 저하시키는 원인이 된다.

본 연구에서는 이러한 한계를 해결하기 위해 LSTM - Transformer Autoencoder(LTAE) 기반 이상 탐지 프레임워크를 제안한다. 제안된 모델은 LSTM 인코더를 통해 공정 데이터의 시간적 변화를 학습하고, Multi-Head 어텐션 기반 트랜스포머 디코더를 활용하여 장기 의존성과 핵심 정보를 병렬적으로 반영함으로써 정밀한 재구성을 수행한다. 또한 GPU 환경에서 병렬 연산에 최적화된 구조로 설계하여 학습 효율성과 계산 효율을 동시에 향상시켰다. 실제 산업용 폴리에틸렌(PE) 생산 공정의 다중모드 환경에 적용한 결과, 기존 모델 대비 오탐률(FAR)을 크게 감소시키면서도 높은 결함 탐지율(Fault Detection Rate, FDR)을 안정적으로 유지하였다. 이는 제안된 모델이 다중 모드 특성을 가지는 실제 화학 공정 환경에서 신뢰성 있고 효율적인 이상 탐지를 수행할 수 있음을 보여준다.

Keywords: Machine learning, Process monitoring, Anomaly detection, Chemical process

## 다상 유동 CFD 해석을 통한 마이크로 버블 스크러버 성능 개선 연구

고태언<sup>1</sup>, 길진우<sup>2</sup>, 조형태<sup>2</sup>, 이재원<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>한양대학교ERICA, <sup>2</sup>경희대학교

## Study on Improving Microbubble Scrubber Performance Using Multiphase Flow CFD Analysis

Taeon Ko<sup>1</sup>, Jinwoo Gil<sup>2</sup>, Hyungtae Cho<sup>2</sup>, Jaewon Lee<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>Hanyang University ERICA, <sup>2</sup>KyungHee University

대규모 산업 단지 및 발전소 주변에서는 다양한 화학 반응으로 인해 질소산화물(NOx)과 황산화물(SOx) 등 대기오염물질이 지속적으로 배출된다. 마이크로 버블 스크러버는 기-액 접촉 면적을 극대화함으로써 이러한 오염물질의 제거 효율을 향상시키는 기술로 그 효과가 입증되어 왔다. 그러나 마이크로 버블 생성을 위한 공기 주입 과정에서 스크러버 내부 형상 변수에 따라 유동 분포의 비균일성이 발생하며, 이는 마이크로 버블 크기의 불균질성과 짧은 체류 시간을 유발하여 물질전달 효율 및 전체 공정 성능을 저하시킨다.

본 연구에서는 전산유체역학(CFD)을 기반으로 다상 유동 및 난류 모델을 적용하여 마이크로 버블 스크러버 내부 유동 특성을 분석하고, 내부 형상 최적화를 통해 혼합 및 분산 성능을 향상시킬 수 있는 설계안을 도출하고자 하였다. 다양한 공기 및 액체 투입 유량 조건에서 수치 해석을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과를 바탕으로 마이크로 버블의 분포 특성, 유동 균일성, 그리고 체적 물질전달을 간접적으로 평가하였다.

해석 결과 스크러버 내부 형상과 운전 조건이 마이크로 버블 분포 및 체류 특성에 미치는 영향을 정량적으로 규명하였으며, 이를 통해 마이크로 버블 스크러버의 성능 향상을 위한 설계 지침을 제시하였다. 본 연구는 CFD 기반 해석을 통해 마이크로 버블 스크러버의 효율 개선 가능성을 입증함으로써, 향후 대기오염 저감용 스크러버 시스템의 설계 및 운전 최적화를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords: 마이크로버블, 다상유동, 전산유체역학

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 에너지전환

(포스터발표 II)

---

2026년 3월 19일(목) 13:00~15:00  
부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비

## 바이오플라스틱(PLA) 에너지화를 위한 열화학적 가용화 공정의 최적화 및 경제성 분석

김남균, 차재훈<sup>1</sup>, 장순웅<sup>2</sup>, 정우진<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, <sup>2</sup>경기대학교 사회에너지시스템공학과

### Optimization of PLA Hydrothermal Hydrolysis Process for Economic Feasibility Using Box-Behnken Design

NamKyu Kim, JaeHun Cha<sup>1</sup>, SoonWoong Chang<sup>2</sup>, WooJin Chung<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Graduate school of Kyonggi University

<sup>2</sup>Department of Civil and Energy System Engineering, Graduate school of Kyonggi University

기후위기 대응과 환경 규제 강화에 따라 바이오플라스틱 생산량은 2023년 기준 218만톤까지 증가하였으며, 향후 사용량의 급격한 확대가 예상됨에 따라 처리 기술에 대한 관심 또한 높아지고 있다. 혐기성 소화는 바이오플라스틱 처리 과정에서 에너지 회수가 가능한 유망한 기술로 평가되지만, 기존 유기성 폐자원에 비해 낮은 생분해율로 인해 공정 적용에는 한계가 존재한다. 이러한 한계를 개선하기 위해 열가수분해 등 전처리 기술이 제안되어 왔으나, 약품 사용과 에너지 소비 증가로 인해 경제성이 저하되는 문제가 발생할 수 있다.

이에 본 연구에서는 열화학적 가수분해 공정의 운영 인자에 따른 성능 모형을 도출하고, 회귀분석 기반 경제성 평가를 통해 최적 경제성을 확보할 수 있는 가용화 운전조건을 산출하고자 하였다. 대상 물질은 사용량이 많고 생분해율이 낮은 폴리락트산(Poly Lactic Acid, PLA)으로 설정하여 열화학적 가용화 실험을 수행하였다. 가용화율과 경제성에 주요 영향을 미치는 약품 농도, 반응온도, 반응시간을 변동 인자로 설정하고 Box-Behnken Design(BBD)을 적용하여 운영 인자별 최적 성능 모형을 도출하였다. 또한 목표 가용화율을 만족하는 조건별 운영비용을 산정하여 각 운전 인자가 경제성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

이를 통해 최적 운영 효율을 달성할 수 있는 가용화 조건을 제시하고, 검증을 통해 경제성과 소화 효율을 동시에 만족할 수 있는 운전조건을 도출하였다.

#### 참고문헌

1. Cazaudehore, G., Guyoneaud, R., Vasmara, C., Greuet, P., Gastaldi, E., Marchetti, R., Leonardi, F., Turon, R., and Monlau, F. "Impact of mechanical and thermo-chemical pretreatments to enhance anaerobic digestion of poly(lactic acid)." Editor's Choice Article, *Chemosphere*, 297, 133986 (2022).
2. Lee, J., and Lee, J.\* "Thermophilic Anaerobic Digestion of Polyhydroxybutyrate with and without Thermo-alkaline Pretreatment." *Journal of Environmental Science International* 33(2), 121-129 (2024).
3. Oh, G.-G., Hwang, I., Yun, S.-L., Kang, J.-H., Kim, D.-H., Im, S., and Kang, S. "Use of hydrothermal pretreatment for enhanced anaerobic digestion of PBAT and PBS: Biogas production and energy balance." *Journal of Environmental Chemical Engineering*, in press, (2025).

#### 사사

본 연구는 농촌진흥청연구과제 '환경부하 저감형 생분해성 수지 코팅비료 개발(과제번호: RS-2022-RD010278)' 지원에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

## 미세조류 기반 SAF용 지질 수율 향상을 위한 복합 스트레스 배양 분석

이아영, 이건호<sup>1</sup>, 장순웅, 정우진\*  
 경기대학교 사회에너지시스템공학과, <sup>1</sup>경기대학교 환경에너지공학전공

### Analysis of Combined Stress Cultivation for Enhancing Lipid Yield of Microalgae-based SAF

Ayoung Lee, GeonHo Lee<sup>1</sup>, SoonWoong Chang, WooJin Chung\*  
 Department of Civil and Energy System Engineering, Kyonggi University  
<sup>1</sup>Department of Environmental Energy System Engineering, Kyonggi University

전 세계 항공 산업에서 지속가능항공유(Sustainable Aviation Fuel, SAF) 도입 의무화가 확대됨에 따라 HEFA(Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)기반 연료 생산이 증가하고 있다. HEFA 공정은 유지류를 수소화 처리하여 항공유를 생산하는 기술로, 상용화 접근성이 높다는 장점이 있으나 주요 원료인 폐식용유의 공급량이 제한적이어서 급증하는 SAF 수요를 충족하기에 한계가 있다. 이를 대체할 3세대 바이오매스로서 미세조류가 주목받고 있으나, 자연 배양 조건에서는 낮은 지질 생산성과 공정 경제성의 한계가 존재한다. 따라서 미세조류의 대사 특성을 활용한 지질 생산성 향상 전략이 요구된다. 미세조류는 질소 결핍이나 고염 조건과 같은 환경 스트레스 조건에서 세포 성장 관련 대사를 억제하고, 에너지 저장 형태인 중성지질 트라이아실글리세롤(triacylglycerol, TAG)을 선택적으로 축적하는 특성을 지닌다.

이에 본 연구에서는 질소 결핍과 염분 스트레스를 복합적으로 적용하여 미세조류의 TAG 축적을 유도하고, 세포 성장 및 지질 축적 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 질소원을 제거한 BG-11 배지에서 NaCl 농도를 0, 3, 5, 7 g/L로 조절하여 배양하였으며, 세포 성장은 UV-Vis 흡광도 측정을 통해 평가하고, 중성지질 함량은 hexan 추출 후 중량법(gravimetric method)을 이용하여 정량하였다.

실험 결과, 복합 스트레스 조건에서 세포 성장률은 감소하는 경향을 보였으나 TAG 축적량은 유의하게 증가하였다. 이는 질소 제한에 따른 단백질 합성 억제와 염분 스트레스에 따른 삼투압 적응 과정에서 탄소 대사가 저장 지질 합성 경로로 전환되었기 때문으로 해석된다. 본 연구 결과는 스트레스 유도 대사 전환 전략이 미세조류 기반 SAF 원료 생산 공정의 지질 생산성 향상에 기여할 수 있음을 시사한다.

#### 참고문헌

1. Pandit, P. R., Fulekar, M. H., and Karuna, M. S. L., "Effect of salinity stress on growth, lipid productivity, fatty acid composition, and biodiesel properties in *Acutodesmus obliquus* and *Chlorella vulgaris*", *Environmental Science and Pollution Research*, 24(15), 13437-13451 (2017).
2. BLIGH, E G, and W J DYER. "A rapid method of total lipid extraction and purification." *Canadian journal of biochemistry and physiology* vol. 37,8 (1959)
3. Biliani, S E, and I D Manariotis. "Sodium chloride and nitrogen effects on *Chlorella vulgaris* growth and biocommodities production." *Desalination and Water Treatment* 237 (2021): 159-169.

#### 사사

본 연구는 2026년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다. (RS-2023-00255939, 미세조류를 이용한 탄소저감형 바이오항공유 업그레이드용 바이오오일 생산 통합시스템 개발)

# 트리글리세라이드 유래 파라핀계 항공유의 저온특성 조절을 위한 업그 레이딩 공정 연구

장정희\*, 장현성, 이지은, 윤여진, 이재홍, 조윤희  
고등기술연구원

## Study on Upgrading Process for Low-Temperature Property Control of Triglyceride-Derived Paraffinic aviation Fuel

Jung Hee Jang\*, Hyun Sung Jang, Ji Eun Lee, Yeo Jin Yun, Jae Hong Lee, Yun Hye Cho  
Institute for Advanced Engineering

항공 분야의 탄소중립 달성을 위해 트리글리세라이드 기반 원료를 활용한 파라핀계 지속가능항공유(SAF) 생산 기술이 주목 받고 있다. HEFA 공정을 통해 생성되는 포화 직쇄 파라핀계 탄화수소는 항공유 범위의 탄소수 분포를 형성하나, 항공유에 필수적인 저온특성 확보를 위해서는 업그레이딩 공정이 필수적이다. 본 연구에서는 트리글리세라이드 유래 파라핀계 중간생성물을 대상으로 수첨이성질화 반응 특성을 조사하였다. 생성물에 대한 탄화수소 분포의 변화를 조사하였으며, 그 결과 업그레이딩 반응 조건의 조절을 통한 탄화수소화합물의 조성 변화를 관찰하여 업그레이딩 반응 특성을 조사하였다. 그 결과 반응 온도 조건에 따라 업그레이딩 생성물의 탄화수소 분포가 변화되며, 수율과 연료특성에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

**키워드:** 지속가능항공유(SAF), HEFA 공정, 수첨이성질화, 저온유동성, 파라핀계 제트연료

### 사사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (RS-2023-00244070)

장현성\*, 장정희, 이지은, 윤여진, 이재홍, 조윤희

고등기술연구원

## Reaction Characteristics of Bio-feedstocks in Hydrotreating Conversion

Hyun Sung Jang\*, Jung Hee Jang, Ji Eun Lee, Yeo Jin Yun, Jae Hong Lee, Yun Hye Cho

Institute for Advanced Engineering

키워드: 수첨 전환 반응, 바이오 원료, 반응 특성

바이오 연료 생산을 위한 HEFA(Hydro processed Esters and Fatty Acids) 공정에서는 동·식물성 원료의 활용 범위가 점차 확대되고 있으나, 원료에 따른 반응 특성 비교에 관한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 바이오 원료 4종을 선정하여 수첨 전환 반응을 수행하고, 원료에 따른 반응기 내부 온도와 생성물 조성 변화를 비교하였다. 동일한 반응 조건 하에서도 원료에 따라 반응기 내부 온도가 다르게 형성되었으며, 원료별 발열 특성의 차이가 존재함을 확인하였다. 또한, 반응 생성물을 GC-FID로 분석한 결과, 원료에 따라 탄화수소 생성물의 조성 분포에 차이가 존재함을 확인하였다.

## 팽생이모자반과 커피찌꺼기 공동 수열탄화(Co-HTC)에 따른 하이드로차 조성 및 열적 특성 변화

전혜린<sup>1</sup>, 차재원<sup>2</sup>, 정승묵<sup>1</sup>, 박진수<sup>1</sup>, 이성아<sup>1</sup>, 윤효정<sup>1</sup>, 김정훈<sup>1</sup>, 이도연<sup>1,2\*</sup>  
<sup>1</sup>국립한밭대학교 건설환경공학과 <sup>2</sup>국립한밭대학교 환경공학과

### Changes in Hydrochar Composition and Thermal Properties via Co-Hydrothermal Carbonization (Co-HTC) of Sargassum horneri and Spent Coffee Grounds

Hyerin Jeon<sup>1</sup>, Jaewon Cha<sup>2</sup>, Seungmook Jung<sup>1</sup>, Jinsu Park<sup>1</sup>

Seongah Lee<sup>1</sup>, Hyojeong Yun<sup>1</sup>, Jung-Hun Kim<sup>1</sup>, Doyeon Lee<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University

<sup>2</sup>Department of and Environmental Engineering, Hanbat National University

팽생이모자반은 빠른 성장 속도와 매년 대량 발생으로 인해 해안 지역에서 지속적인 처리 문제를 발생 시키며, 고수분 특성상 수거 후 부패가 진행되어 악취 및 해안 경관 훼손 등 심각한 환경 문제를 야기 한다. 이러한 고수분 폐기물을 효율적으로 에너지화하기 위해 수열탄화(Hydrothermal Carbonization, HTC) 기술이 주목받고 있으나, 팽생이모자반은 높은 질소 함량으로 인해 단독 처리 시 하이드로차 수율이 낮을 뿐만 아니라 발생 시기가 특정 계절에 집중되어 원료의 지속적이고 안정적인 공급이 어렵다는 공정상의 한계를 가진다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 식음료 산업에서 지속적으로 발생하며 높은 탄소 함량을 보유한 커피찌꺼기를 보조 원료로 활용하여 팽생이모자반과의 공동수열탄화(Co-HTC)를 수행하였다. 실험 결과, 반응 온도가 증가할수록 하이드로차의 탄소 함량은 증가하고 O/C 및 H/C 비는 감소하여 탄화도가 향상되었으며, 표면의 OH 및 C=O 작용기가 감소하는 것을 확인하였다. 또한 커피찌꺼기 혼합비가 증가할수록 고위발열량이 증가하는 경향을 보였고, 시너지 분석 결과 팽생이모자반과 커피찌꺼기 1:3 혼합비에서 260 °C 조건이 최적 조건으로 나타났다. 아울러 생산된 하이드로차의 연료 활용 가능성을 평가하기 위해 연소 특성 분석을 수행하였다. 이러한 결과는 팽생이모자반의 수열탄화 과정에서 커피찌꺼기 혼합이 하이드로차의 질을 향상시키는 동시에, 계절적 원료 공급의 불안정성을 보완하여 지속 가능한 재생에너지 생산 체계를 구축하는 데 효과적인 전략이 될 수 있음을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. Lu et al.[1] "The Development of Hydrothermal Carbonization Process Using Seaweed-Contained Water as the Reaction Environment and Analysis of Its Impact on Adsorption," *Energy*, 313, 133916 (2024).
2. Williams, A. C., Panagiotopolous, M. K., and Kenneth, H., "Supercritical Fluid Extraction," *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39(10), 4657-4665 (2003).
2. Abe et al.[2] "Progress on Separation and Hydrothermal Carbonization of Rice Husk Toward Environmental Applications," *Global Challenges*, 7(8), 2300112 (2023).
3. Mussatto et al.[5], "Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues," *Food Bioprocess Technol.*, 4(5), 661-672 (2011).
4. Spagnuolo et al.[7] "Hydrochar from Sargassum muticum: a sustainable approach via hydrothermal carbonization," *Sustainable Energy & Fuels*, published (2023)
5. Chambers et al.[8] "Physical and morphological alteration of Sargassum via hydrothermal carbonization with KOH activation," *Biochar and Carbon-Based Materials*, 2024

## 폐플라스틱 가스화 합성가스로부터 나프타 생산을 위한 Fe 기반 Fischer-Tropsch 합성 반응용 촉매 연구

공지현<sup>1</sup>, 권재민<sup>1</sup>, 김민주<sup>1</sup>, 박진우<sup>2</sup>, 장원준<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>아주대학교 환경공학과, <sup>2</sup>아주대학교 에너지시스템학과, <sup>3</sup>아주대학교 환경안전공학과

## Fe-Based Catalysts for Fischer-Tropsch Synthesis toward Naphtha Production from Waste Plastic Gasification Syngas

Ji-Hyeon Gong<sup>1</sup>, Jae-Min Kwon<sup>1</sup>, Min-Ju Kim<sup>1</sup>, Jin-Woo Park<sup>2</sup>, Won-Jun Jang<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Ajou University,

<sup>2</sup>Department of Energy Systems Research, Ajou University,

<sup>3</sup>Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University

본 연구에서는 나프타 생산을 목표로 폐플라스틱 가스화 합성가스를 이용한 Fischer-Tropsch (F-T) 합성 반응용 촉매를 개발하고자 하였다. CO와 CO<sub>2</sub>의 동시 전환을 위해 CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, Ar을 혼합한 가스 (CO:CO<sub>2</sub>:H<sub>2</sub> = 14:14:70 및 15:15:68)를 사용하였으며, 공침법으로 제조한 FeZnAl 촉매에 K를 0 ~ 20 wt.% 범위에서 함침하여 조촉매 효과를 평가하였다. 반응은 300 °C, GHSV 4,502 mL·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup> 조건에서 50시간 동안 수행하였고 trap 온도 (20 및 60 °C)의 영향도 비교하였다. Trap 온도 20 °C에서는 액체 생성물에 CO<sub>2</sub>가 용해되어 net CO<sub>2</sub> 전환율이 과대 산정되는 현상이 관찰되었으며, 신뢰성 있는 전환율 평가를 위해 60 °C 조건이 적합한 것으로 판단하였다. CO:CO<sub>2</sub>:H<sub>2</sub> 비가 15:15:68일 때 14:14:70 조건 대비 CO 전환율, net CO<sub>2</sub> 전환율, C<sub>5+</sub> 선택도가 모두 감소하였다. 특히 net CO<sub>2</sub> 전환율이 0 이하의 값을 나타냈으며, 이는 XRD 분석에서 확인된 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 상의 형성으로 인해 WGS 반응이 우세하게 진행되었기 때문으로 해석된다. K 담지 여부는 탄화수소 선택도에 결정적인 영향을 미쳤다. K가 담지된 촉매는 담지되지 않은 촉매보다 약 2배 높은 C<sub>5+</sub> 탄화수소 선택도를 보였으며, 담지량 차이보다는 K 존재 자체가 선택도 향상에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 다만 과도한 K 담지량은 CO 전환율을 감소시키는 경향을 보였다. 따라서, trap 온도 60 °C 및 CO:CO<sub>2</sub>:H<sub>2</sub> 비 15:15:68 조건에서 10KFeZnAl 촉매가 제조된 촉매 중 가장 우수한 성능을 보여 폐플라스틱 가스화 합성가스를 활용한 F-T 합성 공정에 적합한 촉매 후보군인 것을 확인하였다.

이 연구는 2024년도 산업통산자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비(RS-2024-00432109) 지원과 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(RS-2025-00559638)의 지원을 받아 수행된 연구임.

Cu-Zn-Mg-Al 복합 산화물 촉매의 구조 최적화 및 CO<sub>2</sub> 메탄올 전환

권민석, 이건호, 이승우, 권병찬<sup>1</sup>, 박노국<sup>1\*</sup>, 권재현<sup>2</sup>, 배종욱<sup>2</sup>  
 영남대학교 화학공학과, <sup>1</sup>영남대학교 청정기술연구소, <sup>2</sup>성균관대학교 화학공학부

## Structural Optimization of Cu-Zn-Mg-Al Mixed Oxide Catalysts for CO<sub>2</sub>-to-Methanol Conversion

Min Seok Kwon, Gun Ho Lee, Seung Woo Lee, Byung Chan Kwon<sup>1</sup>, No-Kuk Park<sup>1\*</sup>, Jae Hyun Kwon<sup>2</sup>, Jong Wook Bae<sup>2</sup>

School of Chemical Engineering, Yeungnam University

<sup>1</sup>Institute of Clean Technology, Yeungnam University

<sup>2</sup>School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University

### 초록

석유화학 산업의 핵심 원료인 메탄올은 수소 저장체 및 에너지 전환 매개체로서 탄소중립 전략의 중추적 역할을 담당한다. 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 직접 수소화 반응을 통한 메탄올 합성은 탄소 포집 및 활용(CCUS) 기술의 핵심이며, 경제성이 뛰어난 Cu-Zn-Al계 촉매가 주로 사용된다. 그러나 반응 중 생성되는 물(H<sub>2</sub>O)에 의한 활성점 피독과 입자 소결은 촉매 수명을 단축시키는 주요 원인이다. 이를 개선하기 위해 Mg와 같은 조촉매를 첨가하여 열적 안정성을 높이고 CO<sub>2</sub> 흡착 능력을 증진시키려는 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 Cu-Zn-Mg-Al 4성분계 촉매 제조 시 각 금속 성분의 최적 침전 pH 차이로 인해 발생하는 성분 불균질 문제를 해결하고자 정밀 제어된 합성 전략을 도입하였다. 특히 pH 변화에 가장 민감하여 재용해되기 쉬운 Cu를 별도로 분리하여 처리하고, 선행 성분의 조합을 달리한 다양한 합성 경로로 촉매를 제조하여 비교 분석하였다.

XRF 분석 결과, 모든 시료에서 설계된 성분 함량이 유사하게 유지됨을 확인하였으나, XRD, BET, SEM 분석을 통해 합성 조건에 따른 촉매의 물리화학적 구조 차이를 명확히 관찰하였다. 특히 최적 합성 경로로 제조된 시료에서 가장 우수한 메탄올 합성 성능이 나타났다.

XRD 및 SEM 분석 결과, 최적 경로 촉매는 다른 시료에 비해 결정성이 낮고 무정형(amorphous)에 가까운 특징을 보이며, 입자들이 매우 균일하게 분산된 상태임을 확인하였다. BET 분석 결과 역시 가장 높은 비표면적, 기공 부피 및 기공 크기를 나타냈으며, 이는 XRD 및 SEM 분석에서 관찰된 무정형의 균일한 분산 상태와 일치한다. 이러한 특성은 각 성분이 단계적으로 형성되는 과정에서 계층적으로 배열되어 활성 성분 간 접촉 면적을 극대화했기 때문으로 판단된다. 이러한 계층적 구조는 활성점인 Cu와 ZnO 사이의 시너지 효과를 증진시켜 CO<sub>2</sub> 전환율과 메탄올 선택도를 동시에 향상시킨다.

결과적으로 본 연구는 성분 함량이 동일하더라도 정밀한 합성 전략을 통해 촉매의 분산도와 미세구조를 효과적으로 제어할 수 있음을 입증하였으며, 이는 고성능 CO<sub>2</sub> 수소화 촉매 설계를 위한 중요한 지침을 제시한다.

### 참고문헌

1. Binglian Liang et al., "Investigation on Deactivation of Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst for CO<sub>2</sub> Hydrogenation to Methanol", Industrial & Engineering Chemistry Research, 58(21), 9030-9037 (2019).
2. M. Kittel et al., "Understanding the Complexity of a Catalyst Synthesis: Co-precipitation of Mixed Cu, Zn, Al Hydroxycarbonate Precursors", ChemCatChem, 5(12), 3711 - 3721 (2013).
3. J. Park et al., "Effects of Al<sup>3+</sup> Precipitation onto Primitive Amorphous Cu - Zn Precipitate on Methanol Synthesis over Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst", Catalysts, 9(6), 524 (2019).

## 합성가스 생산 증대를 위한 과일 가공 산업 부산물의 이산화탄소 활용 열분해

박경남<sup>1</sup>, 권일한<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>한양대학교 자원환경공학과

### CO<sub>2</sub>-Assisted Pyrolysis of Fruit Processing Industry Byproducts for Enhanced Syngas Production

Gyeongnam Park<sup>1</sup>, Eilhann E. Kwon<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Resource and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

식품 가공 산업은 계절과 지역에 관계없이 식품의 지속적인 공급을 보장함으로써 식량 안보에 중요한 역할을 한다. 하지만, 가공 식품의 수요가 증가하면서 식품 가공 산업은 식품 공급망 전체에서 발생하는 총 식품 폐기물의 38%를 차지하고 있다. 특히, 과일 가공 산업은 껍질과 씨앗이 과일 전체 무게의 10~70%를 차지한다는 점에서 막대한 양의 폐기물 발생이 불가피하다. 일반적으로 식품 폐기물은 바이오연료를 생산할 수 있는 혐기소화나 발효를 통해 고부가가치화된다. 하지만, 생물학적 공정은 식품 폐기물 내 생분해가 불가능한 물질을 유용물질로 전환하기 어렵다. 이와 달리, 열분해와 같은 열화학적 공정은 식품 폐기물 내 유용 탄소의 전환 비율이 높다. 식품 폐기물의 열분해는 합성가스, 바이오 오일, 바이오차를 생산하며, 각각의 생산 비율은 공정 조건에 따라 조정이 가능하다. 하지만, 바이오 오일은 산소 함량이 높아 연료로써 바로 활용이 어렵다는 점에서 탈산소화를 위한 후처리 공정이 필수적이다. 후처리 공정은 바이오 오일의 경제성을 저하시키는 요인이 될 수 있기에 본 연구는 열분해 공정의 경제적 이점을 강화하고자 이산화탄소를 열분해 분위기 가스로 도입하여 합성가스 생산량을 증대시키고자 한다. 석류껍질과 씨앗을 열분해 원료로 선정하였으며, 질소 및 이산화탄소 조건 열 중량 분석을 통해 온도에 따른 질량 변화를 관측하였다. 석류 껍질과 씨앗을 무게 비로 혼합하여 분석한 결과, 200°C부터 질량이 감소하기 시작하여 600°C까지 대부분의 질량이 휘발되었다. 735°C 이상의 온도에서는 무게 감소가 거의 발생하지 않는 질소 조건과 달리 이산화탄소 조건은 추가적인 무게 감소가 관측되었다. 이는 고체 탄소와 이산화탄소의 반응인 부다드 반응에 의한 결과이다. 이에 따라, 본 연구는 부다드 반응 이하의 온도에서 이산화탄소와 휘발분 간의 반응을 관찰하고자 700°C에서 열분해를 수행하였다. 석류 껍질 및 씨앗의 이산화탄소 조건 1단 열분해는 질소 조건 대비 가스 생산 비율이 증가하였으며, 합성가스의 구성성분 중 하나인 일산화탄소의 생성이 증가하였다. 이는 이산화탄소와 휘발분 간의 반응에 의한 결과이다. 이산화탄소의 반응성을 증대시키기 위해 2단 열분해를 수행하였으며, 후단 온도를 700°C로 설정하였다. 이산화탄소 조건의 합성가스 총 생산량은 28.9 mmol인 반면, 질소 조건의 생산량은 25.6 mmol 이었다. 또한, 후단에 니켈 촉매를 도입하여 가스 생산 비율을 50-55%로 증대시켰으며, 이산화탄소 조건에서 일산화탄소 생성량이 질소의 두 배인 74.1 mmol 이었다. 이는 후단에서의 추가적인 열 공급 및 촉매로 인해 휘발분이 분자량이 더욱 작은 물질로 분해되어 이산화탄소와의 반응 촉진시켰기 때문이다. 본 연구에서는 열분해 공정에 이산화탄소를 도입하여 합성가스 생산을 증대시켰으며, 특히 일산화탄소 생성이 증가하였다. 또한, 지구온난화의 주요 원인인 이산화탄소를 활용하였다는 점에서 열분해 공정의 지속가능성을 향상시켰다.

**사사:** 본 연구성과는 2023년도 정부(교육기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2023-NR077231). 본 연구성과는 2025년도 정부(교육기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2025-25428562).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

# 자원순환

(포스터발표 II)

---

2026년 3월 19일(목) 13:00~15:00  
부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비

## 소수성 분리막 접촉기를 이용한 암모니아 회수 공정의 BBD 기반 운영인자 최적화

이윤아, 차재훈<sup>1</sup>, 정우진, 장순웅\*

경기대학교 사회에너지시스템공학과, <sup>1</sup>경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과

### Optimization of Hydrophobic Membrane Contactor for Ammonia Recovery Using Box-Behnken Design

YunA Lee, Jaehun Cha<sup>1</sup>, Woojin Chung, Soonwoong Chang\*

Department of Civil & Energy system Engineering, Kyonggi University,

<sup>1</sup>Department of Environmental Energy Engineering, Graduate school of Kyonggi University

암모니아는 농업 비료 생산을 비롯한 다양한 산업 공정에서 활용되는 대표적인 기초 화학 물질로, 최근 글로벌 시장 규모는 약 810억 달러 수준으로 평가되고 있다. 그러나 대표적인 암모니아 생산 공정인 Haber-Bosch 합성은 고온·고압 조건에서 운전되는 에너지 집약적 공정으로, 막대한 에너지 소비와 온실가스 배출을 수반한다. 한편, 축산폐수, 소화액, 산업폐수 등 다양한 폐수에는 고농도의 암모늄성 질소가 존재하며, 이는 수계 부영양화 및 독성 문제를 유발하는 주요 오염원으로 작용한다. 현재 질소 제거를 위해 적용되는 생물학적 질산화-탈질 공정은 에너지 소비와 탄소원 요구량이 크고, 질소를 질소가스로 전환하여 자원을 손실시키는 한계를 지닌다.

이에 따라 폐수 내 암모니아를 제거 대상이 아닌 회수 가능한 자원으로 전환하려는 기술적 접근이 주목받고 있으며, 이는 질소 오염 저감과 자원 순환을 동시에 달성할 수 있는 대안으로 평가된다. 특히 분리막 접촉기를 이용한 암모니아 막증류 공정은 낮은 에너지 요구량과 선택적 회수 가능성으로 주목받고 있으나, 공정 실증화를 위한 운전 조건 최적화와 질량 전달 특성에 대한 체계적인 연구는 아직 제한적인 실정이다.

이에 본 연구에서는 소수성 분리막을 적용한 막증류 공정의 주요 운영 인자를 Box-Behnken design(BBD)을 적용하여 운전 인자 간 상호작용을 분석하고 공정 운전 매개변수를 모델링하였다.[1,2] 도출된 회귀모형은 높은 결정계수( $R^2 > 0.99$ )를 나타내어 모델의 적합성을 확인하였다.

본 연구는 막증류 공정 설계를 위한 기초 데이터를 제공하며, 폐수 내 질소 부하 저감과 동시에 암모니아 자원 회수가 가능한 지속가능한 질소 회수 기술로서의 적용 가능성을 제시하였다.

#### 참고문헌

1. Yellezuome, D., Zhu, X., Wang, Z., and Liu, R., "Mitigation of ammonia inhibition in anaerobic digestion of nitrogen-rich substrates for biogas production by ammonia stripping: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112043 (2022).
2. Im, S., Lee, H., Kim, T., Jeon, H., and Jang, A., "Application of non-acid stripping solution in hydrophobic membrane process for high-purity ammonia recovery from high-strength ammonium wastewater," (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.

## 분리막 접촉기 기반 CO<sub>2</sub> 탄산염 전환 공정의 성능 평가

이지섭, 차재훈<sup>1</sup>, 임동재<sup>1</sup>, 정우진<sup>2</sup>, 장순웅<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, <sup>2</sup>경기대학교 사회에너지시스템공학과

### Performance Evaluation of a Membrane Contactor-Based CO<sub>2</sub> Carbonation Process

Ji Seop Lee, JaeHun Cha<sup>1</sup>, Dongjae Yim<sup>1</sup>, Woojin Chung<sup>2</sup>, and Soon-Woong Chang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Graduate School of Kyonggi university, <sup>2</sup>Department of Civil and Energy System Engineering, Kyonggi University

국내 산업 및 에너지 부문에서 발생하는 온실가스 배출량은 연간 약 676.6백만 톤 CO<sub>2</sub>-eq이며 이 중 CO<sub>2</sub> 배출량은 618.3백만 톤으로 전체 배출량의 대부분을 차지하는 주요 감축 대상이다. CO<sub>2</sub>를 화학적으로 안정한 탄산염(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) 형태로 전환·고정하는 기술은 탄소 포집 및 저장(CCUS) 분야에서 재방출 위험을 낮추고 자원화 가능성을 동시에 확보할 수 있는 방안으로 주목 받고 있다. 그러나 기존 sparger 기반 기체-액체 반응 시스템은 기포 형태로 주입된 CO<sub>2</sub>가 액상과 충분히 접촉하기 전에 이탈하여 기체 손실이 발생하며, 이에 따라 기-액 질량전달 효율이 제한되는 문제가 있다.

본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해 비분산형 기체 전달이 가능한 분리막 접촉기를 적용하여, 기존 sparger 시스템과의 질량전달 성능을 비교·평가하였다. 30°C, 5M NaOH 수용액 조건에서 CO<sub>2</sub> 주입 압력을 주요 변수로 설정하고, 두 시스템의 겉보기 기-액 질량전달 계수(apparent gas-liquid mass transfer coefficient)를 비교하였다.

분리막 접촉기는 기체와 액체 사이에 안정적인 기-액 계면을 형성하여 기포 발생에 따른 기체 손실을 억제하고, 계면 면적과 접촉 시간을 증가시킴으로써 CO<sub>2</sub> 흡수 및 반응 효율을 향상시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 분리막 접촉기를 이용한 탄소 광물화 공정이 기존 sparger 시스템 대비 질량전달 효율을 개선할 수 있음을 보여준다.

본 연구에서 도출된 공정 특성 분석 결과는 해수 담수화 공정 등 알칼리성 농축수 자원과 연계한 통합 탄소 포집·광물화 공정 설계를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. GIR(Greenhouse Gas Inventory and Research Center). "2023 National Greengouse Gas Inventory Report of Korea." (2024)
2. Yoo, Miran, et al. "Carbon dioxide capture capacity of sodium hydroxide aqueous solution." *Journal of Environmental Management* 114 (2013): 512-519.
3. Mahmud, Nafis, et al. "Exploring carbon dioxide sequestration in desalination reject brine via NaOH reaction: A kinetics study." *Chemical Engineering Journal* 499 (2024): 156008.
4. Sharma, Harsh, et al. "Boosting carbon capture efficiency: Optimized soda ash production via nanobubble-assisted CO<sub>2</sub> absorption." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 13 (2025): 119559.

#### 사사

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)과 산업통상자원부(MOTIE)의 연구과제 '수요맞춤형 물관리 시설 수요자 원화 기술개발 및 실증(과제번호: RS-2025-02307821)' 지원에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

## 대구경 분리막을 이용한 RO 농축수 탄산광물화 기반 CaCO<sub>3</sub> 회수 공정의 안정 운전 특성 평가

차재훈, 임동재, 정우진<sup>1</sup>, 장순웅<sup>1</sup>

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, <sup>1</sup>경기대학교 사회에너지시스템공학과

### Development and Operational Evaluation of a CaCO<sub>3</sub> Recovery Process for RO Brine Carbonation Using Large-Diameter Membrane

Jaehun Cha, Dongjae Yim<sup>1</sup>, Woojin Chung<sup>1</sup>, Soonwoong Chang<sup>1\*</sup>

Department of Environmental Energy Engineering, Graduate school of Kyonggi University

<sup>1</sup>Department of Civil & Energy system Engineering, Kyonggi University

기후변화에 따른 물 부족 문제가 심화되면서 해수담수화 공정의 역할이 확대되고 있으며, 이에 따라 RO 기반 담수화 공정에서 발생하는 농축수(brine)의 처리 및 자원화에 대한 관심이 증가하고 있다. RO 농축수에는 Ca<sup>2+</sup>와 Mg<sup>2+</sup>와 같은 경도 유발 이온이 고농도로 존재하며, 이는 후속 공정에서 스케일 형성을 유발하여 막 성능 저하와 운영 비용 증가의 주요 원인으로 작용한다. 탄산광물화 공정은 이러한 2가 양이온을 CaCO<sub>3</sub> 및 Mg(OH)<sub>2</sub> 형태로 전환·회수할 수 있어 스케일 제어와 자원 회수를 동시에 달성할 수 있는 기술로 주목받고 있다. 특히 회수된 무기물은 산업용 충전재 및 건설 소재 등으로 활용 가능하여 자원순환 측면에서도 잠재적 가치가 크다.

그러나 침전된 입자를 회수하기 위해 필터프레스 또는 원심분리와 같은 고품물 분리 공정을 적용할 경우, 연속 공정 운전이 어렵고 설비 규모 및 에너지 요구량 증가로 인해 경제성과 공정 단순성이 저하되는 한계가 있다. 또한 입자 축적에 따른 배관 폐색 및 슬러지 취급 문제는 대규모 공정 적용 시 주요 운영 리스크로 작용한다.

이에 본 연구에서는 대구경 Tips 분리막을 적용하여 탄산광물화 반응 과정에서 생성된 CaCO<sub>3</sub> 입자를 안정적으로 회수할 수 있는 공정을 개발하고자 하였다. 실험 결과, 대구경 Tips 분리막을 적용할 경우 유로 폐색 없이 in-out 방식의 안정적 운전이 가능하였으며, 직관 형태의 루멘 사이드로 원수를 유입함으로써 사영역(dead zone) 내 입자 침적 없이 효과적인 파티클 제어가 가능하였다. 또한 자체지지막 구조 특성으로 인해 연속 운전 및 역세 운전 조건에서도 선택층 박리와 같은 막 손상 없이 안정적인 운전이 가능함을 확인하였다.

본 연구 결과는 RO 농축수 내 경도 유발 물질의 자원화와 스케일 제어를 동시에 달성할 수 있는 연속 공정 기반 회수 기술로서의 적용 가능성을 제시하며, 해수담수화 공정의 지속가능성과 운영 효율 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Arianna Q. Tariqi, Luis Cruzado, Anthony P. Straub, Kerri L. Hickenbottom, Vasiliki Karanikola, "Synergistic solutions: reverse osmosis and nanofiltration configurations for efficient brackish water desalination." npj Clean Water 8, 83 (2025)
2. Ali MEA. Nanofiltration Process for Enhanced Treatment of RO Brine Discharge. Membranes, MDPI, 11(3):212, (2021) .

#### 사사

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)과 산업통상자원부(MOTIE)의 연구과제 "수요맞춤형 물 관리 시설 수요자원화 기술개발 및 실증(과제번호 : RS-2025-02307821)" 지원에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

## 우분 및 계분의 초기 성상에 따른 퇴비화 후 최종 퇴비 특성 비교

이환희, 윤다운<sup>1</sup>, 박지은<sup>2</sup>, 정유진<sup>3</sup>, 장순웅<sup>1</sup>, 이윤경<sup>4</sup>, 허진<sup>4</sup>, 정우진<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>경기대학교 사회에너지공학과, <sup>2</sup>세종대학교 환경융합공학과, <sup>3</sup>국립환경과학원, <sup>4</sup>세종대학교 환경융합공학과, 지구환경연구소

### Comparison of Final Compost Properties after Composting of Cattle and Chicken Manure with Different Initial Characteristics

Hawnhee Lee, Daeun Yoon<sup>1</sup>, Jieun Park<sup>2</sup>, Eugene Chung<sup>3</sup>, Soonwoong Chang<sup>1</sup>, Yunkyung Lee<sup>4</sup>, Jin Heo<sup>4</sup>, Woojin Chung<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Social Energy Engineering, Kyonggi University, <sup>2</sup>Department of Environment and Energy, Center for Earth and Environment Research, Sejong University, <sup>3</sup>National Institute of Environmental Research, <sup>4</sup>Department of Environment and Energy, Center for Earth and Environment Research, Sejong University

국내 가축분뇨 발생량은 2023년 약 5천만 톤 수준으로, 국내 유기성 폐자원의 약 70%를 차지하고 있으며, 이 중 약 73%는 퇴비화 공정을 통해 자원화하고 있다. 퇴비화는 가축분뇨 내 유기물을 안정화하고 영양분을 재이용할 수 있는 효과적인 자원 재이용 공정이지만, 미생물 기반 생물학적 처리 공정의 특성상 공정 효율은 투입 원료의 초기 성상에 크게 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 가축분뇨의 초기 성상 차이에 따른 퇴비화 후 최종 퇴비의 이화학적 특성을 비교·평가하고자 하였다. 발생량이 많고 초기 성상 차이가 뚜렷한 우분과 계분을 각각 톱밥과 혼합하고 수분 함량을 조절하여 75L 스크류 교반식 자동 퇴비화 장치를 이용해 60일간 퇴비화를 수행하였다. 퇴비화 초기(0일)와 종료 시점(60일) 시료를 채취하여 주요 이화학적 특성 변화를 분석하였다. 계분은 우분에 비해 분해 용이한 유기물과 총질소 함량이 높아 초기 미생물 활성 및 유기물 분해 속도가 상대적으로 높게 나타났으며, 이에 따라 온도 상승 속도와 최고 온도가 더 높게 나타났다. 또한 유기물 분해에 따른 VS(volatile solids) 감소율 역시 계분에서 더 크게 나타나 유기물 분해가 보다 활발히 진행된 것으로 확인되었다. 퇴비화 종료 시점에서 우분 퇴비는 계분 퇴비에 비해 TOC 함량이 높게 나타났으며, 초기 및 종료 시점의 VS 값 또한 상대적으로 높은 수준을 유지하였다. 이는 우분이 섬유질 기반의 난분해성 유기물 비율이 높아 퇴비화 과정 이후에도 안정화된 유기물 분해가 상대적으로 많이 잔존하기 때문으로 해석된다. 이러한 안정화 유기물을 토양 내 탄소 축적과 입단 구조 형성을 촉진하여 토양 공극 구조와 응집 안정도를 개선하는데 기여할 수 있다. 종합적으로, 계분 퇴비는 높은 질소 함량과 상대적으로 낮은 C/N 비로 인해 질소 무기화 및 양분 공급 기능이 우수하여 유기질 비료 자원으로서 활용 가능성이 높다. 반면, 우분 퇴비는 섬유질 기반의 안정화 유기물 함량이 높아 토양 유기물 축적과 입단 구조 형성에 기여함으로써 토양 물리성 개선 및 토양개량제로서 활용 가능성을 시사한다.

#### 참고문헌

1. Sangotayo, A et al., "Cattle manure application for 12 and 17 years enhanced depth distribution of soil organic carbon and X-ray computed tomography-derived pore characteristics.", Scientific reports, 13(1), 23042, (2023).

#### 사사

본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2025-04-02-123). 이에 감사드립니다.

## 탄소 광물화 기반 막 증류(MD) 전처리 공정: 해수 농축수 내 유가 자원( $Mg^{2+}$ , $Ca^{2+}$ ) 회수 및 스케일 제어

임동재, 차재훈, 정우진<sup>1</sup>, 이인규<sup>1</sup>, 장순웅<sup>1\*</sup>  
경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, <sup>1</sup>경기대학교 환경에너지공학과

### Carbon Mineralization-Based Pretreatment for Membrane Distillation: Recovery of Valuable Resources ( $Mg^{2+}$ , $Ca^{2+}$ ) and Scale Control in Seawater Brine

Dongjae Yim, Jaehun Cha, Ingyu Lee<sup>1</sup>, Woojin Chung<sup>1</sup>, Soonwoong Chang<sup>1\*</sup>  
Department of Environmental Energy Engineering, Graduate school of Kyonggi University,  
<sup>1</sup>Department of Civil & Energy System Engineering, Kyonggi University

세계적으로 물 부족 문제가 심화됨에 따라 해수 담수화는 필수적인 대체 수자원 확보 방안으로 자리 잡고 있다[1]. 그러나 기존 담수화 공정은 필연적으로 고농도 농축수(brine)를 발생시키며[2], 이는 해양 생태계 위협과 처리 비용 증가라는 환경적·경제적 한계를 야기한다[3]. 최근 농축수 감량과 담수 회수율 향상을 위한 대안으로 막 증류(Membrane Distillation, MD) 공정이 주목받고 있지만, 농축수 내 고농도 칼슘과 마그네슘에 의한 무기물 스케일링(scaling)이 상용화의 주요 제약 요인으로 작용하고 있다. 이를 완화하기 위해 화학적 연수화 또는 스케일 방지제 주입과 같은 전처리 방식이 적용되고 있으나, 운영비 증가와 2차 환경오염을 유발할 수 있다는 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 막 증류 공정의 전처리 단계로 탄소 광물화 기술을 적용하여 스케일 문제를 해결하는 동시에 유가 자원을 회수하는 연계 공정을 제안하였다. 제안된 공정은 NaOH와  $Na_2CO_3$ 를 이용한 순차적 침전 반응을 통해 농축수 내 주요 스케일 유발 이온인  $Mg^{2+}$ 와  $Ca^{2+}$ 을 각각  $Mg(OH)_2$ 와  $CaCO_3$  형태로 사전 제거 및 자원화하는 방식이다.

실험 결과, 제안된 전처리 공정은 농축수 내  $Mg^{2+}$ 와  $Ca^{2+}$ 을 효과적으로 제거하였다. 또한, 전처리된 농축수를 적용한 MD 장기 운전 결과, 막 젖음(wetting)에 따른 플럭스(flux) 및 제거율(rejection) 저하 없이 안정적인 운전 성능이 유지됨을 확인하였다.

결론적으로 본 연계 시스템은 해수 농축수의 스케일 문제를 해결하여 MD 공정의 안정성을 확보함과 동시에, 폐자원을 유가 자원으로 전환하고 탄소를 고정하는 순환 경제 실현 가능성을 제시한다.

#### 참고문헌

1. Ben Rouane, D., Ait Errouhi, A., and Mghaiouini, R., "Seawater desalination: A review of technologies, environmental impacts, and future perspectives," *Desalin. Water Treat.*, 324, 101578 (2025).
2. Harby, K., Emad, M., Benghanem, M., Abolibda, T. Z., Almohammadi, K., Aljabri, A., Alsaiari, A., and Elgendi, M., "Reverse osmosis hybridization with other desalination techniques: An overview and opportunities," *Desalination*, 581, 117600 (2024).
3. Park, S., Seo, J., and Kim, T., "Environmental impacts of brine from the seawater desalination plants," *J. Environ. Impact Assess.*, 27(1), 17-32 (2018).

#### 사사

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)과 산업통상자원부(MOTIE)의 연구과제 “수요맞춤형 물 관리 시설 수요자원화 기술개발 및 실증(과제번호 : RS-2025-02307821)” 지원에 의해 이루어진 결과로 이에 감사드립니다.

## 폐기물 가스화 및 CO<sub>2</sub> 전환 기반 고부가가치 화학원료 생산을 위한 탄소 순환형 촉매 반응 시스템 공정 연구

남형석<sup>1\*</sup>, 채호진<sup>1</sup>, 장은호<sup>1</sup>, 정세은<sup>1</sup>, 박경두<sup>1</sup>, 하재언<sup>1</sup>, 김문영<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>경북대학교, 41566 대구광역시 북구 대학로 80

### Process Study on Carbon-Circulating Catalytic Reaction Systems for Waste Gasification and CO<sub>2</sub> Conversion to High-Value Chemical Feedstock

Hyungseok Nam<sup>1\*</sup>, Ho Jin Chae<sup>1</sup>, Eunho Jang<sup>1</sup>, Se-Eun Jeong<sup>1</sup>, Kyungdoo Park<sup>1</sup>, Jaeon Ha<sup>1</sup>,  
Moonyoung kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kyungpook National University, 80, Daehak-ro, Buk-gu, Daegu, 41566, KOREA

본 연구는 생활계 및 전자제품 폐기물의 자원화와 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 효율적 전환을 통해 탄소중립 실현을 위한 지속 가능한 자원 순환 기술 확보를 목표로 한다. 첫째, 폐기물 유동층 가스화 및 열적 변환 연구에서는 전자담배 폐기물 등을 대상으로 고온·고압 열분해 및 가스화 공정을 수행하였다. 오토클레이브 및 유동층 반응기를 통해 합성가스(H<sub>2</sub>, CO 등)와 바이오오일, 바이오차를 생산하였으며, 특히 CaO 및 Ni 기반 촉매를 적용하여 CO<sub>2</sub> 농도를 38.2% 저감하고 가스 품질을 개선하였다. 또한, Kinetic 분석을 통해 활성화 에너지(191.9 - 220.5 kJ/mol)와 확산 및 핵생성 모델 기반의 반응 메커니즘을 규명함으로써 공정 최적화의 기틀을 마련하였다. 둘째, CO<sub>2</sub> 포집 및 동시 건식개질(DFM) 기술에서는 폐자원(달걀껍데기, 패각류) 유래 CaO와 Ni를 결합한 이원기능 촉매(Dual Function Materials)를 졸-겔법으로 합성하였다. 이를 통해 바이오매스 가스화 과정에서 발생하는 CO<sub>2</sub>를 선택적으로 포집함과 동시에 메탄 건식개질을 유도하여 수소 생산을 극대화하였다. TGA-GC 및 고정층 반응기 분석을 통해 원료 공급 조건에 따른 반응 특성을 확인하였으며, 이는 탄소 포집 및 활용(CCU)이 결합된 고농도 수소 제조 공정의 핵심 데이터로 활용될 것이다. 셋째, CO<sub>2</sub> 전환 기반 케미컬 합성 연구에서는 탄소중립 대체 연료 생산을 위해 메탄올의 방향족화(MTA) 반응 특성을 규명하였다. H-ZSM-5 촉매를 활용하여 15 bar의 고압 조건에서 방향족 선택도(최대 37.3%)를 확보하였으며, H<sub>2</sub> 및 H<sub>2</sub>O 등 공동공급 가스가 반응 경로 및 올레핀 중간체 거동에 미치는 영향을 속도론적 모델링(Power-law)으로 정량화하였다. 이는 향후 메탄올 및 BTX 생산을 거쳐 지속가능항공유(SAF)로 이어지는 고부가가치 탄소 활용 공정 설계의 기초 자료가 된다. 결론적으로 본 연구는 폐기물의 열적 변환부터 발생한 탄소의 포집, 그리고 이를 고부가 방향족 화합물로 전환하는 전주기적 촉매 공정 기술을 제시하며, 향후 저탄소 에너지 기반의 효율적인 자원 회수 및 화학원료 생산 공정 개발에 기여할 것으로 기대된다.

사사: 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다. (RS-2024-00410397)

## 저농도 옥살산 침출제에 의한 상용 및 재생 NCM 분말의 리튬 회수 비교 연구

김대원<sup>1\*</sup>, 김희선<sup>1</sup>, 김성원<sup>1</sup>, 김재찬<sup>1</sup>, 최희락<sup>2</sup>  
 고등기술연구원 신소재공정센터<sup>1</sup>, 부경대학교 재료공학과<sup>2</sup>

## Study on Lithium Recovery from Commercial and Recycled NCM Powders using Low-concentration Oxalic Acid Leaching

Dae-Weon Kim<sup>1\*</sup>, Hee-Seon Kim<sup>1</sup>, Seong-Won Kim<sup>1</sup>, Jae-Chan Kim<sup>1</sup>, Hee-Lack Choi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Advanced Materials and Processing Center, Institute for Advanced Engineering

<sup>2</sup>Department of Material Science & Engineering, Pukyong National University

### 초록

전 세계적으로 리튬이온배터리(Lithium-ion Batteries, LIBs)의 수요가 폭발적으로 증가함에 따라, 수명이 다한 폐배터리로부터 유가 금속을 회수하는 재활용 기술의 중요성이 그 어느 때보다 강조되고 있다. 특히 니켈(Ni), 코발트(Co), 망간(Mn)이 포함된 삼원계 양극재(NCM)는 높은 에너지 밀도로 인해 전기자동차 시장의 주류로 자리 잡았으나, 이를 처리하는 기존의 무기산 기반 습식 제련 공정은 심각한 환경오염 문제를 야기한다. 본 연구에서는 친환경 유기산인 옥살산(Oxalic acid,  $C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$ )을 사용하여 시약급 NCM622( $LiNi_{0.6}Co_{0.2}Mn_{0.2}O_2$ )와 실제 폐배터리에서 회수된 재생 R-NCM622 간의 리튬 침출 거동 차이를 분석하고, 그 원인을 결정학적 관점에서 규명하였다.

0.5M 옥살산, 80°C의 조건에서 시약급 분말은 240분 기준 약 99%의 높은 리튬 회수율을 보인 반면, 재생 분말은 약 85%에서 반응이 정체되는 현상을 보였다. XRD 리트벨트 해석(Rietveld Refinement) 결과, 재생 분말은 리튬 이동 통로인 리튬 슬래브 높이(Li Slab Height,  $I_{LiO_2}$ )가 3.0989Å에서 2.4242Å로 급격히 축소되었으며, I(003)/I(104) 비율이 0.1908까지 하락하여 심각한 암염화(Rock-salt transition)가 진행되었음이 확인되었다. 또한, 양이온 혼합(Cation mixing)에 의한 전이금속의 리튬 층 점유가 핀닝 효과(Pinning effect)를 유발하여 리튬의 확산을 원천적으로 차단하고 있음을 확인하였다. 반응 속도론(Kinetics) 분석 결과, 시약급은 Avrami 모델에 부합하며 확산 제어 기작을 따랐으나 재생 분말은 구조적 장벽으로 인해 통상적인 속도 모델에 피팅되지 않았다.

### 참고문헌

- Kim, D. W. et al., "Comprehensive Review on Wet Recycling methods for LiFePO4 Batteries", *Resources Recycling*, 33(5), 28-40 (2024).
- Kim, H. S. et al., "A Study on the Leaching Effect and Selective Recovery of Lithium Element by Persulfate-based Oxidizing Agents from Waste LiFePO4 Cathode", *Resources Recycling*, 31(4), 40-48 (2022).
- Han, D. H. et al., "Optimization of Electrodialysis Process for High-Efficiency Lithium Recovery from Lithium Secondary Battery Process By-products", *J. Wat. Treat.*, 29(5), 11-18 (2021).
- Jung, H. C. et al., "Synthesis of the Nickel-Cobalt-Manganese Cathode Material Using Recycled Nickel as Precursors from Secondary Batteries", *Arch. Metall. Mater.*, 66(4), 987-990 (2021).
- Kim, B. R. et al., "A study on the fabrication of high purity lithium carbonate by recrystallization of low grade lithium carbonate", *J. of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, 31(1), 16-23 (2021).
- Han, D. H. et al., "Study on the Optimum Conditions for Synthesizing a Cathode Active Material Precursor in Li-Ion Batteries Using a Taylor Reactor", *Korean J. Met. Mater.*, 57(6) 60-365 (2019).

### 감사의 글

This research was supported by the Materials & Components Technology Development Program (20018912) funded by the Ministry of Trade, Industry and Resources (MOTIR, Korea).

## 테일러 반응기를 이용한 NCM811 전구체 합성 및 분말 특성 비교 연구

김희선,<sup>1</sup> 정항철<sup>1</sup>, 김대원<sup>1</sup>고등기술연구원 소재부품연구본부 신소재공정센터<sup>1</sup>

## Study on Synthesis of NCM811 Precursor and Powder Characterization Using a Taylor Reactor

Hee-Seon Kim<sup>1</sup>, Hangchul Jung<sup>1</sup>, Dae-Weon Kim<sup>1\*</sup>Advanced Materials and Processing Center, Institute for Advanced Engineering<sup>1</sup>

## 초록

Ni-rich 양극재는 고에너지밀도 리튬이온전지 구현을 위한 핵심 소재로 주목받고 있으며, 전기차 시장에서 주목을 받아 수요가 급증하였다. 이에 금속염의 재활용을 통해 전구체를 재합성하고자하는 연구가 다수 수행되었다. NCM 계열의 양극재 중 NCM811 ( $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ )의 전기화학적 성능은 전구체의 입도 및 형상에 크게 영향을 받는다. 이에 본 연구에서는 테일러 반응기를 이용하여 NCM811 전구체를 제조하고자 하였으며, 반응 시간에 따른 전구체의 분말 특성을 SEM, PSA 분석 결과를 기반으로 비교 분석하였다. 전구체를 합성하기 위하여 2M 농도의 금속염 용액( $\text{Ni}^{2+} : \text{Co}^{2+} : \text{Mn}^{2+} = 8 : 1 : 1$ )과 착화제로 2M 농도의 암모니아수( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) 그리고 pH 조절을 위한 4M 농도의 수산화나트륨( $\text{NaOH}$ ) 수용액을 준비하였고, pH는 테일러 반응기 설정을 활용해 pH 11이 유지될 수 있도록 유량을 자동 조절하였고 금속염 용액 및 암모니아수는 각각 1.98 및 0.6 ml/min의 속도로 주입하였다. 이외 반응 속도는 1,200 rpm으로 유지하고 반응 시간은 pH가 안정화된 이후부터 4시간, 6시간, 8시간, 24시간으로 하여 샘플을 회수하였고, 증류수를 이용해 수세 후 80°C 오븐에 건조한 후 분말 특성을 확인하였다. SEM 분석 결과 초기 4시간의 반응 시간에서는 응집되지 못하고 입자가 흩어져 있었으며, 6시간 이후부터 응집되기 시작하여 24시간 후 회수된 시료는 약 5  $\mu\text{m}$  입도를 가진 구형 분말입을 확인할 수 있었다. 또한, SEM 분석 시 EDS를 활용해 조성을 확인한 결과 초기 투입한 8 : 1 : 1 비율이 그대로 유지됨을 확인하였고, XRD 분석 결과 전형적인 NCM 계열의  $\text{LiNiO}_2$  결정 구조임을 확인하였다. 이에 테일러 반응기를 활용하여 기존 공침법 대비 단시간 내 효율적으로 구형 마이크로 입도의 NCM 전구체를 합성할 수 있었고, 추후 이를 활용하여 NCM 양극재로의 적용 가능할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- Kim, B., et al., "A study on the synthesis of a cathode active material precursor from a waste lithium secondary battery", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.*, **32**(2), 61-67 (2022).
- Han, D., et al., "Study on the optimum conditions for synthesizing a cathode active material precursor in li-ion batteries using a Taylor reactor", *Korean J. Met. Mater.*, **57**(6), 360-365 (2019).
- Kim, D. W., et al., "A Study on the Prior Leaching and Recovery of Lithium from the Spent  $\text{LiFePO}_4$  Cathode Powder Using Strong Organic Acid", *Clean Technol.*, **30**(2), 105-112 (2024).
- Sattar, T., et al., "Investigating the impact of calcination temperature to improve the discharge capacity of  $\text{Li}(\text{Ni}_{0.95}\text{Co}_{0.03}\text{Mn}_{0.02})\text{O}_2$  cathode material synthesized by Taylor-Couette reactor", *J. Power Sources*, **641**, 236853 (2025).
- Lee, S., et al., "Co-precipitation of high-nickel NCM precursor using Taylor-Couette reactor and its characteristics in lithium-ion battery", *Solid State Ionics*, **386**, 116042 (2022).

## 감사의 글

해당 연구는 환경부 재원으로 환경산업기술원 이차전지순환이용성 향상 기술개발 사업(이차전지 재활용 공정 발생 오염물질 저감 기술개발)의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: RS-2024-00345911).

## 옥살산 농도에 따른 아연 및 철 성분의 침출 및 분리 효율 비교 연구

김희선<sup>1</sup>, 진연호<sup>1</sup>, 김성원<sup>1</sup>, 김대원<sup>1</sup>  
고등기술연구원 소재부품연구본부 신소재공정센터<sup>1</sup>

### Study on the leaching and separation efficiency of zinc and iron components according to oxalic acid concentration

Hee-Seon Kim<sup>1</sup>, Yun-Ho Jin<sup>1</sup>, Seong-Won Kim<sup>1</sup>, Dae-Weon Kim<sup>1\*</sup>  
Advanced Materials and Processing Center, Institute for Advanced Engineering<sup>1</sup>

#### 초록

아연 소광 분진(Zinc Fuming Dust)는 아연 제련 과정에서 발생하는 분진으로 주로 ZnO, ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 등의 다양한 결정상이 혼재된 형태로 회수된다. 특히, 아연 성분이 약 77% 그리고 철 성분이 약 12% 함유되어 다량의 아연이 존재하는 유가 자원으로서의 회수가 필수적이다. 이에 아연 제련 공정 중 발생된 분진으로부터 아연 성분을 회수하기 위한 연구가 활발히 진행되었으나, 주로 무기산 기반 습식 제련 공정으로 가스, 폐수 등 심각한 환경오염 문제를 야기시킨다. 본 연구에서는 이러한 환경오염 문제를 해결하고자 비교적 친환경적인 유기산인 옥살산(Oxalic acid)를 사용하여 선택적으로 침출 및 분리하고자 하였으며, 옥살산 농도에 따른 침출율 및 성분별 분리효율을 비교하였다. 옥살산 농도 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300 g L<sup>-1</sup>의 농도로 옥살산 수용액을 제조하였고, 반응 온도 및 시간은 80℃ 및 2시간으로 고정하여 실험을 진행하였다. 침출 후 고액 분리를 통해 고상의 분말과 액상을 분리하였으며, 옥살산 농도가 증가할수록 철 성분의 침출율은 증가하여 ZnC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 형태의 아연 분말을 선택적으로 회수할 수 있었다. 그러나 일정 농도 이상의 조건에서는 철 성분의 침출율은 감소하고 용해도가 낮은 고상의 FeC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 형태로 석출되어 분리 효율이 감소함을 확인할 수 있었다. 최종적으로 회수된 고상의 아연 화합물로부터 [Zn]/[Fe]를 계산하여 분리 효율을 비교하였고, 200 g L<sup>-1</sup>농도 조건에서 철의 침출율이 약 65%로 가장 높고 회수된 분말에서 [Zn]/[Fe] 질량비가 원료 대비 약 3.63배 향상됨을 확인하였다. 이러한 아연과 철 성분의 옥살산 농도에 따라 고상 및 액상으로 옥살레이트화 되는 반응성을 고려하고자 네른스트 식을 활용하여 비교분석하였다.

#### 참고문헌

1. Kim, H. S., et al., "Production of High-Purity Zinc Oxide from Zinc Fuming Dust via Dry Reduction and Wet Leaching Processes," *Korean J. Met. Mater.*, **63**(11), 896-904 (2025).
2. Jin, Y. H., et al., "Recycling Nd Magnet Scraps to Synthesize Carbon-Swaddled Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Anode Material for Lithium-Ion Battery," *Int. J. Energy Res.*, **2025**(1), 3361478 (2025).
3. Kim, D. W., et al., "Oxidation Process for the Etching Solution Regeneration of Ferric Chloride Using Liquid and Solid Oxidizing Agent," *Clean Technol.*, **23**(2), 158-162 (2017).
4. Im, S. and Park, Y., "Facile Separation of Zinc Oxalate to Oxalate and Its Conversion to Glycolic Acid via Electrochemical Reduction," *Clean Technol.*, **29**(1), 46-52 (2023).
5. Lee, J. R., et al., "Development of Environmental-Friendly Cleaning Agents Utilizing Organic Acids for Removal of Scale on the Wall of Cleaning Beds and Distribution Reservoirs in the Waterworks," *Clean Technol.*, **18**(3), 272-279 (2012).

#### 감사의 글

본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(소재부품기술개발사업 패키지형 RS-2024-0044834)

## Sustainable Lithium Recovery from Spent LiFePO<sub>4</sub> Cathodes via Chlorine-Mediated Indirect Electrochemical Leaching

Yun-Seong OK<sup>1</sup>, Kyeong-Ho Kim<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Eco-Friendly Energy Technology, Pukyong National University

Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University

The rapid expansion of electric vehicles (EVs) and energy storage systems (ESSs) has led to a growing volume of spent lithium iron phosphate (LiFePO<sub>4</sub>, LFP) batteries. Although LFP batteries widely adopted due to their safety, thermal stability, and cost advantages, their limited lifespan (5–10 years) necessitates the development of sustainable recycling technologies that support a circular battery economy.

Conventional acid-based recycling processes rely on aqueous leaching and generate large amounts of wastewater, leading to environmental risks and increases treatment costs. Recently, chlorine evolution reaction (CER)-driven lithium extraction systems have been proposed, where electrochemically generated Cl<sup>-</sup>/HOCl redox pairs in NaCl electrolytes enable selective lithium recovery. Even though the proposed electrochemical cell system yields high-purity products such as Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (99.7%) and FePO<sub>4</sub> (99.75%), the use of graphite anodes results in low Faradaic efficiency (FE) for CER, limiting overall energy efficiency and product yield [1].

In this study, we propose an energy-efficient and eco-friendly strategy for selective lithium recovery from spent LFP cathodes using noble metal electrocatalysts (Pt- and Ru-based) as high-FE CER anodes [2]. These catalysts enable in situ regeneration of Cl<sup>-</sup>/HOCl oxidants in neutral NaCl electrolytes, eliminating continuous chemical reagent consumption while accelerating lithium leaching kinetics. Systematic optimization of electrolyte composition, catalyst loading, and current density reveals a strong correlation between CER efficiency and lithium recovery performance.

The proposed system enables efficient lithium recovery without acidic effluents, offering a scalable solution for the anticipated surge in LFP battery waste. By establishing a closed-loop electrochemical pathway that minimizes both chemical and energy inputs, this approach improves the economic feasibility of recycling LFP materials, despite their inherently low recycling value due to lithium being the only recoverable metal. Ultimately, this work presents a practical and sustainable strategy for transforming LFP battery waste into high-purity resources, advancing circular economy-driven battery recycling.

### 참고문헌

1. Zhang, B., He, L., Wang, J., Liu, Y., Xue, X., He, S., Zhang, C., Zhao, Z., Zhou, L., Wang, J., and Wang, Z. L., "Self-powered recycling of spent lithium iron phosphate batteries via triboelectric nanogenerator," *Energy Environ. Sci.*, 16(8), 3423-3440 (2023).
2. Liang, N.-N., Han, D. S., Kim, S., and Park, H., "Selective chlorine evolution reaction using Pt–RuO<sub>2</sub> electrocatalysts in brackish water and seawater at circum-neutral pH and its application to seawater desalination," *J. Environ. Chem. Eng.*, 12, 113622 (2024).

## Controlling Beta Zeolite Acidity for Polypropylene Hydrocracking via Phosphorus Modification

Junseok Na, Jungho Jae<sup>1\*</sup>

School of Chemical Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

In this study, the effects of phosphorus (P) modification on the catalytic performance of Beta zeolite were investigated. The Beta zeolite was modified with P via the impregnation method. XRD patterns confirmed that the crystalline structure of Beta zeolite remained intact regardless of P-loading. NH<sub>3</sub>-TPD analysis revealed that P-modification led to a decrease in the number of strong acid sites while simultaneously increasing the number of weak acid sites. After the subsequent washing with water at 80°C, the P-modified catalyst partially recovered the strong acid sites of the Beta zeolite. According to Janardhan et al. [1], this recovery may result from the removal of weakly adsorbed phosphates that had masked the acid sites. Ni was subsequently impregnated to provide hydrogenation/dehydrogenation functionality. When applied to the hydrocracking of polypropylene (PP), the P-modified and washed catalyst exhibited an increased yield of liquid products in the naphtha-range (C<sub>5</sub>-C<sub>12</sub>), which is attributed to the tailored mild acidity that suppresses over-cracking. These results demonstrate that phosphorus modification combined with a washing step is a promising strategy for tailoring zeolite catalysts for PP upcycling.

### References

1. Janardhan, H. L., G. V. Shanbhag, and A. B. Halgeri. "Shape-selective catalysis by phosphate modified ZSM-5: Generation of new acid sites with pore narrowing." *Applied Catalysis A: General* 471 (2014): 12-18.

## Boron-Modified MFI Zeolites for Selective Fuel-Range Hydrocarbon Production from Polypropylene Hydrocracking

Wansu Kim<sup>1</sup>, Jungho Jae<sup>1,\*</sup>  
Pusan National University<sup>1</sup>

In this study, boron-modified MFI zeolite catalysts were synthesized for the production of fuel-range hydrocarbons via polypropylene (PP) hydrocracking. Boron was incorporated into the MFI framework to control acidity, thereby investigating its effect on product distribution. The structural and acidic properties of the synthesized catalysts were characterized by X-ray diffraction (XRD) and NH<sub>3</sub> temperature-programmed desorption (NH<sub>3</sub>-TPD).

In PP hydrocracking reactions, the boron-modified MFI catalyst achieved a fuel-range hydrocarbon (C<sub>5</sub>-C<sub>20</sub>) yield of up to around 51%, outperforming a conventional commercial catalyst. The enhanced performance is attributed to the appropriate modulation of acid strength through boron incorporation, which suppressed excessive cracking to light gases (C<sub>1</sub>-C<sub>5</sub>) and promoted the selective formation of fuel-range hydrocarbons.

This study demonstrates that boron-induced acid-site engineering in MFI-based zeolites is an effective strategy for converting polyolefins into valuable fuel-range hydrocarbons and provides insights into catalyst design for selective liquid-phase production.

## Unveiling the Role of Joule Heating in Modulating Lattice Distortion and EGOR Activity of CoMo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/NF Catalysts

Giljung Kim, Jungho Jae\*

School of Chemical and Biomolecular Engineering, Pusan National University

Joule heating has recently emerged as a promising synthesis approach for constructing high-performance electrocatalysts due to its ultrafast and energy-efficient characteristics. While this method has demonstrated remarkable activity in reactions such as the oxygen evolution reaction (OER) and hydrogen evolution reaction (HER), its influence on the ethylene glycol oxidation reaction (EGOR) remains largely unexplored. In this study, a CoMo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> catalyst supported on nickel foam (CoMo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/NF-JH) was synthesized via a Joule heating process to investigate how rapid thermal treatment affects catalytic behavior in EGOR. The ultrafast heating induced lattice distortions and modulated the electronic structure of the active sites, thereby influencing the reaction kinetics. Comprehensive electrochemical and structural analyses revealed a strong correlation between the local distortion and the enhanced oxidation activity. This work provides new insight into how Joule heating can be leveraged to tailor the active site environment and optimize the catalytic performance of transition-metal oxides for EGOR and other related electrochemical reactions.

### 참고문헌

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

1. Sun, Jianpeng, et al. "Joule heating synthesis of well lattice-matched Co<sub>2</sub>Mo<sub>3</sub>O<sub>8</sub>/MoO<sub>2</sub> heterointerfaces with greatly improved hydrogen evolution reaction in alkaline seawater electrolysis with 12.4% STH efficiency." *Applied Catalysis B: Environmental* 338 (2023): 123015.

## Joule heating reactor for plastic upcycling using ZSM-5 Abstract

Giljung Kim, Jungho Jae\*

School of Chemical and Biomolecular Engineering, Pusan National University

Conventional furnace-based catalytic pyrolysis systems for plastic recycling are limited by slow heat transfer, uneven temperature distribution, and excessive energy consumption. To overcome these challenges, we developed a Joule heating reactor capable of delivering rapid and localized heating for efficient catalytic conversion of waste plastics. Using ZSM-5 as the catalytic material, this study aims to transform plastic wastes into value-added light olefins and other hydrocarbons under ultrafast thermal conditions. Model compounds such as 1-octene and octane were employed to mimic polymeric structures and to elucidate the reaction mechanism of hydrocarbon cracking within the Joule heating environment. Compared to conventional furnace heating, the Joule heating reactor exhibited improved selectivity toward light olefins and significantly reduced coke formation. These findings highlight the potential of Joule heating as an innovative and energy-efficient strategy for sustainable plastic upcycling and provide mechanistic insights into electrically driven catalytic transformations.

### 참고문헌

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

1. Dong, Son, et al. "Catalytic conversion of model compounds of plastic pyrolysis oil over ZSM-5." *Applied Catalysis B: Environmental* 324 (2023): 122219.

## Structure–Activity Relationships and Selectivity of NiZn-based Catalysts for Electrooxidation of Waste PET-Derived Ethylene Glycol

Min Kyoung Kim<sup>1</sup>, Jungho Jae<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Chemical Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Republic of Korea

Focusing on the electrochemical upcycling potential of waste polyethylene terephthalate (PET), this work aims to develop an alternative anodic oxidation strategy based on the ethylene glycol oxidation reaction (EGOR) by selectively oxidizing ethylene glycol (EG) recovered from PET hydrolysis. Waste PET can be converted into EG and terephthalate via chemical or alkaline hydrolysis, and the recovered EG can be electrochemically upgraded into value-added organic acids such as formic acid and glycolic acid. Here, highly active and durable Ni- and Zn-based anodic electrodes are targeted as the core platform, with emphasis on improving electrode stability and characterizing product-selectivity trends. By systematically tuning catalyst composition, nanostructure, and synthesis routes (e.g., coprecipitation, hydrothermal methods, and electrochemical deposition), key performance descriptors governing EGOR will be identified, and the reaction pathway and kinetics will be quantitatively assessed. The anticipated outcomes include enhanced green-hydrogen production efficiency through reduced electricity consumption, increased process value via organic-acid co-production, improved system safety, and the establishment of design principles for next-generation high-efficiency electrolyzers. Ultimately, these advances are expected to strengthen energy-conversion technology competitiveness toward the hydrogen economy and carbon neutrality.

### References

1. Zhao, J-J., Zhu, H-R., Huang C-J., Yin, M-H., and Li, G-R., "Recent advances of ethylene glycol oxidation reaction: catalytic mechanism, catalyst design and applications," *J. Mater. Chem. A.*, 5(13), 3236-3272 (2025).

## Hydroconversion of polyethylene over Ru-based catalysts

Joonkeol Yoon<sup>1</sup>, Hyeong Dong Jung<sup>1</sup>, Junho Suh<sup>1</sup>, Yong Hyun Lim<sup>1</sup>, Jae-soon Choi<sup>2</sup>, Jungup Bang<sup>2</sup>,  
Do Heui Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Chemical and Biological Engineering, Institute of Chemical Processes, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea, <sup>2</sup>Catalyst R&D, LG Chem., Daejeon, Republic of Korea

The rapid growth of plastic production has caused a global plastic waste problem. Polyolefins, such as polyethylene (PE) and polypropylene (PP), make up about 60% of plastic waste, most of which is landfilled or incinerated. Only about 9% of plastic waste is recycled, mainly through value-downgrading mechanical recycling [1]. Therefore, upcycling polyolefin waste has gained significant attention. Both hydrogenolysis and hydrocracking enable chemical recycling of polyolefins under mild conditions, with hydrocracking over bifunctional catalysts providing faster reaction rates and higher selectivity toward fuel-range products [2]. Herein, we investigated the effects of support and Ru dispersion on hydrogenolysis activity to overcome its limitations. Furthermore, Ru was incorporated into zeolite BEA to facilitate a tandem hydrogenolysis-hydrocracking pathway. This work highlights the potential of Ru-based bifunctional catalysts for efficient chemical upcycling of polyolefin waste.

In hydrogenolysis, it is important not only to increase the liquid yield but also to minimize the formation of undesirable methane. We compared the catalytic activities of four different supports, and among them, Ru/TiO<sub>2</sub> exhibited the lowest methane yield. We further investigated the effect of Ru dispersion on hydrogenolysis using Ru/TiO<sub>2</sub>. The hydrogenolysis activity and Ru dispersion followed a volcano-type relationship, where a Ru dispersion of 20% resulted in the highest PE conversion, liquid yield, and methane yield. When the Ru dispersion decreased to 7%, the activity dropped sharply, indicating that an optimal Ru particle size is essential for enhancing hydrogenolysis activity. Ru/BEA showed a notable increase in both naphtha yield and isomer fraction, suggesting that, unlike Ru/TiO<sub>2</sub>, the reaction proceeded partially through the hydrocracking pathway. However, the methane yield also increased significantly, which can be attributed to the extended residence time of reactants and intermediates within the zeolite micropores, leading to overcracking via Ru-catalyzed hydrogenolysis. These results indicate that, in order to enhance catalytic activity while suppressing methane formation, it is crucial to inhibit Ru-catalyzed hydrogenolysis while promoting the hydrocracking pathway.

### References

1. Wang, Haokun, et al., "Ce-promoted PtSn-Based catalyst for hydrocracking of polyolefin plastic waste into high yield of Gasoline-Range products," ACS Catalysis, 13(24), 15886-15898 (2023)
2. Liu, Sibao, et al., "Plastic waste to fuels by hydrocracking at mild conditions," Science Advances, 7(17), eabf8283 (2021)

## Molecular-Level Analysis of Carbonation-Induced Changes in Cement Hydrates Using Raman Spectroscopy

Seong Deok Seo<sup>1</sup>, Sang-Gyu Cho<sup>1</sup>, Sohee Hong<sup>1</sup>, Changsu Jeon<sup>1</sup>, Ju Dong Lee<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, Dongnam Technology Application Division

(\*Email address: julee@kitech.re.kr)

CCUS technology has emerged as a critical strategy for mitigating CO<sub>2</sub> emissions, the primary contributor to global warming. Among various approaches, carbonation curing of cement-based materials offers enabling net CO<sub>2</sub> sequestration. In this study, we investigated the physicochemical and microstructural changes in cement hydrates induced by the incorporation of sodium bicarbonate (NaHCO<sub>3</sub>) as a CO<sub>2</sub> source.

Commercial Portland cement was mixed with varying amounts of NaHCO<sub>3</sub> (0–1 g), and the early-stage hydration behavior was monitored using Raman spectroscopy. Spectral measurements were conducted at 10-minute intervals over a period of 90 minutes to observe the evolution of reaction products and the behavior of water molecules within the hydrating system. Raman spectroscopy, as a non-destructive analytical technique, provides detailed molecular-level information, enabling the identification of microscopic changes in chemical bonding during hydration.

The results revealed the formation of cement hydrates characterized by the emergence of a hydrate-related Raman band at approximately 3620 cm<sup>-1</sup>, corresponding to O–H stretching vibrations associated with bound water in hydration products. Furthermore, the reaction between cement components and NaHCO<sub>3</sub> facilitated the formation of calcium carbonate phases, including both crystalline calcite and amorphous calcium carbonate (ACC). The incorporation of NaHCO<sub>3</sub> was found to influence the hydration kinetics, promote early carbonation reactions, and modify the microstructure of the cement matrix.

These findings demonstrate that sodium bicarbonate can effectively induce carbonation reactions during the early hydration stage, contributing to potential CO<sub>2</sub> sequestration.

### **Acknowledgement**

This work was supported by the Korea Institute of Industrial Technology and Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology (Project Number: 1761002860, RS-2023-00255479).

### **References**

1. D. Zhang, Z. Ghoulah and Y. Shao, “Review on carbonation curing of cement-based materials”, *J. CO<sub>2</sub> Util.*, **21**, 119-131 (2017).

## **Impact of Ball-Milling and Thermal hydrolysis on Physico-chemical Properties and Anaerobic Digestion Kinetics of Mixed Slaughterhouse and Agricultural Wastes**

Won Jae Lee<sup>1,2</sup>, Sang Heon Lee<sup>1,3</sup>, Oh Hyun Gweon<sup>1</sup>, Byoung Seung Jeon<sup>1</sup>, Young Wook Go<sup>3</sup>, Chang Sook Jin<sup>4</sup>, Young Seop Yu<sup>4</sup>, Byoung-In Sang<sup>3</sup>, and Jin Hyung Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Cheong-ju 28160, Republic of Korea

<sup>2</sup> Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

<sup>3</sup> Department of Chemical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

<sup>4</sup> KEC System Co., Hwasung 18244, Republic of Korea

Slaughterhouse by-products are promising substrates for anaerobic digestion due to their high lipid and protein content. However, their complex structures often limit hydrolysis, and excessive pretreatment can generate inhibitory conditions. This study evaluated the effects of ball-milling (BM), ball-milling with water (BM+water), and combined thermal hydrolysis and ball-milling (THP+BM) on the digestion performance of a mixed substrate of slaughterhouse and agricultural wastes. The results showed that all BM-based pretreatments significantly improved digestion kinetics, reducing the lag phase by 26%–66% and shortening the T50 values by approximately 40% compared to the untreated substrate. While no statistically significant differences were observed in the ultimate methane yield, the onset of methanogenesis was markedly accelerated in the BM and BM+water treatments. In contrast, despite achieving superior solubilization, the THP+BM treatment failed to provide proportional kinetic enhancements. This was due to a severe initial metabolic imbalance—characterized by a pH drop below the inhibitory threshold (6.33)—which induced physiological stress and delayed the functional recovery of methanogens. These findings indicate that while ball-milling effectively facilitates digestion initiation by enhancing physical accessibility, the intensity of combined thermal-mechanical processes must be strategically optimized. For high-strength organic biomass, managing pretreatment severity is crucial to prevent initial acid stress and maximize process efficiency.

## **Anaerobic digestion of biodegradable plastics via Biological Methane Potential (BMP) for Application of ball mill–based physicochemical pretreatment assessment**

<sup>1,2</sup> *Won Jae Lee*, <sup>1,3</sup> *Sang Heon Lee*, <sup>2</sup> *Sun Mi Lee* and, <sup>1</sup> *Jin Hyung Lee*\*

<sup>1</sup> Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Rep. Korea

<sup>2</sup> Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Rep. Korea

<sup>3</sup> Department of Chemical Engineering, Hanyang University, Rep. Korea

\* e-mail: [leejinh1@kicet.re.kr](mailto:leejinh1@kicet.re.kr)

Biodegradable plastic market is rapidly expanding. However, current recycling technologies for biodegradable plastics are limited to physical and organic recycling (composting).

Applying biodegradable plastics to anaerobic digestion for biogas production could enable their recovery as renewable energy. However, this requires overcoming the slow degradation rate of biodegradable plastics in anaerobic digesters and achieving efficient decomposition.

To address this issue, this study applied ball-mill-based physicochemical pretreatment to biodegradable plastics, specifically PLA and PBAT, under various conditions. The degradation rate and methane production during anaerobic digestion were compared to evaluate the effects of pretreatment. The solubility of biodegradable plastics was measured over different pretreatment durations, and surface changes were observed using SEM.

Pretreated biodegradable plastic PLA was applied to anaerobic digestion as a substrate. The utilization of this biodegradable plastic suggests its potential contribution to sustainable resource management.

## 파인애플 껍질의 지속가능한 처리를 위한 레블린산 생산 및 CO<sub>2</sub> 열분해 통합 공정

박종현<sup>1</sup>, 이연준<sup>1</sup>, 이태우<sup>2</sup>, 권일한<sup>1,\*</sup>  
<sup>1</sup>한양대학교 자원환경공학과, <sup>2</sup>제주대학교 환경공학과

### Integrated Levulinic Acid Production and CO<sub>2</sub> Pyrolysis for Sustainable Upgrading of Pineapple Peel

Jonghyun Park<sup>1</sup>, Youn-Jun Lee<sup>1</sup>, Eilhann E. Kwon<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Resource and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea, <sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, College of Ocean Sciences, Jeju National University, Jeju Special Self-Governing Province, 63243, Republic of Korea

Levulinic acid (LA) acts as a platform chemical from C<sub>6</sub> mono- and polysaccharides in lignocellulosic biomass and supports production of multiple value-added chemicals. Conventional LA production generates lignin-rich solid residues during carbohydrate recovery, and conventional LA production shows lower environmental sustainability compared with residue valorization routes. The study designed an integrated route that coupled acid-catalyzed hydrolysis with CO<sub>2</sub> pyrolysis of hydrolysis residues, compared with stand-alone hydrolysis. The study selected pineapple peel (PP) as feedstock, compared with model carbohydrates. Acid-catalyzed hydrolysis reached an LA concentration of 11.19 g L<sup>-1</sup> under 2 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, compared with lower-acid conditions. CO<sub>2</sub> pyrolysis converted the hydrolysis residue and increased CO formation through gas-phase reactions of CO<sub>2</sub> with volatile intermediates, compared with N<sub>2</sub> pyrolysis. Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-catalyzed pyrolysis raised CO formation under CO<sub>2</sub>, compared with non-catalytic CO<sub>2</sub> pyrolysis. Biochar from CO<sub>2</sub>-mediated pyrolysis served as a CO<sub>2</sub> sorbent and improved carbon utilization, compared with operation without CO<sub>2</sub> capture. CO<sub>2</sub> biochar showed greater mesopore and micropore development and faster CO<sub>2</sub> uptake kinetics, compared with N<sub>2</sub> biochar, and CO<sub>2</sub> biochar maintained an equilibrium CO<sub>2</sub> uptake of 39.33 mg g<sup>-1</sup>, compared with N<sub>2</sub> biochar. The integrated route linked syngas generation with biochar-based CO<sub>2</sub> capture and improved carbon efficiency and process sustainability, compared with conventional LA production without residue conversion.

**사사:** 본 연구성과는 2023년도 정부(교육기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2023-NR077231). 본 연구성과는 2024년도 정부(교육기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2025-25438313). 본 연구성과는 2023년도 정부(교육기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2024-00342766).

한국청정기술학회 2026년도 춘계 총회 및 학술대회

---

**특별세션(VIII):**  
**2026년 제1회 제주**  
**지역기술혁신허브**  
**기술성과교류회**  
(포스터발표 II)

---

2026년 3월 19일(목) 13:00~15:00  
부산 BEXCO 제2전시장 3층 로비

PS8-1

개인 사정으로 인해 발표가 취소되었습니다.

## 확장 칼만 필터(EKF) 기반 인덕턴스 추정을 이용한 토렘폴 PFC 컨버터의 모델 예측 전류 제어

선희정, 최영준\*  
제주대학교

### Model Predictive Current Control of a Totem-Pole PFC Converter with EKF-Based Inductance Estimation

Hee-Jeong Seon, Yeong-Jun Choi\*  
Jeju National University

#### 초록(Abstract)

최근 재생에너지 보급 확대, 에너지저장장치 및 전기차 충전 인프라의 확산으로 전력변환 시스템은 더 높은 효율과 더 우수한 계통 연계 성능을 요구받고 있다. 특히 재생에너지 기반 전력은 변동성이 크고 분산형으로 계통에 연계되는 경우가 많아, 전력변환 장치의 손실을 최소화하는 동시에 입력 전류의 고조파를 억제하여 전력 품질을 확보하는 것이 청정에너지 활용도를 높이는 핵심 요소로 부각되고 있다.

이러한 전력 변환 시스템의 고효율화 추세에 따라 기존의 브릿지 다이오드를 제거한 Totem-Pole PFC(TPPFC) 컨버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. TPPFC 컨버터의 제어 기법 중 하나인 모델 예측 전류 제어(Model Predictive Current Control, MPCC)는 빠른 응답 특성과 직관적인 제어 알고리즘이라는 장점이 있으나, 제어 모델에 사용되는 모델의 정확도에 따라 제어 성능이 크게 좌우되는 특성을 가진다.

일반적으로 설계 단계에서 모델에 적용되는 설정된 인덕턴스 값은 실제 운전 환경에서의 온도 변화, 부하 조건, 그리고 소자의 노화 등 다양한 요인에 의해 변동될 수 있다. 이러한 파라미터 불일치 현상은 전류 예측의 오차를 발생시키며, 결과적으로 입력 전류의 품질을 저하시키고 시스템의 안정성을 해치는 원인이 된다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)를 활용한 실시간 인덕턴스 추정 기법을 제안한다. 제안된 방식은 컨버터가 동작하는 동안 변화하는 인덕턴스 값을 추정하고, 이를 MPCC 알고리즘에 반영함으로써 파라미터 변동에 유연하게 대응할 수 있도록 한다.

#### 사사(Acknowledgement)

이 논문은 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-25444452)

## 3상 LLC 공진형 컨버터를 위한 개선된 전류 밸런싱 제어 방법

진현진, 최영준\*

제주대학교 공과대학 전기공학전공, 64243, 제주 제주시 제주대화로 102

### An Improved Current Balancing Control Method for Three-Phase LLC Resonant Converter

Hyun-Jin Jin, Yeong-Jun Choi

Department of Electrical Engineering, Jeju National University, Jeju, Republic of Korea

#### 초록

재생에너지의 확산과 교통수단의 전기화가 진행됨에 따라 재생에너지 시스템, 전기차, 데이터 센터, 항공 분야 등과 같은 다양한 산업 분야에서는 직류 기반의 전력 변환 단계를 필수적으로 요구하게 되면서, 고전압과 저전압 간의 전력을 안정적으로 변환하는 절연형 DC/DC 컨버터의 중요성이 커지고 있다. 특히, 이러한 시스템들은 고효율 및 고전력 밀도 전력변환장치가 요구되기 때문에 이를 충족하기 위한 절연형 DC/DC 컨버터가 활발히 연구되고 있다.

절연형 DC/DC 컨버터 중 LLC 공진형 컨버터는 1차측 스위치의 zero-voltage switching(ZVS)과 2차측 정류 다이오드의 zero-current switching(ZCS) 동작을 통해 스위칭 손실을 감소시켜 높은 효율을 달성하며, 고주파 동작이 가능해짐에 따라 수동 소자의 크기를 줄여 높은 전력밀도를 달성한다. 이러한 장점으로 LLC 공진형 컨버터가 다양한 산업 분야에 널리 활용되고 있으며, 적용 분야의 확대와 함께 요구되는 전력 용량 또한 다양해지고 있다. 높은 전력 용량이 요구되는 전력변환장치는 단상 컨버터를 조합하여 구성하는 다상 LLC 공진형 컨버터가 주로 사용된다. 다상 LLC 공진형 컨버터는 낮은 전류 리플과 작은 필터 크기를 유지하면서도 높은 전력 용량을 구현하기에 용이하다. 그중에서도 3상 LLC 공진형 컨버터가 구조적 단순성과 경제적 이점으로 인해 폭넓게 활용되고 있다.

기존 연구에서는 3상 LLC 공진형 컨버터를 구성하는 공진 소자값이 동일하다고 가정하여 분석이 수행되었다. 그러나 공진 소자값은 부품 공차 및 제조 오차로 인해 편차를 가지며, 상 간 전류 불균형을 야기한다. 전류 불균형은 출력 전류 리플 증가, 온도 상승, 소자 스트레스 증가 등의 다양한 문제를 초래하며 시스템 효율과 수명을 저하시킨다.

이에 본 논문에서는 전류 불균형 문제를 완화하고, 전류 밸런싱 성능을 향상시키기 위한 적응형 PI 기반 전류 밸런싱 제어 방법을 제안한다. 적응형 제어 구조는 3상 LLC 공진형 컨버터의 3상 등가회로부터 도출된 불균형 전류의 위상각을 적용한 수학적 모델링에 기반하여 설계된다. 동작 중 공진 소자값이 변화함에 따라 계산되는 불균형 전류의 위상각과 레퍼런스 위상각의 오차를 최소화하도록 구성되며, 고정적인 제어 이득만으로는 모델 파라미터의 불확실성을 효과적으로 보상하기 어렵기 때문에 적응 제어 파라미터가 추가된다.

이를 통해, 공진 소자값의 편차에 따라 제어 파라미터가 동적으로 조정되므로, 다양한 동작 조건에서 유연하게 대응할 수 있으며, 전류의 크기와 위상각에서 발생하는 정상상태 오차를 최소화한다. 결과적으로, 제안된 전류 밸런싱 제어 기법은 다양한 가변 조건에서 불균형 전류의 위상각을 보상하여 추가적인 회로 구성없이도 전류 밸런싱 성능을 향상시킨다.

#### 사사

이 논문은 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-25444452)

# 산업용 특수테이프 분야를 선도하는 화인테크놀로지



반도체용 점착 TAPE



DICING TAPE

FPC MATERIL



COVERLAY TAPE

산업용 보호 TAPE



건축자재용 보호 TAPE

세라믹가공 발포용 TAPE



라벨스티커



BACK GRINDING TAPE



STIFFENR TAPE(보강판)



건축자재용 보호 TAPE



HEAT SEAL TAPE



CARRIER TAPE



자동차 부품용 보호 TAPE



EMC MOLD CUTTING TAPE



CARRIER TAPE



자동차 부품용 보호 TAPE



(주)화인테크놀로지  
www.finetechnology.co.kr

경남 양산시 어곡공단1길 10  
TEL : 055)362-8110 FAX : 055)362-8113



한국청정기술학회 2026년도  
**춘계 총회 및 학술대회 초록집**

2026 THE KOREAN SOCIETY OF CLEAN TECHNOLOGY SPRING CONFERENCE