

하이드롤리시스 해중합 공정의 전과정평가(LCA) 연구



황윤빈

- 2019. 수원대학교 환경공학 박사
- 2013-2019. 에코피엔지 기후변화대응전략실 팀장
- 2021-현재. (주)켐토피아 지속가능본부 팀장



김지은

- 2018. 부경대학교 생태공학 학사
- 2021-현재. (주)켐토피아 지속가능본부 주임



김민석

- 2018. 부산대학교 유기소재시스템공학 학사
- 2020. 부산대학교 유기소재시스템공학 석사
- 2020-현재. 다이텍연구원 구미해중합 연구센터 전임연구원



김대근

- 2007. 부경대학교 전산교육학 석사
- 2015. 부경대학교 IT융합응용공학 박사
- 1999-2005. STX조선 등 프리랜서 S/W개발
- 2006-2013. 한국섬유개발연구원 선임연구원
- 2014-현재. 다이텍연구원 구미해중합 연구센터장

1. 서 론

기후변화 대응을 위한 탄소중립 실현을 명분으로 EU·美 등 선진국 중심의 탄소배출량 기반 무역규제 도입이 지속적으로 가속화 중에 있다. EU에서는 탄소국경조정제도(CBAM)에 대해 2023년 10월까지 전환기간을 지나 2026년부터는 본격 시행을 예고하고 있다. 또한 EU와 미국이 GSSA(Global Arrangement of Sustainable Steel and Aluminium) 관련 공동 성명을 발표하였다. 철강산업과 알루미늄 산업의 데이터를 공유하고 이를 탄소발자국 산정과 탄소감축에 활용할 예정이다.

섬유패션 산업계도 미리 선제적인 대응을 통해 향후 다가올 법·제도 규제에 발맞춰 움직이고 있다. 섬유패션 글로벌 대기업에서는 공급망 내 탄소배출량 관리를 위해 공급사·협력사를 대상으로 제품 단위 탄소배출량을 산정하기 위한 LCA Reporting 및 3자검증의견서를 요구하고 있는 실정이다. LCA 요구사항으로 자원순환과 순환경제 관점에서의 원료 및 물질 흐름과 제품생산과정 중에 과소비되는 에너지 감축, 즉 탄소 감축을 요구하고 있다. 특히, 폐의류, 폐섬유 제품, 섬유성 폐기물(폐PET병) 등 재활용 섬유를 이용한 원사·원단 생산을 통해 탄소중립과 자원순환, 순환경제 실현에 많은 관심이 몰리고 있는 상황이다.

본 원고에서는 화학적 재활용 방법인 하이드롤리시스 해중합을 이용하여 폐PET로부터 폴리에스터 섬유 원료를 생산하기 위한 테스트베드 공정 구축의 설계데이터를 이용하여 LCA를 수행한 결과를 소개한다. 대상 공정시스템은 TPA 생산을 중심으로 수행하였으며, 국외 해중합 사례와 국내외 LCI DB를 함께 살펴봄으로써 수행한 연구의 적합성 및 시사점을 다루고자 한다.

2. 하이드롤리시스 해중합 LCA 연구 동향

2.1. PET의 chemoselective depolymerization LCA 연구

2.1.1. 연구 개요

Iturrondobeitia의 연구에서는 포장, 섬유 및 자동차 산업에서 광범위하게 사용되는 PET의 업사이클링이 환경에 미치는 영향에 대해 분석하였다[1].

일반적인 화학적 재활용 방법인 해중합 공정 5가지(hydrogenolysis, alkaline hydrolysis, glycolysis-EG, glycolysis-PG, aminolysis)에 대한 전과정 평가(LCA) 사례를 종합하여 분석하였다. 실험실 규모에서 폐PET 1 kg을 사용한 전체 stream을 기능단위로 설정하였고, 해중합 공정을 이용해 PET를 투입했을 때 동반되는 재료와 배출되는 제품에 대한 환경영향을 분석하였다. 향후 공정 운영에 대한 최적화 방안에 대해서 결론을 지었다.

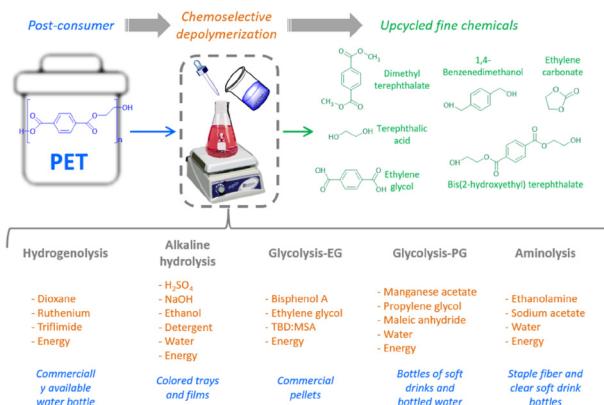


Figure 1. 화학적 재활용 방법(해중합)에 대한 5가지 전략.

2.1.2. 연구 방법

ISO 14040 및 ISO 14044의 표준에 따라 전과정 평가를 수행하였으며, 앞서 언급했던 5가지의 해중합 공정을 대상으로 환경영향을 정량화하였다. 해중합 기술별 input/output 데이터는 아래의 Table 1과 같으며, output으로 배출되는 물질들은 회수되어 재사용되거나 폐기 처리하는 것으로 가정하였다. 아래 표와 같이 수집한 데이터를 기반으로 OpenLCA SW 와 Ecoinvent v3.8 DB를 이용하여 환경영향평가(LCIA)를 도출하였다. 여기에 쓰인 환경영향평가 방법론은 ReCiPe 2016 Midpoint로, 18개의 환경영향범주 결과를 분석하였다. 해당 연구는 기존 LCA 연구와는 달리 input data를 폐PET 1 kg의 해

중합 공정 시 데이터로 기준을 삼았다. 때문에 공정의 최종 산출물인 EG(ethylene glycol), DMT(dimethyl terephthalate), PTA(terephthalic acid) 등 output 산출물의 양이 각각 달리 나타났으며, 하이드롤리시스의 경우 EG가 0.313 kg, TPA가 0.843 kg 배출되었다. 폐PET 사용량을 중심 기준으로 하여 기술 별 LCA 결과를 나타냈기 때문에, 공정 운영 조건에 따라 기여도 분석과 자원효율성 같은 해석이 다양하게 나타낼 수 있음을 명시하고 있다.

Table 1. 해중합 방법별 원료 및 에너지 Input/output 인벤토리 정보[1]

	Hydrogenolysis (Westheus et al., 2022)	Alkaline hydrolysis (Ugolier et al., 2020)	Glycolysis-EG (Jehanno et al., 2021)	Glycolysis-PG (Abdeljalil, Soboh, & Makkai, 2011)	Aminolysis (Shukla & Harad, 2006)
Inputs	Material PET Dioxane Ruthenium Triflimide - Energy	Material PET Sulfuric acid Bisphenol A - Ethanol - Detergent, anionic - Water	Material PET Bisphenol A - Ethylene glycol - TBDS-MSA - Detergent, anionic - Water, deionized	Material PET Manganese acetate Propylene glycol, liquid methylene chloride Water, deionized - Natural gas - Electricity - (m³)	Material PET Ethanolamine - Water, deionized - Natural gas - Electricity - (kWh)
Outputs	Benzene dimethanol Ethylene glycol Bisphenol A - Dimethyl terephthalate - Terephthalic acid - Ethylene glycol - 1,4-benzenedimethanol - Ethylene carbonate - Bis(2-hydroxy ethylene) terephthalimide	Benzene dimethanol Ethylene glycol Bisphenol A - Sodium sulfate - Water - Waste water	Bisphenol A, powder - Edethylene glycol - Sodium sulfate - Water - Waste water	Bisphenol A, powder - Edethylene carbonate - Sodium sulfate - Water - Waste water	Polyester resin, unsaturated Manganese oxide - Water waste - Waste water
					Ethanolamine - Water waste - (kg)

2.1.3. 해중합 공정별 LCA 결과

해중합 공정별 탄소배출량은 kg CO₂-eq.로 정량화 하였으며, Glycolysis-PG가 4.34 kg CO₂-eq., Aminolysis가 5.31 kg CO₂-eq., Hydrogenolysis가 5.78 kg CO₂-eq.로 결과를 보인다. 반면 Alkaline hydrolysis는 74.59 kg CO₂-eq., Glycolysis-EG는 91.29 kg CO₂-eq.로 분석되었다. 이는 공정 초기 설계의 중요성을 나타내고 있으며, 자원과 에너지의 사용량만을 검토하는 것이 아닌 LCA를 통한 환경성 평가의 중요성을 보여준다.

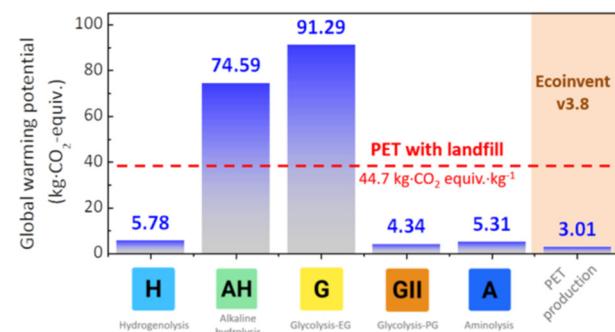


Figure 2. PET 생산과 5가지 해중합 기술, 폐PET 매립에 대한 Cradle-to-gate 탄소배출량(GWP) 현황.

전체적인 결과로 볼 때 해중합 공정에서 화학물질 사용량과 전기 사용량이 탄소배출량에 가장 높은 기여도를 보였다. 이 결과는 해중합으로 인한 EG와 TPA와 같은 부산물의 회수까지 고려한 결과이며, Ecoinvent LCI DB에서는 1 kg PET 생산 시 발생되는 탄소배출량은 3.01 kg CO₂-eq.로 비교하여 보여주고 있다. 또한 폐PET를 매립할 때 44.7 kg CO₂-eq.로 폐PET의 화학적 재활용이 환경적이고 경제적인 지속 가능한 방법이라는 것을 시사하고 있다.

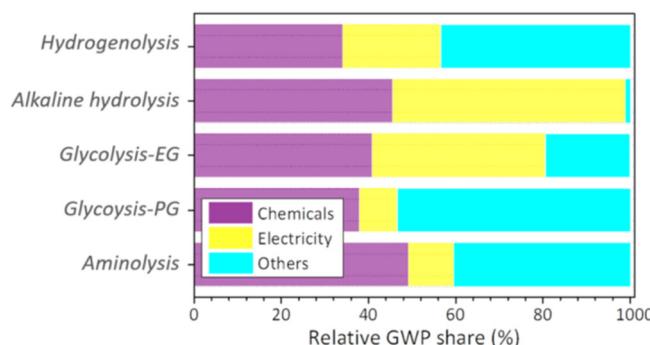


Figure 3. 화학물질 투입과 사용된 전기의 탄소배출량 기여도 분석 결과.

2.2. Polyester 및 PET(PolyEthylene Terephthalate) 관련 LCI DB 현황

2.2.1. 국내 LCI DB 현황

본 원고에서의 LCA 수행 대상 공정시스템은 하이드롤리시스 해중합 공정을 통한 rTPA와 rEG 생산이며, 이 원료들은 향후 화학적 재활용 섬유(Polyester) LCA 수행에 활용될 것이다. 폐PET는 rTPA와 rEG의 주원료가 되며, Polyester DB는 Virgin 생산과 Recycling 제품의 LCA 결과해석에 쓰여진다. 따라서 Input/Output 원료들에 대한 국내외 동향과 LCI DB 정보 수집이 필요하여, 본 장에서 원료 및 제품별 평가계수(LCIA)에 대해 살펴보자 한다.

국내 환경부와 산업통상자원부에서 개발한 국내 LCI DB 목록 중 폴리에스터 생산 및 섬유 생산과 관련된 DB는 전무한 상황이다. 하지만 앞서 언급한 PET 생산에 대한 LCI DB와 PET 소각과 재활용에 대한 LCI DB는 환경부의 Total SW를 통해 확인할 수 있다. 이산화탄소 배출량을 DB별로 살펴보면 PET 1 kg 생산 시에는 4.28 kg CO₂-eq.이나, PET 소각은 3.13 kg CO₂-eq., PET 재활용은 (-)1.42 kg CO₂-eq.가 감축되는 것으로 나타났다.

Table 2. PET 생산 · 소각 · 재활용에 대한 국내 LCI DB 정보

분류	DB 명 (프로세스 명칭)	프로세스 설명	기준 참조량			
			명칭	단위	이산화탄소 배출량 (kg CO ₂ -eq.)	
폐기	PET incineration	* 공정설명 : 생활폐기물 내에 포함된 폐플라스틱(PET)의 소각 * 단위공정 : 반입, 연소, 연소가스처리, 배출수처리, 소각재처리, 여열이용 등의 세부공정을 단일소각공정으로 통합	PET 소각 (2001년)	kg	1	3.13
폐기	PET recycling	* 공정설명 : 폐PET의 원료로서 재생 * 단위공정 : 선별분리, 중간처리, 용융 및 재생 원료화의 세부공정을 단일재활용공정으로 통합	PET recycling (2000년)	kg	1	-1.42
원료	PET (Polyethylene Terephthalate)	PET 병, 필름, 엔지니어링 플라스틱의 원료	PET 생산	kg	1	4.28

Table 3. 해중합 원료 관련 Ecoinvent의 LCI DB 정보

분류	기준물질	LCI DB 명칭	기준 참조량			
			지역	단위	이산화탄소 배출량 (kg CO ₂ -eq.)	
재활용 생산 (rPET)	polyethylene terephthalate	market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, recycled	RoW	kg	1	1.68
일반 생산	polyethylene terephthalate	polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous	RoW	kg	1	3.10
일반 생산	terephthalic acid	purified terephthalic acid production	RoW	kg	1	1.96
일반 생산	ethylene glycol	ethylene glycol production	RoW	kg	1	2.04
일반 생산	polyester	polyester fibre production, finished	RoW	kg	1	4.18

2.2.2. 국외 LCI DB 현황

국외 Ecoinvent LCI DB 플랫폼에서 폴리에스터 및 EG, TPA, 그리고 PET와 관련된 LCI DB는 20여 개로 조사되었다.

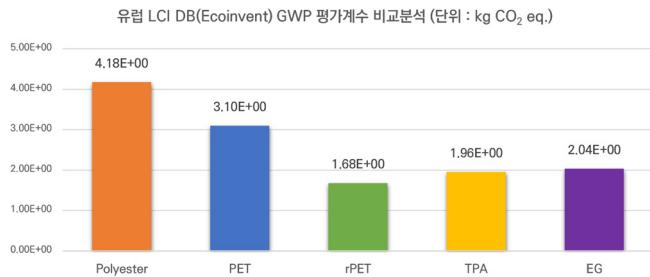


Figure 4. 유럽 LCI DB GWP 평가계수 비교.

Table 4. 해중합 원료 관련 Sphera社의 LCI DB 정보

분류	기준물질	LCI DB 명칭	기준 참조량			
			지역	단위	양	이산화탄소 배출량 (kg CO ₂ eq.)
재활용 생산 (rPET)	polyethylene terephthalate	Polyethylene terephthalate (PET) granulate secondary	US	kg	1	0.534
일반 생산	polyethylene terephthalate	Polyethylene terephthalate resin production	RNA (USLCI)	kg	1	2.61
일반 생산	terephthalic acid	Purified terephthalic acid (PTA)	US	kg	1	2.25
일반 생산	ethylene glycol	Ethylene glycol (from ethene and oxygen via EO)	US	kg	1	1.17

검색된 LCI DB는 기준물질, LCI DB 명칭 및 공정 정보, 지역으로 분류할 수 있지만, Table 3과 같이 언급된 물질들을 전부 살펴보기 위해 local sorting을 진행하였다. Ecoinvent에 공개된 지역은 크게 글로벌(GLO), 미국(US), 유럽(RER), 그 외 기타 지역(RoW)으로 나눌 수가 있으며, 이는 DB가 생성되거나 활용할 수 있는 지역으로 볼 수 있다. 해당 DB들은 앞서 소개한 LCA 사례와 같이 섬유 공정시스템에 대한 LCA 수행 시 많이 활용되고 있는 데이터들이다.

Figure 4와 같이 Ecoinvent의 DB 중 polyester fibre 1 kg 생산은 4.18 kg CO₂-eq.이며, polyethylene terephthalate 3.1 kg CO₂-eq., 재활용 자원을 이용한 rPET 생산은 1.68 kg CO₂-eq.였다. Virgin 원료로부터 생산된 TPA와 EG 1 kg 생산은 각각 1.96 kg CO₂-eq., 2.04 kg CO₂-eq.이며, 하이드롤리시스 해중합 공정에서 산출되는 제품과는 공정 및 운영조건, 그리고 사용처가 다를 수 있기 때문에 같은 기능단위라고 할 수 없다. 하지만 국내 하이드롤리시스 해중합 공정 관련 LCI DB 구축에서 민감도 분석 및 비교 분석에 참고용으로 사용가능하다.

Sphera社의 Gabi SW에서 폴리에스터 및 PET와 관련된 LCI DB 목록은 Table 4와 같다. Ecoinvent보다 다양한 화학섬유 및 공정시스템들을 다루고 있어, LCA 수행에 있어서 다양하게 활용될 수 있다. Sphera DB에는 2023년 시점으로 PET 섬유, PET 수지 생산, 2차 PET 입자 생산, TPA, EG 등과 같은 다양한 LCI DB 들을 확인할 수 있었다[10].

여기서, rPET는 미국에서 수집한 폐플라스틱을 선별, 파쇄, 세척 등의 전처리를 걸쳐 PET pellet 1 kg 생산에 대한 LCI DB이다. rPET의 값은 0.534 kg CO₂-eq.으로 virgin 원료로부터 생산된 PET보다 현저히 낮은 값이라는 것을 볼 수 있다. 미국 TPA LCI DB 정보에서 이산화탄소 배출량은 2.25 kg CO₂-eq.으로 Ecoinvent TPA(RoW)보다 0.29 kg CO₂-eq.가 높다. 반면 미국의 EG LCI DB는 Ecoinvent EG(RoW)보다 0.87 kg CO₂-eq. 낮다. 이러한 비교주장은 적합하지 않을 수 있지만, 본 원고에서는 섬유 산업의 LCI DB가 다양하지 않기 때문에 기준 물질 및 LCI DB 명칭을 기준으로 비교하여 공개된 LCI DB 들을 소개하는 것을 목적으로 한다. 정확한 비교주장을 위해서는 LCI DB가 만들어진 시기뿐만 아니라 같은 공정시스템인지의 여부, 시스템 경계 설정, 투입된 에너지 및 물질에 대한 정보 등과 같은 LCA 시나리오 조건이 같아야 할 것이다.

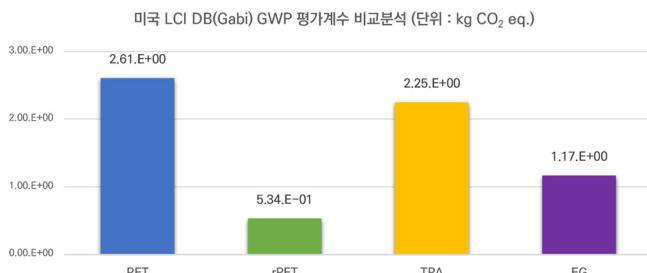


Figure 5. 미국 LCI DB GWP 평가계수 비교.

3. 국내 하이드롤리시스 복합기술 기반 해중합 공정의 LCA 결과

3.1. LCA의 목적 및 분석 방법

본 LCA의 목적은 하이드롤리시스 복합기술 기반 해중합 공정의 테스트베드를 통해 폴리에스터 섬유의 원료(rTPA, rEG)

를 생산하면서 발생되는 탄소배출량을 측정하고, 이 재활용 원료를 사용했을 때 virgin으로부터 생산되는 폴리에스터 섬유 보다 얼마나 감축하느냐를 분석하기 위함이다. 또한 친환경과 공정 최적화 운영이 병행되어야 하기 때문에, LCA 기법을 이용하여 전과정(life cycle)을 고려한 평가를 설계하기 위함이다. 정확한 LCA 수행을 위해서는 제품의 생산기간 또는 데이터의 수집 범위가 12개월 이상됨을 원칙으로 한다. 하지만 본 분석에서는 설계 단계에서의 LCA 수행이기 때문에 설계 데이터(물질수지)를 바탕으로 분석하였다.

시스템 경계는 원료 채굴 단계부터 제조 전 단계, 제품 제조 단계를 대상으로 하며, 여기에서 발생되는 폐수와 폐기물에 대한 처리까지도 시스템 경계에 포함하였다(cradle to gate). 단, 폴리에스터 섬유의 원료인 TPA와 EG는 기초소재이기 때문에 제품의 사용 단계와 폐기 단계는 포함하지 않았다. 또한 주원료인 폐PET는 open loop recycling 할당방법론인 cut-off(1) 기준에 따라 폐PET의 물질 측면의 환경영향은 제외였다. 여기서 폐PET를 테스트베드 공정까지 오는 수송과 전처리에 투입된 전력량 등, 전처리 공정의 현장 데이터와 환경영향을 함께 고려해야 하지만, 데이터의 부재로 인해 시스템 경계에서 제외하였다.

사용하였으며, 본 원고에서는 이산화탄소 배출량(GWP) 부문을 중심으로 분석하고자 한다. 또한 단위공정마다 투입되는 원료물질에 대한 데이터는 문현데이터(sphera LCI DB, 미국)를 적용하였으며, 산성원료 C와 활성탄의 경우 ecoinvent LCI DB를 활용하여 분석하였다. 투입되는 원료와 에너지의 지리적 경계가 대한민국이기 때문에 데이터의 품질을 고려할 때 이차데이터를 국가 LCI DB를 사용하는 것이 타당하다. 하지만 우리나라의 DB는 노후화되어 활용성이 낮고, 영향평가 방법론의 물질명이 불일치하거나 DB 구축 시 요구되는 등록정보의 부재로 신뢰성이 낮다고 판단하여, 국외 LCI DB를 우선 권고하고 있다.

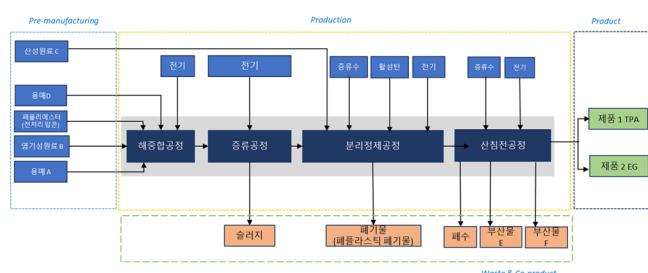


Figure 7. 하이드롤리시스 복합기술 기반 해중합 공정도.

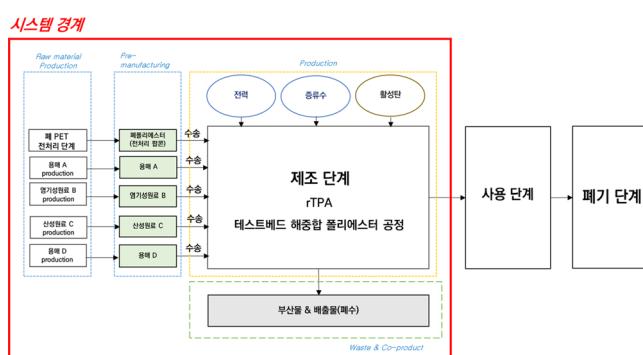


Figure 6. 하이드롤리시스 복합기술 기반 해중합 공정의 LCA 시스템 경계 설정.

공정시스템을 단위공정으로 나누면 해중합, 중류, 분리정제, 산침전으로 구성되고, 각 단위 공정별 소비되는 전력과 용매 D, 염기성원료 B, 산성원료 C, 활성탄 및 유리섬유, 용매 A 등 모든 물질은 cut-off 하지 않고 전부 고려하였다(Figure 7 참조).

본 LCA 수행의 기능단위는 TPA 1 kg 생산이며, 기준 흐름은 TPA 122.67 kg/day 생산으로 설정하였다. 환경영향평가 방법론은 Gabi SW에 내재되어 있는 CML2001-Aug.2016을

3.2. 환경영향평가 결과 및 해석

rTPA 1 kg 생산 당 발생되는 탄소배출량은 5.95 kg CO₂-eq. 산출되었다. 공정별 기여도를 살펴보면, 해중합공정에서 65%, 산침전공정 18%, 분리정제공정 10%, 중류공정 7%의 순으로 나열할 수 있으며, 첫 번째 단위공정인 해중합 공정은 반응조에서 물을 사용하여 고온, 고압 하에서 모노머로 분리하는 과정이기 때문에 가장 많은 양의 전력을 사용한다. 또한 여기에 산성원료 C와 염기성원료 B, 용매 D 등 투입되는 촉매 및 보조물질 투입에 따라 물질측면의 환경성이 높게 평가되었다.

투입물질과 에너지, 폐기물 등 input과 output 관점에서 기여도는 전력 부문이 81.7%로 가장 높은 비중을 차지하고 있었으며, 활성탄 3.7%, 폐기물 소각 1.9%, 산성원료 C 1.2%, 용매 A 0.9%, 중류수 0.4%, 폐수처리 0.3%, 용매 D 0.1% 순으로 결과가 도출되었다.

앞장에서 리뷰한 해중합 관련 선진 사례에서와 같이 전력에 대한 영향이 높은 비중을 보인다. 본 분석에 사용한 데이터는 continuous flow에서 얻어진 실제 데이터가 아니며, batch type

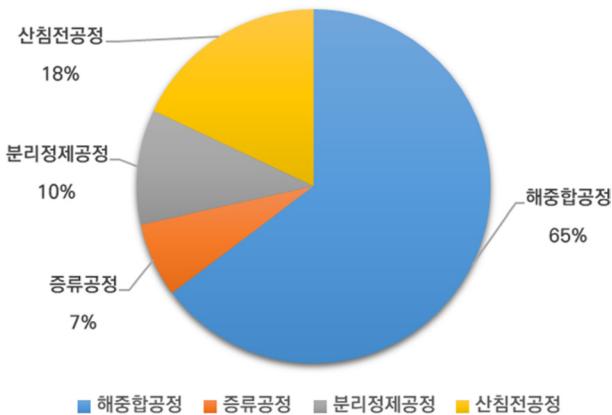


Figure 8. 단위공정 별 기여도 분석.

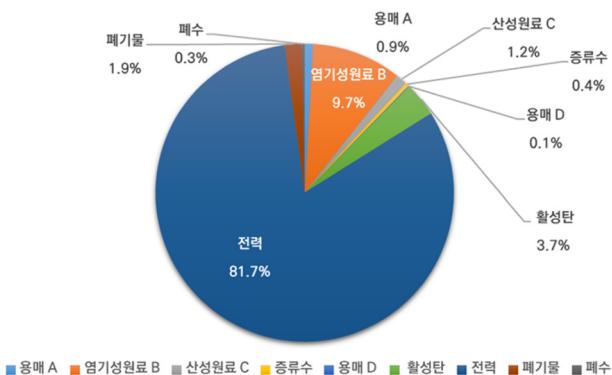


Figure 9. 에너지 및 물질 별 기여도 분석.

형 물질수지 자료를 이용하였기 때문이다. 단위 공정으로 볼 때 전력 사용량이 많은 이유는 해중합 공정 시스템의 시동을 위해서 고온, 고압 하에 반응을 위한 반응조 예열이 필요하며, 전력량을 분리할 수 없는 설계 조건에 따라 예열 전력량도 포함하였기 때문이다. 또한 촉매와 같은 보조역할의 화학물질들이 반응조 내 내재되어 있는 상태로 추가 투입량에 대한 데이터 수집을 우선해야 하지만 앞서 언급한 것처럼 설계 기준으로 분석되었기 때문에 초기 원료 투입량까지 포함되어 환경영향이 과대평가된 경향이 있다. 또한 증발량 및 손실율에 대한 데이터도 향후 경험치를 통한 추정 및 가정을 통해 반영하여 추가 분석이 필요하다.

4. 결 론

본 원고에서는 하이드롤리시스 해중합 공정에 대한 국외 사례와 관련 국내외 LCI DB 현황, 그리고 LCA 기법을 이용한

해중합 공정의 환경성평가 결과를 소개하였다. 화석원료를 폐플라스틱으로 대체하여 원료측면을 개선함으로써 섬유 제품의 친환경성을 높이는 하이드롤리시스 해중합 공정은 섬유패션 산업계의 매우 유망한 기술이라고 판단된다. EU의 경우 10여년 전부터 실험실 규모로 해중합 연구가 시작되어, 지금은 상용화에 이르렀지만, 아직 경제성 확보에 어려움을 겪고 있는 상황이다. 또한 환경성을 검토하여 환경규제대응을 위해 LCA 기법에 대한 상세 내용들을 Higg-index와 같은 가이드라인으로 제공하여 산업계가 빨리 대응하고 있다. 무엇보다 친환경성을 검증하기 위해 사용되는 LCA 기법은 목적과 연구 범위에 대한 정확한 설계와 수집한 데이터의 품질에 따라 신뢰성과 적합성이 결정된다. 데이터의 품질을 확보하기 위해 현재 정부사업인 화학재생그린섬유개발사업에서 해중합 공정 기반구축과 제품개발 뿐만 아니라 LCI DB 구축과 이를 모니터링 할 수 있는 체계를 내재화하기 위한 연구가 진행중이다. 현재 섬유패션산업계의 LCA는 ISO 14040과 ISO 14044 표준을 근간으로 수행되고 있으나, 재활용 물질 및 폐자원 순환에 대한 구체적인 방법론과 제품 시스템별 또는 특정 제조 산업별 환경성 분석 방법 지침에 대한 추가 개발이 시급하다. 환경부에서는 이러한 문제점을 인지하고 2022년부터 기초화학물질 및 폐기공정에 대한 DB 모듈을 매년 150여개씩 제·개정하기 위하여 대규모 사업을 추진중이다. 또한, 민간단체 및 개별 기업에서도 수출에 대한 무역장벽 대응과 탄소중립 실현을 위해 공급망 실사와 데이터 요구를 선제적으로 준비하는 사례도 많이 늘어나고 있다.

범지구적으로 기후위기가 가속화됨에 따라 에너지의 전환 및 효율화 문제뿐만 아니라 end-of-pipe 관점에서의 자원 재활용과 친환경 원료로의 전환과 같이 제품의 전과정(life cycle)이 고려해야 된다. 앞으로 화학적 재활용 공정의 안정화와 환경성 평가에 대한 구체적인 방법론 체계가 마련된다면, 섬유패션 산업에서 탄소중립과 자원순환, 그리고 순환경제라는 큰 목표를 동시에 달성할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Maider Iturronobeitia, Laura Alonso, Erlantz Lizundia, "Prospective life cycle assessment of poly (ethylene terephthalate) upcycling via chemoselective depolymerization. Resources", *Conservation & Recycling*, 2023, **198**, 107182.
2. Nesi S., Bulgheroni C., Garbarino E., Garcia-Gutierrez P., Orveillon

G., Sinkko T., Tonini D., Pant R, Environmental sustainability assessment comparing through the means of lifecycle assessment the potential environmental impacts of the use of alternative feedstock (biomass, recycled plastics, CO₂) for plastic articles in comparison to using current feedstock (oil and gas). European Commission JRC TECHNICAL REPORTS.

3. Simon Hann, Toby Connock, Chemical Recycling: State of Play, Eunomia.
4. Westhues, S., Idel, J., Klankermayer, J., “Molecular catalyst systems as key enablers for tailored polyesters and polycarbonate recycling concepts”, *Sci. Adv.*, 2022, **4**(8), eaat9669, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat9669>
5. Joshi, A.S., Alipourasiabi, N., Vinnakota, K., Coleman, M.R., Lawrence, J.G., “Improved polymerization and depolymerization kinetics of poly(ethylene terephthalate) by co-polymerization with 2,5-furandicarboxylic acid”, *RSC Adv.* 2021, **11**, 23506–23518, <https://doi.org/10.1039/D1RA04359E>
6. Ügdüler, S., Van Geem, K.M., Denolf, R., Roosen, M., Mys, N., Ragaert, K., De Meester, S., “Towards closed-loop recycling of multilayer and coloured PET plastic waste by alkaline hydrolysis”, *Green Chem.* 2020, **22**(16), 5376–5394, <https://doi.org/10.1039/D0GC00894J>
7. Abdelaal, M.Y., Sobahi, T.R., Makki, M.S.I., “Chemical transformation of pet waste through glycolysis”, *Constr. Build. Mater.* 2011, **25** (8), 3267–3271.
8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.013>
9. Shukla, S.R., Harad, A.M., “Aminolysis of polyethylene terephthalate waste”, *Polym. Degrad. Stab.* 2006, **91**(8), 1850–1854, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.11.005>
10. Ecoinvent LCI DB. <https://ecoinvent.org/>
11. Sphera DB, <https://sphera.com/solutions/product-stewardship/life-cycle-assessment-software-and-data/>