

EU PEF 방법론을 이용한 에폭시 제조 시스템의 환경성 평가

배재성^{1*}, 김명곤¹, 염윤호²

¹한국탄소산업진흥원
²글래스돔 코리아

Environmental Impact Assessment of Epoxy Preparation Systems using the EU PEF Methodology

Jae-Sung Bae¹, Myounggon Kim¹, YunHo Yeom²

¹Korea Carbon Industry Promotion Agency
²Glassdome Korea

ABSTRACT

This study analyzes the environmental impact of the epoxy manufacturing system, which is widely used across various industries, and explores measures to improve its environmental performance. Additionally, the study conducted an environmental assessment in accordance with the EU PEF methodology to contribute to the establishment of the national LCI database. Among the impact categories, climate change was identified as having the greatest influence, primarily due to the effects of Bisphenol A and epichlorohydrin, which are key raw materials in the epoxy manufacturing process. Therefore, the development of technologies to reduce carbon dioxide emissions during the production of these key raw materials is necessary.

Key words: PEF, life cycle assessment, epoxy, carbon fiber composites, climate change

요약

본 연구는 다양한 산업 분야에서 널리 사용되는 에폭시 제조 시스템의 환경 영향을 분석하고, 환경 성능을 개선하기 위한 방안을 모색하며, 국가 LCI DB 구축을 위한 기초 자료로 활용하고자 EU PEF 방법론에 따라 환경성 평가를 수행하였다. 영향 범주 중 기후 변화에 미치는 영향이 가장 큰 요소는 에폭시 제조과정에서 주요 원료로 사용되는 비스페놀 A와 에피클로로하이드린에 의한 영향으로 분석되었으며, 이들 주요 원료의 생산과정에서 발생하는 이산화탄소 배출 저감을 위한 기술 개발의 필요성이 제기된다.

주제어: 제품환경발자국, 전과정평가, 에폭시, 탄소섬유복합재, 기후변화

1. 서론

최근 기업 지속가능성 보고 지침 (CSRD, corporate sustainability reporting directive) 및 기후공시 도입과 더불어

환경 규제 강화로 인해 기업들은 다양한 환경영향범주를 포함한 제품의 환경성 분석이 필수적이다[1,2]. “정부, 국제기구 및 관련 기관은 기업 제품의 전과정평가를 통해 자원 소비, 온실 가스 배출 등의 주요 환경 요소를 체계적으로 분석하고 보고

Date Received: Nov. 11, 2024, Date Revised: Dec. 18, 2024, Date Accepted: Dec. 26, 2024

* Corresponding author: Jae-Sung Bae, Tel: +82-63-219-3573, E-mail: jsbae@kcarbon.or.kr

© Copyright 2024 The Korean Society for Life Cycle Assessment. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하도록 요구하며, 이를 기반으로 지속 가능한 경영 전략 수립을 지원한다.

에폭시는 건설, 토목, 전기·전자 산업 등 다양한 산업에서 사용되는 다목적 소재로 내구성, 화학적 저항성, 접착력 등이 뛰어나 접착제, 복합재 재료, 도료 등의 용도로 주로 사용되고 있다. 그러나 지속 가능성에 대한 우려가 커지면서 에폭시 또한 환경성에 대한 철저한 분석이 필요함에 따라 에폭시의 LCA 관련 논문들이 보고되고 있다. 최근에는 바이오(bark[3], vanillin[3], cardanol[4]) 기반 에폭시 제조, 재활용[5,6], CCU(carbon capture utilization)[6]로의 활용에 관한 에폭시 연구가 해외에서 주로 보고되고 있다. 하지만, Bisphenol A type, Bisphenol F type, Novolac type, Aliphatic type, Glycidylamine type 등 다양한 형태가 존재하는 에폭시의 소재 자체에 대한 기본적인 LCA 연구 결과가 부족할 뿐만 아니라 국내 생산 현장 데이터를 반영한 LCI(life cycle inventory) 데이터베이스 또한 부족한 상황이다.

이에 본 연구에서는 에폭시의 가장 대표적인 유형인 Bisphenol A type 에폭시의 국내 생산 제조시스템을 대상으로 LCA를 수행하여 환경 영향 평가 및 주요 이슈를 규명하고 환경적 개선 방안을 도출함에 있다. 또한, 에폭시를 활용한 여러 제품의 상위 데이터를 연결하는데 쓰이기 위한 LCI DB 구축에 활용하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 범위 정의

2.1.1. 기능 및 기능단위 설정

EU 에코디자인 규정 등 글로벌 환경규제에 대한 대응 잠재력을 진단하기 위하여 에폭시의 환경성평가는 EU PEF(product environmental footprint) 방법론[7]을 선택하였으며 기능단위는 Table 1과 같이 정의하였다.

Table 1. Function and functional unit

Category	Definition
Function	Epoxies are commonly used in a variety of industries, including electrical and electronics, civil engineering, and construction, as adhesives, composite materials, and paints.
Functional unit	1 kg of epoxy produced
Reference flow	1 kg epoxy

2.1.2. 시스템경계

데이터 수집범위인 시스템경계는 원료채취 단계부터 에폭시를 생산하는 단계까지인 Cradle to Gate로 정의하였다. 에폭시 생산에 필요한 생산 설비와 공장 건설을 위한 투입물과 산출물은 시스템경계에 포함하지 않았다.

2.1.3. 제외기준

별도의 제외기준은 설정하지 않고, 모든 투입물과 산출물을 데이터 수집 범위에 포함하였다.

2.1.4. 데이터범주

투입물에 대한 데이터 범주는 원료물질, 유틸리티(에너지, 연료 등)를 포함하며, 산출물에 대한 데이터 범주는 제품, 부산물, 대기 및 수계 배출물, 폐기물로 구분하였다(Table 2).

2.1.5. 데이터 품질요건

시스템경계 설정에서 정의한 제품 제조단계는 일차데이터 수집을 원칙으로 하였으며 원료채취단계에서의 투입물과 산출물에 대한 데이터는 이차데이터를 수집하였다. 이차데이터는 KS I 7004:2016에 따라 품질지표로 시간적, 지역적, 기술적 대표성을 선정하였다. 상위 및 하위 흐름 데이터세트는 데이터 품질평가를 통해 적합한 것을 선정하였다. 데이터 품질평가 시, 품질지표 별로 같은 점수가 나오면, ① 지역적(KR, RoW, RER, GLO, EU, US, JP순), ② 시간적(가장 최근) 순으로 우선순위를 부여하였다. 데이터 품질평가는 단위공정별로 수행하며, 수집 데이터별로 Table 3의 Pedigree 매트릭스를 활용

Table 2. Data categories

Category	Name
In put	Raw materials Bisphenol A, epichlorohydrin, phosphoric acid, nitrogen, sodium hydroxide
	Utility Electricity, steam, diesel, industrial water
Out put	Product Epoxy
	Waste Solid waste
	Air emission Nitrogen, water(steam)
	Water emission Chlorine, waste water
By-products	Industrial salt

Table 3. Data quality requirements (Pedigree)

Category	Indicator score				
	1	2	3	4	5
Time coverage	Less than 3 years of difference to year of study	Less than 5 years of difference	Less than 7 years of difference	Less than 10 years of difference	More than 10 years of difference
Geographical coverage	Data that reflects domestic production (KR)	Regional data that closely resembles domestic (RoW, RER, GLO, EU)			Other non-similar data
Technology coverage	Data with the same technique	Data with partially the same technique	Data with similar techniques in principle	Data with different techniques applied in principle	Data with other non-similar techniques

한 데이터별 품질목표는 평균 3.0 이하로 설정하였다.

2.1.6. 할당

수집한 생산 공정 데이터가 에폭시에 국한한 것이므로 다중 산출에 의한 할당은 고려하지 않았으며, 공장에서 발생한 폐기 물에 대한 열린고리 재활용 방법은 KS I 7004:2016의 요건에 따라 제외(Cut-off) 방법을 적용하였다.

2.1.7. 가정 및 한계사항

데이터 수집 과정에서 부득이하게 설정한 가정과 한계사항은 Table 4와 같다.

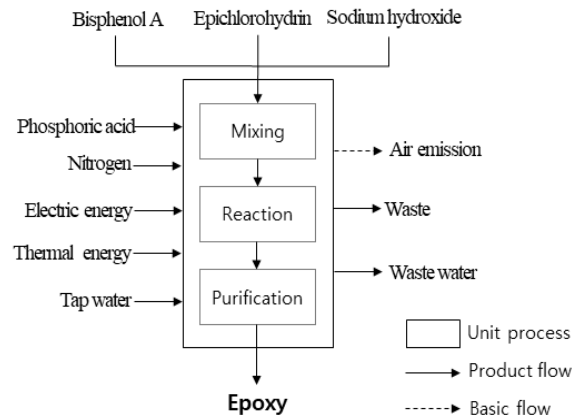


Fig. 1. Process flow of epoxy production.

3. 목록분석

3.1. 단위공정 선정 및 공정흐름도

데이터 수집을 위한 단위 공정은 Fig. 1과 같이 에폭시 생

산 공정 한 개로 정하였다. 단위 공정으로의 투입물은 비스페놀A, 에피클로로히드린, 인산, 수산화나트륨, 질소, 전기, 스팀 등이 포함되며, 산출물은 에폭시와 대기배출물, 폐기물을 포함

Table 4. Assumptions and limitations

Category	Contents
Commonality	- Direct air emissions from fuel combustion are calculated by applying emission factors from the guidelines of IPCC 2019 and the Ministry of Environment[8].
Production process (onsite)	- Transportation distances for field data are calculated and applied using the shortest distance. - Bisphenol A and NaOH (50%) data are mixed with other products and it is not possible to accurately measure the actual amount recovered, so theoretical values are used. - For wastewater, process water and water balance were applied accordingly. - For industrial salt, a by-product, the theoretical value for NaOH (50%) is applied.
Production process (paper)	- The transportation distance of the waste from the factory to the recycling company is assumed to be 30 kilometers. - To drive the basic value, it was assumed that all waste generated by the business site is recycled, which may result in an underestimation of the environmental impact.

한다.

3.2. 데이터 수집 및 계산

국내 한 개의 에폭시 생산업체로부터 에폭시제품을 선정하여 데이터를 수집하였다. 또한, 해외 공인 LCI Dataset인 Ecoinvent를 활용하여 에폭시 제조단계에서의 투입물과 산출물에 대한 일차데이터를 수집하여 현장데이터와 합산하였다. 에폭시 제조과정에서 수집한 일차데이터를 전과정으로 확장하기 위한 상위흐름 LCI Dataset를 사전에 정의한 데이터 품질 요건을 고려하여 Table 5와 같이 수집하였다.

4. 연구결과

에폭시에 대한 전과정 목록 분석 결과를 기초로, 영향평가 방법론인 Environmental footprint(EF) 3.1을 활용하여 16대 영향범주별 특성화 결과와 정규화 결과를 산출하였다. 영향평가 결과의 산출을 위해 Sphera LCA 소프트웨어를 활용하였다.

4.1. 특성화 결과

16대 영향범주 별로 특성화 결과인 잠재적 환경영향은 Table 6과 같으며 주요 영향범주 결과를 Fig. 2에 도식화하였다. 영향범주 중 기후변화 영향은 에폭시 1 kg당 6.25 kgCO₂

eq.가 발생하였다. 기후 변화에 가장 큰 영향을 주는 것은 에피클로로히드린(ECH) 투입에 의한 것으로 전체의 약 54%이고, 그 다음으로 비스페놀A(BPA)에 의한 영향이 약 29%, 스티프 사용에 의한 영향이 약 12%인 것으로 나타났다.

또한, 산성화, 생태독성, 부영양화(토양), 인체독성, 화석연료 고갈, 수자원 고갈 등 대부분의 영향범주에 대해서도 BPA, ECH 투입에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다.

4.2. 정규화 결과

영향범주별 특성화 결과에 대한 상대적 중요도를 파악하기 위하여 유럽집행위원회(EC)에서 2017년에 개발한 글로벌 정규화기준을 사용하였다. 정규화 기준은 세계 평균 인구 1인당 16대 영향범주별 잠재적 환경영향을 의미하여 특성화 결과 값을 정규화 기준에서 제시된 기준 값으로 나누어 정규화 결과 값을 산출할 수 있다. 특성화 값의 영향범주 별 인구수 대비 상대적인 결과 값을 쉽게 비교하기 위해서 정규화 값을 산출하였다.

정규화 기준에 의해 산정한 영향범주별 정규화 결과의 단위는 영향을 받은 인구수(pe)로 동일하여, 영향범주별 결과를 상호 비교할 수 있었다. 주요 영향범주 결과를 Fig. 3에 도식화하였으며 그 결과, 생태독성(상수)의 영향이 가장 크고 그 다음으로 화석연료 고갈, 기후 변화, 스모그, 부영양화(토양) 영

Table 5. LCI database lists

Category	Source
Bisphenol A (BPA)	US: Bisphenol A, Sphera, 2023
Epichlorohydrin (ECH)	US: Epichlorohydrin (by product calcium chloride, hydrochloric acid) Sphera, 2023
Phosphoric acid	US: Phosphoric acid (75%, purified), Sphera, 2022
Nitrogen	Nitrogen (gaseous), Sphera, 2021
Sodium hydroxide (NaOH)	RER: Sodium hydroxide mix (50%), Sphera, 2022
Steam	Steam production, in chemical industry, Ecoinvent (v3.8), 2021
Diesel	RER: Diesel mix at refinery, Sphera, 2019
Electricity	Market for electricity, high voltage, Ecoinvent (v3.8), 2021
Industrial water	GLO: Process water from surface water (for regionalization) - open inputs electricity and water, Sphera, 2022
Epoxy	-
Wastewater	RoW: Treatment of wastewater, average, capacity 1E9l/year, Ecoinvent (v3.8), 2021
Industrial salt	RER: Sodium chloride (rock salt), Sphera, 2022
Waste (truck transport)	Small lorry transport incl. fuel, Euro 0-6 mix, 7.5 t total weight, 3.3 t max payload, Truck, 2022
Transport (ocean)	RNA: Transport, ocean freighter, average fuel mix, Sphera, 2022

Table 6. Characterization LCA results

Impact category	Unit	Characterization results					
		Total	BPA	ECH	Electricity	Steam	Etc
Acidification	mol H+ eq.	1.48E-02	3.57E-03	4.31E-03	5.89E-04	2.74E-03	3.62E-03
Climate change	kg CO ₂ eq.	6.25E+00	1.81E+00	3.35E+00	1.74E-01	7.27E-01	1.85E-01
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	1.31E+03	2.37E+01	3.85E+01	5.46E-01	3.20E+00	1.24E+03
Eutrophication, water	kg P eq.	2.45E-04	2.03E-06	1.90E-05	1.26E-04	8.42E-05	1.39E-05
Eutrophication, marine environments	kg N eq.	4.41E-03	1.30E-03	1.41E-03	1.88E-04	3.81E-04	1.12E-03
Eutrophication, land	mol N eq.	5.40E-02	1.43E-02	1.64E-02	1.84E-03	4.02E-03	1.74E-02
Human toxicity, cancerous	CTUh	1.62E-09	4.96E-10	5.04E-10	5.15E-11	1.47E-10	4.24E-10
Human toxicity, non-cancerous	CTUh	7.79E-08	1.05E-08	2.62E-08	1.42E-09	2.86E-09	3.69E-08
Ionizing radiation	kBq U-235 eq.	2.58E-01	2.47E-02	1.33E-01	4.87E-02	1.92E-02	3.27E-02
Land use	pt	4.82E+00	4.29E-01	2.26E+00	3.97E-01	7.92E-01	9.37E-01
Ozone depletion	kg CFC-11 eq.	7.23E-08	1.07E-12	5.76E-12	5.23E-09	6.66E-08	5.09E-10
Particulate matter emissions	disease incidences	1.29E-07	2.51E-08	4.84E-08	1.83E-09	3.12E-08	2.21E-08
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq.	1.33E-02	4.50E-03	4.17E-03	4.64E-04	1.29E-03	2.92E-03
Resource use, fossil	MJ	1.24E+02	4.89E+01	5.89E+01	3.29E+00	1.01E+01	3.00E+00
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq.	1.32E-06	4.35E-07	3.71E-07	2.32E-07	1.99E-07	8.79E-08
Water usage	m ³	2.33E-01	1.94E-01	3.52E-01	3.59E-02	3.76E-02	-3.86E-01

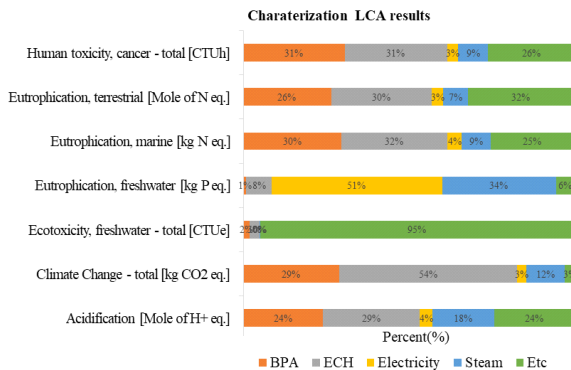


Fig. 2. Characterization LCA results.

향 순으로 나타났다.

5. 결론

본 연구는 범용성의 에폭시 제조 시스템에 대한 환경 영향을 도출하고 환경성을 개선하기 위한 방안 및 여러 제품의 상위 데이터를 연결하는데 쓰이기 위한 LCI DB 구축하기 위하여 PEF 방법을 통해 수행되었다. 결과적으로 특성화 결과 기

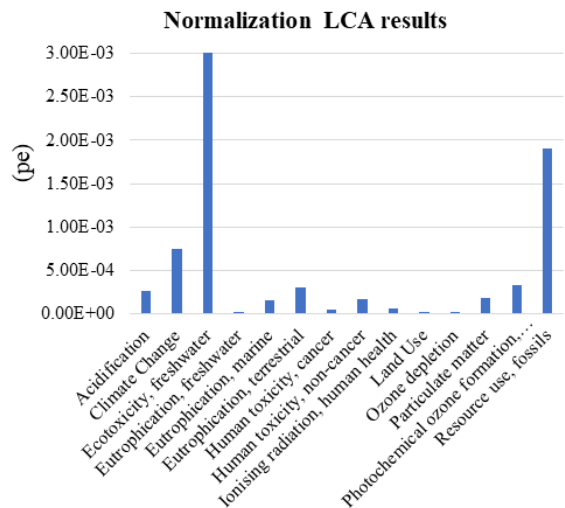


Fig. 3. Normalization LCA results.

준으로 에폭시 제조에서의 영향범주 중 기후변화 영향이 가장 큰 것은 주요 원료인 비스페놀 A(BPA)과 에피클로로히드린 (ECH)에 의한 영향인 것으로 파악되어 주요 원료 생산과정에서 발생하는 이산화탄소 감축을 위한 기술 개발이 필요할 것

으로 판단된다.

위 결과는 에폭시의 주요 원료인 BPA, ECH 등이 해외 국가 LCI DB를 사용하였기 때문에 데이터 품질 측면에서 BPA 및 ECH의 국내 현장 데이터를 사용할 수 있다면, 더욱 신뢰성 있는 수치를 도출할 수 있을 것으로 생각되어 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

사 사

이 논문은 2024년도 산업통상자원부의 지원 하에 수행한 “한국탄소산업진흥원 글로벌 호환형 LCI DB 구축[Project No. G2820240200011]” 사업의 일환으로 작성하였습니다.

References

1. European Union. Directive 2022/2464 of the Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), 2022.
2. KOTRA. EU Economic and Trade Briefing No. 24-51, 2024.
3. Bakthavatchalam, K., Pilla, S., Iyer, R.K. Life cycle assessment of bio-based epoxies. SPE ANTEC 2019 Conference, 2019.
4. Tserpes, K., Tzatzadakis, V. Life-cycle analysis and evaluation of mechanical properties of a bio-based structural adhesive. *Aerospace* 9, pp. 1-15 (2022).
5. Kočí, V., Picková, E. Life cycle perspective of liquid epoxy resin use in the automotive industry. *Polish Journal of Environmental Studies* 29, pp. 653-667 (2020).
6. Schelte, N., Hendrickx, B., Severengiz, S. Life-cycle based evaluation of the environmental impact of chemical recycling vs. combined waste-to-energy and carbon-capture-and-utilization for selected epoxy resins. *Procedia CIRP* 116, pp. 660-665 (2023).
7. Simone, M., Karen, A., Nathan, P., Kirana, C., de Souza, D.M. Product Environmental Footprint (PEF) Guide. European Commission: Brussels, Belgium, 2012.
8. IPCC 2019 Guidelines. Ministry of Environment Notice No. 2024-23: Guidelines for the Operation of Greenhouse Gas Target Management in the Public Sector, Article 7, Paragraph 2 (Method for Calculating Greenhouse Gas Emissions, etc.).