

석고보드 라이너의 전과정 환경영향평가에 관한 연구

오다훈^{1*}, 김태연², 백영순³, 민경택⁴¹한국공학대학교 IT반도체융합공학과, ²한국공학대학교 시탄소중립융합공학과,
³수원대학교 환경에너지공학과, ⁴한국공학대학교 나노반도체공학과

A Study on Life Cycle Environmental Impacts of Plasterboard Liner

Dahoon Oh^{1*}, Taeyeon Kim², Youngsoon Baek³, Kyungtaek Min⁴¹Department of IT-Semiconductor Convergence Engineering, Tech University of Korea, Korea²Department AI Carbon Neutrality Convergence Engineering, Tech University of Korea, Korea³Department of Environmental Energy Engineering, University of Suwon, Korea⁴Department of Nano-Semiconductor Engineering, Tech University of Korea, Korea

ABSTRACT

This study aimed to quantitatively analyze the environmental impacts throughout the entire life cycle of plasterboard liner produced in the paper industry, with a particular focus on the climate change category. The objective was to identify potential improvement measures to mitigate these impacts. To achieve this, a Life Cycle Assessment (LCA) was conducted using the openLCA software, analyzing the environmental burdens from Cradle-to-Gate. The climate change category accounted for 6.24E-01 kg CO₂-Eq per kilogram of plasterboard liner, with electricity consumption contributing 54.28% of the total 6 major greenhouse gases emissions. Organic compound production (23.9%) and recycled corrugated cardboard (7.59%) were the next most significant contributors. Among the six greenhouse gases defined by the IPCC, CO₂ accounted for the largest proportion of total emissions at 89.5%, followed by CH₄ at 9.1% and N₂O at 0.9%. Environmental costs were calculated as 6.01E-02 USD based on the EU ETS and 7.01E-03 USD based on the Korea ETS. Normalization results showed that the impact of toxic substances on freshwater ecosystems (Ecotoxicity: freshwater) had the highest contribution of 36.15% per kilogram of plasterboard liner produced. The stage-wise impact assessment revealed that the manufacturing stage (A3) contributed 59.97%, followed by the pre-manufacturing stage (A1-A2) at 46.06%.

Key words: LCA, plasterboard liner, openLCA, climate change

요약

본 연구는 제지산업에서 생산되는 석고보드 라이너의 전과정에서 발생하는 환경영향을 정량적으로 분석하고, 특히 climate change 범주를 중심으로 환경영향을 개선 방안을 도출하는 것을 목적으로 수행되었다. 이를 위해 openLCA 소프트웨어를 활용하여 LCA기법으로 Cradle-to-Gate에 걸친 환경 부하를 분석하였다. Climate change 범주는 석고보드 라이너 1 kg 기준 6.24E-01 kg CO₂-Eq로 나타났으며, 전체 6대 온실가스 배출량의 54.28%는 전력 소비가 차지하였다. 다음으로 유기 화합물 생산(23.9%)과 폐골판지 재활용(7.59%)이 주요 기여 요인으로 나타났다. IPCC 정의에 따른 6대 온실가스 중 CO₂는 전체 배출량의 89.5%로 가장 큰 비중을 차지했으며, CH₄와 N₂O가 각각 9.1%와 0.9% 순이다. 환경비용은 EU ETS 기준으로는 6.01E-02 USD, Korea ETS 기준으로는 7.01E-03 USD로 산출되었다. 정규화 결과, 석고보드 라이너 1 kg 생산 시 전과정에서 독성물질이 담수 생태계에 미치는 영향(Ecotoxicity: freshwater)이 36.15%로 가장 큰 기여도를 보였다. 단계별 영향평가 결과는 제조전단계(A1-A2)와 제조단계(A3)에서 각각 46.06%와 59.97%의 영향을 미치는 것으로 나타났다.

주제어: 전과정평가, 석고보드 라이너, openLCA, 온실가스

Date Received: Date Received: Mar. 3, 2025 , Date Revised: Apr. 28, 2025 , Date Accepted: Apr. 28, 2025

* Corresponding author : Dahoon Oh, Tel: +82-10-3456-2558, E-mail: odh@tukorea.ac.kr

© Copyright 2025 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.

1. 서론

제조산업은 국가 경제와 기술 발전의 핵심 원동력으로, 현대 사회의 경제 성장과 기술 발전을 이끌어 왔다. 그러나, 제조산업의 자원 집약적 생산 방식과 높은 에너지 소비는 심각한 환경 문제를 초래하고 있다. 특히, 온실가스 배출로 인한 지구온난화는 생태계 파괴, 기후변화 등 전 지구적인 부정적 영향을 일으키며, 이는 현대 사회가 직면한 주요 과제로 부상했다.

유엔기후변화협약의체(UN Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)는 2018년 보고서를 통해 산업화 이전 대비 지구 평균 온도가 1.5°C 상승할 경우 초래될 심각한 환경적, 경제적 영향을 경고하며, 전 세계가 탄소중립(carbon neutrality) 실현을 위한 노력을 강화해야 한다고 강조했다. 2016년 파리기후협정(COP21)을 기점으로 일부 국가들은 2050년까지 온실가스 순 배출량을 '0'으로 줄이기 위한 구체적인 목표와 정책을 수립했다[1]. 한국 정부 또한 탄소중립 시나리오를 발표하며, 제조산업을 포함한 주요 산업군에서 온실가스 감축을 위한 규제를 강화하고 있다. 제조산업 중 제지산업은 생산 공정에서 스팀 생산 및 설비 가동을 위해 화석연료, 폐기물 에너지를 광범위하게 활용한다. 이러한 에너지 소비는 온실가스 배출의 주요 원인으로 작용하고 있다. 2015~2019년 제지산업의 온실가스 배출 원단위(tCO₂-Eq/백만 원)를 살펴보면 5년간 평균이 2.042로, 제조산업의 평균치인 0.655보다 약 3.1176배에 높은 수준으로 나타났다. 공정별 온실가스 배출량은 건조 공정이 64.2%로 가장 높은 비중을 차지하며, 조성 공정(16.2%), 초지 및 압착 공정(11.7%), 완성 및 후공정(7.6%) 순으로 나타났다[2]. 이는 건조 공정에서 스팀 생산을 위해 주로 화석연료와 폐기물 에너지가 주로 사용되기 때문이다[3,4].

이러한 제지산업에서 생산되는 대표적인 제지제품은 석고보드 라이너(plasterboard liner)이다. 이는 건축 내장재로서 벽체와 천장의 마감에 사용되는 석고보드의 주요 구성 요소로 석고를 중심으로 두 장의 보드용 종이를 겹쳐 제작되며, 석고 심재와 결합하여 제품의 안정성과 내구성을 강화한다. 또한 불연성, 단열성, 차음성과 같은 물리적 특성을 가지며, 건축물의 안전성과 에너지 효율성을 높이는 역할을 한다[5]. 주요 원료는 폐골판지, 폐지와 같은 재활용지이다. 재활용 원료의 활용은 천연자원의 소비를 줄이고 폐기물을 효과적으로 재활용함으로써 지속가능성을 도모한다. 특히, 재활용지로 생산된 석고보드 라이너는 자원 순환의 대표적인 사례이다. 주요 생산 과정은 해리, 정련, 조성, 건조 및 코팅, 캘린더링의 단계로 이루

어진다. 해리 단계에서는 폐골판지가 물과 혼합되어 섬유 형태로 분리되며, 정련 단계에서는 섬유의 물리적 특성이 개선된다. 이후 조성 단계에서 섬유에 접착제와 첨가제를 혼합하여 요구 사양에 맞는 슬러리를 형성하고, 이를 바탕으로 시트 형태의 라이너가 제작된다. 건조 및 코팅 단계에서는 제품의 안정성과 내구성을 확보하며, 마지막으로 캘린더링 과정을 통해 두께와 표면 품질을 조정한다[6]. 이와 같은 과정을 통해 석고보드 라이너는 건축 내장재로서의 성능을 극대화하며, 친환경적 자원 활용을 실현한다.

이러한 변화는 제조산업 전반에 새로운 기회를 제공하는 동시에, 국내·외 규제 변화에 대응이 미흡한 기업은 규제와 시장 압력에 직면할 수 있다. 이에 따라, 제조업의 환경영향을 정량적으로 분석하고, 개선 방안을 모색하는 것이 필수적이다. 이를 위한 기법으로 전과정평가(life cycle assessment, 이하 LCA)는 제조산업의 환경적 영향을 정량적으로 분석하고 개선 방안을 제시하는 데 핵심적인 방법론으로 자리 잡고 있다[7,8].

제지산업 분야에서 수행된 기존의 LCA 연구는 주로 골판지, 인쇄용지 등 일반적 용도의 제지제품을 중심으로 환경영향 평가에 집중되어 있다. 그러나 건축용 특수지인 석고보드 라이너와 같이 재활용 원료 기반의 특수 목적형 제지제품에 대한 환경영향평가는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 석고보드 라이너 1 kg에 대한 LCA를 수행하여, cradle-to-gate 범위에서 발생하는 주요 환경 부하 요인을 정량화하고자 한다.

2. LCA 분석

2.1. 목적 설정

본 연구는 openLCA를 활용하여 석고보드 라이너 전과정에서 발생하는 잠재적 환경영향 범주(기후변화, 자원소모, 에너지 사용 등)를 정량화한다. 특히, climate change 범주를 중심으로 process별 환경영향을 분석하여 주요 온실가스 배출 process를 규명한다. 석고보드 라이너 전과정에서 발생하는 climate change 범주의 인벤토리를 CML v4.8 2016 방법론을 통해 정량화한 후, 이를 IPCC에서 정의한 6대 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆)로 그룹화하고, 가중화 단계를 통해 Korea ETS와 EU ETS 등 주요 국가 및 지역의 온실가스 배출권 거래 가격을 적용하여 석고보드 라이너 생산의 전 과정에서 발생하는 온실가스 배출량에 따른 경제적 환경비용을 정량화한다.

2.2. 범위 설정

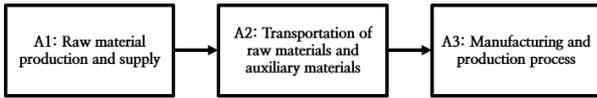


Fig. 1. System boundary of plasterboard liner.

석고보드 라이너의 기능단위(function unit)를 1 kg으로 설정하여 전과정에서 발생하는 온실가스 배출량, 폐기물, 에너지 소비량 등을 정량적으로 평가하고, 비교주장을 위한 기준으로 활용하고자 한다.

또한, 환경성적표지 작성지침의 건축자재(생산재) 부문에서 제시한 cradle-to-gate 시스템경계 설정 기준을 적용하여 분석 범위를 설정하였다. 설정된 시스템경계는 원료 취득부터 제품 제조 완료 시점까지의 과정을 포함하였다. A1 및 A2 단계를 제조전단계로, A3 단계를 제조단계로 구분하였으며, 열린 고리 재활용(open-loop recycling)의 extraction load 방식을 적용하여 주원료인 재활용 자재의 환경영향을 반영하였다. 전체 시스템경계를 Fig. 1에 나타내었다.

A1 단계는 국내·외 원료물질(폐골판지, 폐지 등), 보조물질(전분, 약품 등)의 생산 및 수급 과정에서 발생하는 자원 소비와 환경 부하가 포함된다. A2 단계는 원료물질 및 보조물질을 제조 공장으로 운송하는 과정에서 발생하는 연료 소모와 대기 배출물(CO₂, NO_x 등)이 포함된다.

A3 단계는 석고보드 라이너의 생산 공정을 다루며, 주요 공

정은 펄핑, 조성, 건조, 마무리 단계로 구성된다. 이 단계에서는 전력과 열에너지의 사용, 물 소비, 그리고 공정 중 발생하는 폐수 및 고형 폐기물의 처리 과정이 포함된다. 전체 제조 공정의 흐름을 Fig. 2에 나타내었다.

이에 따라, 석고보드 라이너 제조 과정에서 발생하는 환경 부하를 정량적으로 평가하기 위해 ISO 14044 국제 표준과 환경성적표지 작성지침을 참고하여 LCA 모델링 및 해석 조건을 설정하였다[9].

본 연구에서 주로 다루고자 하는 환경영향 평가는 climate change 범주가 포함된, CML v4.8 2016 방법론을 적용하였다.

LCI 데이터는 현지점에서 가장 최신이며, openLCA에서 활용할 수 있는 ecoinvent v3.10 데이터베이스를 적용하였다. 데이터는 1차 데이터와 2차 데이터로 나뉘어 활용하였다. 1차 데이터는 제조업체와 협력업체에서 수집한 현장 데이터로 구성하였다. 직접적인 데이터 확보가 어려운 경우, 2차 데이터로 산업계 평균 전과정 목록 데이터를 활용하였다.

해의 수송 거리는 환경성적표지 작성지침 부속서 B의 권역별 표준 데이터를 적용하였다.

데이터 모델링 과정에서는 제외 기준(cut-off) 원칙을 적용하여, 제품 제조 단계에서 투입되는 물질 중 누적 질량 기준 상위 95% 이상 기여하는 물질에 대해 환경성적을 산정하였다.

또한, 사업장의 총생산량 대비 대상 제품 생산량 비율(64.79%)에 따라 할당을 진행하였다. 제조 공정에서 발생하는 일부

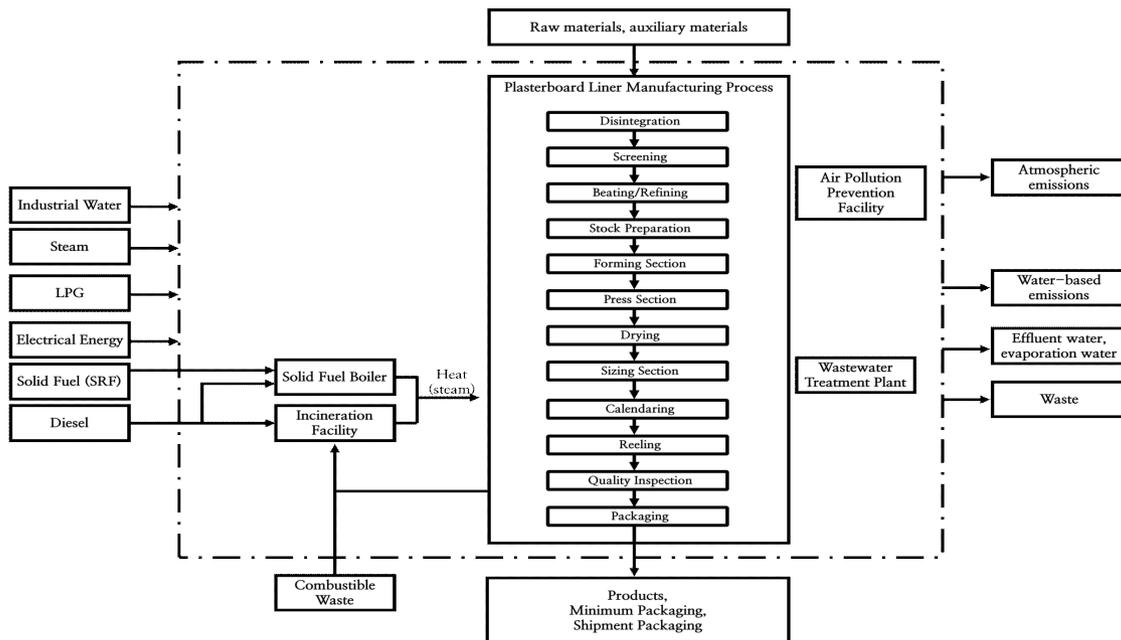


Fig. 2. Process diagram for manufacturing process of plasterboard liner.

폐기물의 경우, 사업장 내부 소각로에서의 완전연소를 가정하여 분석을 진행하였다.

2.3. 목록분석

목록분석 단계에서는 석고보드 라이너의 전과정에서 사용된 자원과 배출된 물질을 정리 및 정량화하였다. 이에 범위 설정 단계에서 설정한 시스템경계(A1-A3)에 해당하는 데이터를 ecoinvent v3.10 데이터베이스와 연결하였다. 목록화한 투입/산출물과 사용한 ecoinvent 데이터베이스 목록을 Table 1, 2에 나타내었다.

2.4. 영향평가

분류화 단계에서는 목록분석 단계에서 도출된 데이터를 환경영향 범주별로 분류하였다. 본 연구에서는 기후변화(climate change) 범주에 중점을 두어 분석하였다. 이에 따라, 분류화를 통해 주요 발생원에서 carbon dioxide(fossil), methane(fossil), dinitrogen monoxide, sulfur hexafluoride가 배출되는 것을 확

Table 1. Data categories of plasterboard liner (1 kg)

Category		Name
Input	Raw materials	Waste paper, starch, aluminium chloride, strength agent, pure water, steel, polyvinyl acetate, paper
Input	Utility	SRF, steam (external)
Input	Water use	Industrial water (production), industrial water (consumption)
Input	Energy	Electricity, LPG, diesel
Input	Transportation	Marine transportation, road transportation
Input	Packaging material	Corrugated cardboard, film
Output	Product	Plasterboard liner
Output	Waste	Fly ash, bottom ash, waste oil incineration, foundry sand, wood recycling, sludge recycling, oil recycling, lubricant recycling
Output	Water-related emissions	Discharged water
Output	Process emissions	Styrene, CO ₂ , CO, N ₂ O, CH ₄ , SO _x , NMVOC, NO _x , Ammonia, HCl, F-compounds, H ₂ S, T-N, T-P

Table 2. List of ecoinvent LCI data used (v3.10)

Flow	Geographical location
Waste newspaper	GLO
Chemical, organic	GLO
Maize starch	RoW
Corrugated board box	RoW
Packaging film, low density polyethylene	GLO
Core board	RoW
Waste plastic, mixture	RoW
Steam, in chemical industry	RoW
Waste paper, unsorted	RoW
Waste wood, untreated	RoW
Municipal solid waste	RoW
Tap water	RoW
Electricity, low voltage	KR
Diesel	RoW
Liquefied petroleum gas	RoW
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	RoW
Transport, freight, sea, container ship	GLO
Wood ash mixture, pure	RoW
Lignite ash	GLO
Fly ash and scrubber sludge	RoW
Digester sludge	GLO
Waste wood, post-consumer	GLO
Used vegetable cooking oil	GLO
Sewage sludge, 70% water, WWT, WW from vegetable oil refinery	GLO
Wastewater, average	RoW

인하였다. 분류화 결과, 주요 발생원 일부를 Table 3에 나타내었다.

특성화는 분류화 단계에서 도출된 물질 및 배출 항목에 대해 특정 환경영향 범주로의 기여도를 정량적으로 평가하였다. 이를 위해 CML v4.8 2016 방법론의 climate change 범주를 포함한 다양한 환경영향 범주에 대한 특성화 인자를 적용하였다. 이를 통해 도출한 특성화 결과를 Table 4에 나타내었다.

정규화는 특성화 단계를 통해 산출된 환경영향을 설정한 기준으로 범주별 비교가 가능하도록 조정하는 과정이다[10]. 본 연구에서는 CML normalisation factors, World 2000 정규화 인자를 적용하였다[11]. 이를 통해 각 환경영향 범주별 상대적 중요도를 평가하여 정규화 결과를 Table 5에 나타내었으며,

Table 3. Major flows and source of climate change

Major flow name	Source
Carbon dioxide (fossil)	Generated from fossil fuel combustion in the manufacturing process and transportation stages
Methane (fossil)	Emissions from waste management and energy use
Dinitrogen monoxide	Emissions from the manufacturing process and Waste incineration process

Table 4. Characterization results of plasterboard liner (1 kg)

Impact category	Impact assessment result	Unit
Acidification	2.16E-03	kg SO ₂ -Eq
Climate change	6.24E-01	kg CO ₂ -Eq
Ecotoxicity: freshwater	6.28E-01	kg 1,4-DCB-Eq
Ecotoxicity: marine	1.80E+03	kg 1,4-DCB-Eq
Ecotoxicity: terrestrial	1.78E-02	kg 1,4-DCB-Eq
Energy resources: non-renewable	8.56E+00	MJ
Eutrophication	7.56E-03	kg PO ₄ -Eq
Human toxicity	3.09E+00	kg 1,4-DCB-Eq
Material resources: metals/minerals	3.90E-06	kg Sb-Eq
Ozone depletion	1.19E-08	kg CFC-11-Eq
Photochemical oxidant formation	1.65E-04	kg ethylene-Eq

범주별 정규화된 값을 연간 단위 환경 부하(yr/fu.)로 표현하였다. Climate change(2.993%)는 5번째로 높은 기여도를 보이는 것으로 확인되었다.

그룹화 단계에서는 석고보드 라이너의 전과정에서 발생하는 climate change 범주 값을 IPCC에서 지정한 6대 온실가스로 분류하여 그룹화하였다. 이 과정은 전과정의 climate change 범주의 배출 데이터를 기반으로 수행하였으며, 그룹화 결과를 Table 6에 나타내었다.

가중화 단계는 환경비용법 중 오염처리비용법(tellus method)을 적용하였다. 그룹화 단계에서 도출된 6대 온실가스를 기반으로, 각국의 2023년 평균 온실가스 배출권 거래 가격(emission trading scheme, ETS)을 적용하여 석고보드 라이너의 전과정 배출량에 따른 환경비용을 산출하였다. 이를 통한

Table 5. Normalization results for plasterboard liner (1 kg)

Impact category	Value	Unit
Climate change	1.49E-14	yr/fu.
Material resources: metals/minerals	2.13E-17	yr/fu.
Ozone depletion	5.18E-17	yr/fu.
Human toxicity	8.08E-14	yr/fu.
Ecotoxicity: freshwater	1.80E-13	yr/fu.
Ecotoxicity: terrestrial	1.63E-13	yr/fu.
Photochemical oxidant formation	3.03E-15	yr/fu.
Acidification	9.05E-15	yr/fu.
Eutrophication	4.79E-14	yr/fu.

석고보드 라이너 1 kg당 전과정에서 발생한 6대 온실가스 배출량(6.24E-01 kg CO₂-Eq)의 가중화 결과 일부를 Table 7에 나타내었다.

ETS 기반 환경비용 산정은 국가별 탄소시장 구조와 가격 변동성, 배출권 정책 등에 따라 결과가 달라질 수 있다. 본 연구에서는 제품 단위의 총배출량을 평균 탄소가격으로 환산하

Table 6. Grouping results by six major GHGs of IPCC's

Group	Flow name	Inventory result (kg)
CO ₂	Carbon dioxide, fossil	5.59E-01
	Carbon dioxide, from soil or biomass stock	7.81E-03
	Carbon dioxide, to soil or biomass stock	-9.52E-07
CH ₄	Methane, fossil	4.95E-02
	Methane, non-fossil	1.30E-03
	Methane, from soil or biomass stock	2.15E-04
N ₂ O	Dinitrogen monoxide	5.66E-03
HFCs	1,1,1,2-Tetrafluoroethane	1.91E-05
	1,1,2-Trichloro-1,2,2-trifluoroethane	9.84E-06
	Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	3.41E-06
PFCs	Tetrafluoromethane	9.81E-05
	Hexafluoroethane	2.94E-05
SF ₆	Sulfur hexafluoride	5.70E-04

Table 7. Weighting results for plasterboard liner (1 kg)

Category	Carbon price (USD/tCO ₂ -Eq)	Environmental cost (USD)
EU ETS	96.29	6.01E-02
Switzerland ETS	93.8	5.85E-02
UK ETS	88.12	5.50E-02
Austria ETS	35.34	2.21E-02
New Zealand ETS	34.19	2.13E-02
Germany ETS	32.62	2.04E-02
Beijing pilot ETS	12.95	8.08E-03
Korea ETS	11.23	7.01E-03

여 환경비용을 평가하였으나, 실제 기업의 재무적 탄소관리에 서는 scope별 배출 구분, 배출권 할당량 및 부과 기준 등에 따라 큰 차이가 발생할 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 배출 범위별 정교한 모델링과 탄소가격의 시계열적 변동성을 고려한 시나리오 분석이 요구된다.

3. 전과정 해석 및 고찰

3.1. LCA 해석 결과

목록분석과 영향평가 결과를 기반으로 전과정 해석을 수행하였다. 특히, climate change 범주에 대한 상세 분석 결과를 중심으로 전과정 해석을 수행하였다. Climate change 범주는 온실가스 배출로 인한 지구온난화의 영향으로 6.24E-01 kg CO₂-Eq로 정량화되었으며, 주요 영향 물질을 Fig. 3에 나타내었다. 석고보드 라이너 1 kg 생산 시 전과정에서 carbon dioxide, fossil가 89.55%로 가장 높은 기여도를 나타냈으며, 그 다음으로 methane, fossil(7.93%) 및 carbon dioxide, from

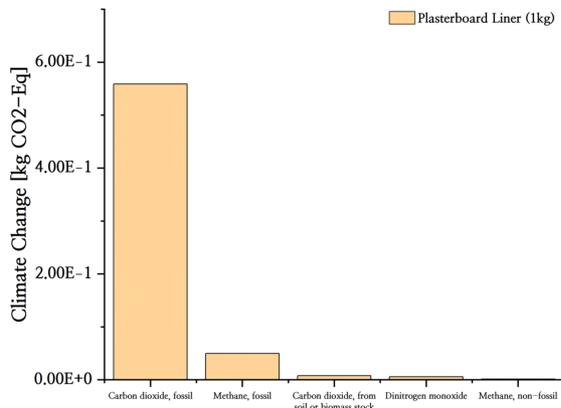


Fig. 3. Contribution of major impact flow in climate change (2023).

Table 8. Major factors of GHGs emissions

Source	Emissions (kg CO ₂ -Eq)	Contribution rate (%)
Electricity consumption	3.39E-01	54.28
Organic chemical production	1.49E-01	23.90
Recycling of wasteboard	4.74E-02	7.59
Starch production	3.36E-02	5.39
Transportation process	3.14E-02	5.04
Steam and thermal energy use	2.91E-03	0.51
Packaging material use	3.19E-03	0.47

soil or biomass stock(1.25%) 순으로 나타났다.

Table 8은 6대 온실가스로 그룹화한 climate change 범주의 주요 기여 요인 및 상대적 기여도를 나타내었다.

3.2. LCA 결과의 비교 분석

본 연구에서 정량화한 석고보드 라이너의 환경영향 결과의 신뢰도 검증을 위해 유사 골판지 계열 제지제품 containerboard, linerboard와 제품 유닛에 대한 비교 분석을 수행하였다. 본 연구는 생산단계(A1-A3)까지를 시스템경계를 설정하였다. 이에 따라, 본 연구와 비교 대상 제품에 동일한 조건을 적용하기 위해 생산단계까지의 ecoinvent v3.10 LCI 데이터베이스를 활용하였다. 사용한 데이터는 ‘containerboard production, linerboard, kraftliner | containerboard, linerboard | Cutoff, S - RoW’이다[12]. CML v4.8 2016 평가 방법론을 적용하여 동일한 환경영향 범주 결과를 도출하여 Fig. 4에 나타내었다. 비교 결과 containerboard, linerboard(1 kg)의 climate change는 6.82E-01로 나타났으며, 본 연구 결과 대비 5.74E-02 높은 것으로 나타났다. Climate change를 제외한 환경영향 범주의 평균은 1.12E+02로 본 연구 결과 대비 6.93E+01 낮은

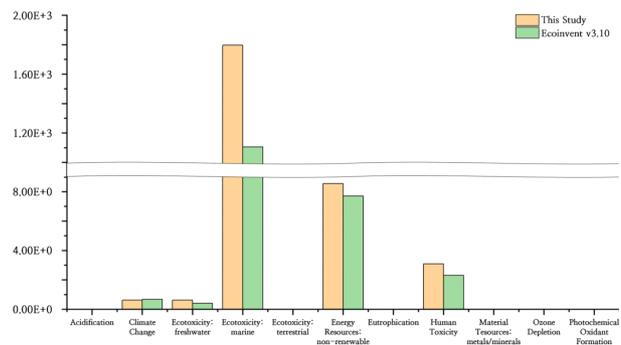


Fig. 4. Comparison of containerboard and linerboard (1 kg) and this study.

환경영향을 미치는 것으로 나타났다.

석고보드 라이너의 climate change 범주의 환경영향을 정량적으로 비교하기 위해 독일의 Hamburger Containerboard GmbH사의 SpreeGips Plasterboard Liner(1 ton) The International EPD System 사례를 활용하였다[13]. 이에 따라, 본 연구와 비교 대상 제품에 동일한 조건을 적용하기 위해 기능단위를 1 kg으로 환산하였으며, A1-A3 단계의 Climate Change 범주의 환경영향을 비교 분석하였다. Fig. 5는 두 사례의 climate change 범주에 대한 비교 결과를 보여준다. 분석 결과, SpreeGips Plasterboard Liner의 climate change 값은 $6.23E-01$ 로, 본 연구 결과 대비 $3.20E-02$ 낮은 환경영향을 나타냈다.

본문과 해외 EPD 사례 간의 온실가스 배출량 차이 $3.20E-02$ kg CO₂-Eq는, 본문에서는 CML v4.8 방법론을, 해외 EPD 사례에서는 EF3.1 EN15804+A2 방법론을 적용한 데에서 기인한 차이로 나타났다. 양 사례는 지리적 대표성, 제품범주규칙(product category rules, PCR) 등에서도 차이를 보이므로, 수치 간 직접적인 비교보다는 상대적 경향성과 주요 기여 요인 분석에 중점을 두어 해석하였다. 향후 연구에서는 동일한 평가 방법론, 데이터베이스(DB), PCR 조건을 적용한 정합성 있는 비교 분석이 필요하다.

또한, 현재 국내에서 운영되고 있는 환경성적표지제도에서 7대 환경영향 범주에 대한 환경성 정보를 정량적으로 산정할 때 활용 중인 에코스퀘어 프로젝트를 본 연구와의 비교 분석에 활용하였다. 이를 위해 동일한 시스템계와 목록분석 범위를 적용하여 석고보드 라이너의 LCA를 수행하고, 그 결과를 비교 분석하였다. 이에 따라, 본 연구에서 도출한 환경영향 결과 중 비교 가능한 범주와 비교 분석을 진행하였으며, Fig. 6

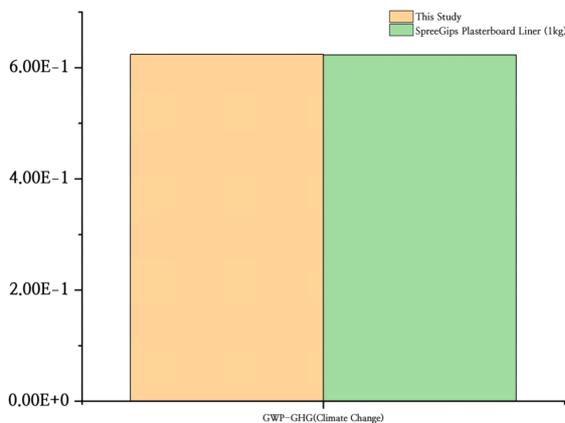


Fig. 5. Comparison of spreeGips plasterboard liner (1 kg) and this study.

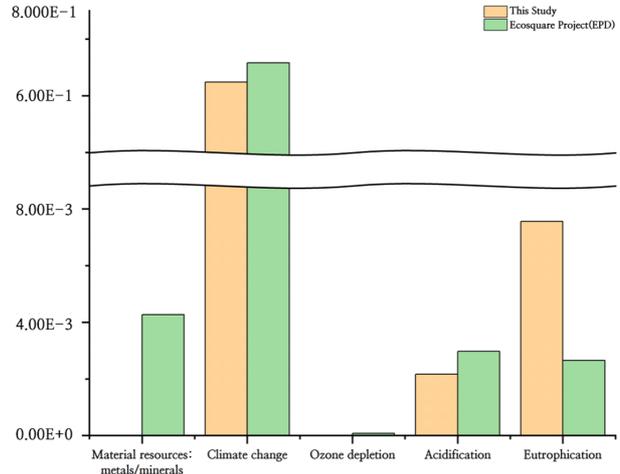


Fig. 6. Comparison of ecosquare project (EPD) and this study.

에 환경영향 범주별 비교 결과를 나타내었다. 비교 결과, 에코스퀘어 프로젝트의 환경성적의 평균은 $1.34E-01$ 로 본 연구 결과 대비 $6.84E-03$ 높은 환경영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 적용한 LCI 데이터베이스의 차이에 의한 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 제지산업에서 생산되는 석고보드 라이너의 Cradle-to-Gate 범위에서 발생하는 환경영향을 openLCA 소프트웨어를 활용하여 정량화하였다. 석고보드 라이너의 전과정에 걸친 환경 부하를 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 석고보드 라이너 1 kg 전과정에서 climate change 범주는 $6.24E-01$ kg CO₂-Eq로 정량화되었으며, 6대 온실가스 기준 전력 소비가 54.28%를 차지하고 가장 큰 환경 부하 요인으로 나타났다. 다음으로 유기 화합물 생산(23.9%)과 폐골판지 재활용(7.59%)이 주요 환경 부하 요인이다.
2. 정규화 결과를 통해 석고보드 라이너 1 kg 생산 시 전과정에서 가장 큰 기여도로 Freshwater가 36.15%, 그 다음으로 Terrestrial가 32.65%, Human toxicity가 16.19%, Eutrophication가 9.59%, climate change가 2.99% 순으로 나타났다. 단계별 영향평가 결과는 제조단계(A1-A2)가 46.06%, 제조단계(A3)가 59.97%로 나타났다. 이는 석고보드 라이너 제조 공정 중 수생 생태계에 독성을 유발하는 물질 배출의 영향이 다른 환경영향 범주보다 상대적으로 크다는 것을 의미한다.

3. 그룹화 및 가중화 분석 결과, IPCC에서 정의한 6대 온실가스 중 CO₂는 전체 배출량의 89.5%로 가장 큰 비중을 차지하였다. CH₄와 N₂O는 각각 9.1%와 0.9%를 차지하였다. 또한, ETS를 기반으로 온실가스 배출에 따른 환경비용을 산출하였다. EU ETS 기준으로 환경비용은 6.01E-02 USD로 산출되었으며, Korea ETS 기준으로는 7.01E-03 USD로 산출되었다. 이는 각 지역에서 적용되는 배출권 가격의 차이를 반영한 결과로, 지역적 특성을 고려한 정책적 접근이 필요함을 시사한다.

사 사

이 논문은 2025년도 정부(환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 탄소중립특성화대학원의 지원을 받아 수행된 연구임(DX기반 탄소공급망 환경 전문인력 양성).

References

1. United Nations Framework Convention on Climate Change. UN Climate Change Annual Report. UNFCCC: Germany (2018).
2. Charles, M., Narayan, K.B., Edmonds, J., Yu, S. The role of the pulp and paper industry in achieving net zero U.S. CO₂ emissions in 2050. *Energy and Climate Change* 5 (2024).
3. Korea Paper Association. Annual Domestic Supply and Demand Status. Korea Paper Association: Korea (2024).
4. Park, H. Carbon Neutral Strategy and Policy Tasks in the Domestic Textile and Paper Industry. Policy Report 2022-04, Statistics Korea: Daejeon (2022).
5. Business Research Insights. Plasterboard liner market size, share & growth report, 2032. Business Research Insights (2024).
6. Rivero, A.J., Sathre, R., Navarro, J.G. Life cycle energy and material flow implications of gypsum plasterboard recycling in the European Union. *Resources, Conservation and Recycling* 108, pp. 171-181 (2016).
7. ISO. ISO 14040:2006 Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework. 2nd Edition, International Organization for Standardization: Geneva (2006).
8. Kim, I., Heo, T. Environmental life cycle assessment. Donghwa Technology: Seoul (2022).
9. Ministry of Environment. Guidelines for Environmental Product Declaration. Notification No. 2024-29, Green Industry Innovation Division, Ministry of Environment: Daejeon (2024).
10. Heo, Y.C., Seo, S.W., Ha, S.S., Lee, G.M. Estimation of domestic normalization reference values for the Korean environmental impact assessment index method. *Journal of Life Cycle Assessment* 2(1), pp. 69-78 (2000).
11. Huijbregts, J., Margni, L., Curran, S., Schaubroeck, B., Struijs, A.N., Zelm, M.J. Cumulative energy demand as predictor for the environmental burden of commodity production. *Science of the Total Environment* 407(8), pp. 2695-2706 (2010).
12. Ecoinvent. Ecoinvent 3.10 Dataset Documentation: Containerboard Production, Linerboard, Kraftliner – RoW – Containerboard, Linerboard. Ecoinvent Association: Zürich (2021).
13. Hamburger Containerboard GmbH. Environmental Product Declaration: SpreeGips Plasterboard Liner. The International EPD® System, EPD Registration No. S-P-12187 (2024).
14. Magacho, G., Espagne, E., Godin, A. Impacts of the CBAM on EU trade partners: consequences for developing countries. *Climate Policy* 24(2), pp. 243-259 (2023).
15. Li, T.T., Wang, K., Sueyoshi, T., Wang, D.D. ESG: Research progress and future prospects. *Sustainability* 13(21), pp. 1-28 (2021).
16. Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B.P., Pennington, D.W. Life cycle assessment: Part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International* 30 (5), pp. 701-720 (2004).
17. Reinhard, J., Mutel, C.L., Wernet, G., Zah, R., Hilty, L.M. Contribution-based prioritization of LCI database improvements: method design, demonstration, and evaluation. *Environmental Modelling & Software* 86, pp. 204-218 (2016).
18. Kim, H.S., Lee, D.E., Park, H.I. Investigation of the status of international life cycle inventory (LCI) database

- development and suggestions for national LCI DB construction. *Journal of Life Cycle Assessment* 18(1), pp. 57-59 (2017).
19. Shin, W.C., Hwang, Y.W., Moon, J.Y., Gong, C.H. Environmental assessment of copper and aluminum metal resource circulation using LCA methodology. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 36(2), pp. 139-146 (2014).
 20. Jeong, S.J., Ryu, J.Y., Heo, T. Life cycle assessment of waste paper incineration process. *Journal of Life Cycle Assessment* 5(1), pp. 43-49 (2004).
 21. Park, K.H., Hwang, Y.W., Cho, B.M., Kim, H.J. Environmental impact assessment of paper and paper packaging products: a case study of life cycle assessment (LCA). *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 25(11), pp. 1411-1419 (2003).
 22. ISO. ISO 14044:2006 Environmental Management — Life Cycle Assessment — Requirements and Guidelines. 1st Edition, International Organization for Standardization: Geneva (2006).
 23. Herrmann, I.T., Moltesen, A. Does it matter which life cycle assessment (LCA) tool you choose? A comparative assessment of SimaPro and GaBi. *Journal of Cleaner Production* 86, pp. 163-169 (2015).
 24. Ministry of Environment, ESG Infrastructure Support Team, Life Cycle Assessment Office. 2024 Environmental Product Declaration Certification Guide. Ministry of Environment (2024).