

# PEF 방법론을 활용한 발포유리보드에 대한 환경성평가

김 익 · 설소영  
스마트에코 주식회사

## Environmental assessment on expanded glass board using PEF method

Ik Kim · Soyoung Suol  
SMaRT-ECO Consulting Firm

**핵심어:** 전과정평가, 발포유리보드, PEF 방법론

**Key words:** Life cycle assessment, Expanded glass, PEF method

### 1. Introduction

질은 미세먼지의 잦은 출몰과 폭염, 폭설 등 환경이슈가 우리사회의 뜨거운 감자로 떠오르면서 친환경에 대한 관심이 증가하고 있다. 이와 같은 환경이슈에 더하여 글로벌에서 가장 이슈화되고 있는 환경이슈를 들면 기후변화(climate change)와 순환경제(circular economy)일 것이다. 특히 순환경제에 대한 이슈화로 재활용과 재사용이 떠오르고 있다. 즉, 지금까지의 선형경제(linear economy)에서 순환경제로 전환함에 따라 폐기물 발생량을 줄이는 것과 함께 비용절감도 이뤄 지속가능한 사회로의 전환을 유도하고자 하는 취지이다.

세계은행에 따르면 인구증가와 도시팽창으로 인해 대부분의 선진국에서 발생하는 전체 폐기물의 30~35%는 건설 폐기물이다. 이에 따라 EU는 순환경제의 비전달성을 위해 섬유와 함께 건설자재에 대한 환경규제를 강화한다고 발표하였다. 우리나라에서도 이와 유사하게 건설자재의 개발 시에 순환자재의 비율을 높이면서 동일한 성능을 유지할 수 있는 자재의 개발이 활발해지고 있다.

본 연구의 대상인 발포유리보드는 주원료인 폐유리를 무게비율로 90%이상 투입하고 발포제로 알루미늄 드로스, 카본, 실리콘카바이드를 첨가하여 틀에 넣어서 약 800℃ 이상으로 가열하면 유리가 녹으면서 발포 및 팽창하고 이를 냉각하면 다공성의 경량소재가 생산된다. 한국순환자원유통지원센터에 따르면 Fig. 1에서 보는 바와 같이 2015

년부터 2017년까지 포장용기 재질별 재활용률은 플라스틱 재질이 가장 높은 100%에 육박하고 다음으로 페트병과 금속캔, 발포합성수지가 80% 수준이다. 반면에 유리병은 2015년에 71%이었으나 지속적으로 감소하여 2016년 69%, 2017년 63%로 종이팩 다음으로 재활용률이 낮았다. 이에 폐유리의 재활용률을 높일 수 있는 방안 중의 하나로 건설 자재의 원료로 사용하는 노력을 하고 있다. 또한 폐유리 재활용에 따른 추가적인 환경개선 효과가 얼마나 되는지를 평가하기 위하여 전과정평가의 개념을 도입한 EU에서 발표한 PEF (product environmental footprint) 방법론에 따라 환경성을 평가하였다.

### 2. Materials and methods

#### 2.1 기능 및 기능단위

폐유리를 주원료로 사용하여 제조한 외장용 발포유리보드와 내장용 발포유리보드를 연구대상으로 하였다. 이들 제품은 건축자재로서 건축물의 내장용 및 외장용 마감재로서의 기능을 갖는다. 발포유리보드의 기능단위는 1 kg 생산으로 설정하였다. 그리고 외장용 및 내장용 발포유리보드의 밀도는 각각 단위부피(1 m<sup>3</sup>)당 0.339 ton과 0.270 ton이다.

#### 2.2 시스템경계

발포유리보드는 제품의 특성상 중간제품이다. 따라서 제품의 시스템경계는 Fig. 2와 같이 원료채취에서부터 제품생산단계까지인 Cradle to gate로 정하였다. 여기서 제조단계는 폐유리를 수거하여 분쇄업체로 보내서 유리분말을

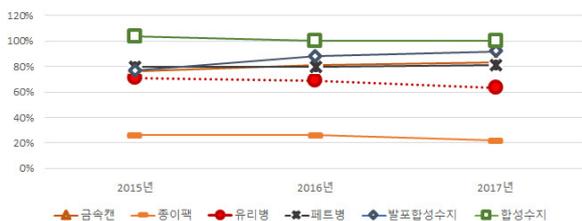


Fig. 1. 용기별 재활용률(2015~2017년)

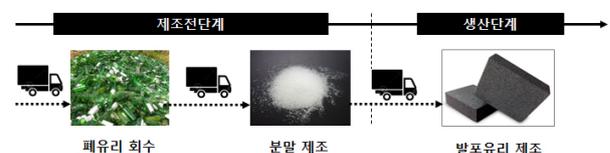


Fig. 2. 발포유리보드의 시스템경계

‡ Corresponding author:

**Table 1.** 연구대상의 기능 및 기능단위

	외장용 발포유리보드	내장용 발포유리보드
기능	외장용 마감재	내장용 마감재
기능단위	1 kg 생산	1 kg 생산
성능	밀도: 0.339 (ton/m <sup>3</sup> )	밀도: 0.270 (ton/m <sup>3</sup> )

**Table 2.** 사용한 LCI 데이터베이스 목록별 출처

물질명	데이터베이스 명칭	년도
전기	자체 제작	2019
SiC	[GLO] Silicon mix (99%)	2018
Al 드로스	[RNA] Secondary aluminum ingot	2018
붕산	[EU-28] Boric acid (estimation)	2018
LPG	[US] Liquefied petroleum gas (70% propane, 30% butane)	2018
유리분말	자체 제작	2019

생산하는 단계를 포함한다. 그리고 생산단계는 유리분말 및 발포제를 활용하여 발포유리보드를 생산하는 단계를 포함한다.

**2.3 데이터 수집**

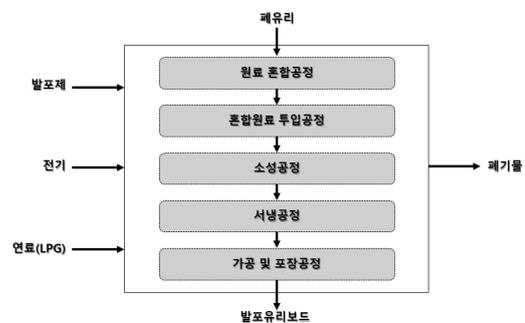
발포유리보드를 생산하는 공정은 제조전단계의 폐유리 분쇄공정을 통해 만든 유리분말을 공장으로 이송해 온 것을 발포제와 혼합하는 원료 혼합공정, 혼합원료를 규격사이즈의 형틀에 투입하는 혼합원료 투입공정, 보일러에서 연료를 연소하여 생산한 스팀을 활용하여 형틀에 들어있는 혼합원료를 소성하는 공정, 소성 후 형틀을 공냉하는 공정, 마지막으로 규격사이즈로 절단하여 포장하는 공정을 포함한다.

Fig. 3의 발포유리보드 생산공정으로부터 폐유리와 발포제, 전기, 연료에 대한 투입량 및 폐기물 발생량, 발포유리보드 생산량 데이터를 수집하였다.

**2.4 데이터 계산**

투입물과 산출물의 흐름에 대해 실시간으로 데이터관리가 되고 있지 않아서 투입물 중 폐유리와 발포제의 투입량은 내장용과 외장용 별로 관리하는 원단위 장부를 토대로 투입량을 산출하였다. 또한 발생하는 폐기물의 출처는 전량 폐유리와 발포제에 기인하기 때문에 폐기물 발생량을 내장용과 외장용의 생산비율에 따라 배분한 후에 내장용과 외장용 보드별로 폐유리와 발포제의 구성비율을 고려하여 폐유리와 발포제의 투입량을 산출하였다.

다음으로 원료혼합공정과 혼합원료 투입공정, 소성공정, 서냉공정, 가공 및 포장공정이 형틀단위로 진행되기 때문에 생산공정에서 사용되는 전기와 연료투입량을 형틀단위를 기준으로 배분하였다. 형틀단위의 배분기준은 Table 1에서 제시한 내장용과 외장용의 밀도(ton/m<sup>3</sup>)를 활용하였다.



**Fig. 3.** 발포유리보드 생산공정 및 투입·산출물 목록

**2.5 환경영향 산출**

본 연구에서는 영향범주별 환경영향을 산출하기 위하여 EU PEF에서 제시하고 있는 영향평가 방법론을 사용하기로 하였다. 이를 위하여 환경영향 산출을 위한 도구로 GaBi LCA 소프트웨어를 사용하였으며, LCI(전과정 목록)를 산출하기 위하여 한국 정부에서 개발한 LCI 데이터베이스를 사용할 수 없어서 GaBi 소프트웨어를 활용하여 자체적으로 개발한 전기 LCI 데이터베이스를 활용하였다. 또한, 트럭에 의한 내륙수송과 발포제, 연료, 폐기물 재활용에 대한 LCI 데이터베이스는 GaBi 소프트웨어에 내장된 LCI 데이터베이스를 사용하였다. 사용한 LCI 데이터베이스 목록은 Table 2와 같다.

전과정 영향평가를 위한 영향범주는 GaBi 소프트웨어에 내장된 EU PEF 영향평가 방법론 1.09버전의 16대 영향범주 중에서 기후변화(바이오기반 CO<sub>2</sub> 포함), 토지사용을 제외한 14대 영향범주를 대상으로 특성화(characterization) 결과를 산출하였다. 14대 영향범주 목록과 범주별 단위는 Table 4를 참조하기 바란다. 또한 영향범주간의 상대적 중요도를 평가할 수 있는 정규화(normalization) 결과의 산출을 위하여 정규화 기준(normalization reference)<sup>1)</sup>으로

1) Lorenzo B. et al., JRC Technical Report: Normalization method and data for Environmental Footprints, European Commission, 2014.

**Table 3.** 내장용 및 외장용 발포유리보드에 대한 LCI 결과

구분	물질명	단위	발포유리외장재(a)		발포유리내장재(b)	
			발생량	비율 (a/a)	발생량	비율 (b/a)
자원	Non-renewable energy resources	kg	1.03E+00	100%	1.27E+00	123%
	Non-renewable resources	kg	6.04E-01	100%	6.46E-01	107%
대기 배출물	Ammonia	kg	1.93E-05	100%	2.02E-05	105%
	Carbon dioxide	kg	1.94E+00	100%	2.38E+00	123%
	Carbon monoxide	kg	1.03E-03	100%	1.19E-03	115%
	Nitrogen oxides	kg	2.74E-03	100%	3.29E-03	120%
	Sulphur dioxide	kg	6.15E-03	100%	7.49E-03	122%
	Methane	kg	3.23E-03	100%	3.93E-03	122%
	Dust (> PM10)	kg	1.84E-02	100%	1.84E-02	100%
	수계 배출물	Biological oxygen demand (BOD)	kg	7.15E-05	100%	8.80E-05
	Chemical oxygen demand (COD)	kg	3.67E-04	100%	4.42E-04	120%

**Table 4.** 외장용 및 내장용 발포유리보드에 대한 14대 영향범주별 특성화 결과

영향범주	단위	발포유리외장재	발포유리내장재
산성화	mol H <sup>+</sup>	1.02E-02	1.23E-02
지구온난화	kg CO <sub>2</sub> -eq	2.02E+00	2.49E+00
생태독성	CTUe	8.94E-01	1.10E+00
부영양화(육수)	kg P-eq	7.42E-07	8.81E-07
부영양화(해수)	kg N-eq	1.10E-03	1.32E-03
부영양화(토지)	mol N-eq	1.20E-02	1.44E-02
인체독성(발암)	CTUh	2.87E-08	3.53E-08
인체독성(비발암)	CTUh	9.74E-08	1.18E-07
인체건강(방사선)	bq U <sub>235</sub>	1.26E-02	1.34E-02
오존층영향	kgCFC11-eq	1.28E-11	1.44E-11
인체건강(호흡기)	PM <sub>2.5</sub>	5.41E-04	6.51E-04
광화학스모그	NM VOC	3.57E-03	4.29E-03
수자원고갈	m <sup>3</sup> -eq	1.20E-02	1.23E-02
광물자원고갈	kg Sb-eq	2.69E-05	2.78E-05

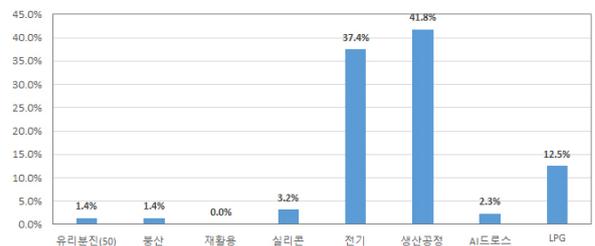
PEF에서 제시한 글로벌 수준의 정규화 기준을 활용하였다.

### 3. Results and discussion

#### 3.1 목록분석 결과

Table 3은 내장용 및 외장용 발포유리보드에 대한 LCI 목록 중에서 주요 투입물과 산출물에 대하여 요약정리한 표이다. 이에 따르면 외장용 발포유리보드 1 kg을 생산하는 동안 1.94 kg의 이산화탄소를 배출하였고, 내장용은 외장용보다 23%가 더 많은 2.38 kg이 배출되었다. 반면에 대기배출물 중에서 입자의 직경이 10 μm 이상인 분진발생량은 내장용과 외장용이 거의 동일한 것으로 나타났다. 이는, 연료와 전기의 생산과정에서 분진발생량이 극소량이기 때문인 것으로 나타났다.

외장용 발포유리보드를 생산하는 전과정 동안에 발생한 1.94 kg의 이산화탄소가 각 투입-산출 공정에서 얼마나 발



**Fig. 4.** 외장용 발포유리보드의 투입-산출물별 이산화탄소 발생 기여도(%)

생하는 지를 분석하였다. Fig. 4에 따르면 발포유리보드를 생산하는 과정에서 연료를 연소시켜 스팀을 생산하는 과정에서 전체의 41.8%가 배출되었고, 다음으로 생산공정에서 사용한 전기로 인해 발생한 이산화탄소 간접배출로 인해 37.4%가 발생하였다. 연료를 생산하는 과정에서 발생한 이산화탄소 간접배출에 따라 12.5%가 발생하였다. 이

상의 결과로부터 연료와 전기에너지의 생산과 연소과정에서 직·간접 이산화탄소 배출로 인해 전체의 91.7% 발생하여 지배적이었다. 발포제로 사용되는 붕산과 실리콘 카바이드, 알루미늄 드로스로 인해 전체의 6.9%가 발생하였고, 주요 원료인 폐유리를 분쇄하여 분말을 만들고 발포유리 제조공장으로 50 km 이송하는 과정에서는 불과 1.4%만이 발생한 것으로 나타났다.

3.2 영향평가 결과

발포유리보드를 생산하는 전과정에서의 잠재적 환경영향을 평가하였다. Table 4는 외장용 및 내장용 발포유리보드에 대한 14대 영향범주별 특성화 결과이다. 각종 온실가스로 인한 지구온난화 영향은 외장재가 2.02 kgCO<sub>2</sub>-eq.이고, 내장재가 2.49 kgCO<sub>2</sub>-eq.이었다. 또한 미세먼지로 인한 호흡기 질환에 대한 영향은 외장재가 5.41E-04 kgPM<sub>2.5</sub>

이었고, 내장재가 6.51E-04 kgPM<sub>2.5</sub>이었다. 하지만 특성화 결과가 14대 환경영향별로 잠재적 기여도를 비교할 수 없기 때문에 정규화를 수행하였다.

Fig. 5는 외장용 및 내장용 발포유리보드에 대한 14대 영향범주별 정규화 결과를 나타낸 것이다. 이에 따르면 외장용과 내장용의 모든 영향범주에 대한 환경영향 기여도 순서가 동일하였다. 먼저 가장 기여도가 큰 영향범주는 인체독성(발암)으로 외장용과 내장용의 기여도가 47.1%와 48.5%이었다. 다음으로 인체독성(비발암)이 12.7%와 12.9%이었으며, 광물자원 고갈에 대한 영향의 기여도가 각각 12.9%와 11.2%이었다. 상대적 중요도가 가장 큰 인체독성(발암)의 경우, 연료인 LPG의 생산으로 인해 전체의 86.1%를 차지하였고, 전기에 의해 6.2%, 붕산에 의해 5.1%를 차지하였으며, 실리콘 카바이드에 의해 2.0%를 차지하였다.

Table 5. 유리원료를 재생재에서 신재로 대체함에 따른 환경영향 비교

단위	외장재(a) (100% 재생재)	외장재(50% 재생재)(b)			외장재(0% 재생재)(c)			
		환경영향	차이(b-a)	(b-a)/a	환경영향	차이(c-a)	(c-a)/a	
산성화	mol H <sup>+</sup>	1.02E-02	1.52E-02	5.00E-03	49.0%	2.02E-02	1.00E-02	98.0%
지구온난화	kgCO <sub>2</sub> -eq	2.02E+00	2.51E+00	4.90E-01	24.3%	3.00E+00	9.80E-01	48.5%
생태독성	CTUe	8.94E-01	1.04E+00	1.46E-01	16.3%	1.19E+00	2.96E-01	33.1%
부영양화(육수)	kgP-eq	7.42E-07	1.07E-06	3.28E-07	44.2%	1.36E-06	6.18E-07	83.3%
부영양화(해수)	kgN-eq	1.10E-03	2.26E-03	1.16E-03	105.5%	3.42E-03	2.32E-03	210.9%
부영양화(토지)	molN-eq	1.20E-02	2.53E-02	1.33E-02	110.8%	3.86E-02	2.66E-02	221.7%
인체독성(발암)	CTUh	2.87E-08	2.93E-08	6.00E-10	2.1%	2.98E-08	1.10E-09	3.8%
인체독성(비발암)	CTUh	9.74E-08	1.03E-07	5.60E-09	5.7%	1.09E-07	1.16E-08	11.9%
인체건강(방사선)	bq U <sub>235</sub>	1.26E-02	3.68E-02	2.42E-02	192.1%	6.10E-02	4.84E-02	384.1%
오존층영향	kgCFC <sub>11</sub> -eq	1.28E-11	1.29E-11	1.00E-13	0.8%	1.30E-11	2.00E-13	1.6%
인체건강(호흡기)	PM <sub>2.5</sub>	5.41E-04	7.17E-04	1.76E-04	32.5%	8.93E-04	3.52E-04	65.1%
광화학스모그	NMVOG	3.57E-03	5.89E-03	2.32E-03	65.0%	8.20E-03	4.63E-03	129.7%
수자원고갈	m <sup>3</sup> -eq	1.20E-02	1.63E-02	4.30E-03	35.8%	2.06E-02	8.60E-03	71.7%
광물자원고갈	kgSb-eq	2.69E-05	2.78E-05	9.00E-07	3.3%	2.87E-05	1.80E-06	6.7%

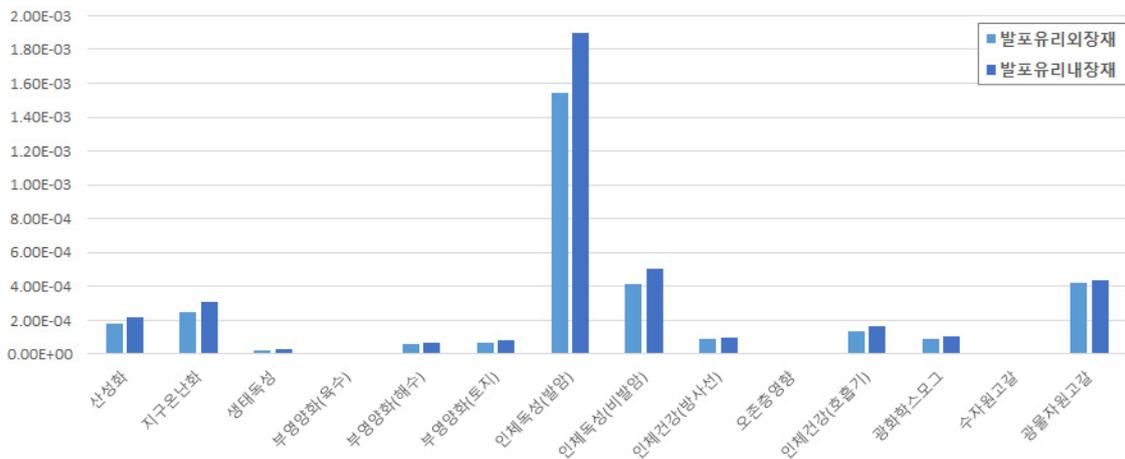


Fig. 5. 외장용 및 내장용 보드에 대한 14대 영향범주별 정규화 결과

### 3.3 영향평가 개선효과 분석

발포유리보드는 재생유리 100%로 생산하더라도 품질을 만족시키고 환경성 개선 및 비용절감효과가 있기 때문에 활용도가 크다. 하지만 발포유리의 원료를 100% 신재를 사용할 때에 비해 100% 재생재를 사용함에 따라 어느 정도의 환경개선 효과가 있는지를 분석해 보았다.

Table 5는 주원료인 폐유리의 비율을 100%에서 50%, 0%로 변화시킴에 따라 발포유리보드의 영향범주별로 환경영향의 변화를 분석한 결과이다. 그 결과, 인체건강(방사선)의 감축률이 192.1%로 가장 컸고, 다음으로 부영양화(토지)가 110.8%, 부영양화(해수)가 105.5%가 줄어 들었다. 하지만 지구온난화는 0.49 kg인 24.3%가 줄었다. 주원료인 폐유리의 비율을 0%로 대체함에 따라 광화학스모그가 129.7%가 줄었고, 지구온난화도 48.5%에 해당하는 0.98 kg이 감소했다.

### 4. Conclusion

재활용 및 재사용률을 높여 환경영향도 줄이고 비용도 절감시킬 수 있는 순환경제가 시대적인 주요 이슈로 부상하고 있다. 이에 따라 폐기물 발생량이 30% 이상이 되는 건설부문에서도 순환경제의 중요성이 강조되고 있고, 건설자재에 대한 재생소재 함유에 대한 규제가 점차 강화되고 있다. 외장용 및 내장용 마감재로 사용되는 발포유리보드도 주원료로 폐유리를 100%를 사용하면서도 성능기준을 만족한 제품이 시중에 출시되고 있어 이로 인한 환경개선 효과가 매우 크다. 하지만 재생소재 사용에 따른 정량적 환경개선 효과가 알려지지 않았다. 이에 본 연구에서는 EU PEF 방법론을 사용하여 발포유리보드의 주원료인 폐

유리의 비율을 기존의 100%에서 50%와 0%로 변화시키면서 환경개선 효과를 분석하였다. 지구온난화의 경우에 50% 재생재를 사용하는 경우보다 24.3%가 줄었고, 재생재 0%(신재 100%)인 것에 비해서는 48.5%가 줄었다. 이처럼 재생재의 함유율을 높임으로써 실질적인 환경개선 효과가 있다는 것을 알 수 있었다.

### Acknowledgement

본 연구는 국토교통과학기술진흥원이 발주한 '환경성적표지 기반 생태건축의 성능기준 및 모듈화시공 기술개발사업'의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### REFERENCES

- 1) Zampori L., Pant R., Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, European Union, 2019.
- 2) Lorenzo B. et al., JRC Technical Report: Normalization method and data for Environmental Footprints, European Commission, 2014.
- 3) 우수재활용제품(GR) 품질인증기준: 재활용 발포유리블럭, 국가기술표준원, 2016.
- 4) 한국순환자원유통지원센터 홈페이지(<http://www.kora.or.kr/>).
- 5) GS칼텍스 매거진: 글로벌 친환경 트렌드, 순환경제(Circular Economy)와 우리, 2019.
- 6) Silpa K. et al., What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050, World bank group, 2018.
- 7) 이철태, 가압성형 방법에 의한 발포유리의 제조공정, 한국공업화학회지, 제24권 3호, pp 239-246, 2013.
- 8) 김용환, 폐유리를 이용한 발포유리에 대한 첨가물 효과, 첨단기술정보분석, 2014.

