

EU PEF Guide에 따른 3종 시멘트에 대한 환경성 비교

김 익¹ · 설소영¹ · 김현수² · 이지영²

¹스마트에코 주식회사

²한국건설기술연구원

Comparison of environmental performance for 3 types of cement by EU PEF Guide

Ik Kim¹ · So-Yeong Seol¹ · Hyeon-Soo Kim² · Ji-Young Lee²

¹SMaRT-Eco Consulting

²Korea Institute of Civil Engineering and Building Technologies

요 약

다량의 온실가스를 배출하는 시멘트 3종에 대하여 EU PEF 방법에 따라 환경성평가를 수행하였다. 환경성결과는 환경지수로 산출하였다. 그 결과 포틀랜드시멘트의 환경지수가 가장 높은 1.17E-01로 나타났다. 이는 포틀랜드 시멘트의 지구온난화 영향이 다른 시멘트에 비해 월등히 높는데 기인한다. 하지만 미세먼지 영향은 온실가스 배출량이 가장 적은 에코시멘트가 가장 높았다. 에코시멘트의 미세먼지 영향을 줄이기 위해 황산칼슘의 대체가 필요하다.

주제어: 제품환경발자국, 전과정평가, 시멘트, 기후변화, 미세먼지 영향

ABSTRACT: Environmental assessment was performed according to the EU PEF method for three types of cement that emit large GHG emissions. The results were calculated as an eco-point. As a result, Portland Cement has the highest eco-point of 1.17E-01. This is due to the fact that the global warming effect of Portland cement is significantly higher than those of other cements. However, eco-cement had the highest particulate matter effect. The replacement of calcium sulfate is necessary for reducing the particulate matter effect of eco-cement.

Key words: PEF, Life cycle assessment, Cement, Climate change, Particulate matter effect

1. 서 론

2015년 12월 파리기후협약이 체결된 이후, 2018년 10월에 송도에서 개최된 제48차 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 기후변화에 관한 정부간 협의체) 총회에서 채택된 1.5°C 특별보고서는 지구의 평균온도 상승폭을 1.5도로 제한하기 위해 2010년 대비 2030년까지 45%의 CO₂를 감축해야 하고, 2050년까지는 CO₂ 배출과 흡수가 서로 완전히 상쇄되는 이른바 넷제로 배출(Net-Zero Emission)을 달성해야 한다고 기술되어 있다. 이후 2019년 12월 EU 집행위원회(European Commission)는 유럽그린딜(European Green Deal)을 발표하고 2050년까지 세계 최초로 기후중립(Climate Neutral) 목표를 달성하겠다고 발표하면서 전 세계의 관심의 대상이 되었다. 발표 이후에 일본과 중국 등 세계 각국에서 탄소중립 계획을 발표하였다. 우리나라도 2020년 10월 28일 국회 시정연설에서 문재인 대통령이 2050 탄소중립을 선언하면서 세계의 흐름에 동참하게 되었다. 산업계에서는 국내 최초로 온실가스 배출량이 가장 많은 포

스코가 2050 탄소중립을 선언하면서 산업계로 관심이 확산되는 분위기이다.

국제사회는 2050 탄소중립을 위하여 기존의 온실가스 배출권거래 이외에 제품을 매개로 하는 탄소규제를 점차 강화하고 있다. 대표적으로 EU 탄소국경세는 탄소누출업종 중에서 가치사슬이 짧은 철강과 시멘트, 화학제품을 1차 규제대상으로 2023년부터 규제가 시작될 거라고 발표한 바가 있다. 국내 철강업종은 포스코를 시작으로 탄소중립 전략을 수립하여 시행할 것으로 보이지만, 철강에 비해 상대적으로 열악한 시멘트업계의 탄소중립 전략은 아직 제시된 바가 없다.

이에 본 연구에서는 시멘트업계의 기후변화 대응 잠재력 및 미세먼지 영향을 진단하기 위하여 대표적인 시멘트인 포틀랜드 시멘트(Portland cement)와 슬래그 시멘트(Slag cement), 기후변화 대응을 위해 개발 중인 에코 시멘트(Eco-cement)에 대하여 EU PEF(Product Environment Footprint) 가이드에 따라 환경성을 비교하고자 한다.

[‡] Corresponding author:

2. 연구 방법

2.1 비교대상 시멘트

비교대상 시멘트는 1종 포틀랜드 시멘트와 슬래그 시멘트, 그리고 에코 시멘트로 알려진 SSC (Super-Sulphated Cement) 등 3종이다. SSC 시멘트는 포틀랜드 시멘트의 함량이 약 5% 이하이며 나머지는 슬래그 분말과 황산칼슘 (Calcium Sulfate)으로 구성된다. 슬래그 시멘트는 타 시멘트에 비해 초기 강도발현은 낮지만 28일 이후의 장기 강도가 포틀랜드 시멘트의 강도를 초과하여 물성에는 문제가 없는 것으로 알려지고 있다.

2.2 연구의 범위정의

EU 탄소국경세 등 글로벌 환경규제에 대한 대응 잠재력을 진단하기 위하여 시멘트의 환경성평가를 위한 방법론은 EU PEF 가이드를 선택하였다. 기능단위는 Table 1과 같이 정의하였다. 시스템경계는 시멘트의 원료인 석회석을 채취하는 과정에서 가공 또는 교반을 통하여 시멘트를 생산하는 과정까지인 Cradle to gate로 설정하였다. 데이터 품질평가를 위한 품질지표는 지역적상관성(Geographical coverate), 시간적상관성(Time coverage), 기술적상관성(Technology coverage) 등 3가지를 고려하였다. 지역적으로는 국내의 생산시설이 있는 공장으로 데이터를 수집하고, 시간적으로는 5년 이내의 데이터를 사용하며, 기술적으로는 최신의 기술이 적용되는 것을 원칙으로 하였다. 영향평가 방법론은 EU PEF Guide에서 제시한 16대 영향범주 중 기후변화 (Climate change)와 미세먼지 영향(Particulate matter effect)에 대한 영향평가 모델(EF 3.0)을 적용하였다. 영향평가 단계는 특성화와 정규화, 가중화를 수행하였다.

Table 1. 기능 및 기능단위 설정.

Aspects	Definition
What (functions provided)	건축물의 벽면을 포장
How much (Extent of function)	1ton 생산
How well (Expected level)	
How long (Duration)	50년 유지

Table 2. 3종 시멘트의 일차데이터 수집현황.

대상	생산지역	수집년도	수집데이터 목록
포틀랜드 시멘트	한국 (3개공장)	2016	· 투입물 - 원부자재 - 유틸리티
슬래그 시멘트	한국 (2개공장)	2016	· 산출물 - 제품
에코 시멘트	한국 (1개공장)	2018	- 폐기물, - 배출물

2.3 데이터 수집 및 계산

생산공정으로부터 일차 데이터를 수집하였다. 3종의 시멘트에 대한 일차데이터는 모두 한국의 생산현장으로부터 데이터를 수집하였고, 수집년도는 포틀랜드 시멘트와 슬래그 시멘트는 2016년도 데이터이고, 에코 시멘트는 2018년도의 파일럿 설비의 데이터이다.

수집한 데이터는 투입물과 산출물 간의 인관계를 고려한 물질수지 검증이 이뤄졌으며, SimaPro 소프트웨어(Ver. 9.0)를 활용하여 목록분석 결과와 영향평가 결과를 산출하였다. 소프트웨어를 활용한 LCA 모델링 과정에서 사용한 이차데이터의 목록은 Table 3과 같다. 에코시멘트의 주원료인 황산칼슘은 LCI 데이터세트가 없어서 유사한 황산알루미늄으로 대체하였다.

3. 연구 결과

3.1 특성화 결과 비교

3.1.1 총괄

Fig. 1은 3종 시멘트에 대한 지구온난화 영향을 비교한 것이다. 이에 따르면 포틀랜드 시멘트는 1톤당 849kgCO_{2e}, 슬래그 시멘트는 포틀랜드 시멘트의 51.1% 수준인 434kgCO_{2e}, 에코 시멘트는 16.3% 수준인 138kgCO_{2e}이었다. 즉, 기후변화 측면에서 에코시멘트는 포틀랜드시멘트에 비해 6배가 좋은 것으로 나타났다. 또한 Fig. 2는 3종 시멘트에 대한 미세먼지 영향을 비교한 것이다. 이에 따르면 포틀랜드 시멘트가 1톤당 7.21E-06 질환자(disease)를 발생시키고, 슬래그 시멘트는 포틀랜드 시멘트의 66% 수준인 4.76E-06dis-

Table 3. 이차데이터 목록별 연도 및 출처.

목록	연도	출처
슬래그	2019	Blast furnace slag {GLO} blast furnace slag, Recycled Content cut-off/U
석고	2019	Gypsum, mineral {IN} market for gypsum, mineral APOS, U
LNG	2019	Natural gas liquids {GLO} market for APOS, U
전기	2019	Electricity, high voltage {KR} market for APOS, U
석회석	2019	Limestone, crushed, for mill {RoW} market for limestone, crushed, for mill APOS, U
유연탄	2008	Bituminous coal, at mine/US
LPG	2020	LPG, combusted in industrial boiler, at pulp and paper mill (EXCL.)/I/RNA
황산칼슘 (대체)	2019	Aluminium sulfate, powder {RER} market for aluminium sulfate, powder APOS, U
점토	2019	Clay plaster {RoW} production APOS, S

ease, 에코 시멘트는 159% 수준인 1.15E-05disease로 나타났다. 즉, 에코시멘트는 기후변화 측면에서는 3종 시멘트 중에서 가장 우수하지만 미세먼지 측면에서는 가장 좋지 않은 입장일단이 있는 것으로 나타났다.

3.1.2 포틀랜드 시멘트

포틀랜드 시멘트의 지구온난화 영향의 86.9%가 시멘트 제조과정 내에서 킬른과정에서 발생한 이산화탄소와 연료의 연소과정에서 발생한 이산화탄소 발생에 기인한다. 6.7%는 전기사용에 의해 발생된다. 반면에 미세먼지 영향의 33.3%는 공정내에서 발생한 미세먼지로 인한 영향이고, 27.6%는 석고의 생산과정에서 발생한 미세먼지이며, 14.5%는 석회석의 생산과정에서 발생한 미세먼지로 인한 영향으로 분석되었다.

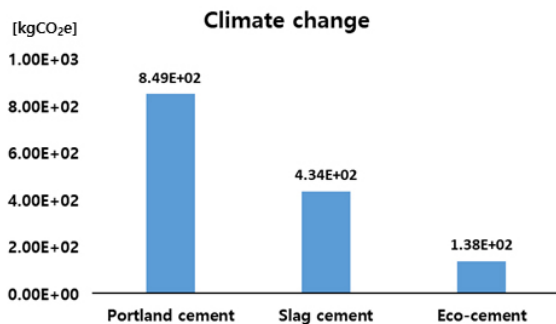


Fig. 1. 3종 시멘트의 지구온난화 결과 비교.

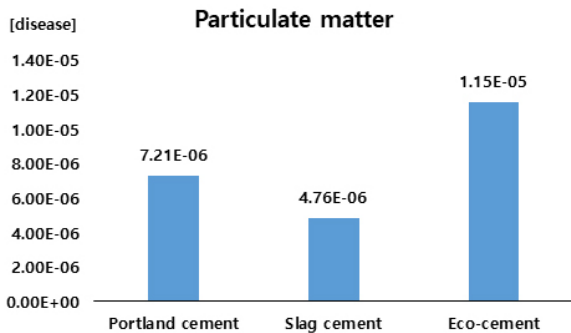


Fig. 2. 3종 시멘트의 미세먼지 영향 비교.

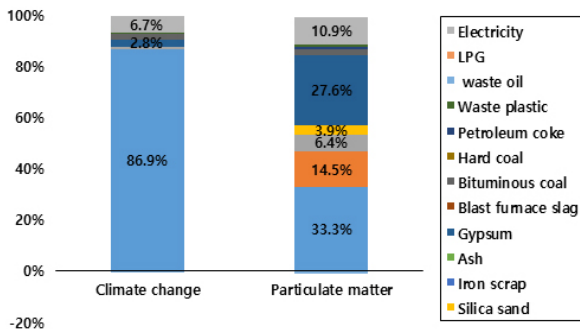


Fig. 3. 포틀랜드 시멘트의 지구온난화 및 미세먼지 영향.

3.1.3 슬래그 시멘트

Fig. 4는 슬래그 시멘트의 생산과정에서 투입물에 의해 발생한 지구온난화와 미세먼지 영향에 대한 비교그래프이다. 이에 따르면 슬래그 시멘트 원료로 투입되는 약 40wt%에 해당하는 포틀랜드 시멘트로 인한 영향이 지구온난화와 미세먼지 영향에 대해 각각 93.9%와 89.3%로 지배적이었다. 다음으로는 전기사용에 의해 각각 5.7%와 7.1%가 발생하였다. 2.3wt% 정도의 석고의 투입에 의해서는 0.4%와 3.5%의 영향을 발생시켰다. 즉, 포틀랜드 시멘트는 투입물 비중에 비해 환경영향이 훨씬 큰 것을 알 수 있다.

3.1.4 에코 시멘트

에코 시멘트는 포틀랜드 시멘트가 5.0wt% 이하로 투입되는 저탄소 시멘트이다. 포틀랜드 시멘트의 투입량이 적어서 전체의 약 15wt%가 투입되는 황산칼슘으로 인한 지구온난화 영향이 전체의 66%이고, 미세먼지 영향은 95.6%를 차지하였다. 반면에 포틀랜드 시멘트로 인한 영향은 각각 31.8%와 4.0%를 차지하였고, 전기사용에 의한 영향은 각각 2.2%와 0.4%를 차지하였다. 이상의 결과부터 황산칼슘은 투입량은 15% 수준이지만 이로 인한 미세먼지 영향은 95.6%를 차지하여 무게 대비 약 6.4배정도 미세먼지 영향이 큰 것으로 나타났다. 이로 인해 에코 시멘트 1톤당 발생하는 미세먼지 영향이 포틀랜드 시멘트나 슬래그 시멘트보다 높은 것을 알 수 있다.

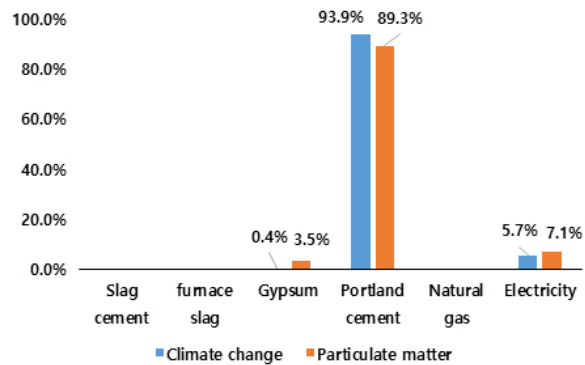


Fig. 4. 슬래그 시멘트의 지구온난화 및 미세먼지 영향.

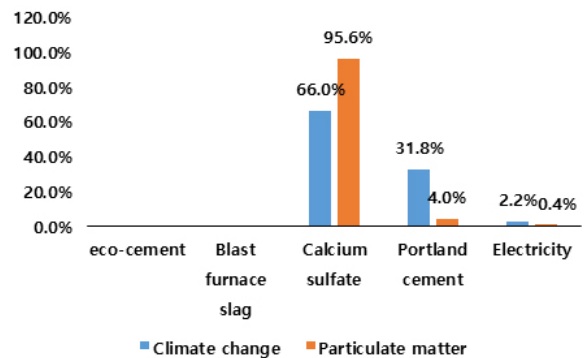


Fig. 5. 에코 시멘트의 지구온난화 및 미세먼지 영향.

Table 4. 3종 시멘트별 정규화 및 가중화 결과.

	지구온난화			미세먼지영향		
	포틀랜드 시멘트	슬래그 시멘트	에코 시멘트	포틀랜드 시멘트	슬래그 시멘트	에코 시멘트
특성화 결과	8.49E+02	4.34E+02	1.38E+02	7.21E-06	4.76E-06	1.15E-05
정규화 기준		8.10E+03			5.95E-04	
정규화 결과	1.05E-01	5.36E-02	1.71E-02	1.21E-02	8.00E-03	1.93E-02
가중화 인자		1			1	
가중화 결과	1.05E-01	5.36E-02	1.71E-02	1.21E-02	8.00E-03	1.93E-02

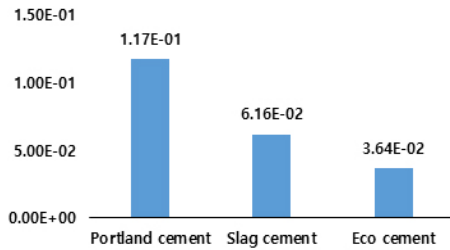


Fig. 6. 3종 시멘트의 환경지수 비교.

3.2 정규화 및 가중화 결과 비교

Table 4와 같이 3종의 시멘트에 대해 영향범주별로 정규화와 가중화를 수행하여 환경지수를 산출하였다. 영향범주별 정규화를 위한 정규화 기준은 유럽 집행위원회(European Commission) 산하의 공동연구센터(Joint Research Center, JRC)에서 2017년에 개발한 글로벌 정규화기준을 사용하였다. 한편 EC JRC는 EU PEF 방법론에 제시한 16대 영향범주별로 가중화인자를 개발하였으나, 이는 16대 영향범주를 모두 사용할 경우에 유효한 가중화인자이기 때문에 본 연구에서는 지구온난화와 미세먼지 영향에 대한 가중화인자를 사용할 수 없기 때문에 지구온난화와 미세먼지 영향에 대한 사회적 중요도를 동일하게 "1"로 가정하여 환경지수(Eco-point)를 산출하였다.

Fig. 6은 정규화와 가중화를 통해 산출된 3종의 시멘트에 대한 환경지수를 나타낸 그래프이다. 이에 따르면 포틀랜드 시멘트의 환경지수가 가장 큰 1.17E-01이었고, 슬래그 시멘트는 포틀랜드 시멘트의 환경지수의 52.6% 수준인 6.16E-02이었고, 에코 시멘트는 31.1% 수준인 3.64E-02이었다.

4. 결론

본 연구는 글로벌 기후위기 대응을 위해 추진되고 있는 2050 탄소중립 정책에 대한 실효성 검증 차원에서 철강과 함께 온실가스를 가장 많이 배출하는 시멘트 종류별로 지구온난화 영향이 어느 정도인지를 PEF 방법을 통해 평가하는 것이 목적이었다. 아울러 온실가스와 함께 발생하는 미세먼지로 인한 영향도 동시에 평가하여 일장일단(trade-off)의 효과가 있는지도 확인하고자 하였다. 결과적으로 포틀랜드 시멘트가 슬래그 시멘트와 에코 시멘트에 비해 지구온난화와 미세먼지 영향을 종합한 환경지수는 가장 높았

다. 이는 포틀랜드 시멘트가 지구온난화 영향이 다른 시멘트에 비해 월등히 높았기 때문이다. 하지만 미세먼지의 측면에서 볼 때, 지구온난화 영향이 가장 적은 에코 시멘트가 황산칼슘의 사용으로 인한 미세먼지 발생이 지배적인 것으로 나타났다. 이에 따라 에코 시멘트는 지구온난화 측면에서는 매우 우수한 건설자재이지만 미세먼지 측면에서는 개선해야 할 점이 많은 자재라는 것을 파악하였다.

이상의 결과는 황산칼슘에 대한 LCI 데이터세트가 없어서 황산알루미늄으로 대체하여 얻은 결과이기 때문에 향후 황산칼슘에 대한 LCI 데이터세트로 대체하여 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

사 사

이 논문은 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 지원 하에 수행한 도시건축연구사업 "환경성적표지 기반 생태건축의 성능기준 및 모듈화시공 기술개발"사업의 일환으로 작성하였습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- 1) J. Bijen, E. Niël, Supersulphated cement from blastfurnace slag and chemical gypsum available in the Netherlands and neighbouring countries, *Cement and Concrete Research*, 11(3), 1981, pp. 307-322.
- 2) J. Bijen, E. Niël, Supersulphated cement from blastfurnace slag and chemical gypsum available in the Netherlands and neighbouring countries, *Cement and Concrete Research*, 11(3), 1981, pp. 307-322.
- 3) Manfredi, S.; Allacker, K.; Chomkham Sri, K.; Pelletier, N.; Souza, D.M. *Product Environmental Footprint (PEF) Guide*; European Commission: Brussels, Belgium, 2012.
- 4) Serenella, S.; Eleonora, C.; Michela, S.; Rana, P. *Global Normalization for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment*; EC JRC Technical Report; Publications Office of the European Union: Brussels, Belgium, 2017.
- 5) Sala, S.; Cerutti, A.K.; Pant, R. *Development of a Weighting Approach for the Environmental Footprint*; European Commission: Luxembourg, 2018.
- 6) ISO 14044: *Environmental Management -Life Cycle Assessment-Requirements and Guidelines*; ISO: Geneva, Switzerland, 2006.
- 7) *Global warming of 1.5°C*, IPCC, 2019.
- 8) *Climate Recon 2050: Modelling net zero emissions*, BMU, 2019.
- 9) *European Environmental Bureau, Priorities for the European Green Deal and the 8th Environment Action Programme*, 2019.
- 10) PRé Consulting, *SimaPro database manual: Method library*, 2020.