

시멘트 제품군의 전과정평가

신동희*, 정재수, 이진모

(*환경마크협회, 아주대학교 환경·도시공학부)

Life Cycle Assessment on Cement Product

Dong-hee Shin*, Jae-su Jung, Kun-Mo Lee

*Korea Environmental Labelling Association, School of Environmental & Urban System Engineering, Ajou University)

ABSTRACT

A life cycle assessment has been conducted from raw material acquisition to manufacturing for cement products in Korea. The product category included portland cement - Type I, Type II, Type III and Type V - and Blast furnace cement. The major manufacturing companies were chosen for each product category and conducted life cycle inventory analysis. Generally, Site-specific Data was applied. If it's not impossible, database was used. Impact assessment was carried out consecutively as classification, characterization, normalization and weighting. The eco-indicators of portland cement - Type I, Type II, Type III and Type V - and Blast furnace cement were 6.53E-05, 4.81E-05, 4.39E-05, 4.84E-05 and 3.84E-05, respectively. Global warming from CO₂ was major contributor of product category.

Key Words : Life Cycle Assessment, Cement Products, Eco-indicator

요약문

국내산업계에서 범용적으로 생산되는 시멘트 제품군에 대하여 원료채취부터 제품제조까지에 대한 전과정평가를 수행하였다. 대상제품군은 국내 산업현황을 바탕으로 1종 포틀랜드 시멘트, 2종 포틀랜드 시멘트, 3종 포틀랜드 시멘트, 5종 포틀랜드 시멘트 및 고로슬래그 시멘트를 선정하였다. 각 대상 제품군별 국내 생산량이 큰 기업을 선정하여 전과정 목록분석을 수행하였다. 데이터는 현장 데이터를 적용하였으며, 현장 데이터 취득이 어려운 경우 데이터베이스를 사용하였다. 영향평가는 분류화, 특성화, 정규화 및 가중치부여 단계로 수행하였다. 환경영향평가지수는 1종 포틀랜드 시멘트, 2종 포틀랜드 시멘트, 3종 포틀랜드 시멘트, 5종 포틀랜드 시멘트 및 고로슬래그 시멘트공정이 각각 6.53E-05, 4.81E-05, 4.39E-05, 4.84E-05 및 3.84E-05로 나타났다. CO₂에 의한 지구온난화가 전체 환경영향의 대부분을 차지하였다.

주제어 : 전과정평가, 시멘트제품군, 환경영향평가지수

I. 개요

시멘트는 물과 반죽하였을 때 경화하는 무기질 교착재료를 통칭하는 것으로서, 주성분이 규산(SiO₂), 알루미늄(Al₂O₃), 산화철(Fe₂O₃) 및 석회(CaO)로 구성된다. 시멘트는 이미 고대로부터 자연상태의 시멘트가 각종 토목 및 건축공사에 사용되었으며, 현재도 다

양한 종류의 시멘트가 건축자재로 폭넓게 사용되고 있다. 그러므로 건축물의 LCA 수행시 국내 실정을 반영한 시멘트 LCI 데이터베이스가 유용하게 사용되리라 판단된다.

이 연구의 목적은 국내 현실을 반영한 시멘트 제품군에 대한 전과정 목록분석 결과(LCI 데이터베이스)를 구축하고, 전과정 영향평가를 수행하여 환경영향평가지수를 도출하는 것이다.

1. 대상제품 및 업체 선정

2001년 기준 전체 국내 시멘트 생산량 중 1종 포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 시멘트가 차지하는 비율은 99.55%이다. 따라서, 범용성 기준에 의해 1종 포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 시멘트를 연구대상제품으로 선정하였다. 추가적으로, 연구대상 설정시 제품 용도를 고려하였다. 건축 자재로서 고유한 용도를 가진 2종, 3종 및 5종 포틀랜드 시멘트에 대해서는 생산량이 소량이지만 연구범위에 포함하였다.

Table 1. product category

시멘트 종류	생산량(톤)	비율(%)
1종 포틀랜드 시멘트	52,046,329	89.93
2종 포틀랜드 시멘트	84,277	0.15
3종 포틀랜드 시멘트	17,893	0.03
4종 포틀랜드 시멘트	-	-
5종 포틀랜드 시멘트	107,606	0.19
고로슬래그 시멘트	5,566,304	9.62
특수 시멘트	51,277	0.09
합계	57,873,686	100

국내 시장점유율 기준으로 대상업체를 선정하였다. 1종 포틀랜드 시멘트는 생산업체의 상위 86%가 참여하였고, 2종, 3종 및 5종 포틀랜드 시멘트는 국내의 모든 생산업체를 고려하였으며, 고로슬래그 시멘트는 91%의 시장점유율을 가진 업체가 연구대상이 되었다.

II. 목표 및 범위 정의

1. 목표

국내에서 생산되는 시멘트 제품군에 대해 원료물질 취득부터 제품제조까지에 대한 전과정평가를 수행하고 환경영향평가가 지수를 도출하는 것이 이 연구의 목표이다. 여기서 도출된 전과정 목록분석 데이터는 국내 생산현황이 반영된 국가평균 LCI 데이터베이스가 되며, 제품의 전과정의 환경성을 평가하려는 정부기관, 기업 및 소비자 등에 의해 사용 가능하다.

2. 범위정의

2.1 기능, 기능단위 및 참고흐름

각 대상제품의 기능, 기능단위 및 참고흐름을 Table 2에 나타내었다. 각 대상제품의 참고흐름(reference flow)은 계산의 편의성 및 도출된 전과정 목록분석 결과의 이용을 쉽게 하기 위하여 기능단위와 동일하게 각 대상제품별 1kg으로 선정하였다.

Table 2. Function and functional unit of each product category

제품군	기능	기능단위
1종 포틀랜드 시멘트	토목, 건축 구조물용 무기질 접합제	1종 포틀랜드 시멘트 1kg
2종 포틀랜드 시멘트	도로포장, 댐공사, 터널용 무기질 접합제	2종 포틀랜드 시멘트 1kg
3종 포틀랜드 시멘트	콘크리트 2차제품, 긴급공사용 무기질 접합제	3종 포틀랜드 시멘트 1kg
5종 포틀랜드 시멘트	하수시설, 배수시설, 해양 구조물용	5종 포틀랜드 시멘트 1kg
고로슬래그 시멘트	일반 건설 토목용 무기질 접합제	고로슬래그 시멘트 1kg

2.2 시스템 경계

시스템 경계와 관련된 사항을 아래에 정의하였다.

자연계 흐름으로서 투입물/배출물 : 대상제품의 전과정 중 원료의 취득부터 대상제품 제조공정까지 (Cradle to Gate; CtG)를 시스템 경계로 정의하였다. 정의된 시스템 경계를 통과하는 투입물 및 배출물을 자연계 흐름(elementary flow)으로 간주하였다.

의사결정 기준(Decision criteria) : 각 대상제품 1kg을 생산하기 위한 원료 취득부터 제품 생산까지 대표적이고 일반적인 공정 및 투입물/배출물을 시스템 경계 내에 포함시켰다.

전과정의 단계나 공정 혹은 데이터 요구의 생략 : 이 연구의 목표에 비추어 전과정의 단계중 사용 및 폐기 단계를 제외한 CtG에 대해 연구를 수행하였다. 또한 단위 공정 중 제품 출하시의 검수 등 제품생산

공정과 직접 관련이 없고 환경부하가 적을 것으로 판단되는 공정의 데이터는 조사대상에서 제외하였다.

단위 공정들의 초기분석 : 관계자 및 산업계 전문가의 조언을 통해 국내 시멘트 제조공정을 채광 및 조쇄 공정, 원료분쇄 공정, 소성 공정 및 시멘트분쇄 공정의 4단계로 구분하였다. Fig. 1에 1종 포틀랜드 시멘트의 process tree를 나타내었다.

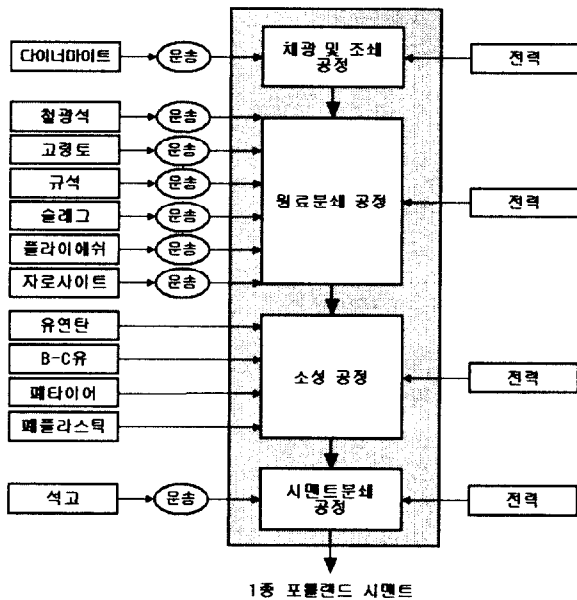


Fig. 1. Process Tree of Potland Cement (Type I)

할당의 결정 : 원자재로 사용되는 슬래그는 철강 제품 제조 시 발생하는 폐기물이다. 마찬가지로 페타이어와 페플라스틱도 폐기물이지만, 시멘트 제조공정에서 연료로써 재활용된다. 이와 같이 슬래그, 페타이어 및 페플라스틱은 각각 다른 시스템에서 폐기된 것으로서 같은 시스템내에서 재활용되지 않고 시멘트 시스템에서 재활용된다. 슬래그는 슬래그 고유 성질의 변화없이 재활용되며, 페타이어와 페플라스틱은 소성공정의 연료로써 성질 변화를 일으키며 재활용된다. ISO 14041(6.5.4)에 근거하여 슬래그는 닫힌고리 재활용 절차를 가진 열린고리 재활용 시스템, 페타이어 및 페플라스틱은 열린고리 재활용 시스템으로 파악되었다. 이와 같이 다른 제품 시스템과 연결되는 경우에는 cut-off 할당 방법을 적용하며, 발생한 폐기물은 자사공정 내에서 재활용 될 경우, 닫힌고리 할당 방법

을 적용하였다.

2.3 데이터 범주

데이터 범주는 크게 에너지, 천연 자원, 대기 배출물, 수계 배출물, 폐기물 및 방사능 폐기물로 분류하였다. 출처를 추적하는 것이 불가능한 데이터는 데이터 갭으로 분류하였다. 대상제품 제조공정의 데이터는 2001년 1년간의 현장 데이터이며 상위공정은 문헌데이터 및 외국 데이터베이스를 우선으로 유사공정의 자료 등을 차선으로 하는 것을 데이터 질의 초기목표로 하였다.

2.4 초기 투입물/산출물의 포함기준

ISO 14041에 제시된 누적 무게, 누적 에너지 및 환경관련성 등의 기준을 적용하였다. 즉, 누적무게 99.9%까지의 투입물은 연구범위에 포함시켰으며, 에너지 및 유해 화학물질로 규정된 투입물은 투입량에 관계없이 제품 시스템에 포함시켰다.

2.5 데이터 질 요구사항

시간적 경계: 제조 단계의 데이터는 2001년 1월 1일부터 2001년 12월 31일까지 1년간의 데이터를 수집한다. 기타 데이터는 5년 이내의 데이터 사용을 목표로 하였다.

지역적 경계: 원/부자재는 각 해당 생산지역으로 하고, 제품의 제조는 한국으로 하였다.

기술적 경계: 업계에서 가장 많이 사용하고 있어 국내 생산 기술을 대표할 수 있는 평균 공정들을 선정하였다.

도출된 기업별 결과에 생산량 기준으로 가중 평균하여 국내 1종 포틀랜드 시멘트의 데이터베이스를 완성하였다. 즉, 대상 기업별로 단위 공정별 데이터베이스가 구축됨으로써 포틀랜드 시멘트를 원료로 사용하는 고로슬래그 시멘트의 LCA 수행시 정확한 데이터의 사용이 가능하다.

데이터 수집은 정확성(precision), 완전성 (completeness), 대표성(representativeness), 일관성 (consistence) 및 재현성(reproducibility)등을 고려하였다.

2.6 데이터 검증

원자재 상위공정(raw material upstream process), 부자재 상위공정(ancillary material upstream process), 에너지 상위공정(energy upstream process) 및 기준공정(reference process)로 분류하여 계산된 데이터를 정량적으로 검증하였다.

III. 전과정 목록 분석

전과정 목록분석은 ISO 14040과 14041 문서에 규정된 방법에 따라 수행하였다.

데이터 수집 준비 단계에서는 시장조사를 통해 대상제품을 생산하는 주요업체를 결정하였다. 설문서는 해당 단위공정의 특성을 감안하여 작성하였고 내용은 데이터 수집대상 제품공정, 데이터 수집자 및 일시, 데이터 수집기간, 공정 상세 설명, 투입물(원자재, 부자재, 에너지, 운송)과 배출물(대기, 수계 및 육상)으로의 배출)항목, 사용량, 데이터 질 등을 포함하였다.

작성된 설문서를 바탕으로 해당업체를 방문하여 1차 설문을 실시하였고 미흡한 부분은 2차 설문 및 유선을 통해 데이터를 수집하였다. 수집 후 동일 업종에 있는 타사의 데이터와의 비교를 통하여 데이터 항목수에 차이가 있는지 검토하였고, 물질수지(mass balance) 점검을 통해서 조사된 데이터의 신뢰성을 체크하였다.

조사 완료된 자료를 투입물/kg 대상제품 및 산출물/kg 대상제품의 형태로 나타낸 뒤 cut-off 기준을 적용한 후 process tree를 작성하였다. 이때 사용된 원/부자재에 대한 성분조사도 함께 이루어졌으며 투입물에 대한 LCI 데이터베이스 조사도 함께 수행되었다. 투입물은 Simapro 및 LCAiT 등의 LCA 관련 소프트웨어의 데이터베이스 및 외국의 문헌 데이터를 이용하였다. 대상제품 생산과 관련하여 정량화된 투입물 및 배출물 자료와 투입물에 대한 환경부하를 나타내는 데이터베이스를 LCAiT 4.0 소프트웨어에 입력하고 이 소프트웨어를 이용하여 목록분석 결과를 도출하였다.

동일한 대상제품에 대해 조사된 각 업체별 목록분석 결과를 바탕으로 생산량 기준 가중평균 값을 구하

였고, 이는 해당 제품군의 국내 전과정 목록분석 데이터베이스가 된다. Table 3에 1종 포틀랜드 시멘트의 LCI 데이터베이스 중 주요지표만을 선정하여 제시하였다.

Table 3. LCI database with selected parameters of Potland Cement (Type I)

Inventory parameter	LCI result (g/f.u)
<i>Resource Consumption</i>	
CaSO ₄ × 2H ₂ O	4.15E+01
Coal	2.19E+01
Dolomite	4.84E-07
Iron ore	6.85E+01
Limestone	1.63E+03
<i>Emission of air</i>	
CO	2.89E-01
CO ₂	8.45E+02
HC	1.26E-01
NO _x	1.96E+00
SO _x	3.64E-01
<i>Emission of water</i>	
Cl-	1.25E+00
COD	8.45E-03
DS	3.93E-01
Sulfate	6.51E-02
SS	5.31E-02
<i>Waste</i>	
Hazardous waste	7.79E-02
Industrial waste	2.38E+02

IV. 전과정 영향평가

전과정 영향평가는 ISO 14040과 14042에서 제시한 바와 같이 분류화, 특성화, 정규화 및 가중치부여 단계를 기쳤다. 고려된 영향범주는 무생물 자원고갈, 지구온난화, 오존층 고갈, 광화학 산화물 생성, 부영양화, 생태독성(수계) 및 인간독성(대기)로써 총 8개이다. 특성화는 상응인자 모델을 이용하여 목록항목의 잠재적인 환경영향을 평가하였다. 이때 특성화 인자는 Nordic Guideline의 자료를 이용하였다. 정규화는 국내 정규화 기준값을 사용하였으며, 가중치 부여는 한국형 Ecoindicator 방법을 이용하여 수행하였다.

Table 4에 시멘트 제품군의 가중치 부여된 환경영향(weighted Impact: WI) 값과 환경영향평가지수를 제시하였으며, 각 제품군에 대한 결과를 나타내었다.

Table 4. Weighted impact result of the cement product

	1종	2종	3종	5종	고로슬래
영향범주	포틀랜드 시멘트	포틀랜드 시멘트	포틀랜드 시멘트	포틀랜드 시멘트	그 시멘트
무생물 자원고갈	8.44E-06	8.27E-06	4.35E-06	8.59E-06	1.28E-06
지구 온난화	3.67E-05	3.58E-05	3.55E-05	3.57E-05	1.65E-05
오존층 고갈	4.51E-08	3.74E-09	3.74E-09	3.74E-09	8.64E-09
광화학산 화물생성	4.84E-07	1.63E-08	1.60E-08	1.64E-08	1.02E-06
산성화	4.39E-06	1.41E-06	1.44E-06	1.43E-06	7.72E-06
부영양화	3.89E-06	8.47E-07	9.05E-07	8.73E-07	7.65E-06
생태독성	1.13E-05	1.78E-06	1.69E-06	1.77E-06	4.22E-06
인간독성	7.82E-10	5.24E-10	4.80E-10	5.24E-10	1.16E-10
Total (Eco-indicator)	6.53E-05	4.81E-05	4.39E-05	4.84E-05	3.84E-05

1종 포틀랜드 시멘트에 의해 야기된 환경영향평가지수는 6.53E-05으로 계산되었다. 가중치가 부여된 환경영향을 기준으로 하여 1종 포틀랜드 시멘트가 환경에 미치는 영향은 지구온난화(56.26%), 생태독성(17.33%), 무생물자원고갈(12.92%), 산성화(6.73%), 부영양화(5.95%), 광화학산화물생성(0.74%), 오존층고갈(0.07%) 및 인간독성 순으로 나타났다.

2종 포틀랜드 시멘트에 의해 야기된 CI, NI 및 WI를 표 4-2에 나타내었다. 환경영향평가지수는 4.81E-05으로 계산되었다. 가중치가 부여된 환경영향을 기준으로 하여 2종 포틀랜드 시멘트가 환경에 미치는 영향은 지구온난화(74.38%), 무생물자원고갈(17.19%), 산성화(2.93%), 생태독성(3.69%), 부영양화(1.76%), 광화학산화물생성(0.03%), 오존층고갈(0.01%) 및 인간독성 순으로 나타났다.

3종 포틀랜드 시멘트에 의해 야기된 CI, NI 및 WI를 표 4-3에 나타내었다. 환경영향평가지수는 4.39E-05으로 계산되었다. 가중치가 부여된 환경영향을 기준으로 하여 철근이 환경에 미치는 영향은 지구온난화(80.87%), 무생물자원고갈(9.90%), 생태독성(3.85%), 산성화(3.28%), 부영양화(2.06%), 광화학산

화물생성(0.04%), 오존층고갈(0.01%) 및 인간독성 순으로 나타났다.

5종 포틀랜드 시멘트에 의해 야기된 CI, NI 및 WI를 표 4-4에 나타내었다. 환경영향평가지수는 4.84E-05으로 계산되었다. 가중치가 부여된 환경영향을 기준으로 하여 레일이 환경에 미치는 영향은 지구온난화(73.77%), 무생물자원고갈(17.76%), 생태독성(3.66%), 산성화(2.96%), 부영양화(1.80%), 광화학산화물생성(0.03%), 오존층고갈(0.01%) 및 인간독성 순으로 나타났다.

고로슬래그 시멘트에 의해 야기된 CI, NI 및 WI를 표 4-5에 나타내었다. 환경영향평가지수는 3.84E-05으로 계산되었다. 가중치가 부여된 환경영향을 기준으로 하여 레일이 환경에 미치는 영향은 지구온난화(42.94%), 산성화(20.13%), 부영양화(19.94%), 생태독성(10.99%), 무생물자원고갈(3.33%), 광화학산화물생성(2.66%), 오존층고갈(0.02%) 및 인간독성 순으로 나타났다.

각 영향범주별 특성화된 환경영향에 대해 각 대상 제품별 기여도를 Fig. 2에 나타내었다.

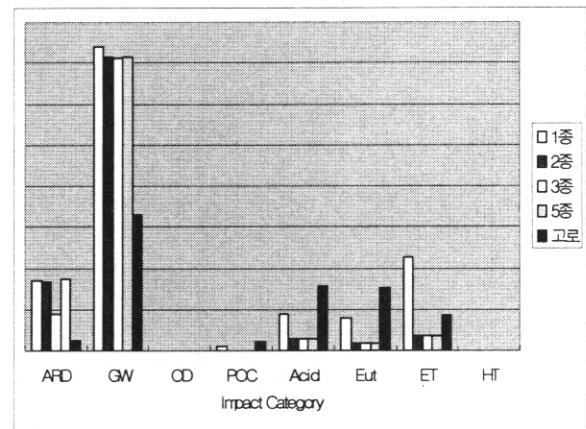


Fig. 2. Relative contribution of each product

Fig. 2에서 나타난 것처럼 가중치 부여된 환경영향을 기준으로 하여 환경에 미치는 영향이 가장 큰 범주는 지구온난화 범주였으며, 생태독성, 무생물 자원고갈, 산성화, 부영양화, 광화학산화물 생성, 오존층 고갈 및 인간독성 순으로 나타났다.

Fig. 3에 1종 포틀랜드 시멘트의 가중치부여된 환

경영향 결과값을 나타내었다. Fig. 3에서 알수있듯이 1종 포틀랜드 시멘트의 환경영향 기여도가 가장 큰 영향범주는 지구온난화이며 56%이다.

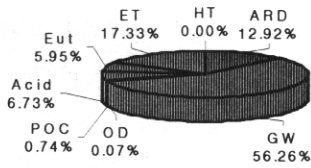


Fig. 3. Weighted impact of the portland cement (Type I)

위의 결과에 대해 Inventory 분석을 수행하였다. 지구온난화 범주에 영향을 미친 주요 목록항목은 CO₂이며 99.44%의 기여도를 가지며 그 외 CFC, CH₄, HCFC 및 N₂O 등이 0.56%를 기여하였다.

Fig. 4에서 공정별 CO₂ 배출 현황을 나타내었다. 소성공정에서 CO₂ 배출량은 95%로써 가장 많은 양이 배출되며, 이는 시멘트 제조공정의 특성상 소성공정에서의 탈탄산반응으로 인한 CO₂와 연료 연소에 의한 CO₂ 발생량이 많아 이와 같은 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

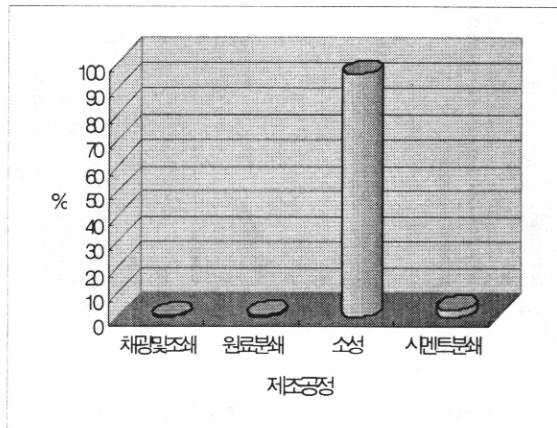


Fig. 4. CO₂ emission of the portland cement (Type I)

국내 시멘트 업체에서는 소성공정의 연료로 대부분 유연탄을 사용하며, 10%내의 소량만이 정제유 및 폐자재등이 활용되고 있다. Fig. 5에서 각 업체에서 사용되고 있는 연료에 대해 연료 연소시 발열량 1MJ당

CO₂ 배출량을 산정하였다. 그 결과, 정제유 및 폐자재등을 연료로 활용할 때 CO₂ 배출량도 적어짐을 알 수 있다. 대체원료 및 대체연료의 적절한 활용이 시멘트 제조공정의 환경부하를 저감시킬 수 있음을 확인하였다.

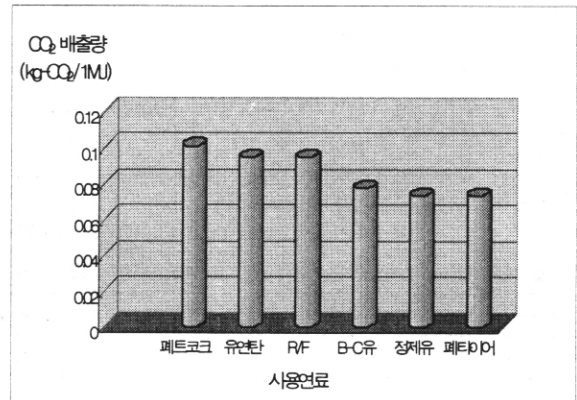


Fig. 5. CO₂ emission of the each fuel

V. 결론 및 요약

국내에서 생산되는 범용성이 높은 시멘트 제품군과 특이성을 가진 시멘트 제품군에 대하여 전과정평가를 수행하였다. 1종 포틀랜드 시멘트, 2종 포틀랜드 시멘트, 3종 포틀랜드 시멘트, 5종 포틀랜드 시멘트 및 고로슬래그 시멘트의 LCI 데이터베이스를 구축하였다.

목표 및 범위정의에서 각 대상제품별 제품시스템, 기능단위, 시스템 경계, 데이터 범주 및 데이터 질을 정의하였다. 이를 토대로 대상기업의 2001년 1년간 데이터를 현장방문 및 설문서 등의 방법으로 수집하였다. 수집된 데이터는 ISO 14040시리즈 요건에 맞게 LCA를 수행하고 이를 토대로 환경영향평가지수를 도출하였다.

1종 포틀랜드 시멘트, 2종 포틀랜드 시멘트, 3종 포틀랜드 시멘트, 5종 포틀랜드 시멘트 및 고로슬래그 시멘트의 환경영향평가지수는 각각 6.53E-05, 4.81E-05, 4.39E-05, 4.84E-05 및 3.84E-05으로 계산되었다.

1종 포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 시멘트의 환경영향평가지수가 차이가 나는 이유는 제조공정의 차이

점이 있기 때문이다. 1종 포틀랜드 시멘트는 채광 및 조쇄 공정, 원료분쇄 공정, 소성 공정 및 시멘트 분쇄 공정을 거쳐서 생성되지만, 고로슬래그 시멘트는 재활용 물질 사용으로 인한 원료분쇄와 혼합 공정만 존재하므로 공정이 상대적으로 단순하다고 할 수 있다.

모든 시멘트 대상 제품군에서 지구온난화 범주가 전체 환경영향에 가장 기여도가 큰 것으로 나타났다. 지구온난화 범주에 영향을 미친 주요 목록항목은 CO₂이다. 시멘트 제조공정의 특성상, 소성공정에서의 탈탄산반응으로 인한 CO₂와 연료 연소에 의한 CO₂ 발생량이 많아 이와 같은 결과를 나타내었다.

이 연구에서 제조공정에 대한 데이터는 통계자료에 기반한 현장 데이터를 조사하였으므로 데이터의 신뢰성이 높다. 그러나 원자재 및 부자재 등의 upstream에 대한 데이터는 외국의 데이터베이스 및 문헌데이터를 활용함으로써 데이터의 신뢰성이 낮다고 판단된다. 향후 국내에 전과정 목록 데이터베이스의 추가 구축을 통하여 upstream 데이터베이스의 신뢰성을 제고시킬 필요가 있다.

사 사

이 연구를 수행하는데 있어서 재정적 지원은 산업자원부의 청정생산 기술산업에 의해 제공되었다.

참고문헌

- 1) Intergovernmental Panel on Climate change, Revised 1996, IPCC Guidelines for National Greenhouse Gases Inventories(volume 3)-Greenhouse Gas Inventory Reference Manual, 1997
- 2) 국립해양조사원, 해상거리표, 해양수산부, 1998
- 3) RMIT, "Australian LCA data inventory project.", 호주, <http://www.cfd.rmit.edu.au/lac/datadownloads>, 1998
- 4) 한국양회공업협회, 시멘트 통계연보, 서울, 2002
- 5) 현대시멘트, 시멘트 기초상식(인터넷 홈페이지), 한국, <http://www.hdcement.co.kr/kor/product/cement/home.htm>, 2001
- 6) 환경 친화적 산업기술기반조성에 관한 보고서(4차년도 최종보고서), 산업자원부, 2002
- 7) 이진모, 허탁, 김승도, 환경 전과정평가(LCA)의 이론

- 과 지침, 한국인정원(KAB), 1998
- 8) ISO 14040, Environmental management -Life cycle assessment- Principles and framework, 1997
- 9) ISO 14041, Environmental management -Life cycle assessment- Goal and scope definition and inventory analysis, 1998
- 10) CIT, LCA inventory tool 4.0, Chalmers Industriteknik, Sweden, 2000