

시멘트 산업에서 LCA의 적용

이 승 현 (군산대학교 재료·화학공학부 교수)

제품이나 재료의 환경부하를 평가하는 적절한 방법으로서 LCA(Life Cycle Assessment)가 주목받고 있다. LCA는 에너지 분석을 기본 배경으로 하고 있으며, 1960년대 말기에 음료 용기의 환경영향 평가 방법으로 처음 도입되었다. 최근에는 다양한 제품에 대해 환경영향을 과학적으로 평가하는 방법으로 정착되어가고 있다. 그리고 환경관리시스템이 ISO 1400 시리즈로 발행되고 있는 가운데, 그 내용 속에 환경관리도구로서 LCA가 포함되어 있다.

지구온난화와 관계된 CO₂ 배출량에 관해 1997년에 기후변화협약에 관한 교토의정서가 채택되고, 2005년 2월에 교토의정서가 발효됨에 따라 OECD 31개 협약국기들은 온실가스 감축의무를 준수해야 하는 실정에 있으며, 우리나라는 2013년부터 온실가스를 감축해야 하는 2차 의무대상국에 포함될 것이 확실시 되고 있다. 이러한 영향을 받아 외국의 여러 단체에서는 시멘트를 포함한 각종 제품의 CO₂ 배출량을 공표하고 있지만 그 산출근거나 계산범위가 불명확한 점이 너무 많다. 또한 최근 폐부산물의 시멘트 원료 및 연료에의 이용은 폐기물의 처분장의 수명연장과 천연자원의 고갈 해소에 공헌하고 있지만, 그 공헌도를 제대로 평가받지 못하고 있는 실정이다.

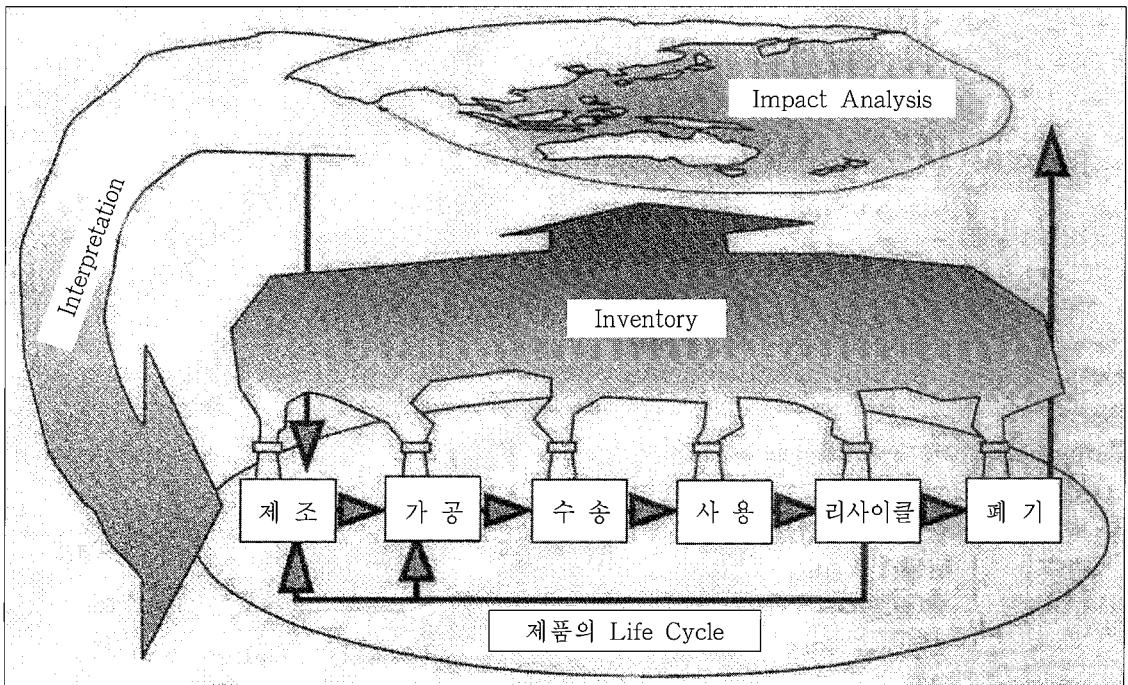
여기서는 LCA에 대해 설명하고, 시멘트 산업에서 CO₂ 배출량, 천연자원 및 폐부산물 사용량을 근거로 환경부하 평가를 한 예를 들어 LCA를 설명하고자 한다.

1. LCA(Life Cycle Assessment)

LCA라는 것은 어떤 제품에 대해서 그 라이프 사이클을 처음부터 끝까지, 즉 원료 구입부터 제조, 가공, 운반, 사용, 재생, 폐기, 처리, 처분까지의 과정에서 발생하는 환경에의 부하(자원·에너지 소비량, 고형폐기물 발생량, 대기오염물질 배출량, 수질오염물질 배출량 등)를 정량적으로 열거하여 평가하는 방법이다. 기존의 환경부하 분석에서는 한정된 조건에서 환경부하를 논의하였지만, LCA에서는 제품에 관련된 모든 시스템의 환경부하를 고려하여 평가하는 방법이다.

LCA는 우선 평가 목적 및 범위를 설정하여야 한다. 이것을 GSD(Goal And Scope Definition)라 하고, 이것에 근거하여 환경부하를 열거하는 목록(Inventory)을 작성하여야 한다. 그 다음에 목록에 열거된 환경부하를 분석하는 영향분석(Impact Analysis)을 실시해야 한다. 이러한 목록작성과 영향분석의 결과가 끝나면, 환경부하 저감의 방향을 제시해주는 라이프 사이클 해석(Interpretation)을 실시해야 한다. 즉 목록, 영향분석, 해석을 시행하는 것에 의해 목적하는 제품의 라이프 사이클이 환경에 미치는 부하를 평가하는 것이다.

이러한 것을 알기 쉽게 나타낸 것이 <그림-1>이다. 즉 대상으로 하는 제품의 연·원료의 자원 채취로부터 제품제조, 운송, 사용, 리사이클, 폐기까지의 라이프 사이클을 하나의 시스템으로 간주하여 평가



어떤 제품이나 소재에 대해서 처음부터 끝까지(원료의 취득으로부터 제조, 가공, 운반, 사용, 재생, 폐기까지의 일생) 발생하는 환경 부하를 화학적으로 평가하는 방법

<그림-1> LCA 구성의 개념도

하는 것이다. 이 제품의 라이프 사이클 시스템을 구성하는 각각의 요소를 Sub-System 혹은 Process라 한다. <그림-1>에서는 간단하게 제조 등으로 표현하였다. 이러한 Sub-System에서 환경부하의 원인이 되는 항목들의 입출력을 기입하여 부하 항목별로 적산하는 것을 목록(Inventory)이라 한다. 그리고 Sub-System 간의 관계를 기술한 것을 Inventory Tree라고 하고, Inventory Tree에 환경부하 항목의 입출력을 기입하여 적산한 것을 목록분석(Inventory Analysis)이라 한다.

그러나 목록분석 결과는 단지 각각의 환경부하 항목의 입출력 값의 총합에 불과하기 때문에 이러한 값이 지구환경에 미치는 영향의 크기에 대해 검토할 필요가 있다. 이것을 영향분석(Impact Analysis)이라 한다. 영향분석은 지구환경에의 영향이라는 관점

에서 목록의 수치분석을 하는 작업이다. 그러나 배출물이 환경에 미치는 메카니즘이나 그 규모에 대해서는 정확하게 알 수 없기 때문에 현재 보편적으로 확정된 수법은 없다. 그러나 방법론적으로 영향분류(Classification), 영향의 특성치화(Characterization), 영향의 중요도(Weighing)라는 방법을 이용하여 영향분석을 한다.

영향분류(Classification)는 다양한 환경 배출물을 지구온난화, 오존층 파괴, 인체독성 등의 환경영향의 종류에 따라 분류하는 작업이다. 영향특성치화(Characterization)는 분류된 항목별로 Parameter화하여 수치적으로 나타내는 일로서 지구온난화, 산성화, 인체 독성 등에 대해 수치 값으로 나타내는 작업이다. 그러나 지구온난화, 산성화, 인체독성이 특정 제품의 리사이클에 미치는 효과가 동일하지는 않

기 때문에 가중치를 두면 좀더 합리적으로 평가할 수 있을 것이다. 이것이 영향의 중요도(Weighing)이다. 이러한 값은 편리하게 보이지만 임의성이 크기 때문에 논의의 대상이 되고 있다.

해석(Interpretation)은 말그대로 목록이나 영향 분석의 결과를 해석하는 것이다. GSD에 따라 작성된 목록이나 영향분석의 결과를 검토하여 그 완비성(Completeness), 신뢰성(Sensitivity) 및 분석방법의 일관성(Consistency)을 체크(Check)하는 것이다. 이 부분은 특별히 LCA 특유의 방법론이나 수법이 있는 것이 아니고 일반 학술논문에서 Discussion에 해당되는 부분이다. 다만 LCA는 그 결과를 기술적, 정책적으로 반영시키는 것을 목적으로 하고 있기 때문에 신뢰성 등에 유념해야 한다.

완비성의 체크라는 것은 제일 중요한 항목이 목록이나 영향분석에서 적절하게 취급되었고, LCA 실시 목적에 일치되고 있는지를 체크하는 것이다. 신뢰성의 체크는 가정한 조건의 범위나 목록 데이터의 정밀도 등의 변화가 평가의 결과에 미치는 영향을 조사하여 결과의 견고성을 체크하는 것이다. 그리고 일관성의 체크는 LCA의 결과가 전체를 통해서 필요로 하는 신뢰성을 갖고 있는지를 체크하여, 모든 중요한 Input와 Output가 빠지지 않고 취급되었는지를 검토하는 것이다. 이와 같이 해석(Interpretation)은 LCA 결과 자체에는 직접 영향을 미치지 않지만 결과를 과학적으로 논의하는데 필요한 과정이다. 특히 LCA가 환경부하의 저감이라는 목적을 가지고 기술적, 사회적, 정책적으로 반영되는 것을 목적으로 하고 있기 때문에, 그 결과가 설득력을 가지고 있어야 한다.

2. 보통 포틀랜드시멘트 적용 예

한국세라믹학회 시멘트부회 주최로 1999년 9월에 개최한 Cement and Concrete Forum(Cement and Concrete Tomorrow)에서 일본 태평양 시멘트의 Makihico Ichikawa 박사가 발표한 “각종 시멘트의

〈표-1〉 시멘트 산업에서 환경에의 영향

영향(Impact)	물질 및 재료
지구온난화 효과	CO ₂
에너지자원 고갈	석탄, 석유
천연자원 고갈	석회석, 점토, 규석, 철광석
폐기물처분장 용량	폐기물

Eco-balance” 중에서 포틀랜드시멘트에 관한 부분을 정리하여 설명하면 다음과 같다.

가. 환경에의 영향 및 정량화 방법

보통 포틀랜드시멘트(Blaine 3,300cm²/g)를 대상으로 하였으며, 시멘트 산업이 환경에의 영향(Impact)과 거기에 대응되는 물질 및 재료를 〈표-1〉에 나타냈다. 지구온난화를 포함하여 대부분의 나라에서 중요하게 생각하는 영향에 대해서 검토하였으며, 특히 폐기물처분장 용량의 감소에 따른 새로운 처분장의 확보가 어렵기 때문에 처분장 수명연장은 매우 중요한 환경문제의 하나로 대두되고 있다.

정량화를 시도하기 위해서는 기존에 보고된 계산식을 참고로 하든지 아니면 자체 연구에 의한 계산식을 사용하여야 한다. 현재 각 기관마다 보고된 계산식은 서로 다르기 때문에 사용할 때에는 주의하여야 한다. 일본 NEDO 조사보고서를 참고한 계산식은 다음과 같다.

- 지구온난화 = CO₂배출량 × 1kg
- 천연에너지자원 고갈 = 원유사용량 × 1
+ 석탄사용량 × 0.129(kg)
- 천연광물자원 고갈 = 철(Fe)자원사용량 × 1
+ 칼슘자원사용량 × 1.36
+ 알루미늄(Al)자원사용량 × 0.68
+ 규소(Si)자원사용량 × 0.2(kg)
- 폐기물처분장 용량 = 고품폐기물발생량(kg)

지구온난화계수는 기존에 일반적으로 사용하는 지구온난화 포텐셜(GWP)를 사용하였으며 CO₂만

계산 대상으로 하였다. 천연에너지자원 고갈계수는 발열량과 채굴년수(채굴매장량/연간생산량)의 곱을 원유와 비교하여 상대화한 값을 사용하였다. 천연광물자원 고갈계수는 각 원소의 지각 존재율의 역수를 기준(철원소를 1로 기준)으로 하여 상대화한 값을 사용하였다. 폐기물처분장 용량에 미치는 영향은 고품폐기물의 배출량을 그대로 사용하였으며 계수설정은 하지 않았다.

나. 계산범위

라이프 사이클 전체의 환경부하를 정량화하기 위해서는 원료의 채굴부터 폐기 또는 재활용까지를 대상으로 하여야 하나 기반재료인 시멘트는 사용 이후에 발생하는 환경부하를 파악하는 것은 매우 어려운 일이다. 또한 수입되는 연·원료의 정확한 값을 얻는 것은 거의 불가능하다. 따라서 지구온난화 영향에 대해서는 국내산 천연원료의 채굴 및 연·원료의 시멘트 공장까지의 국내 수송시의 CO₂ 배출량, 시멘트 제조시의 CO₂ 배출량을 계산범위로 하였다. 그 외의 영향(Impact)에 대해서는 시멘트 제조시에 발생하는 부하를 대상으로 하였다. CO₂ 배출량의 계산에 사용한 각 연·원료, 전력 및 혼합재 제조시의 CO₂ 배출 원단위를 <표-2>에 나타냈다. 또한 <표-3>에는 폐부산물을 전혀 사용하지 않은 보통 포틀랜드시멘트와 폐부산물을 연·원료 및 혼합재로 사

용한 보통 포틀랜드시멘트와의 제조 원단위를 비교하였다.

다. CO₂ 배출량, 천연자원 사용량 및 폐기물 사용량

보통 포틀랜드시멘트 제조시 배출되는 CO₂의 90% 이상은 크링카를 제조할 때 나오며, 그중에서 60%는 주원료인 석회석이 탈탄산될 때 배출된다. 폐부산물을 연·원료로 사용하지 않은 보통 포틀랜드시멘트는 1톤을 제조할 때 배출되는 CO₂량은 756 kg-CO₂/t-cement이었으나, 그러나 폐부산물을 연·원료로 사용한 보통 포틀랜드시멘트는 730kg-CO₂/t-cement로 CO₂의 배출량이 3% 감소하였다. 이것은 크링카의 주원료인 석회석의 사용량이 감소되어 탈탄산 소비열량의 저감되었으며, 또한 폐유, 페타이야 등 폐기물을 재자원화하는 것에 의해 CO₂량이 감소된 것으로 볼 수 있다.

시멘트 제조시에 사용되는 에너지 자원 사용량을 보면, 보통 포틀랜드시멘트는 폐부산물의 재자원화에 의해 석탄 사용량을 8% 감소할 수 있다. 이것은 폐유나 페타이어 등의 폐기물을 크링카 소성용 연료로서 재자원화와 더불어 크링카의 주원료인 석회석 사용량 감소에 기인하여 탈탄산에 필요한 열량이 저감되었기 때문이다. 또한 보통 포틀랜드시멘트 제조시에 사용되는 각 원소 공급자원의 사용량을 보면, 폐부산자원을 사용함으로써 Ca 자원을 약 3%, Al 자원을 약 47%, Si 자원을 약 24% 저감시킬 수 있다. Al 자원의 저감율이 큰 것은 Al을 대량 함유하고 있는 석탄회를 다량 재자원화하고 있기 때문이다.<표-3>

시멘트 제조에서 다량의 폐기물 사용은 폐기물 처리장의 수명 연장에 공헌하고 있다. 사용되는 폐기물의 양을 계산한 결과를 <표-4>에 나타냈다. 여기서 폐기물은 무상으로 구입할 수 있는 것이고, 부산물은 유상으로 구입하는 것으로 분류하였다. 이렇게 분류하였을 때, 폐기물의 사용량은 보통 포틀랜드

<표-2> 시멘트 산업에서 CO₂ 배출 원단위

공 정	CO ₂ 배출
석회석 채굴	5kg-CO ₂ /t
점토, 규석, 석고 채굴	16kg-CO ₂ /t
중 유	2.9kg-CO ₂ /t
석 탄	2.4kg-CO ₂ /t
석유 코크스	2.9kg-CO ₂ /t
석회석의 탈탄산	418.9kg-CO ₂ /t
전 력	0.469kg-CO ₂ /k조
슬래그의 분쇄	27.7kg-CO ₂ /t
석회석의 분쇄	10.1kg-CO ₂ /t

〈표-3〉 보통 포틀랜드시멘트 제조에 따른 원료 및 연료

원료 및 연료		투입량(kg/t-cement)		
		폐·부산자원 사용 OPC	순수 OPC	
크링카원료	천연원료	석회석	1023	1046
		점토	110	208
		규석	47	21
		철광석	0	15
	부산물	철질 부산물	19	0
		슬래그	22	0
		폐기물	57	0
혼합재	천연원료	석회석	25	31
		천연석고	13	26
	부산물	석고	13	0
		슬래그	6	0
연료	천연연료	중유	3 L	3 L
		석탄	67	73
		오일 코크스	37	37
	부산물	폐유, 타이어 등	6	0
전 력		33kwh	33kwh	

주 : OPC-보통 포틀랜드시멘트

시멘트가 혼합시멘트보다도 많다.

라. 각 영향(Impact)의 정량화

앞서 계산한 환경부하 대상물질량의 계산식을 사용하여 보통 포틀랜드시멘트가 환경에 미치는 영향을 정량화한 결과를 〈표-5〉에 나타냈다. 보통 포틀랜드시멘트는 폐기물이나 부산물을 재자원화하는

〈표-4〉 시멘트 제조시의 폐기물 사용량

종 류	폐기물 사용량(kg/t-cement)
순수 OPC	0
폐기물 사용 OPC	62.9
슬래그 시멘트	34.6
필러 시멘트	47.2

〈표-5〉 시멘트 제조시의 환경영향의 정량화 결과

영 향	순수 OPC	폐기물 사용 OPC
지구온난화 효과 (kg-CO ₂)	756	730(-3)
에너지자원 고갈 (kg-crude oil)	39.6	38.8(-2)
광물자원 고갈 (kg-iron ore)	1536	1459(-5)
폐기물처분장 용량(kg)	0	-62.6 -122(폐기물+부산물)

것에 의해 지구온난화, 에너지자원 고갈, 광물자원 고갈에 기여를 하고 각각 3%, 2%, 5% 정도를 저감한다. 폐기물처분장 용량에의 영향을 보면 폐기물의 정의에 의해서 달라지지만 보통 포틀랜드시멘트는 처분장의 연장에 크게 공헌하고 있는 것으로 나타났다.

마. 해석 및 평가

정량화한 여러가지 환경에의 영향을 하나의 수치로 통합하는 방안이 제안되고 있다. 이러한 수치는 다양한 환경에의 영향을 고려하고 있기 때문에 제조공정의 개선, 신제품의 개발, 소비자가 환경을 고려한 제품 선택시에 유효한 지표가 될 수가 있다. 현재 시멘트에 사용되는 환경부하지수 식은 여러가지가 있으나 여기서는 다음 식을 사용하였다.

$$\text{환경부하지수} = (\alpha_{\text{각종시멘트}} / \alpha_{\text{순수시멘트}}) \times 100$$

$$\alpha_i = \text{각 Impact 정량값} \times \text{중요도}$$

여기서, $\alpha_{\text{순수시멘트}}$ 는 폐기물이나 부산물을 사용하지 않고 제조한 순수 보통 포틀랜드시멘트이고, 중요도는 각 영향의 중요도로 앙케이트, 가격, 과학적 근거에 등에 의해 결정되는 값이다.

〈표-6〉에 앙케이트 및 가격에 의해 설정된 중요도를 나타냈다. 앙케이트에 의해 설정된 중요도는 일본의 NEDO에서 조사한 것이고, 가격에 의한 중요도 설정은 원료의 단위 중량당의 가격과 원유와의

〈표-6〉 환경부하의 중요도 지수

영 향	중 요 도	
	양케이트 조사	가격 기준
지구온난화 효과	0.293	0.022
에너지자원 고갈	0.341	0.495
광물자원 고갈	0.194	0.080
폐기물처분장 용량	0.172	0.403

상대값을 비교하여 결정한 것이다. 지구온난화에 대해서는 유럽에서 도입이 진행되고 있는 탄소세 30,000 원/t-탄소를 사용하였으며, 에너지자원 및 광물자원의 고갈은 원유, 철광석의 수입가격을 비교하여 결정하였다. 설정한 중요도를 사용하여 환경부하 지수를 계산하면, 폐·부산물을 사용한 보통 포틀랜드시멘트는 폐·부산물을 사용하지 않은 보통 포틀랜드시멘트보다 양케이트를 기준으로 하면 10% 정도 환경부하가 감소하였고, 가격을 기준으로한 환경부하지수는 20% 정도 감소하였다.

3. 맺 는 말

시멘트 산업에서 LCA 내지는 환경평가방법의 도입은 시멘트 제조사의 폐기물, 부산물의 재자원화 등의 활동이 제품의 품질을 유지하면서 환경부하를 저감시켜 나아가느냐를 파악하는 유효한 수단이다. 또한 앞으로 새로운 폐기물 및 부산물을 사용할 때나 제조공정 개선 등을 시행할 때에도 고려해야 할 지표 중의 하나이다. 앞으로 소비자들이 제품을 선택할 때에도 참고사항이 될 수가 있다. 그리고 시멘트 산업이 환경에의 기여 및 환경부하를 저감시키기 위해 노력하고 있다는 것을 정부나 일반인들에게 제시할 수 있는 유효한 수단이라고 생각된다. 그러나 중요도의 설정방법, 폐기물의 정의방법, 적용범위 등 여러 요인에 의해 환경부하지수는 크게 차이가 나므로 LCA를 적용하기 위해서는 심도있는 검토가 필요하다. ▲

시사 용어 해설

▶ 베이스스 위험

현물가격과 선물가격의 차인 베이스스가 변동하는 위험을 말한다. 현물가격과 선물가격은 기본적으로 같은 방향으로 움직이며 거의 일정한 비율을 움직이며 거의 일정한 비율을 유지하게 된다. 그러나 순보관비용의 변동이나 미래의 이자율 수준에 대한 예상치 못한 정보 등이 유입될 경우 현물가격과 선물가격의 차이는 상이한 변화패턴을 보이는 것이 일반적이다. 이러한 베이스스 위험의 존재는 계약청산시점에서의 베이스가 예약체결시점에서의 베이스스와 다르게 되는 결과를 초래하게 되어 헷지결과에 영향을 주게 된다. 한편 파생금융상품을 이용한 헷지거래시 불완전한 헷지거래를 할 경우 헷지거래를 할 경우 헷지대상의 가격변동과 헷지거래의 가격변동 차이로 인해 시장리스크가 존재하게 되는데, 이러한 불완전한 헷지로 인해 발생하는 위험을 베이스스 위험이라고도 한다.