

환경제품선언(EPD)을 통한 콘크리트의 환경영향 평가 및 CO₂ 흡착 사례

A Review on Environmental Impact Assessment of Concrete as a CO₂ Sink through Environmental Product Declaration



김낙현 Rak-Hyun Kim
그리너스 대표
E-mail : redwow6@grners.com

1. 머리말

콘크리트의 생산 및 사용이 해당 권역 그리고 우리의 주변 환경에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지면서 환경 친화적인 콘크리트 개발이 주목받고 있다. 건축 및 토목 구조물의 건설을 위해 다량의 콘크리트 및 콘크리트 제품이 필수적으로 사용되는 현실을 고려할 때 콘크리트 생산 및 사용이 환경에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고 이를 절감하기 위한 노력은 지속가능한 콘크리트 산업으로의 전환을 위해 필수적이다.

최근 연구결과에 의하면 콘크리트는 건설구조물을 구성하는 건설재료 중 CO₂ 배출량에 기인한 지구온난화뿐만 아니라 자원사용, 오존층영향, 산성화, 부영양화, 광화학적산화물 생성 등 다양한 지구 환경변화를 야기하는 건설재료라고 평가되고 있다. 따라서 지속가능한 건설구조물의 건설과 더 나아가 지속가능한 건설 산업을 실현하기 위해서는 CO₂ 배출량 및 흡착량을 포함하여 다양한 환경영향을 절감하는 환경부하 저감형 콘크리트의 개발이 요구되며, 이들의 종합적인 환경성능을 정량적으로 평가하는 연구도 반드시 병행되어야 한다.

이러한 움직임으로 영국 Concrete Centre, 미국 National Ready Mixed Concrete Association, 독일 Institut Bauen und Umwelt e.V., 스웨덴·노르웨이의 Environmental Product Declaration 재단과 같은 기관에서는 콘크리트의 생애 주기 관점에서의 잠재적인 CO₂ 배출량 및 흡착량을 포함한 다종의 환경영향정보를 제공하는 환경제품선언 (Environmental Product Declaration, EPD)을 통해 환경부하 저감형 건설재료 개발 및 실용화를 지원하고 있다.

본 고에서는 콘크리트의 전과정 평가(이하 LCA, Life Cycle Assessment)를 통해 생애 주기 관점에서 발생 가능한 잠재적인 각종 환경영향범주를 정량적으로 평가하기 위한 방법인 LCA 기법 및 연구 동향을 소개하고, 운영단계에서 탄산화로 인해 흡착된 CO₂에 대한 환경영향을 제공한 EPD 사례를 제공하고자 한다.

2. 전과정 평가 방법론

2.1 전과정 평가 방법론

콘크리트를 비롯한 건설재료의 LCA를 위한 평가항목은 지구환경적인 측면과 생태계 및 인체보건 등의 사항에 대한 고려가 필요하다. 이는 단순히 특정 원자재가 배제되어서 환경 친화적이라든지, 특정 물질을 배출한다고 해서 유해재료로 여겨지는 것을 방지할 수 있기 때문이다. LCA는 제품 서비스의 원료취득, 제조, 수송, 재활용 및 폐기물 처리 등 최종처리와 같은 제품 서비스의 전과정 단계 동안에 투입되는 자원 및 에너지와 배출되는 오염물질을 정량적으로 목록화하고, 이들이 지구환경에 미치는 잠재적인 환경영향(지구온난화, 자원사용, 오존층영향, 산성화, 부영양화, 광화학적산화물 생성 등)을 평가하는 기법이다. LCA 방법론은 1991년 국제환경독성화학학회(SETAC)와 1992년 Heijungs의 “Environmental Life Cycle Assessment of Products: Guide and Background”를 통해 그 개념이 체계적으로 정의되었다. 그 후, 건설재료의 LCA 기법은 ISO 21930(Sustainability in building construction - Environmental declaration of building products) 시리즈를 통해 구체화되었고, 콘크리트 산업에서도 EN 16757(Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Product Category Rules for concrete and concrete elements) 및 ISO 13315(Environmental management for concrete and concrete structures)를 통해 평가방법과 세부적인 내용이 정립되었다. LCA 기법의 수행절차는 목적 및 범위정의, 전과정 목록분석(이하 LCI, Life Cycle Inventory Analysis), 전과정 영향평가(이하 LCIA, Life Cycle Impact Assessment), 전과정 해석의 4가지 단계로 구성되며, 각 단계는 서로 유기적인 상호 보완 관계를 갖는다. 즉, 목적 및 범위 정의 단계에서는 연구의 목적과 대상 시스템의 범위를 정의한다. 특히, LCA의 수행 이유, 의도된 이용 분야, 연구 대상 제품 시스템의 기능, 시스템 경계, 기능단위, 할당 절차, 데이터 요구사항, 가정 및 제한 등을 명확하게 나타내야 한다. LCI 단계에서는 목적 및 범위 정의 단계에서 설정된 제품 시스템에 대한 자료 수집과 계

산 절차를 통해 제품 시스템에서 발생하는 환경영향 물질의 종류를 도출하고 투입물과 산출물의 양을 정량화한다. 본 단계에서는 공정흐름도 작성, 데이터 수집, 데이터 계산의 과정이 수행된다. LCIA 단계에서는 LCI 단계에서 수집한 환경영향 물질을 중심으로 제품 시스템에 대한 잠재적인 환경영향을 평가한다.

2.2 전과정 영향평가 방법론

건설재료의 생산 및 사용 등 건축생산활동과 관련된 환경영향은 대기기후, 수질 및 생물보호, 유해물질 등으로 나누어 살펴볼 수 있다. 제품의 환경성능은 환경영향 평가범주나 평가기준에 따라 다른 결과가 도출될 수 있기 때문에, 평가 대상 및 목적에 따라 적절한 영향범주와 평가기준을 정의하는 것이 중요하다. 이를 평가하는 것이 LCIA 단계로 CO₂ 배출량 이외에도 콘크리트에서 주요하게 평가되어야 할 영향범주와 평가기준을 다루고 있다. 현재까지 많은 연구자에 의하여 다양한 LCIA 방법론이 개발되어 왔으며, 각 LCIA 방법론들은 개발한 연구자에 따라 다양한 환경영향 범주와 범주별 평가방법을 정의하고 있다. LCIA 단계에서는 LCI 단계에서 수집한 환경영향 물질을 중심으로 제품 시스템에 대한 잠재적인 환경영향을 평가한다. LCIA 방법론은 크게 중간점 수준(Midpoint level)과 종말점 수준(Category endpoint level) 방법론으로 구분된다. 중간점 수준 방법론은 투입물이나 산출물에 의한 환경문제를 중심으로 환경영향을 분류하는 방법론으로서, 지구 온난화나 산성화, 부영양화 등의 문제를 규정한다. 반면, 종말점 수준 방법론은 환경부하로 인해 야기되는 최종적인 피해에 집중한다. 예를 들어, 인체피해나 생태계 파괴 등이 종말점 수준 방법론의 환경영향 범주에 포함된다고 할 수 있다. 이러한 두 가지 LCIA 방법론은 방법론적 특성의 차이로 인해 각기 다른 장단점을 가진다. 중간점 수준 방법론은 일반적으로 모든 환경영향을 포함하는 반면, 평가결과를 쉽게 이해하기 어렵다는 단점이 있다. 이와 반대로, 손실 지향 접근법은 평가결과를 이해하는데 용이하다는 장점을 가진 반면, 환경영향으로 인한 모든 손실을 포함한다고 단정할 수 없다는 단점이 있

다. 중간점 수준 방법론은 ‘Problem-oriented approach’ 로도 불리며, 환경적 메커니즘에서의 오염물 배출로 인한 환경문제의 정도를 정량적으로 평가하는 방법론이다. 대표적인 방법론으로 CML 2001, EDIP 2003, TRACI, ReCiPe 2008 등이 사용되고 있다.

CML 2001은 네덜란드 레이넨대학 환경과학 연구소에서 개발한 방법론이다. Ecoinvent를 이용하여 환경영향범주를 평가할 수 있으며, 유럽지역에 따른 정규화 지수와 지구적 정규화 지수를 제공하는 국제적으로도 통용되는 방법론이다. EDIP 2003은 1997년 중반 덴마크 기술대학(Technical University of Denmark)이 개발한 EDIP 97이 개선된 방법론이다. 8개의 환경영향범주 중에서, 지구를 기준지역으로 하는 지구온난화와 오존층파괴를 제외하고는 유럽을 기준지역으로 정하고 있다. TRACI(Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts)는 2003년 미국환경보호국(US EPA)에서 개발한 환경영향 평가 도구로서, 총 9개 환경영향범주를 평가할 수 있다. 오존층 파괴와 온실효과 부문은 전 지구적 수준으로 개발되었고, 나머지 부분은 북미 출처 자료를 기준으로 개발되었다. 일반적으로 자원고갈에 대한 부분

을 평가하지 못한다는 한계가 있다.

1999년 개발된 Eco-indicator 99는 자원, 생태계 질, 인체 건강 항목에 대한 평가결과를 제시한다. Eco-indicator 99에서는 3가지 영향범주별 피해를 산정할 수 있도록, 투입물이나 배출물이 각 항목에 영향을 주는 정도를 정의하고 있다. 그리고 위의 3가지 항목을 평가하는 과정에서, 인간을 3가지 관점으로 구분하여 정규화 및 가중화 지수를 정의하고 있다. EPS 2000은 환경부하를 비용으로 변환하여 제시하고자 하는 목적에 따라 1990~1991년에 만들어진 방법론으로, 배출물질들이 각 환경영향 범주에 대한 영향도와 함께 비용으로 정의된 환경영향 범주의 중요도를 제시한다.

ReCiPe 2008은 CML 2001과 마찬가지로 네덜란드 레이넨대학 환경과학 연구소(Center of Environmental Science of Leiden University) 및 PR Consultants에서 개발된 방법론이다. 환경영향범주는 지구온난화, 부영양화, 산성화, 미세먼지 형성 가능성 등의 영향범주를 포함하여 14개의 영향범주를 포함하고 있다. 타 LCIA 방법론과 달리 Particulate matter formation(PM10)의 인자를 기준물질로 하는 미세먼지형성 가능성에 대한 영향범주를 제공하고 있다는 특징이 있다.

[표 1] 전과정 영향평가(LCIA, Life Cycle Impact Assessment) 방법론

Method	CML 2001	EDIP	TRACI	ReCiPe 2008
Nation	Netherlands	Denmark	U.S.A.	Netherlands
Institute	Center of Environmental Science of Leiden University	Technical University of Denmark	US EPA	Leiden University, PRé Consultants, Radboud University, Bilthoven
Data Scope	Global / Europe	Europe	North America	Global / Europe
Environmental Impact Category	Acidification potential, Climate change, Eutrophication potential, Freshwater aquatic ecotoxicity, Human toxicity, Marine aquatic ecotoxicity, Photochemical oxidation, Resources, Stratospheric ozone depletion, Terrestrial ecotoxicity	Global warming, Acidification, Terrestrial eutrophication, Photochemical ozone exposure of plants, Photochemical ozone exposure of human beings	Global warming, Ozone depletion, Acidification, Eutrophication, Photochemical oxidation, Ecotoxicity, Human health	Climate change, ozone depletion, terrestrial acidification, freshwater eutrophication, marine eutrophication, human toxicity, photochemical oxidant formation, particulate matter formation, terrestrial ecotoxicity, freshwater ecotoxicity, marine ecotoxicity, ionising radiation, agricultural land occupation, urban land occupation, natural land transformation, water depletion, mineral resource depletion, fossil fuel depletion
Methodology	Guinée et al. 2001	Hauschild & Wenzel 1997	Bare 2004	Mark Goedkoop et al. 2009

2.3 시스템 경계

콘크리트의 시스템 경계는 크게 생산, 시공, 사용 및 폐기의 4단계로 구분한다. 평가를 위한 시스템 경계의 구분은 전과정 평가에서 가장 노동집약적인 데이터 수집단계를 체계적이며 효율적으로 수행할 수 있도록 도울 뿐만 아니라 유사한 기능의 제품을 비교할 때 동일한 조건 하의 환경성능을 비교할 수 있도록 해준다. 각 단위 모듈들은 전과정 평가를 위한 시스템 경계를 형성하며 시스템 경계 내의 하위 단위공정의 범위를 결정함으로써 체계적인 데이터수집과 환경부하 배출량 계산을 수행할 수 있도록 한다. 건설재료의 환경성선언에 대한 국제표준인 ISO 21930에서는 Cradle to Grave에 이르는 제품의 환경성정보를 ISO 14040과 ISO 14044에 서술된 정보 모듈(Information module)에 기초하여 작성하도록 하고 있으며, 이에 따라 콘크리트의 시스템 경계는 <그림 2>에서 보이는 것과 같이 4가지 단계로 세분화된다. 각 생애주기 단계별 시스템 경계 또는 정보 모듈을 결정하고 각 경계 내부의 단위 공정들을 규정한 다음, 단위 공정에서 일어나는 활동에 따른 각각의 환경영향을 계산하도록 한다.

자재생산의 시스템 경계는 콘크리트의 생산을 위한 자원의 채취와 가공, 제품의 제조 등 생산에 필요한 자원과 에너지를

소비하여 건축물에 투입될 콘크리트 완제품 또는 반제품의 상태로 생산하는 모든 공정을 포함한다. 시공의 시스템 경계는 건축물을 구성할 자재를 생산지에서 건설현장까지 운송해오는 과정에서부터 시공 공종별로 건설재료, 에너지 및 각종 기계장비들을 투입하여 건축물을 완성하는 단계를 포함한다. 사용 및 유지보수의 시스템 경계는 완성된 건축물을 해체하기 전까지 이용자가 건물에 상주하면서 추가적인 수선 및 보수를 통하여 점차 노후화되는 건축물의 상태를 유지하는 과정을 포함한다. 폐기 및 재활용의 시스템 경계는 건축물의 용도가 다하면 장비를 이용하여 건축물을 해체하고 발생된 건축폐자재를 처리장까지 수송하여 폐기물을 매립 또는 소각하거나 다른 제품의 원료로서 재활용하는 과정을 포함한다.

3. 콘크리트와 환경제품선언

3.1 환경제품선언

콘크리트와 같은 단일제품의 환경영향 평가 정보는 전과정 평가와 같은 환경성 평가도구를 활용하여 정량적인 표시형태를 취하게 된다. 이 같은 형태의 환경성 정보를 제공하는 매체

[표 2] 환경제품선언 제도 운영현황

국가	명칭	운영기관	건설재료 운영여부
Australia	NCOS, Carbon Reduction Label	정부	-
Canada	Carbon Label	민간	-
France	Indice Carbon	민간	-
Germany	IBU EPD	민간	○
Italy	EPD-Climate Declaration	민간	○
Japan	JEMAI CFP Program	정부	○
Netherland	EPD-Climate Declaration	민간	○
Norway	EPD-Climate Declaration	민간	○
Poland	EPD-Climate Declaration	민간	○
Spain	EPD-Climate Declaration	민간	○
Sweden	EPD-Climate Declaration	민간	○
Switzerland	Climatitop	민간	-
UK	Environmental Profile / Carbon Trust	민간	○
USA	Carbon Counted Carbon Label	민간	○

를 EPD(Environmental Product Declaration, EPD)로 지칭하고 있다. EPD는 제품의 환경성 정보를 계량화하여 표시하는 제도로, 제품 전과정에서 환경영향에 대한 검증과 정보교류를 통하여 환경에 미치는 영향을 파악하고 친환경제품 생산 및 친환경제품의 활성화를 유도하는데 그 목적이 있다. 건설재료성능평가를 시행하는 영국, 스웨덴, 독일 등 주요국가들은 ISO 21930 및 EN 15804 규격을 따르고 있다. 전 세계적으로 건설재료의 생애 주기 관점에서의 EPD 제도를 운영하고 있는 국가는 17개국이며, 이 중 콘크리트를 비롯한 건설재료의 EPD 운영을 위한 세부 군별 전과정 평가 작성지침(PCR, Product Category Rules)을 활용하고 있는 국가는 12개국이다. 해외의 EPD는 평가기준에 따라 사용범위, 기능단위, 평가범위를 구체적으로 설정하여, 동일한 기능을 수행한 건설재료간의 비교가능성을 높일 수 있도록 하였으며, 건설재료의 환경영향을 지구온난화 자원고갈 등 약 13개의 영향범주로 구분하여 산출하고 있다. 또한 EPD의 평가 결과에서 일반적인 목적은 개별 건설재료의 환경성 정보 제공이지만, 건물의 환경성능 평가 및 인증제도의 활용데이터로 EPD를 개발 및 사용하고 있다. 특히, 독일, 스웨덴에서는 콘크리트, 시멘트 등 건설재료별 제품범주 규칙을 구축하여 전과정에 걸친 건설재료에 대한 환경영향을 평가하고 있으며, 특히 운영과정 환경영향인자의 배출 및 흡수

하는 부분까지 평가를 실시하고 있다. 또한, 영국의 사례는 EPD가 부재 및 건물의 입력데이터로서의 기능도 가지고 있어 EPD를 건물단위평가 차원으로 확장시켜 친환경 건설재료의 활성화에 매우 효과적인 프레임워크를 가지고 있다.

국내에서도 건설재료산업의 전과정 평가에 관한 관심이 높아지고 있으나, 현재 건설재료 전과정 평가의 영향범주는 지구온난화 관점에서 이산화탄소 배출량 평가가 주를 이루고 있다. 시스템 경계 또한 건설재료를 건축물을 구성하기 위한 중간제품으로 간주하는 경향에 따라 건설재료의 전 생애 주기 관점이 아닌 건설재료의 제조단계까지만의 전과정 평가가 주를 이루고 있는 실정이다. 그러나 인간의 주거 및 사회활동에 밀접해있는 건설재료 산업의 특수성을 고려할 때 전과정 평가의 목적에 따라서는 지구온난화 관점의 제한된 전과정 평가에서 벗어나 자원소모, 산성화, 오존층 영향, 부영양화, 광화학적 산화물 생성 등 다양한 환경영향 범주에 대한 평가가 이루어져야하며 제조단계 이후에 대해서도 전과정 평가가 가능하도록 할 필요가 있다.

3.2 환경제품선언 콘크리트 사례

콘크리트의 전과정 평가를 위한 시스템 경계를 파악하기

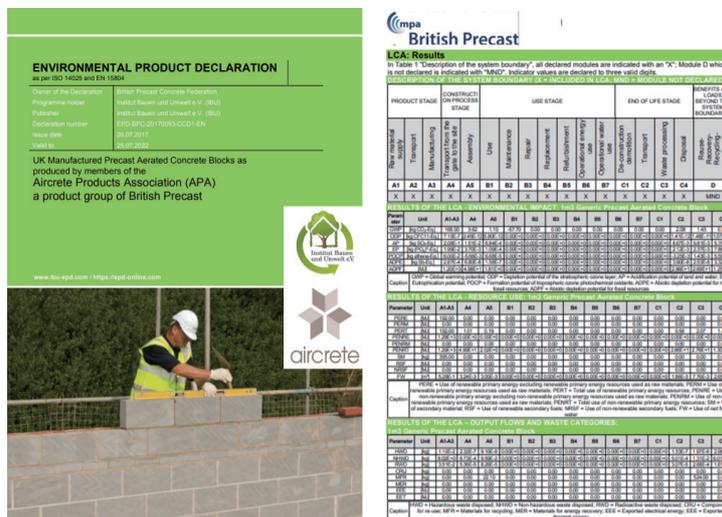


그림 1. Institut Bauen und Umwelt e.V. 콘크리트 제품 EPD 사례

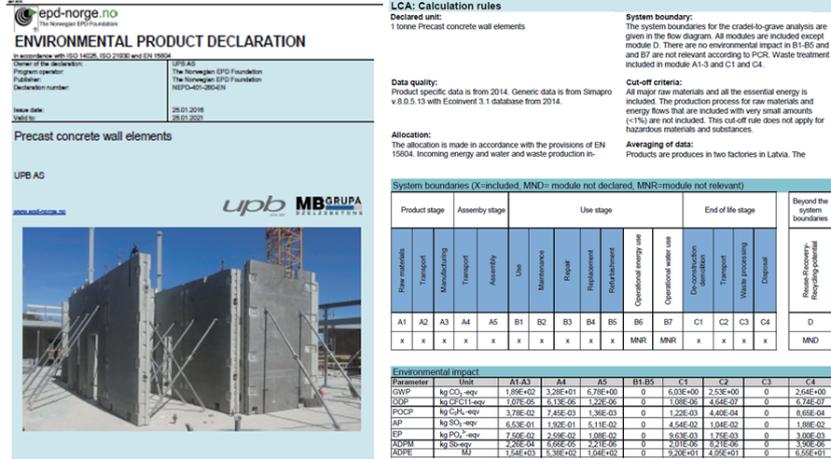


그림 2. The Norwegian EPD Foundation 콘크리트 제품 EPD 사례

[표 3] EPD 사례별 콘크리트 시스템 경계

EPD 운영 국가	평가 범위	생산단계			시공단계			사용/유지관리단계						해체/폐기단계			
		A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4
		원재료 공급	수송	제조	수송	시공	사용	유지 (+수송)	수리 (+수송)	교체 (+수송)	보수 (+수송)	운영 (에너지)	운영 (수자원)	해체 철거	수송	재활용 재사용	폐기
한국	CtG	●	●	●	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
영국	CtO	●	●	●	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
미국	CtG	●	●	●	●	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
독일	CtO	●	●	●	●	●	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	●	●	●	●
스웨덴	CtO	●	●	●	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
노르웨이	CtG	●	●	●	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	CtGv	●	●	●	●	●	●	×	×	×	●	×	×	●	●	●	●

CtG : Cradle to Gate, CtO : Cradle to Gate with Option, CtGv : Cradle to Grave ● :필수 ▲ :선택 × :제외

위하여 콘크리트 인증사례를 보유하고 있는 EPD별 운영사례를 분석하였다. 국내에서도 EPD가 수행되고 있으나, 건설재료를 위한 특화된 시스템 경계는 구축되어 있지 않은 상태이다. 반면 해외의 EPD는 국가 주도로 운영되고 있는 독일과 덴마크가 국가 차원에서 프로그램 운영을 추진 중에 있으며, 민간 부문에서 추적이 되어 시행되고 있는 국가는 스웨덴, 노르웨이, 영국, 미국 등이 있다.

이중 민간 주도 EPD는 주로 건설산업 분야에 치중하고 있

으며, 각 국가간의 상호 인증체계가 구축되어 활발한 인증 교류가 이루어지고 있다. 각 건설재료의 데이터 수집을 위한 시스템 경계를 각국의 기술수준을 반영하여 부분적 수명주기평가(Cradle to Gate), 선택적 반영 평가(Cradle to Gate with Option), 전 과정 의무(Cradle to Grave) 등으로 재료별 평가 체계를 특화하여 운영하고 있다. 각 건설재료의 성능평가 결과는 전생애 범위 설정에 따라 달라질 수 있기 때문에 건물을 구성하는 건설재료마다의 시스템 경계설정이 중요하다.

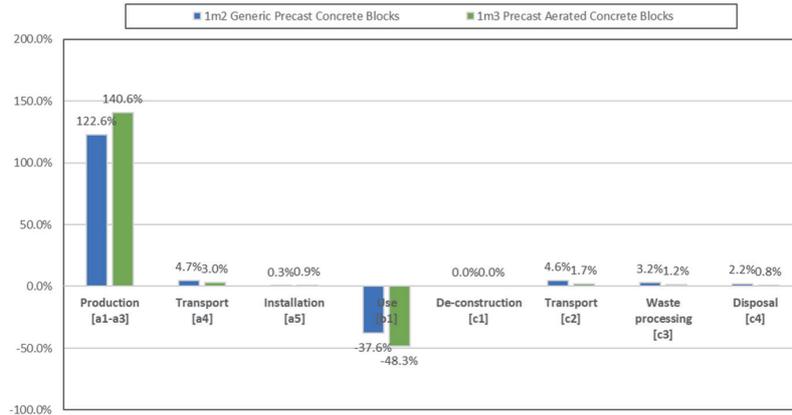


그림 3. 콘크리트 제품 생애주기별 탄소배출량 비율 사례

PCR 사례를 분석한 결과 생산, 시공, 사용, 보수, 폐기의 단계까지로 넓게 설정되어 있는데, 특히 운영과정의 경우 환경영향인자의 배출 및 흡수하는 부분까지 평가를 실시하고 있다. 이때에 운영단계의 환경인자는 LCA의 결과에 포함되어 있지 않지만, 사용단계의 시스템 경계 설정을 통해 독성유해물질 방출이나, 실내환경에 미치는 영향, 건강/안전과 같은 인체에 미치는 영향 등과 같은 이슈를 채택함으로써 ISO 21930 및 EN 15804에서의 권고 사항에 가까워 질 뿐 아니라, 환경영향 평가 결과의 제공정보의 범위를 넓힐 수 있다.

실제 EPD 인증사례에서는 레드믹스트 콘크리트 경우의 운영 단계 탄산화 인증사례는 미비하였고, 콘크리트 블록 등의 2차 제품사례가 주를 이루고 있었다. <그림 3>은 Generic Precast Concrete Blocks과 Precast Aerated Concrete Blocks의 생애 주기 단계별 탄소배출량 비율 사례를 도식화 하였다. 전과정 동안의 탄소배출량 총량의 경우 Generic Precast Concrete Blocks은 10.6 kg-CO_{2eq}/1 m², Precast Aerated Concrete Blocks은 119.5 kg-CO_{2eq}/1 m³을 나타냈다. 이 가운데, 탄소배출계수가 높은 원부자재가 투입되는 생산단계에서의 탄소배출 비율은 Generic Precast Concrete Blocks과 Precast Aerated Concrete Blocks이 각각 122.6%, 140.6%를 나타냈으며, 운영 단계에서 콘크리트 탄산화로 인한 흡착된 탄소배출 비율은 -37.6%, -48.3%를 나타냈다. 다음은 영국 Concrete Centre와 노르웨이 PCR-콘크리트 품목에서 제공된 탄산화 관련 PCR

운영 사례이다.

일반강도 콘크리트와 콘크리트 블록, 모르타르를 포함한 콘크리트 제품에서는 제품의 전체 깊이가 건축물 수명 동안 탄산화할 것이라 가정한다. 탄산화는 콘크리트의 양면에서 발생하며, 탄산화의 총 이론적인 깊이는 200 mm로 설정한다. 콘크리트 1m³ 당 탄산화율은(탄산화로 인해 흡수된 CO₂의 양) 식 (1)과 같이 제품 내 탄산화 할 수 있는 산화칼슘의 비율과 산화칼슘의 양을 기반으로 한다. 이 제품들에 대해, Concrete Centre에 의해 제공된 데이터를 기반으로 산화칼슘의 63%가 탄산화 할 것으로 가정한다. 산화칼슘의 양은 식 (2)에서 알 수 있듯이 콘크리트 제품 내 시멘트의 양, 시멘트 내 클링커의 비율 그리고 클링커 내 산화칼슘의 비율로부터 계산될 수 있다.

$$\text{탄산화로 인해 흡수된 CO}_2\text{의 양 (kg/m}^3\text{)} \\ = 0.63 \times M_{CaO} \times \frac{m \cdot m_{CO_2}}{m \cdot m_{CaO}} \quad \text{식 (1)}$$

여기서 0.63 = CaO의 탄산화량

$m \cdot m_{CO_2}$ = CO₂ 분자량 (44)

$m \cdot m_{CaO}$ = 산화칼슘의 분자량 (56)

M_{CaO} = 콘크리트 제품 내 산화칼슘의 질량

$$M_{CaO} = Q_{cem} \times C_{cem} \times CaO_c \quad \text{식 (2)}$$

여기서, Q_{Cem} = 콘크리트 내의 시멘트 중량 (kg/m^3)

$\% C_{Cem}$ = 시멘트 내 클링커의 비율 (%) (80 % 레디믹 스트 콘크리트, 90 % PC 콘크리트 또는 포장 콘크리트)

$\% CaO_c$ = 클링커 내 CaO 함량 (65 %)

식 (2)에 의해서, 식 (1)은 하기와 같이 도출된다.

탄산화로 인해 흡수된 CO_2 의 양 (kg/m^3)

$$= 0.63 \times Q_{Cem} \times \% C_{Cem} \times 0.65 \times \frac{44}{56} \quad \text{식 (3)}$$

식 (3)에서의 $(0.63 \times 0.65 \times \frac{44}{56})$ 을 'z'로 치환하면 하기와 같이 표기할 수 있다.

탄산화로 인해 흡수된 CO_2 의 양 (kg/m^3)

$$= z \times Q_{Cem} \times \% C_{Cem} \quad \text{식 (4)}$$

추가적으로 고강도 콘크리트 제품, PC 제품, 포장 콘크리트 등에 대한 수정인자를 통해 탄산화로 인해 흡수된 CO_2 의 양을 산정한다.

탄산화로 인해 흡수된 CO_2 의 양 (kg/m^3)

$$= (K \times S \times \sqrt{RSL}) \times (z \times Q_{Cem} \times \% C_{Cem}) \quad \text{식 (5)}$$

여기서, K = 탄산화 깊이 (m)

S = 표면적 (m^2)

RSL = 기존사용수명

[표 4] 콘크리트 제품별 탄산화 수정인자

	고강도 콘크리트	PC 콘크리트 제품	포장 콘크리트
탄산화 깊이 (m)	0.00125	0.00233	0.001
단위시멘트량 (kg/m^3)	290	350	300
시멘트내 클링커 비율 (%)	80	90	90
PEA 30 % 치환혼입시	1.10	1.10	1.10
GGBS 50 % 치환혼입시	1.25	1.25	1.25

4. 맺음말

기존 연구를 통해 개발된 LCA 방법론은 산업 전반에 걸쳐 제품의 생애주기 동안 발생하는 수많은 배출물질에 의한 환경영향을 평가하는 것을 지원해 왔다. 하지만 콘크리트 분야에서의 LCA 평가는 이산화탄소로 대표되는 온실가스 배출량에만 집중되어 왔으며, 이는 콘크리트의 모든 환경영향을 종합적·정량적으로 파악하지 못하고 있었다는 것을 의미한다.

따라서 본고는 현재까지 진행된 콘크리트 및 건설재료의 LCIA 방법론 및 EPD 인증사례에 대한 연구내용을 종합적으로 소개함으로써 실무자들로 하여금 각종 환경영향 특성에 대한 이해를 높이고자 하였다.

이를 통해 콘크리트 산업 실무자들이 이산화탄소 배출량 이외에도 이산화탄소 흡착 및 콘크리트에서 주요하게 평가되어야 할 환경영향평가를 선별적으로 수행하여, 환경부하저감형 콘크리트 개발시 진정한 의미의 지속가능한 콘크리트산업 구현에 기여할 수 있기를 기대한다.

참고문헌

1. Institut Bauen und Umwelt e.V. "Product Category Rules for Construction Products from the range of Environmental Product Declarations of IBU, Part A: Calculation Rules for the Life Cycle Assessment and Requirements on the Background Report", 2013.
2. Institut Bauen und Umwelt e.V. "Product Category Rules for Construction Products from the range of Environmental Product Declarations of IBU, Part B: Requirements on the EPD for Pre-cast concrete components, Version 1.6", 2014.
3. The Norwegian EPD Foundation. "Product-Category Rules For preparing an environmental declaration (EPD) for Product Group-Precast Concrete Products, NPCR20", 2012.
4. Danish Technological Institute. "Guidelines-Uptake of carbon dioxide in the life cycle inventory of concrete", 2005.
5. EN 16757 Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Product Category Rules for concrete and concrete elements, 2017.

담당 편집위원 : 박원준(강원대학교)