

# 지속가능한 콘크리트의 개발을 위한 에코효율성 평가방법 제안

## Proposal of Eco-Efficiency Assessment Method for Sustainable Concrete



김태형 Tae-Hyoung Kim  
한국건설기술연구원  
건축도시연구소 연구원  
E-mail : kimtaehyoung@kict.re.kr



채창우 Chang-U Chae  
한국건설기술연구원  
건축도시연구소 선임연구위원  
E-mail : cuhae@kict.re.kr

### 1. 머리말

콘크리트 산업은 자원을 소비하고 환경영향을 배출하는 단순한 건설산업이 아니라 지구환경 보전 및 유지활동의 일환이 되는 지속가능 개발 산업으로서 패러다임을 전환하는 상황이다. 또한, 에너지 소비 절감과 온실가스 감축이라는 전 세계적 화두 앞에서 시멘트 및 콘크리트 산업에서의 환경영향 개선은 우리나라 녹색성장을 위해서도 필연이다. 최근 건축물의 건축공사 시 투입된 자재들의 온실가스 배출량 평가결과에 의하면 콘크리트는 철근, 철골, 유리, 도료, 단열재 등과 함께 전체 온실가스 배출량의 약 95% 이상을 차지하는 주요 건축자재 중 하나로 나타났다. 이 중 콘크리트가 차지하는 비율은 약 70%로서 온실가스 배출량을 평가할 수 있는 기법 및 이를 저감하기 위한 기법의 개발이 요구된다.

현재 콘크리트에 관한 연구는 콘크리트의 균열 억제 및 강도, 내구성 향상 등의 물리적 성능 개선에 집중되어 왔다고 해도 과언이 아니다. 하지만 최근에는 콘크리트의 생산 및 사용이 지구, 지역 그리고 우리의 주변 환경에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지면서 환경 친화적인 콘크리트 개발이 주목받고 있다. 또한, 콘크리트의 단위제품 생산에

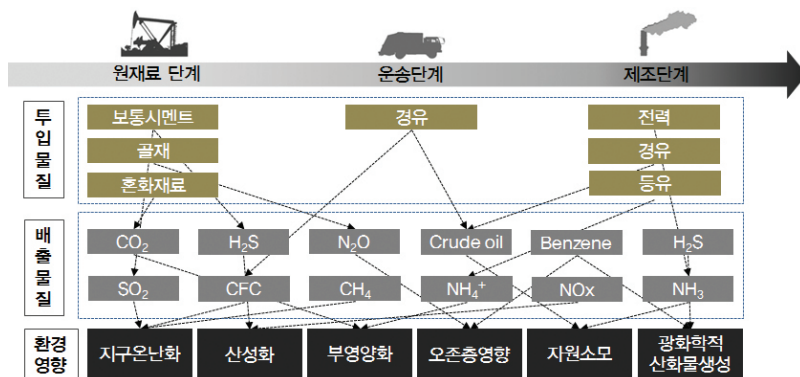


그림 1. 콘크리트 생산과정 시 전과정 환경영향 분석

따른 환경영향 배출량을 타 건설재료와 애써 비교하지 않더라도 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 필수불가결한 것이다.

이러한 이유에서 최근 콘크리트의 환경성을 평가하고 저감하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 하지만, 현재 국내의 연구실정은 대부분 환경영향 물질 중 온실가스를 대상으로 한 저감 및 평가기술에 관한 연구에 편중되어 있다고 해도 과언이 아니며, 콘크리트 구성재료 및 에너지 투입비용과 구조재료로서 내구성을 종합적으로 고려한 평가기술에 관한 연구는 매우 미비한 실정이다.

이는 콘크리트의 생산과정에서 배출되는 다양한 환경영향 물질이 생태계에 미치는 영향에 대한 중요성은 인식하고 있으나, 환경성을 경제성 및 내구성과 별개의 관점에서 평가해온 것에 기인한 것으로 콘크리트를 지속가능한 개발 관점에서 평가하기 위해서는 지속가능한 개발 개념인 Triple Bottom Line(TBL)에 근거한 환경성, 경제성, 내구성을 종합적으로 연계한 평가기술이 요구된다. Triple Bottom Line(TBL)은 environmental(환경) 및 economic(경제), social(사회)요소로 구분되며, 이는 기

업이 경제적으로 생존가능하고, 환경적으로 건전하며, 사회적 책임을 갖는 것을 의미한다. 환경적 요소는 환경영역, 환경정책, 환경교육 등으로 평가될 수 있으며, 경제적 요소는 수익성, 생산성 증대, 부가가치 창출 등으로 평가될 수 있다. 또한, 사회적 요소는 제품책임, 사회참여, 사회공헌 등으로 평가될 수 있다.

## 2. 콘크리트의 에코효율성 평가방법 제안

### 2.1 개요

콘크리트의 친환경성에 대하여 건축구조재료로서의 기성성(내구성) 및 경제성에 대한 고려 없이 단순히 환경영향 배출량만을 통하여 평가하기에는 한계점이 있다.

따라서 환경부하와 생산비용을 최소로 줄이면서 고내구성을 갖는 환경친화형 콘크리트를 생산하기 위한 기법인 콘크리트 에코효율성 평가방법을 제안한다. 우선, <그림 2>와 같이 콘크리트 생산 시 환경성(환경영향) 및 경제성(생산비용) 그리고 내구성(내구수명)이 유기적으로 연계된 에코효율성 평가체계를 정립하였다. 또한, 콘크리트의 친환경성을 평가하는 개념으로서 콘크리트의 지속가능성 지표(Indicator)인 콘크리트 에코효율성(CEI,

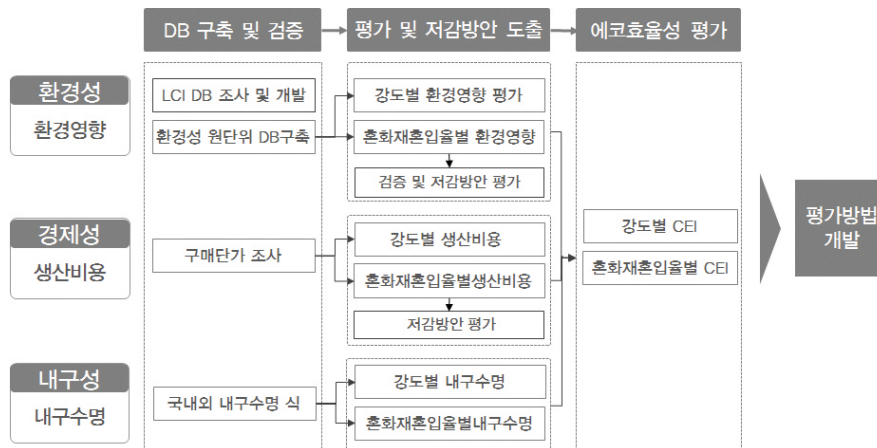


그림 2. 콘크리트 에코효율성 평가 개요

Concrete Eco-efficiency Index)을 제안한다.

## 2.2 콘크리트 에코효율성의 정의

콘크리트의 에코효율성(Eco-efficiency)이란 콘크리트의 친환경성을 평가하는 진보된 개념으로서 콘크리트 생산과정의 환경부하 배출량 및 생산비용 그리고 내구성을 유기적으로 연계한 콘크리트의 지속가능성 지표이다.

콘크리트의 에코효율성 평가는 콘크리트를 생산 시 환경부하 및 생산비용 그리고 콘크리트의 내구수명 평가결과를 기반으로 생태환경에 미치는 환경부하와 생산비용을 최소로 줄이면서 고내구성을 갖는 환경친화형 콘크리트를 생산하기 위한 기법이다. 콘크리트의 에코효율성은 내구수명(년)이 증가되거나 비용(원)이 절감될수록 향상된다. 따라서 동일강도의 콘크리트 중 에코효율성(원/년) 값이 적은 콘크리트가 에코효율성이 향상된 콘크리트라고 할 수 있다. 식 (1)은 콘크리트의 에코효율성(Eco-efficiency) 산출방법을 나타낸다.

$$CEI = \frac{(EC + MC)}{SL} \quad (1)$$

여기서 CEI(Concrete Eco-efficiency Index)는 콘크리트 에코효율성 지수, E.C(Environmental Cost)는 환경비용, M.C(Manufacture Cost)는 생산비용, S.L(Service Life)은 콘크리트 내구수명을 나타낸다.

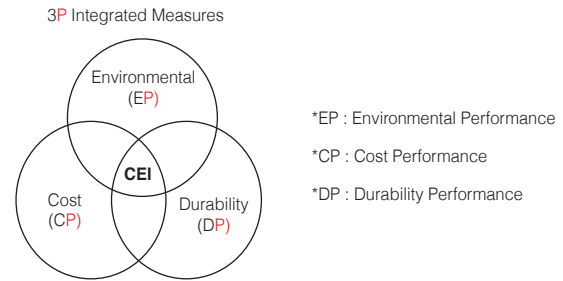


그림 3. 콘크리트 에코효율성 개념

## 2.3 콘크리트의 에코효율성 평가 프로세스

콘크리트 에코효율성은 <그림 4>와 같이 대상 콘크리트 생산 시 투입된 배합재료 및 에너지원에 따른 환경성, 경제성, 내구성을 각각 평가한다.

환경성은 전과정 평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 이용하여 콘크리트 생산과정에서 투입된 원재료 및 에너지원의 환경부하 배출량을 평가하였다. 이때, 전과정 평가방법 중 환경부하 배출물질이 인간과 생태계에 미치는 정도를 파악할 수 있는 피해산정형 방식을 적용하였으며, 지구온난화와 산성화, 부영양화, 자원소모, 오존층 영향, 광화학적산화물 생성 등 6종류의 환경영향 범주를 평가대상으로 선정하였다. 앞서 선정된 환경영향 범주들이 인간건강 및 사회자산, 동·식물 멸종, 1차 생산에 미치는 정도를 분석하였으며, 기존 연구 DB를 적용하여 비



그림 4. 콘크리트 에코효율성 평가 프로세스

용(원)으로 환산하였다. 기존의 연구는 환경성 측면과 경제적 측면을 화폐 단위로 통합하여 평가 할 수 있는 DB이며, 국내 최초로 제품 전과정에서 발생하는 환경영향을 화폐 단위로 지수화 한 연구이다. 현재 국내에는 건설재료 및 콘크리트에 특화된 이론 및 DB가 개발되어 있지 않은 상황에서 기 개발된 DB가 콘크리트의 환경비용을 산출하기 위한 방법으로 적합하다고 사료된다.

경제성은 전과정 동안 투입된 원재료 및 에너지원 등의 비용을 합산하여 도출한다. 이를 위해 한국물가정보시스템의 콘크리트 구성재료 및 에너지원별 표준 단가 DB를 이용하였다.

내구성은 다양한 열화현상 중 탄산화에 대한 예상 내구수명을 평가한다. 기존의 탄산화 예측식 중 일본건축학회에서 제시된 식을 이용하여 콘크리트의 내구수명(년)을 도출하였다.

### 3. 콘크리트의 에코효율성 평가 사례분석

앞서 제안한 콘크리트 에코효율성 평가방법을 이용하여 다양한 종류의 콘크리트의 에코효율성을 평가하였다. 압축강도가 높아짐에 따라 에코효율성의 변화량 평가하였으며, 주요 원인을 분석하였다. 또한, 혼화재 혼입에 따른 에코효율성을 평가하였으며, 이를 통해 콘크리트의 에코효율성을 향상시킬 수 있는 혼화재 혼입률을 도출하였다. 에코효율성을 평가하기 위하여 압축강도별 환경성

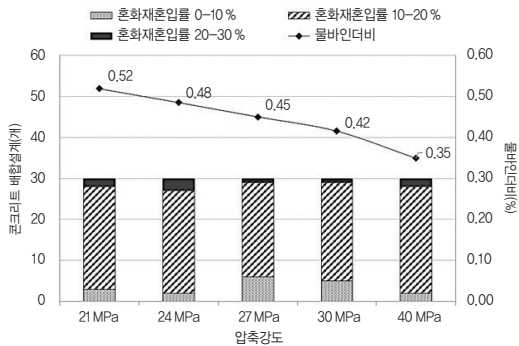


그림 5. 평가대상 콘크리트 배합설계 종류

및 경제성, 내구성을 평가하였고, 이를 이용하여 에코효율성을 평가하였다. 평가대상 콘크리트 종류는 <그림 5>와 같이 강도별로 각각 30개의 콘크리트 배합설계를 조사하였으며, 압축강도의 범위는 21 MPa ~ 40 MPa이다.

#### 3.1 콘크리트 압축강도별 에코효율성(CEI) 평가결과

콘크리트의 압축강도가 21 MPa에서 40 MPa로 높아질수록 에코효율성이 평균 약 5,700(원/년)에서 2,200(원/년)까지 상승되었다. 압축강도 24 MPa 및 40 MPa 콘크리트의 경우 평균 에코효율성이 각각 4,700(원/년)과 2,200(원/년)으로 나타났으며, 40 MPa 콘크리트의 에코효율성이 24 MPa 콘크리트에 비하여 약 50% 정도 상승되었다. <그림 6>과 같이 압축강도가 24 MPa에서 40 MPa로 높아짐에 따라 비용(환경+생산)이 평균 318,000(원/m<sup>3</sup>)에서 387,000(원/m<sup>3</sup>)으로 약 21%가 증가되었으나, 콘크리트의 탄산화 내구수명이 평균 68(년/m<sup>3</sup>)에서 190(년/m<sup>3</sup>)으로 매우 크게 증가되었다. 이와 같이 콘크리트 압축강도가 높아질수록 내구수명의 증가율이 비용의 증가율에 비해 크기 때문에 에코효율성이 상승하는 것으로 분석되었다.

#### 3.2 콘크리트 혼화재 혼입률별 에코효율성(CEI) 평가결과

콘크리트 배합설계 시 혼화재(GGBS) 혼입율을 30%

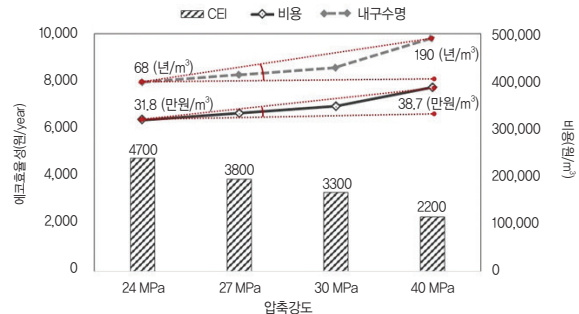


그림 6. 콘크리트 압축강도별 에코효율성 분석

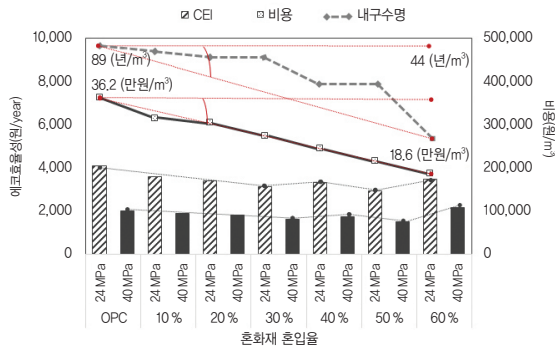


그림 7. 콘크리트 혼화재 혼입율별 에코효율성 분석

까지 증가할수록 모든 강도의 에코효율성(원/년)이 상승되는 경향을 나타냈다. 대표적으로 압축강도 24 MPa 및 40 MPa 콘크리트의 경우 혼화재 혼입률이 10%에서 30%까지 증가할수록 OPC 대비 에코효율성이 약 10%에서 최대 23%까지 상승하였다. <그림 7>과 같이 24 MPa 콘크리트의 경우 혼화재 혼입률 증가함에 따라 환경영향 저감 및 생산비용 절감으로 인하여 비용(원/m³)이 362,000(원/m³)에서 274,000(원/m³)으로 줄어들었기 때문이다. 또한, 혼화재 혼입률이 증가될수록 콘크리트의 탄산화 내구수명도 89(년/m³)에서 79(년/m³)으로 감소되는 것으로 나타났으나, 내구수명의 감소된 비율이 비용의 저감 비율에 비해 적은 것으로 분석되었다. 하지만, 혼화재 혼입률이 40%와 60%까지 증가시킬 경우 내구수명이 각각 74(년/m³)과 44(년/m³)으로 급격히 감소됨으로 인하여 에코효율성이 하락되는 경향을 나타냈다. 이러한 경향은 압축강도 24 MPa 콘크리트 뿐만 아니라 21 MPa, 27 MPa, 30 MPa, 40 MPa 콘크리트에서 동일하게 나타났다.

#### 4. 맺음말

콘크리트는 단일 재료로써 지구 기후변화를 비롯한 최근 환경문제에 대해 미치는 영향이 매우 크기 때문에 콘크리트 재료 및 생산에 따른 환경영향 평가는 상당히 중요하다고 볼 수 있다.

콘크리트의 친환경성을 평가하는 진보된 개념으로서 환경부하와 생산비용을 최소화 하면서 고내구성을 갖는 환경친화형 콘크리트를 생산하기 위한 에코효율성 평가방법에 대하여 살펴보았다.

이는 동등한 내구성을 만족하면서 비용이 저감되어 콘크리트의 에코효율성을 향상시킬 수 있는 배합설계 개발 시 적용 할 수 있을 것이다.

앞으로 콘크리트 저변 확대의 의지를 가지고 환경성 뿐만 아니라 경제성, 내구성까지 포함된 통합 성능평가를 위한 융합 연구가 이루어져야 할 시점이다.

담당 편집위원 : 이건철(한국교통대학교)

#### 참고문헌

1. ISO 14045. Environmental Management—Eco-Efficiency Assessment of Product Systems—Principles, Requirements and Guidelines; ISO: Geneva, Switzerland, 2012.
2. Tae-hyoung, Kim.; Sung-ho, Tae; Chang-u, Chae. Analysis of Environmental Impact for Concrete Using LCA by Varying the Recycling Components, the Compressive Strength and the Admixture Material Mixing. Sustainability 8, 361, 2016.
3. Itsubo, N.; Inaba, A. Lifecycle Impact Assessment Method Based on Endpoint Modeling (LIME2)—Chapter 2. Characterization and Damage Evaluation Methods. Available online: [http://lca-forum.org/english/pdf/No15\\_Chapter2,1-2,3.pdf](http://lca-forum.org/english/pdf/No15_Chapter2,1-2,3.pdf).
4. Architectural Institute of Japan. Japanese Architectural Standard Specification (JASS); Architectural Institute of Japan: Tokyo, Japan, 2012.