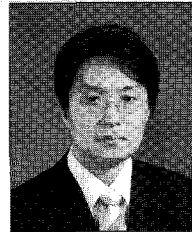
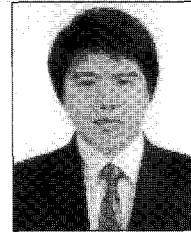


콘크리트 전과정 CO₂ 평가 프로그램 개발 연구

The Development of LCCO₂ Evaluation Program for Concrete



태 성 호*



김 태 형**

* 한양대학교 건축학부 조교수

** 한양대학교 건축환경공학과 석사과정

1. 서 론

지구 온난화에 대비한 주요 국제 환경협약의 흐름은 1970년대를 기점으로 2009년에 이르기까지 지속적으로 발전해 왔다. 1972년 6월 113개국 대표가 모여 세계적으로 환경 위기에 처한 지구를 보전하는데 전 지구인이 협력 노력하는 스톡홀름의 인간환경 선언을 시작으로 1992년 6월 리우회의를 통해 “현재의 개발이 현재세대와 미래세대의 필요를 공평하게 충족시켜야 한다”는 지속 가능한 개발의 개념이 유엔 차원에서 공식적으로 환경과 개발을 위한 주요한 목표로 천명하게 되었다. 또한, IPCC 제4차 보고서에 따르면 1990년 이후 전 지구 평균기온은 0.74℃ 상승했으며, 대기 중의 온실가스 농도의 증가에 따라 지금 추세대로 대기 중 온실가스 농도가 높아질 경우 2100년에는 20세기말보다 최고 6.4℃가 상승하고 해수면은 최고 59cm가 높아질 것이라고 전망하였으며, 지구 평균온도가 3.5℃ 상승하면 생물종의 40~70%가 멸종할 가능성이 있기 때문에 지구 온난화의 주범인 온실가스를 절대적으로 줄여야 한다고 경고하고 있다.

한편, 건설산업은 국내 전체 재료소비의 40%, 에너지소비의 24%, CO₂ 배출량의 42%, 전 산업폐기물의 30%, 그리

고 불법폐기물의 60%를 발생하는 산업임에도 불구하고 친환경적인 연구개발은 타 산업분야에 비해 미흡한 실정이다. 따라서 국내 건설생산 활동은 지금까지의 단편적이고 반환경적인 개발정책을 지양하고, 건축물의 설계, 시공, 운영, 해체 등 건축물 Life Cycle에 걸친 환경부하 저감과 거주환경성능 향상을 목표로 한 지속가능한 개발 위주의 새로운 패러다임으로 전환하는 것이 필요하다¹⁾.

특히, 건설산업의 주요자재인 콘크리트는 시멘트, 골재, 혼화재료 등의 자재 생산과정에서부터 제조에 이르기까지 다량의 CO₂를 배출함에 따라 콘크리트 생산에 따른 CO₂의 정량적 평가에 관한 연구가 절실히 요구되고 있다.

이러한 이유에서 환경 선진국에서는 저탄소 콘크리트 조달 시스템²⁾ 등 CO₂ 배출량 및 에코 콘크리트 생산 연구와 더불어 콘크리트의 전과정 CO₂평가에 관한 연구가 진행되고 있으나 국내에서는 현재까지 뚜렷한 연구가 진행되고 있지 않은 것이 현실이다.

이에 본 기사에서는 건설산업의 주요 건설자재인 콘크리트를 대상으로 콘크리트의 전 생애주기 동안의 CO₂ 평가 기술에 대하여 기술하고자 하며, 기술에 앞서 본 내용은 필자의 기존 연구논문³⁾의 내용을 근거로 기술하였음을 밝힌다.

2. 콘크리트 전과정 CO₂ 배출량 평가의 필요성

건축물의 전과정 CO₂ 배출량을 건설단계, 운영/유지관리 단계, 해체/폐기단계로 구분하여 평가한 연구결과에 의하면 건설단계의 자재생산에 의한 CO₂ 배출량은 건축물 전과정 CO₂ 배출량의 약 30%정도를 차지하는 것으로 평가된다. 또한 자재생산에 의한 CO₂ 배출량을 건축공사, 토목공사, 설비공사로 구분하여 평가할 수 있는데, 건축공사의 CO₂ 배출량은 건설단계 자재생산에 의한 CO₂ 배출량의 약 85%를 차지하는 것으로 분석되며, 특히 건축공사에 사용되는 건설자재 중 CO₂ 배출량 80%를 차지하는 CO₂ 주요배출 건설자재를 표 1와 같이 정리할 수 있다. 표 1에 의하면 CO₂ 주요배출 건설자재는 철근, 레미콘, 합판, 콘크리트제품, 산업용 플라스틱 제품, 도료의 총 6종류로 분류 가능하며 콘크리트는 CO₂ 주요배출 자재 중에서도 철근 다음으로 많은 CO₂를 배출하는 건설자재임을 알 수 있다.

이렇듯 콘크리트는 건설단계의 CO₂ 배출량에 지대한 영향을 미치는 CO₂ 주요 배출자재로서 건설과정에서의 콘크리트 사용량 절감기술과 CO₂ 배출량이 적은 에코 콘크리트와 같은 재료적 측면의 개발과 더불어 고강도 콘크리트 등 다양한 콘크리트에 대한 정량적인 CO₂ 배출량 평가기술의 개발과 이를 통한 CO₂ 원단위 DB구축이 절실히 요구된다고 할 수 있다. 그러나 현재 정부에서 제시되고 있는 콘크리트 CO₂ 원단위는 21MPa, 24MPa의 범위에 머물고 있어 최근 활발히 연구되고 있는 에코 콘크리트 및 고강도 콘크리트 등 다양한 콘크리트에 대한 정량적인 전과정 CO₂ 평가는 불가능한 실정으로 이에 대한 연구가 요구되고 있다.

표 1 건축공사 이산화탄소 주요배출 건설자재

주요 자재 그룹	이산화탄소 발생비율
철근	42.37%
레미콘	23.72%
합판	4.03%
콘크리트 제품	3.47%
산업용플라스틱제품	3.37%
도료	3.13%
합계	80.09%

표 2 국가 LCI DB - 레미콘 부문

구분	개발기관	CO ₂ 원단위
레미콘 25-210-12	지정부	400 kg-CO ₂ /m ³
레미콘 25-210-15	지정부	409 kg-CO ₂ /m ³
레미콘 25-240-12	지정부	406 kg-CO ₂ /m ³
레미콘 25-240-15	지정부	419 kg-CO ₂ /m ³

3. 콘크리트 전과정 CO₂ 배출량 평가 프로그램 개발

3.1 개요

콘크리트의 CO₂ 배출량 평가는 그림 1과 같이 생산단계별로 구분하여 자재단계, 운송단계, 제조단계 동안에 소모되고 배출되는 에너지 및 CO₂를 정량화하여, 이들이 환경에 미치는 영향을 총체적으로 평가하고, 이를 토대로 환경개선의 방안을 모색하고자 하는 객관적이며 적극적인 환경영향 평가로 정의할 수 있다.

즉, 본 평가 시스템은 단계별로 구분된 콘크리트 생산과정에서 배출하는 CO₂의 정량적 평가를 목적으로 하며, 그림 1과 같이 콘크리트 생산과정에서 발생하는 CO₂ 배출량을 자재, 운송, 제조단계로 구분하여 각 단계의 평가대상을 분류하고 이에 대한 분석방법을 제안하였다.

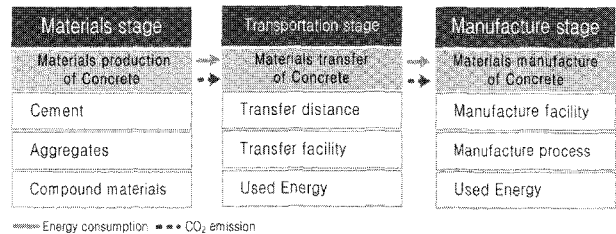


그림 1 콘크리트의 전과정 CO₂ 평가 개요

3.2 단계별 평가방법

(1) 자재단계

자재단계의 CO₂ 배출량은 콘크리트 배합에 사용되는 각 구성 재료의 투입물량과 자재 별 CO₂ 원단위를 이용하여 산출하였다. 식 (1)에 콘크리트 자재단계의 CO₂ 배출량 산출식을 나타낸다.

$$CO_2M = \sum(M(i) \times \text{원단위}M,CO_2) \quad (1)$$

(i= 1 : 시멘트, 2 : 굵은골재, 3 : 잔골재, 4 : 혼화재료, 5 : 물)

여기서, CO₂M는 단위 콘크리트 생산에 따른 자재단계의 CO₂ 배출량[kg-CO₂/m³], M(i)는 콘크리트 1m³당 각 재료의 사용량[kg], 원단위 M,CO₂=각 재료의 CO₂ 원단위 [kg-CO₂/kg]이다.

(2) 운송단계

운송단계의 CO₂ 배출량은 콘크리트 각 구성 재료의 운

송과정에서 배출되는 CO₂ 배출량을 산출하며 산출식은 식(2)와 같다.

$$CO_2T = (M(i) / Lt) \times d \times \text{원단위 } T,CO_2 \quad (2)$$

(i= 1 : 시멘트, 2 : 굵은골재, 3 : 잔골재, 4 : 혼화재료)

여기서 CO₂T는 단위 콘크리트 생산에 따른 운송단계의 CO₂배출량[kg-CO₂], M(i)는 콘크리트 1m³당 각 재료[ton], Lt는 (i)재료별 운송장비의 적재량[ton], d는 운송거리[km], 원단위 T,CO₂ = 운송장비의 CO₂ 배출량 원단위[kg-CO₂/ton·km] 이다.

(3) 제조단계

제조단계에서의 CO₂ 배출량 평가는 레미콘 생산업체의 공정현황, 각 설비의 용량 데이터를 기초로 하였다. 배치플랜트와 재료 저장사이로 등 레미콘 제조설비에서 사용한 일간 에너지 사용량과 레미콘 생산량 데이터를 이용하여 콘크리트 1m³ 생산에 사용되는 각 제조설비의 에너지 소비량과 CO₂ 배출량을 산정하였다. 콘크리트 1m³ 생산 시 각 제조설비의 사용된 전력량을 도출하기 위해 먼저 제조공정을 저장, 수송, 계량, 혼합으로 구분하였다. 구분된 설비의 각 용량과 일간 사용된 전력사용량과의 비율 분석을 통해 각 설비의 가동사용량을 도출하였다. 또한, 각 공정마다 사용된 유류에너지는 전년도 연간 레미콘 생산량에 따른 유류 사용량을 입력하여 산출되도록 하였으며, 유류 사용량 미 입력 시 동절기(11월~4월)와 하절기(5월~10월)의 유류 평균 사용량DB가 적용되도록 하였다. 이렇게 산정된 콘크리트의 단위 체적 당 CO₂ 배출량을 기초로, 콘크리트 제조에 소요된 총 에너지사용량에 대한 CO₂ 배출량을 산정하였다. 식(3)에 콘크리트 제조단계에서의 CO₂ 배출량 산출식을 나타낸다.

$$CO_2F = \sum \{[(E_y / R) + E(i)] \times \text{원단위 } E,CO_2\} \quad (3)$$

(i= 1 : 저장설비, 2 : 운반설비, 3 : 혼합설비, 4 : 기타설비)

여기서, CO₂F는 단위 콘크리트 제조단계의 CO₂ 배출량[kg-CO₂/m³], E_y는 연간 등유 사용량[ℓ], R는 연간 레미콘 생산량[m³], E(i) 각 공정별 제조설비의 전력사용량[kwh], 원단위 E,CO₂ = 각 에너지원의 CO₂ 배출량 원단위[kg-CO₂/단위], y는 등유이다.

3.3 콘크리트 CO₂ 배출량 평가 프로그램 개요

콘크리트 CO₂ 배출량 평가 프로그램은 Microsoft office excel을 기반으로 제작되었으며 평가자가 직접 입력한 조건

에 근거하여 콘크리트 생산 시 에너지 사용량과 CO₂ 배출량의 평가가 가능하도록 구성되었다.

(1) 기본정보 입력 시트

기본정보 입력 시트는 레미콘 생산업체의 기본적인 정보를 입력한다. 회사 명칭과 콘크리트 제조공장의 지리적 위치를 입력하고 평가일시, 평가자, 연간 생산량, 평가시기의 내용을 순차적으로 입력한다. 연간 생산량은 제조단계의 연간 난방 에너지 사용량과의 분석을 통하여 콘크리트 단위 체적 당 제조 시 투입되는 각각 에너지 사용량을 산출하는데 활용된다.

(2) 자재단계 입력 시트

자재단계 시트에서는 콘크리트 종류, 호칭강도, 필요량, 슬럼프, W/C, 굵은 골재 최대치수, 콘크리트 1m³의 재료배합이 입력된다. 재료배합의 기본단위는 1m³ 당 투입자재 물량이고 사용자는 평가하고자 하는 콘크리트 호칭강도별로 각 해당 투입되는 자재의 물량에 대해 기준안과 대책안으로 구분하여 입력함으로써 자재단계에 대한 기준 대비 대책안의 CO₂ 발생 저감비율을 산출할 수 있다.

(3) 운송단계 입력 시트

운송단계 시트에서는 운송차량의 종류, 운송수단, 운송거리 등을 입력하도록 구성된다. 우선 각 재료마다 표준적인 운송수단의 범위를 정하였으며, 입력란에 평가를 원하는 트럭의 종류를 적재량에 따라 표준 5가지로 분류하여 선택하도록 하였으며, 이를 토대로 결과 값이 산출되도록 하였다. 또한 각 재료마다 콘크리트 공장과의 실제 운송거리를 입력하도록 하였고, 운송수단의 표준연료는 경유로 한정 한 후 현재의 표준 연료(경유)가격을 직접 입력하도록 하여 경제성 평가 시 정량적인 평가 가능하도록 하였다.

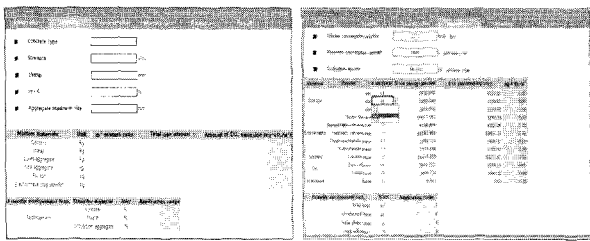
(4) 제조단계 입력 시트

제조단계 시트는 콘크리트 제조설비의 운용과정에서의 CO₂ 배출량을 평가하는 시트이다. 운용과정 중의 에너지 사용량의 도출을 위해서 배치플랜트와 재료저장사이로, 혼합 믹서 등의 설비부분과 일반 사무소로 분류하여 정보가 입력된다. 설비부분의 입력 값은 저장, 수송, 계량, 혼합 공정에서 사용되는 장비를 선택한다. 전력, 유류의 에너지 항목별 해당 데이터를 입력하면 평가하는 레미콘 생산업체의 에너지사용량이 자동 산출된다. 위의 기본정보 단계에서 입력한 평가시기를 적용하여 동절기에 유류 에너지가 더

많이 사용되는 것을 감안하여 이에 대한 변수를 적용하여 평가되도록 하였다. 또한 평가업체의 CO₂ 배출저감을 위한 친환경 기술인 고로슬래그와 플라이애쉬 치환, 신·재생에너지 사용, 설비시스템의 고 효율화, 에너지의 효율적 운용 등의 친환경기술 항목을 적용할 수 있도록 하였으며, 새로운 친환경 기술의 추가도 가능하도록 하였다.

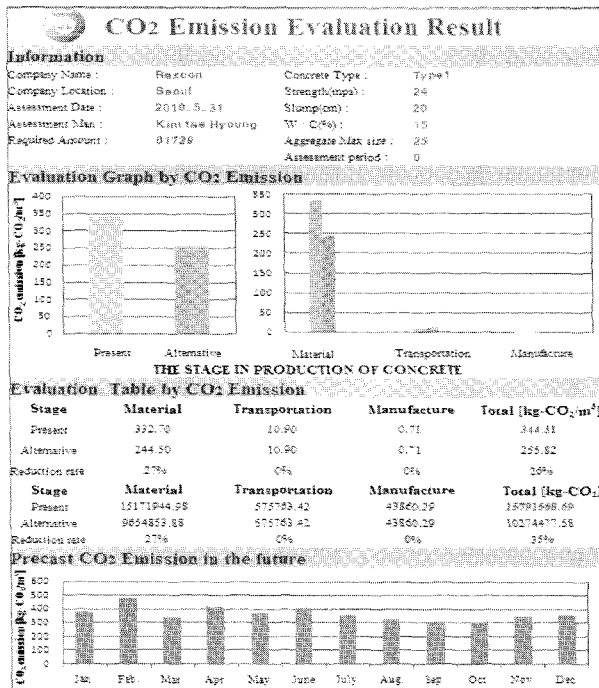
(5) 평가결과 시트

평가결과 시트는 콘크리트 전과정 CO₂ 배출량 계산 결과를 출력하는 시트이다. 입력 시트에서 입력이 완료된 조건과 단계별 CO₂ 산출식에 따라 각각의 계산이 실행되며 계산 결과는 수치 및 그래프의 형태로 평가결과 시트에 제시된다. 또한, 그래프는 각 단계 공정의 표기와 함께 기준안의 원단위를 대책안의 원단위와 비교하여 나타내며 기준안에 대한 대책안의 저감율이 표시되도록 구성되었다.



(a) 생산단계 평가시트

(b) 제조단계 평가시트



(c) 평가결과 시트

그림 2 건축공사 이산화탄소 주요배출 건설자재

4. 콘크리트 전과정 CO₂ 평가사례

4.1 평가개요 및 방법

평가대상 레미콘 생산업체는 서울에 위치하며, 연간 약 700,000m³을 생산하는 업체로서 제조설비인 배치플랜트 2기, 사무소 건물 2동, 컨트롤 센터 1동으로 구성되어 있다. 본 평가분석에서는 상기 레미콘 업체의 5월(하절기)에 생산된 콘크리트에 대한 단위 m³당 발생하는 CO₂ 배출량을 평가하였다. 표 3은 콘크리트 배합표를 나타낸다.

표 3 콘크리트 배합표

W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					
		W	C	S	G	BS	AD
50	47	137	304	917	902	45	2

4.2 평가결과

그림 3에 의하면 평가대상 레미콘 업체의 CO₂ 배출량은 344.3kg-CO₂/m³로 산업연관분석 및 국가 LCI DB의 CO₂ 원단위와 유사한 평가 결과가 도출되었으며, 이에 본 연구에서 제안된 콘크리트 전과정 CO₂ 배출량 평가 프로그램을 이용하여 콘크리트 종류별 CO₂ 배출량 평가가 가능하며 이러한 콘크리트의 CO₂ 배출량 원단위 구축을 통해 향후 콘크리트 산업의 CO₂ 배출량 예측 및 절감을 위한 기초적 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

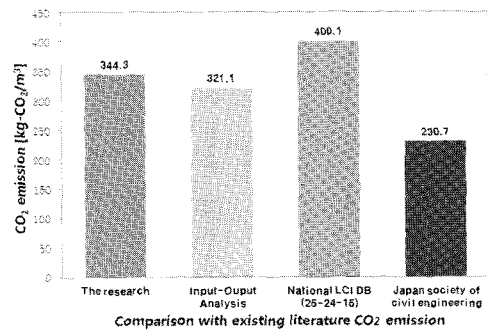


그림 3 콘크리트 전과정 CO₂ 평가 결과

참고 문헌

1. 신성우, 국내 친환경건축 방향', 2007년도 제1차 친환경건축물 성능평가와 설계기술, 2006.
2. Hironori Nagai, Takafumi Noguchi. Resource-flow Simulation in Concrete Related Industries by using "ecoMA", the International Conference(SB07 SEOUL), 2007.
3. 김태형, 태성호. 콘크리트 생산에 의한 CO₂ 배출량 평가 시스템 개발에 관한 연구, 한국콘크리트학회, 2010(12).

[담당 : 김명환, 편집위원]