콘크리트 CO₂ 저감을 고려한 혼화재 및 단위 결합재 양의 설계

양근혁^{1)*} · 문재흠²⁾

¹⁾경기대학교 플랜트건축공학과 ²⁾한국건설기술연구원 SOC성능연구소 인프라구조연구실

Design of Supplementary Cementitious Materials and Unit Content of Binder for Reducing CO₂ Emission of Concrete

Keun-Hyeok Yang^{1)*} and Jae-Heum Moon²⁾

¹⁾Dept. of Plant Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

²⁾SOC Research Institute, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

ABSTRACT The present study assessed the CO₂ emissions of concrete according to the type and replacement ratio of supplementary cementitious materials (SCM) and concrete compressive strength using a comprehensive database including 2464 cement concrete specimens and 776 cement concrete mixes with different SCMs. The system studied in CO₂ assessment of concrete based on Korean lifecycle inventory was from cradle to pre-construction, which includes consistent materials, transportation and production phases. As the performance efficiency indicators, binder and CO₂ intensities were analyzed, and simple equations to evaluate the amount of CO₂ emission of concrete were then formulated as a function of concrete compressive strength and the replacement ratio of each SCM. Hence, the proposed equations are expected to be practical and useful as a guideline to determine the type and replacement ratio of SCM and unit content of binder in concrete mix design that can satisfy the target compressive strength and CO₂ reduction percentage relative to cement concrete.

Keywords : CO₂, SCM, unit content of binder, compressive strength

1. 서 론

건설산업에서 가장 많이 이용되는 콘크리트의 핵심성분을 다루는 시멘트 산업은 국가 기간산업 중의 하나이다. 우리나라는 1919년도에 시멘트 공장의 설립과 함께 1970년대 이후 확장기를 거쳐 1990년대 후반에는 세계 5위권에 달하는 시멘트 생산국으로 도약하였다.¹⁾ 1998년도에는 연간 6000만 톤을 초과하는 생산능력을 보유하면서 2000년도 이후 연간 평균 시멘트 소비량은 5000만 톤에 달하고 있다. 이에 따라 국내 시멘트 산업은 이전의 성장기반을 발판으로 성숙기에 접어들었다고 평가되고 있다. 하지만 시멘트 산업은 온실가스를 포함한 환경영향 저감에 대한 강력한 정책적·사회적 요구의 증가와 함께 2000년도 이후 지속가능성을 기반으로 하는 중장기적 대책을 필요로 하고 있다.

시멘트 제조 시 발생하는 CO₂ 양은 우리나라 전체 CO₂

배출량의 약 6.5%에 해당하며, 콘크리트 제조 및 타설까지의 CO₂ 발생량을 고려하면 그 비율은 약 10%까지 증가한다.²⁾ 또한 일반적으로 시멘트 산업에서 배출되는 CO₂ 양은 전세계 배출량의 약 7%로 평가되고 있다.³⁾ 시멘트를 제조할 때 배출되는 CO₂ 배출은 일반적으로 석회석의 탈탄산 과정, 화석연료 연소, 분쇄 시 소모되는 전력 및 발전기 가동을 위한 기름 연소 등에 기인한다. 석회석의 탈탄산 과정에서 발생하는 CO₂는 시멘트 제조 시 배출량의 약 59%를 차지하며, 석회석의 소성 시 화석연료 연소로 인한 CO₂ 발생량은 약 31%를 차지한다. 이는 시멘트 산업이 막대한 에너지를 필요로 함을 또한 의미한다. 에너지 소비 절감과 온실가스 감축이라는 전 세계적인 화두 앞에서 시멘트 및 콘크리트 산업에서의 환경영향 개선은 우리나라 녹색성장을 위해서도 필연이다. 특히 우리나라의 전과정 평가(life cycle assessment, LCA)에 의한 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement, OPC)의 CO₂ 배출계수는 0.931 CO₂-kg/kg으로서, 세계 평균인 0.81 CO₂-kg/kg비해 약 1.15배 높다. 따라서 콘크리트 산업에서 CO₂ 절감대책은 매우 중요한 이슈임이 분명하다.

*Corresponding author E-mail: yangkh@kyonggi.ac.kr

Received May 15, 2012, Revised June 25, 2012,

Accepted July 5, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

시멘트 산업에서 CO₂ 저감을 위한 노력으로는 에너지 효율설비 확충, 대체연료 사용증대, 석회석과 같은 시멘트 혼합재의 비율증가, 에너지 저소비형 클링커 제조 및 고로슬래그와 같은 혼화재(supplementary cementitious material, SCM)들의 첨가 등을 들 수 있다.⁴⁾ 이들 노력 중 고로슬래그(ground granulated blast-furnace slag, GGBS)나 플라이애쉬(fly ash, FA)와 같은 산업부산물을 활용한 혼합시멘트의 사용은 일반적으로 현장에서 쉽게 접근할 수 있는 방법이다. 더구나 GGBS나 FA의 사용은 천연자원 보존 및 산업부산물의 재활용이라는 부가적인 효과도 기대할 수 있다. 따라서 산업부산물을 이용한 혼화재의 첨가가 OPC 콘크리트에서의 CO₂ 배출량 저감에 미치는 영향을 정량적으로 쉽게 평가할 수 있는 기술의 마련은 환경배려형 콘크리트 배합을 위해 매우 중요하게 고려될 사항이다. 이는 또한 콘크리트 배합에서 CO₂ 저감을 위한 혼화재를 포함한 결합재의 설계 및 단위 결합재 양을 결정하는데 중요하게 이용될 수 있다.

이 연구의 목적은 콘크리트 배합에서 CO₂ 배출량을 비교적 쉽게 예측하고, 이를 바탕으로 목표 압축강도와 CO₂ 배출 저감량에 대한 혼화재의 첨가 및 단위 결합재 양을 결정할 수 있는 방법을 제시하는 것이다. 콘크리트 CO₂ 배출량의 평가는 국가 전과정 목록(life cycle inventory, LCI) 데이터베이스⁵⁾에 기반하여 각 구성재료의 생산과 레미콘 공장까지의 운송, 그리고 콘크리트의 생산과 현장까지의 운송 등을 고려하였다. 결합재의 환경영향을 분석하기 위한 지표로서 Damineli 등⁶⁾에 의해 제시된 콘크리트 단위 압축강도(1 MPa) 발현을 위한 결합재 양과 그때의 CO₂ 배출량을 나타내는 결합재 지수 및 CO₂ 지수를 이용하였다. 궁극적으로 결합재 지수와 CO₂ 지수의 상관관계 모델에서 혼화재의 종류와 치환율의 영향을 고려함으로써 혼합 시멘트 콘크리트의 CO₂ 저감률을 확인하였다.

2. CO₂ 평가 절차

전과정 평가는 크게 3단계로 구분된다.⁷⁾ 첫 번째 단계에서 기능 단위와 시스템 경계가 정의된다. 두 번째 단계에서는 에너지의 정의와 사용량, 재료 소비 및 폐기물 양과 CO₂ 배출량 등을 포함하는 원단위 데이터가 구축되고, 세 번째 단계에서는 이들 데이터를 이용하여 요구 조건에 대한 환경영향을 평가한다.

2.1 기능단위 및 시스템 경계

콘크리트 구조물의 전과정 평가 시스템은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 구성재료들의 생산 및 운반, 콘크리트 생산 및 운반, 구조물의 시공, 사용연한 및 폐기 등으로 구성될 수 있다.⁸⁾ 따라서 전과정 평가에 의한 콘크리트의 CO₂ 배출량은 Fig. 1에 나타난 모든 요소들을 고려해야 하지만 콘크리트의 타설, 사용연한 및 폐기의 과정에서 배출되는 CO₂ 양에 대한 원단위의 평가는 구조물의

Fig. 1 Schematic identification of concrete lifecycle

기능 및 규모에 따라 달라지므로 이에 대한 데이터의 구축은 매우 어렵다. 또한 콘크리트 구조물의 사용연한 동안 탄산화를 통해 흡수되는 CO₂ 양도 고려될 필요가 있지만 공기에 노출된 콘크리트 면적 및 CO₂ 농도 등의 평가가 필요하므로 무시하였다. 즉 이 연구에서 고려된 시스템은 요람에서부터 현장에서의 타설 직전까지의 단계로서 구성재료, 운반, 콘크리트 생산 등에서 배출되는 CO₂ 양을 포함하였다. 이 연구에서 고려된 시스템은 구조물의 사용연한을 고려하지 않기 때문에 내구성도 포함하지 않는다. 더구나 콘크리트는 일반적으로 1 m³ 단위로 주문과 생산이 이루어진다. 따라서 이 CO₂ 평가에서 고려된 콘크리트의 기능단위는 1 m³이다.

콘크리트의 기능단위에 대한 각 재료의 출구에서부터 콘크리트 시공 전 단계까지의 시스템에서 배출된 전체 CO₂ 양(C_d)은 다음에 의해 산정될 수 있다.

$$C_d = CO_{2-M} + CO_{2-T} + CO_{2-P} \quad (1)$$

여기서, CO_{2-M} 은 시멘트, 각 혼화재, 골재, 물 및 혼화제(감수제)를 포함하는 재료단계에서의 CO₂ 배출량이며, CO_{2-T} 은 각 재료 및 생산된 콘크리트의 운반단계에서의 CO₂ 배출량이며, CO_{2-P} 은 공장에서 콘크리트 배합을 위해 소비되는 전력으로부터 산정된 생산단계에서의 CO₂ 배출량이다. 재료단계인 CO_{2-M} 은 다음 식에 의해 산정된다.

$$CO_{2-M} = \sum_{i=1}^n (W_i \times CO_{2(i)-LCI}) \quad (2)$$

여기서, i 는 콘크리트 생산을 위해 이용된 각 재료들이며, n 은 이들 재료들의 수이며, W_i 와 $CO_{2(i)-LCI}$ 는 각각 재료 i 의 단위질량(kg/m³)과 CO₂ 배출계수(CO₂-kg/kg)이다. 운반 단계에서의 CO₂ 배출량인 CO_{2-T} 은 다음과 같이 산정된다.

$$CO_{2-T} = \sum_{i=1}^n (W_i \times D_i \times CO_{2(i)-LCI(TR)}) + D_B \times CO_{2-LCI(TR-con)} \quad (3)$$

여기서, D_i 는 재료 i 의 출구에서 레미콘 공장까지의 운반 거리(km)이며, $CO_{2(i)-LCI(TR)}$ 은 운반수단의 CO_2 배출계수(CO_2 -kg/km·kg)이며, D_B 는 콘크리트의 공장에서 현장까지의 운반거리(km)이며, $CO_{2(i)-LCI(TR-con)}$ 은 레미콘 차량의 CO_2 배출계수(CO_2 -kg/km·kg)이다. 운반단계에서의 CO_2 배출량을 산정하기 위하여 레미콘 공장의 위치는 서울 방배동으로 가정하였다. 시멘트는 전남 담양, 굵은골재와 잔골재는 경기도 광주와 인천, FA는 경남 하동, GGBS는 전남 광양, 실리카 폼(silica fume, SF)은 인천, 혼화제는 평택에서 운송됨을 가정하였다. 물은 상수도를 통해 조달되므로 운송수단을 통한 평가는 무시하였다.

2.2 LCI 데이터베이스

LCI 데이터는 기온, 에너지원 및 천연자원의 차이에 따라 각 나라에 따라 상이하므로, 자국에서 제공되는 원단위를 이용하는 것이 가장 바람직하다. 우리나라는 국토해양부, 환경부와 지식경제부에서 물질 및 부품제조, 가공공정, 수송, 사용 및 폐기활동 등에 대하여 약 400여개의 LCI 데이터베이스를 구축하고 있다. 이 중 건설활동에 관련된 데이터는 약 60여 개로서 일본(약 130여개) 등의 선진국에 비해 적은 상황이다. 이 연구에서 고려된 Fig. 1의 시스템에서 각 재료 및 운반에 대한 LCI는 기본적으로 국내 데이터⁵⁾를 이용하였다. 콘크리트 생산단계에서의 CO_2 배출량인 CO_{2-P} 는 플랜트 가동을 위해 소비되는 전력, 유류, 가스 양 등으로부터 평가될 수 있으며, 계절에 따라 다소 변동이 있다. 콘크리트 플랜트의 CO_2 배출계수에 대한 국내 LCI 데이터베이스는 아직 마련되지 않았기 때문에 이 연구에서는 일본토목학회⁹⁾에서 제시하는 데이터목록을 이용하였다. 재료 중에서도 FA와 GGBS는 일본토목학회⁹⁾의 자료를 이용하였으며, SF는 CEN¹⁰⁾ 자료를 이용하였다.

2.3 콘크리트 배합에 대한 데이터베이스

혼화제가 콘크리트의 CO_2 배출량에 미치는 영향을 평가하기 위하여 국내 논문집(대한건축학회, 한국콘크리트학회 및 한국건축시공학회 등) 및 레미콘사를 중심으로 콘크리트 배합 및 28일 압축강도에 대한 데이터베이스를 구축하였다. 실험 데이터베이스는 모두 3240개의 배합을 포함하고 있는데, 이 중 결합재로서 OPC는 2464 배합, OPC+FA는 481 배합, OPC+GGBS는 92 배합, OPC+FA+GGBS는 23 배합, OPC+SF는 131 배합, OPC+FA+SF는 46 배합, 기타 3 배합이다(Fig. 2). 재령 28일 압축강도의 범위는 OPC 콘크리트의 경우 7.7~147 MPa이며, OPC+SCM 콘크리트의 경우에는 13.3~125 MPa이다. 물-결합재의 범위는 OPC 콘크리트의 경우 15~88%이며, OPC+SCM 콘크리트의 경우에는 15~63%이다. 단위 결합재 양의 범위는 OPC 콘크리트의 경우 150~1067 kg/m³이며, OPC+SCM 콘크리트의 경우에는 234~1067 kg/m³이다. 플

(a) Concrete compressive strength at 28 days

(b) Unit content of binder

(c) Replacement ratio of FA

(d) Replacement ratio of GGBS

(e) Replacement ratio of SF

Fig. 2 Distribution of main parameters in the database

라이애쉬, 고로슬래그, 실리카폼의 최대 치환율은 각각 70%, 69% 및 30%이었다.

2.4 CO₂ 평가 예

압축강도(f_{ck})가 40 MPa일 때 FA와 GGBS가 치환된 OPC 콘크리트에서 CO₂ 평가 예를 Table 1에 나타내었다. 콘크리트 기능단위는 1 m³이다. Table에서 A열은 콘크리트 배합에 관련된 정보로서 각 재료 및 콘크리트의 단위질량이며, D열은 각 재료 및 콘크리트의 운반거리이다. A열에 각 재료 및 콘크리트 플랜트에서의 CO₂ 배출계수인 B열을 곱하면 재료 및 생산단계에서의 CO₂ 배출량을 얻을 수 있다. 한편, 운반단계에서의 CO₂ 배출량은 식 (3)에 따라 A열, D열 및 E열을 곱하면 얻을 수 있다. 따라서 Table 1로부터 콘크리트 기능단위에 대한 재료, 생산 및 운반단계에서 배출된 CO₂ 양은 402.09 kg이며, 이 중 OPC에 의한 CO₂ 양은 336.1 kg이다. 즉, OPC 재료에 의한 CO₂ 배출량은 전체 배출량의 약 83.6%이다. 한편, 운반과정에서 배출된 CO₂ 양은 31.57 kg으로서 전체 배출량의 7.8%이다.

3. 콘크리트 CO₂ 양에 대한 결합재 영향

Table 1에서 나타난 바와 같이 OPC 재료에 의한 CO₂ 배출량은 콘크리트 전체 배출량에서 가장 큰 비율을 차지하므로 OPC가 최소 사용된 결합재의 설계는 환경영

향의 최소 측면에서 매우 중요하다. 이에 따라 Damineli 등⁶⁾은 콘크리트의 환경에 대한 효율성은 소요 압축강도 및 내구연한에 대한 전체 결합재 소비측면에서 정의될 필요가 있음을 제시하였다. 일반적으로 콘크리트는 물-결합재비가 감소함에 따라 압축강도가 증가하므로, 높은 압축강도 발현을 위해서는 많은 양의 결합재가 소비된다. 한편, 콘크리트의 압축강도 증가는 구조부재의 단면크기를 줄일 수 있으므로 콘크리트 양의 감소에 의한 CO₂ 저감효과를 기대할 수 있다. 따라서 단위 압축강도(1 MPa)의 발현을 위한 결합재 양 및 이에 따른 CO₂ 양이 평가될 필요가 있다. 이 연구에서는 Damineli 등⁶⁾이 제시한 결합재 지수(B_i)와 CO₂ 지수(C_i)를 이용하여 결합재의 환경성능을 평가하였다.

$$B_i = B/f_{ck} \quad (4)$$

$$C_i = C_d/f_{ck} \quad (5)$$

여기서 B 는 콘크리트 기능단위에 대한 결합재 양(kg/m³)이다.

3.1 결합재 지수(B_i)

콘크리트의 압축강도(f_{ck})에 따른 결합재 지수(B_i)를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 데이터 수가 너무 많아 각 결합재의 구별이 쉽지 않으므로 회귀분석으로부터 얻은 추

Table 1 Example for CO₂ assessment of concrete ($f_{ck} = 40$ MPa)

Functional unit (FU): m ³	Material			Transportation		
	A	B	A·B	D	E	A·D·E
Item	$\frac{\text{kg}}{\text{FU}}$	$\frac{\text{CO}_2 - \text{kg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{CO}_2 - \text{kg}}{\text{FU}}$	km	$\frac{\text{CO}_2 - \text{kg}}{\text{kg} \cdot \text{km}}$	$\frac{\text{CO}_2 - \text{kg}}{\text{FU}}$
OPC ⁽¹⁾	361	0.931	336.1	277	5.1810^{-5}	5.18
GGBS ⁽¹⁾	68	0.0265 ⁽³⁾	1.802	339	5.1810^{-5}	1.19
FA ⁽¹⁾	23	0.0196 ⁽³⁾	0.451	322	5.1810^{-5}	0.38
Sand ⁽¹⁾	805	0.0026	2.093	47	6.310^{-5}	2.38
Coarse ⁽¹⁾	918	0.0075	6.885	37.6	6.310^{-5}	2.17
Water ⁽²⁾	163	1.9610^{-4}	0.032	-	-	-
Admixture	3.1	0.25 ⁽³⁾	0.775	70.6	2.2110^{-4}	0.05
	Sum		351.94	-		
Concrete production ⁽⁴⁾	2341	0.00768	17.98	30	$\frac{0.674}{\text{m}^3 \cdot \text{km}}$	D·E = 20.22
				Sum		31.57

Total = 402.09 CO₂ - kg/FU (= 351.94 + 17.98 + 31.57 CO₂ - kg)

1) All of the cementitious materials are assumed to be transported by a 23 ton capacity hydraulic truck, while aggregates are transported by a 15 ton capacity dump truck.

2) Water drawn from Han-river is used for concrete mix.

3) LCI data given in JSCE are referenced wherever Korean LCI database is unavailable.

4) The fresh concrete produced from the plant is transported to a building site by a 6 m³ capacity transit-mix truck.

Fig. 3 f_{ck} versus B_i

Fig. 5 f_{ck} versus C_i

Fig. 4 Best-fit curves determined from B_i data of Fig. 2

Fig. 6 Best-fit curves determined from C_i data of Fig. 5

세선을 Fig. 4에 나타내었다. 실리카 폼이 치환된 콘크리트의 실험 데이터 수가 많지 않아 추세선의 상관계수(R^2) 값이 낮게 나타났다. 결합재 지수는 혼화재의 치환에 관계없이 f_{ck} 의 증가와 함께 감소하였다. 이는 압축강도가 증가함에 따라 단위 압축강도 (1 MPa) 발현을 위한 결합재 양이 감소됨을 의미한다. 결합재 지수의 감소속도는 f_{ck} 가 약 60 MPa 이상에서 점차 완화되면서 혼화재 치환에 관계없이 B_i 의 값은 $5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$ 에 수렴하는 경향을 보였다. 고로슬래그가 치환된 콘크리트의 B_i 값은 혼화재가 치환되지 않은 OPC 콘크리트와 매우 비슷한 값을 보였다. 실리카 폼이 치환된 콘크리트의 B_i 값은 f_{ck} 가 약 40 MPa 이하에서 OPC 콘크리트보다 낮게 있었다. 반면 플라이애쉬가 치환된 콘크리트의 B_i 값은 동일 압축강도의 OPC 콘크리트보다 다소 높았는데, 이는 FA가 치환된 콘크리트에서는 결합재 양이 OPC 콘크리트보다 다소 증가하고 있음을 의미한다.

3.2 CO₂ 지수(C_i)

콘크리트의 압축강도(f_{ck})에 따른 CO₂ 지수(C_i)를 Fig. 5에 나타내었으며, 회귀분석으로부터 얻은 추세선의 비교는 Fig. 6에 나타내었다. 콘크리트의 C_i 값은 B_i 에서와 같

이 혼화재 치환에 관계없이 f_{ck} 가 증가함에 따라 감소하였다. 감소기울기는 f_{ck} 가 60 MPa 이상에서 다소 완만하였으며 OPC 콘크리트의 경우 약 $5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$ 에 수렴하였다. 동일 f_{ck} 에서는 OPC의 C_i 값이 가장 높았으며, 플라이애쉬와 고로슬래그가 치환된 콘크리트의 C_i 값이 가장 낮았다. 이는 콘크리트 단위 압축강도(1 MPa)를 발현시킬 때 배출되는 CO₂ 양은 OPC+FA+GGBS 결합재가 가장 작게 있음을 의미한다. OPC+FA+GGBS 콘크리트의 C_i 값은 OPC 콘크리트에 비해 f_{ck} 가 20 MPa일 때 약 40% 감소하며, f_{ck} 가 100 MPa일 때 약 50% 감소하였다. 한편, 플라이애쉬나 실리카 폼을 치환한 콘크리트의 C_i 값은 OPC 콘크리트에 비해 낮았는데, 그 저감율은 약 12% 이내였다.

3.3 CO₂ 지수(C_i)에 대한 혼화재 치환율의 영향

일반강도($f_{ck} = 23 \sim 30 \text{ MPa}$) 및 고강도($f_{ck} = 60 \sim 70 \text{ MPa}$) 콘크리트 범주에서 각 혼화재의 치환율이 C_i 값에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 일반적으로 혼화재의 치환율이 증가할수록 콘크리트의 C_i 값은 감소하였는데, 실험 결과들의 추세선으로부터 결정된 그 감소기울기는 콘크리트 강도에 의한 영향이 매우 미미하였다. 또한 추세선의 감소기울기는 혼화재 치환율이 약 30% 이상에서 다소

Fig. 7 Effect of replacement level of SCM on C_i

완만하여지는데, 이는 혼화재 치환율이 증가할수록 단위 시멘트 양의 증가와 함께 콘크리트 CO_2 배출량 저감율이 다소 둔화됨을 의미한다. 동일 혼화재 치환율에서는 OPC+FA 콘크리트가 OPC+GGBS 콘크리트에 비해 높은 C_i 값을 보였으며, 치환율이 25% 이하일 때 OPC+SF 콘크리트의 C_i 값이 가장 낮은 경향을 보였다. 따라서 OPC 콘크리트의 CO_2 저감을 위해서는 혼화재로서 FA보다는 GGBS와 SF가 더 효율적이라고 판단된다.

3.4 결합재 지수(B_i)와 CO_2 지수(C_i)의 관계

OPC 콘크리트의 CO_2 배출량은 콘크리트 압축강도 및 이에 따른 단위 결합재 양과 혼화재 치환율에 의해 영향을 받았다. 이를 고려하여 콘크리트의 CO_2 지수를 간단하게 예측하기 위한 모델에서 결합재 지수 및 각 혼화재의 치환율의 영향을 주요 변수로 비선형 회귀분석을 수행하였다. 혼화재가 치환되지 않았을 경우에는 단순히 C_i 에 대한 B_i 만의 영향을 고려하였으며, 각 혼화재 치환율의 영향은 Fig. 7의 분석 결과를 참고로 개별적으로 적용하였다. 또한 결합재가 0이면 CO_2 발생량도 0이다. 이와 같은 경계조건을 고려하여 C_i 와 B_i 의 관계는 다음 식과 같이 모델링하였다.

$$C_i = A_1[1 - (R_F^{B_1} + R_G^{C_1} + R_S^{D_1})]B_i \quad (6)$$

여기서, R_F , R_G , R_S 는 각각 FA, GGBS 및 SF의 치환비이다. 식 (6)에서 A_1 , B_1 , C_1 및 D_1 은 실험상수로서 실험 결과의 회귀분석으로부터 각각 1.1, 1.15, 1.1 및 0.95로 결정될 수 있었다(Fig. 8). 결국, 식 (4)와 (5)에 나타난 B_i 와 C_i 의 정의로부터 콘크리트의 단위용적(1 m^3)당 CO_2 배출량(C_d)은 다음 식 (7)에 의해 간편하게 평가될 수 있다.

$$C_d = 1.1[1 - (R_F^{1.15} + R_G^{1.1} + R_S^{0.95})]B \quad (\text{CO}_2\text{-kg/m}^3) \quad (7)$$

혼화재가 치환되지 않은 콘크리트의 CO_2 배출량은 단

순히 1.1B에 의해 산정될 수 있으므로, (7)에서 $(R_F^{1.15} + R_G^{1.1} + R_S^{0.95})$ 는 OPC 콘크리트에서 결합재 양이 동일할 때 혼화재의 치환에 따른 CO_2 감소율을 나타낸다.

3.5 단위 결합재 양 (B)의 결정

Fig. 4에 나타내었듯이 콘크리트의 단위 결합재 양은 압축강도에 반비례(OPC 콘크리트의 경우 -0.57승)하며, 동일 압축강도에서는 혼화재의 첨가에 의해 영향을 받는다. 즉, 동일 압축강도의 OPC 콘크리트 단위 결합재 양에 비해 OPC+FA 콘크리트는 1.05~1.16배 많은 양을, OPC+GGBS 콘크리트는 0.98~1.03배로서 상당히 비슷한 양을, OPC+SF 콘크리트에서는 0.79~0.94배로서 낮은 경향을 보였다. 식 (6)에서와 같이 각 혼화재 치환율의 영향을 개별적으로 적용하면 압축강도(단위 = MPa)와 혼화재 치환율의 영향을 고려한 B_i 는 다음과 같이 선형적으로 모델링될 수 있다.

$$B_i = A_2(f_{ck})^{P_1}[1 + (R_F^{B_2} + R_G^{C_2} - R_S^{D_2})] \quad (8)$$

여기서, 실험상수인 A_2 , P_1 , B_2 , C_2 및 D_2 는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 실험 결과들의 회귀분석으로부터 각각 82, -0.55, 1.7, 3.0, 3.0으로 각각 결정될 수 있었다. Fig. 9에 나타난 추세선과 실험 결과의 상관계수(R^2)가 Fig. 8에 비해 다소 낮은 이유는 콘크리트의 배합설계 시 단위 결합재 양(또는 단위 수량)을 주로 연구자의 경험에 의해 결정하기 때문이다. 하지만 식 (8)로부터 소요 압축강도에 대한 B_i 를 비교적 단순하게 예측할 수 있으며, 식 (4)를 적용하면 콘크리트 단위 결합재 양(B)을 혼화재 치환율을 고려하면서 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$B = 82(f_{ck})^{0.45}[1 + (R_F^{1.7} + R_G^3 - R_S^3)] \quad (\text{kg/m}^3) \quad (9)$$

4. 콘크리트 CO_2 저감을 위한 혼화재 설계

콘크리트의 CO_2 배출량에 대해 OPC 재료가 차지하는

Fig. 8 Regression analysis for relationship between C_i and B_i

Fig. 9 Regression analysis for determination of B_i

(a) Combination of different SCMs

(b) Combination of FA and GGBS

Fig. 10 Examples for SCM design chart ($f_{ck} = 30 \text{ MPa}$)

비율은 80%가 넘는다. 따라서 목표 압축강도를 만족시키면서 CO_2 저감을 위한 콘크리트 배합을 위해서는 적절한 혼화재의 선택 및 치환율이 중요하다. 식 (9)에서 목표강도에 대하여 혼화재와 치환율을 선택하여 단위 결합

재 양을 결정하고 이를 식 (7)에 대입하면 콘크리트에서 CO_2 배출량 및 혼화재 사용에 따른 OPC 콘크리트 대비 CO_2 저감율을 평가할 수 있다. 혼화재로서 FA, GGBS 및 SF의 치환율에 따른 콘크리트 CO_2 저감율을 Fig. 9에 나타내었다. 플라이애쉬만을 이용하여 치환하였을 때가 GGBS 및 SF의 치환에 비해 CO_2 저감율이 낮았으며, SF만을 이용하여 치환하였을 때가 CO_2 저감에 가장 유리하였다. Igcc(international green construction code)¹¹⁾에서는 건축물에서 전과정 평가에 의한 CO_2 저감율을 동일 규모의 기준 건축물 대비 20% 이상을 요구하고 있다. OPC 콘크리트 대비 CO_2 저감율을 20% 이상 달성하기 위해서는 FA만을 혼화재로 이용하는 경우 그 치환율은 약 45% 이상, 15%의 GGBS를 함께 치환하는 경우의 FA 치환율은 약 15% 이상이 요구된다(Fig. 10(a)).

보통강도 콘크리트에서는 경제성 및 산업부산물 재활용 측면에서 SF보다는 FA와 GGBS가 주로 혼화재로 이용된다. FA와 GGBS가 치환된 콘크리트에서 OPC 콘크리트 대비 CO_2 저감율을 Fig. 10(b)에 나타내었다. OPC 콘크리트 대비 CO_2 저감율을 20% 이상 달성하기 위해서는 GGBS 30% 이상, GGBS 20%와 FA 10% 이상, 또는 GGBS 10%와 FA 25% 이상의 치환이 요구된다. 이와 같이 식 (7)과 (9) 또는 Fig. 10과 같은 설계차트를 이용하여 콘크리트 배합에서 목표 압축강도 및 목표 CO_2 저감율을 만족시키기 위한 단위 결합재 양과 함께 혼화재의 선택과 그 치환율을 간략히 결정할 수 있다.

5. 결 론

콘크리트 환경설계에 중요하게 이용될 수 있는 CO_2 저감에 기반한 혼화재의 설계를 위하여 결합재 지수와 CO_2 지수 개념을 이용하였다. 3240개의 실험 데이터들에 대한 회귀분석으로부터 콘크리트의 결합재 지수와 CO_2 지수의 평가식을 제시하였으며, 이를 이용하여 목표 압축강도와 CO_2 저감율을 만족시킬 수 있는 단위 결합재 양 및 각 혼화재(플라이애쉬, 고로슬래그 및 실리카 폼 등)의 치환율을 비교적 간단하게 결정할 수 있다. 비록 제안된 모델에서 콘크리트 CO_2 평가 시스템은 건축물의 사용연한 및 폐기를 고려하고 있지 않으며, 운반에 의한 CO_2 배출량도 콘크리트 공장 및 재료공급자 위치에 따라 약간 변동이 있을 수 있다. 하지만 운반거리의 변동에 의한 CO_2 배출량의 차이는 매우 미미하며, 콘크리트 CO_2 배출량의 80% 이상이 시멘트에 기인하고 있다. 따라서 CO_2 저감을 위한 콘크리트 혼화재 설계에 대한 제안모델은 연구 및 레미콘 공장 등의 실용적 측면에서 중요하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

CO_2 저감 기반 콘크리트 배합설계를 위한 기초자료 분석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 결합재 지수는 혼화재의 치환에 관계없이 콘크리트 압축강도의 증가와 함께 감소하면서 $5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$ 에 수렴하는 경향을 보였다.

- 2) CO₂ 지수도 콘크리트 압축강도 증가와 함께 감소하였다. 동일 혼화재 치환율에서는 플라이애쉬 치환이 고로슬래그 치환보다 높은 CO₂ 지수 값을 나타내었다.
- 3) CO₂ 지수와 결합재 지수는 각 혼화재들의 치환율을 변수로 선형관계로서 모델링될 수 있었다. 또한 결합재 지수도 콘크리트 압축강도 및 각 혼화재들의 치환율을 변수로 선형관계로 제시될 수 있었다.
- 4) 콘크리트의 CO₂ 배출량 저감을 위한 혼화재로서 효율성은 실리카 폼, 고로슬래그, 플라이애쉬 순으로 나타났다. 시멘트 콘크리트 대비 CO₂ 저감율을 20% 이상 달성하기 위해서는 고로슬래그 30% 이상, 고로슬래그 20%와 플라이애쉬 10% 이상, 또는 고로슬래그 10%와 플라이애쉬 25% 이상의 치환이 요구되었다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부 R&D정책인프라사업의 연구비 지원(과제번호: 11기술표준화10-1)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Korea Concrete Institute, *Concrete and Environment*, Kimondang Publishing Co., Seoul, 2011, pp. 1-15.
2. Korea Concrete Institute, *Concrete and Environment*, Kimondang Publishing Co., Seoul, 2011, pp. 16-30.

3. Ali, M. B., Saidur, R., and Hossain, M., S., "A Review on Emission Analysis in Cement Industries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 5, 2011, pp. 2252-2261.
4. Gartner, E., "Industrially Interesting Approaches to 'Low-CO₂' Cements," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 9, 2004, pp. 1489-1498.
5. Korea LCI Database Information Network, <http://www.edp.or.kr/lcidb>.
6. Damineli, B. L., Kemeid, F. M., Aguiar, P. S., and John, V. M., "Measuring the Eco-Efficiency of Cement Use," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, No. 8, 2010, pp. 555-562.
7. ISO, *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*, ISO 14040, International Standardisation Organisation (ISO), 2006.
8. Kim, T. H. and Tae, S. H., "A Study on the Development of an Evaluation System of CO₂ Emission in the Production of Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 6, 2010, pp. 787-796.
9. Sakai, K. and Kawai, K., "JSCE Guidelines for Concrete No. 7: Recommendation of Environmental Performance Verification for Concrete Structures," *Japan Society of Civil Engineering*, 2006, 29 pp.
10. CEN, European Committee for Standardization, *NF EN 197-1. Cement-Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements*, 2001.
11. IGCC Public Comment Hearing Committee, *International Green Construction Code*, International Code Council, INC., USA, 2010.

요 약 이 연구에서는 2464개의 시멘트 콘크리트 배합과 776개의 혼화재가 치환된 혼합 시멘트 콘크리트 배합을 포함하는 실험 데이터베이스를 이용하여 콘크리트 압축강도 및 혼화재 치환율에 따른 콘크리트 CO₂ 배출량을 평가하였다. 국내 생애주기 데이터 목록에 기반한 콘크리트 CO₂ 평가에서 고려된 시스템은 요람에서 현장 콘크리트 타설 전까지로서 구성재료, 운반 및 생산단계를 포함하고 있다. 콘크리트의 성능 효율성 지표로서 결합재 지수와 CO₂ 지수가 분석되었으며, 콘크리트 CO₂ 배출량을 평가하기 위한 단순 식이 각 혼화재의 치환비 및 콘크리트 압축강도의 함수로서 제시되었다. 따라서 이 제안된 모델은 목표 압축강도 및 목표 시멘트 콘크리트 대비 CO₂ 배출 저감율을 만족하는 콘크리트 배합설계를 위하여 단위 결합재 양 및 혼화재 종류와 치환비를 결정하는 데 가이드 라인으로서 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : CO₂, 혼화재, 단위 결합재 양, 압축강도