



혼화재 종류 및 치환율을 고려한 저탄소 콘크리트 배합설계 모델

정연백¹⁾ · 양근혁^{2)*}

¹⁾경기대학교 일반대학원 건축공학과 ²⁾경기대학교 플랜트·건축공학과

Mixture-Proportioning Model for Low-CO₂ Concrete Considering the Type and Addition Level of Supplementary Cementitious Materials

Yeon-Back Jung¹⁾ and Keun-Hyeok Yang^{2)*}

¹⁾Department of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Seoul, 120-702, Korea

²⁾Department of Plant-Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 443-760, Korea

ABSTRACT The objective of this study is to establish a rational mixture-proportioning procedure for low-CO₂ concrete using supplementary cementitious materials (SCMs) achieving the targeted CO₂ reduction ratio as well as the conventional requirements such as initial slump, air content, and 28-day compressive strength of concrete. To evaluate the effect of SCM level on the CO₂ emission and compressive strength of concrete, a total of 12537 data sets were compiled from the available literature and ready-mixed concrete plants. The amount of CO₂ emission of concrete was assessed under the system boundary from cradle to concrete production stage at a ready-mixed concrete plant. Based on regression analysis using the established database, simple equations were proposed to determine the mixture proportions of concrete such as the type and level of SCMs, water-to-binder ratio, and fine aggregate-to-total aggregate ratio. Furthermore, the CO₂ emissions for a given concrete mixture can be straightforwardly calculated using the proposed equations. Overall, the developed mixture-proportioning procedure is practically useful for determining the initial mixture proportions of low-CO₂ concrete in the ready-mixed concrete field.

Keywords : low CO₂ concrete, supplementary cementitious materials, mixture-proportioning procedure

1. 서 론

천연자원 보존 및 이산화탄소(CO₂) 배출저감 측면에서 보통 포트랜드 시멘트(ordinary Portland cement, OPC)의 사용량을 감소시키기 위한 다양한 노력들이 이루어지고 있다¹⁾. 국내의 시멘트 산업에서도 CO₂ 배출 저감을 위하여 시멘트 제조 시 석회석과 같은 시멘트 혼합재의 비율 증가, 에너지 효율설비 확충 및 에너지 저소비형 클링커 제조 등에 대한 기술개발이 시도되고 있다. 특히 콘크리트 산업에서는 비교적 간편한 현장적용성을 고려하여 저탄소 콘크리트 측면에서 고로슬래그(ground granulated blast-furnace slag, GGBS)나 플라이애시(fly ash, FA)와 같은 산업부산물을 이용한 혼합시멘트의 사용을 점차 확대시키고 있다.

콘크리트 혼화재(supplementary cementitious materials,

SCMs)로서 GGBS, FA 및 실리카 흙(silica fume, SF)을 활용한 OPC 치환은 콘크리트 생산 시 CO₂ 배출량의 저감뿐만 아니라 산업부산물의 재활용 및 천연자원 보존의 긍정적 환경영향도 기대할 수 있다. 이에 따라 콘크리트 산업에서는 콘크리트의 품질에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 OPC 사용량을 최소화 하면서 SCM 치환율을 점차 증가시키고 있다^{2,3)}. 하지만 OPC 콘크리트에서 SCM의 치환에 따른 강도의 변화와 함께 CO₂ 저감을 쉽게 평가할 수 있는 자료는 매우 제한적이다⁴⁾. Flower and Sanjayan⁵⁾은 콘크리트 배합에서 GGBS와 FA를 사용하면 각각 22% 및 13~15%정도 CO₂ 발생량을 줄일 수 있다고 제시하였으며, Feiz et al.⁶⁾은 CEM I (95% clinker)를 생산할 때 GGBS를 80% 치환하면 66% CO₂ 저감의 효과가 있는 것으로 평가하였다. 하지만 환경친화형 콘크리트 배합을 위해서는 GGBS, FA 및 SF과 같은 산업부산물을 활용한 SCM의 첨가 시 CO₂ 배출량 저감과 함께 콘크리트의 목표 슬럼프와 압축강도를 함께 고려해야 한다. 하지만 목표 CO₂ 저감, 압축강도 및 슬럼프에 대한 저탄소 콘크리트 배합에 대한 자료는 매우 미흡한 실정이다.

본 연구의 목적은 다양한 SCM을 사용한 콘크리트 배

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

Received March 2, 2015, Revised April 6, 2015,

Accepted May 11, 2015

©2015 by Korea Concrete Institute

합에서 목표성능(압축강도, 슬럼프, 공기량 및 CO₂ 저감율)에 대한 콘크리트 시험배합을 결정하기 위한 절차를 제시하는 것이다. 콘크리트 배합단계에서의 CO₂ 배출량 평가를 위해 선택한 시스템 경계는 ISO 13315-2⁷⁾에 따라 원료채취에서부터 레미콘 공장에서의 콘크리트 생산까지이다. 혼화재 치환이 콘크리트 압축강도 및 CO₂ 배출량 저감에 미치는 영향을 파악하기 위하여 5,231개의 실내배합과 7,306개의 레미콘 배합을 분석하였다. 기존 배합들에서 평가된 CO₂ 배출량을 기반으로 콘크리트 목표성능에 대해 SCM 치환율을 결정할 수 있는 식을 제안하였다.

2. CO₂ 평가 절차

2.1 시스템 경계

콘크리트 생산단계에서의 CO₂ 평가를 위한 시스템 경계는 ISO 13315-2⁷⁾의 절차를 고려하여 원재료 채취 및 가공에서부터 콘크리트 생산단계까지로 설정하였다(Fig. 1). 혼화재 치환이 콘크리트 CO₂ 저감에 미치는 영향은 구조물 시공, 사용 중 또는 해체단계에서는 매우 미미하며 장비 및 에너지 소비에 따른 CO₂ 발생량은 SCM의 치환과 무관하기 때문에 이는 무시하였다.^{8,9)}

시간적 경계는 1990~2012년으로, 지역적 경계는 서울로 가정하였으며 일반적으로 콘크리트는 1 m³ 단위로 주문과 생산이 이루어지므로 콘크리트 배합단계에서 CO₂ 평가를 위한 기능단위는 1 m³로 설정하였다.

2.2 LCI 데이터베이스

콘크리트의 CO₂ 평가를 수행하기 위한 전과정 목록(lifecycle inventory, LCI) 데이터는 콘크리트 구성재료들의 생산, 콘크리트 생산 단계에서 수반되는 각 활동들에서 필요한 입력요소와 배출요소들을 포함해야 한다. 콘크리트 구성재료 및 운송, 생산 활동에서 수집된 목록 데이터는 기온, 에너지원 및 천연자원의 차이에 따라 각 나라에 따라 상이하므로, 자국에서 제공되는 데이터를 이용하는 것이 바람직하다. 우리나라에서 제공되고 있는 콘크리트 구성재료 및 운반단계에서의 LCI 데이터 베이스를 Table 1에 요약하여 나타내었다. 콘크리트 구성재료

들 중 시멘트계 재료의 기능단위는 kg인 반면, 골재의 기능단위는 m³로 제시되고 있다. 운송수단은 적재하중과 운송거리에 따라 CO₂ 배출량이 달라지므로 그 기능단위는 kg·km이다.

2.3 CO₂ 평가 절차

콘크리트의 기능단위에 대한 각 원재료의 생산에서부터 콘크리트 생산단계(Fig. 1)까지의 시스템에서 배출된 CO₂ 양(C_d)은 다음 식 (1)에 의해 산정될 수 있다.

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

여기서 CO_{2-M} 는 시멘트계 재료, 골재, 물 및 혼화재(감수제)를 포함하는 재료단계에서의 CO₂ 배출량이며, CO_{2-T} 는 각 재료들의 출구에서부터 레미콘 공장까지의 운송단계에서 배출되는 CO₂ 양이며, CO_{2-P} 는 공장에서 콘크리트 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. 재료단계에서의 시스템 경계는 원료채취(cradle)에서부터 가공·제조 후 출품되는 공장출구(gate)까지이다.

운반단계에서의 CO₂ 배출량인 CO_{2-T} 는 콘크리트 구성재료들의 출구에서부터 레미콘 공장까지로서 다음과 같이 산정된다.

Table 1 Summary of LCI DB for concrete production

Item	CO ₂ inventory	Reference
OPC	9.31E-01 kg/kg	Korea LCI DB
GGBS	3.40E-02 kg/kg	CMCR** LCI DB
FA	3.49E-03 kg/kg	CMCR** LCI DB
SF*	1.40E-02 kg/kg	ecoinvent DB
Sand	2.10E+00 kg/m ³	MOLIT*** LCI DB
Coarse	1.11E+01 kg/m ³	MOLIT*** LCI DB
Water	1.12E-04 kg/kg	Korea LCI DB
15 ton capacity Truck	1.14E-06 kg/kg·km	Korea LCI DB
Bulk cement trailer	5.92E-07 kg/kg·km	Korea LCI DB

* <http://www.ecoinvent.org/database/>

** Construction Materials and Carbon Reduction

*** Ministry of Land, Infrastructure and Transport

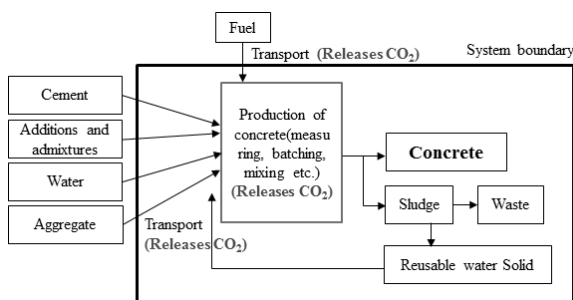
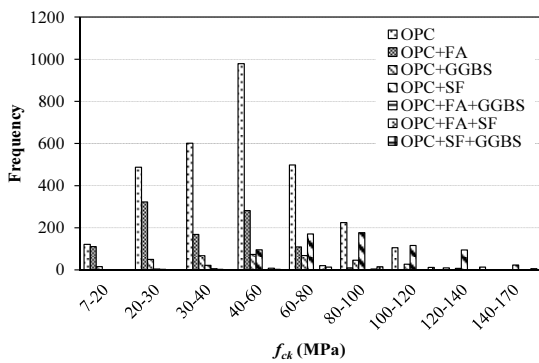


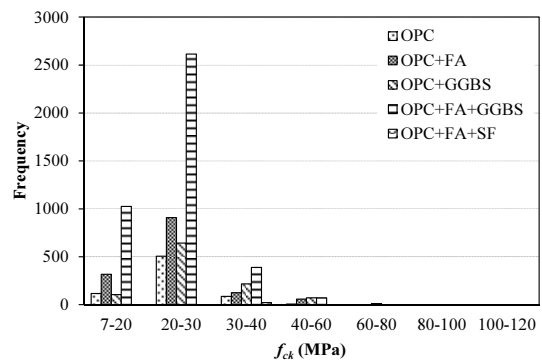
Fig. 1 System boundary for concrete production

Table 2 Example for CO₂ assessment of concrete($f_{ck}=24$ MPa) under the system boundary(cradle-to-production)

Functional Unit (FU): m ³	Material			Transportation		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
Item	kg/FU	CO ₂ -kg/kg	CO ₂ -kg/FU	km	CO ₂ -kg/kg·km	CO ₂ -kg/FU
OPC	238	9.31E-01	221.66	277(Damyang)	5.92E-07	0.039
FA	117	3.49E-03	0.41	322(Hadong)	5.92E-07	0.022
Sand	840	8.08E-04	0.68	47(Kyonggi Gwangju)	1.14E-06	0.045
Coarse	915	4.27E-03	3.91	37.6(Incheon)	1.14E-06	0.039
Water	165	1.12E-04	0.02	Sum		0.146
Sum			226.68			
Concrete Production	1 m ³	0.71 CO ₂ -kg/FU	0.71			
Total= 227.53 CO ₂ -kg/FU(=226.68+0.71+0.146)						



(a) Laboratory mixes



(b) Ready-mixed plant mixes

Fig. 2 f_{ck} levels in the database for concrete mixtures

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

여기서 D_i 는 재료 i 의 출구에서 레미콘 공장까지의 운반 거리(km)이며, $CO_{2(i)-LCI(TR)}$ 은 콘크리트 구성재료들의 운반수단의 CO₂ 배출계수(CO₂-kg/km·kg)이다.

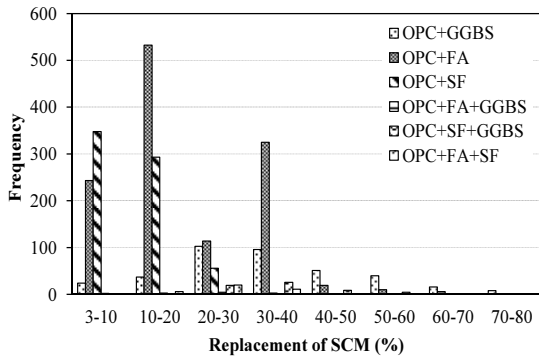
콘크리트 제조공정은 각 재료들의 하역, 저장, 계량, 혼합기로의 운반 및 혼합 등의 5공정으로 구분될 수 있다. 5가지 공정에서 대표적으로 사용되는 기계설비는 콘크리트 구성재료의 저장을 위한 사이로와 재료운반을 위한 컨베이어벨트 설비, 콘크리트 믹서이다. 따라서 콘크리트 생산단계에서의 CO₂ 배출량(CO_{2-p})은 각 공정에서의 기계설비로부터 소비되는 에너지양으로부터 산정될 수 있다. 국내의 레미콘 공장에 대한 자료조사로부터 콘크리트 1 m³를 생산하기 위해 소비되는 에너지원으로부터 환산된 CO₂ 원단위는 약 0.71 CO₂-kg/m³로 평가된다⁸⁾.

Table 2에 콘크리트의 원료채취에서부터 생산단계까지의 CO₂ 배출량을 산정하기 위한 절차를 요약하였다. A열은 콘크리트 배합에 관련된 정보로서 각 재료의 단위용적질량이며, B열은 각 재료의 LCI에서 제공하는 CO₂ 원단위이며, D열은 각 재료의 생산지 출구에서부터 레미콘

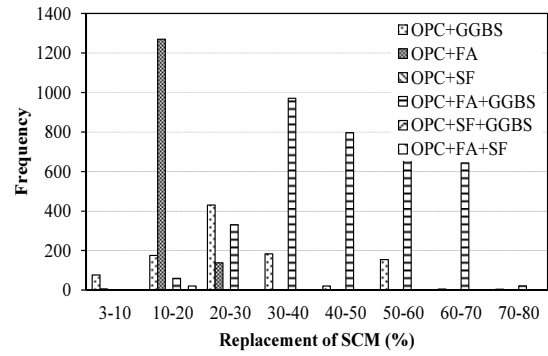
공장까지의 거리이며, E열은 각 재료의 운송수단의 CO₂ 원단위이다. 운송수단으로서 시멘트계 재료는 벌크 시멘트 트레일러로, 골재는 15 톤 트럭으로 가정하였다. 콘크리트 생산을 위한 콘크리트 구성재료들의 생산에 의한 CO₂ 배출량은 A열과 B열의 곱으로 산정되며, 그 재료들의 운반에 의한 CO₂ 배출량은 A열, D열 및 E열의 곱으로 산정된다. 레미콘 공장에서 콘크리트 생산단계에서 배출하는 CO₂ 양은 C열의 아래에 별도로 나타내었다.

3. CO₂ 저감에 기반한 콘크리트 배합설계

콘크리트의 목표성능에 대한 물-결합재비와 같은 배합 변수 및 SCM 치환율의 영향을 평가하기 위하여 실내배합 데이터 5,231개와 레미콘 공장배합 데이터 7,306개를 분석하였다. 수집된 데이터의 콘크리트 배합기간은 1990~2012년도로서 레미콘 배합의 수집지역은 대부분 서울, 경기도 및 경상도 지역이다. 데이터베이스에서 재령 28일 압축강도의 범위는 Fig. 2에 나타낸바와 같이 OPC 콘크리트의 경우 실내배합에서는 8.4~150 MPa, 레미콘 배합에서는 16~52 MPa이며, OPC+GGBS 콘크리트의 경우 실내배합에서는 10~139 MPa, 레미콘 배합에서는 11~73



(a) Laboratory mixes



(b) Ready-mixed plant mixes

Fig. 3 SCM dosage levels in the database for concrete mixtures

MPa이며, OPC+FA 콘크리트의 경우 실내배합에서는 8~90 MPa, 레미콘 배합에서는 10~60 MPa이다. OPC+SF 콘크리트는 실내배합에서만 사용되었으며 압축강도의 범위는 20~100 MPa이다. 데이터베이스에서 각 혼화재의 치환율 범위는 Fig. 3에 나타내었다. GGBS 치환율의 범위는 실내배합에서는 3~80%, 레미콘배합에서 7~70%이며, FA 치환율의 범위는 실내배합에서는 4~67%, 레미콘 배합에서는 3~40%이다. SF 치환율의 범위는 실내배합에서 3~30%이다. 특히 OPC와 GGBS 및 FA를 사용한 3성분계 결합재에서 실내배합의 GGBS 치환율 범위는 6~45%, FA 치환율 범위는 3~45%이며 레미콘배합에서의 GGBS 치환율 범위는 5~50%, FA 치환율 범위는 3~40%이다.

3.1 결합재 지수(B_i) 및 CO₂ 지수(C_i)

일반적으로 콘크리트는 물-결합재비가 감소함에 따라 압축강도가 증가하므로, 높은 압축강도 발현을 위해서는 많은 양의 결합재가 소비된다. 한편, 콘크리트 압축강도의 증가는 구조부재의 단면사이즈를 줄일 수 있으며, 이는 콘크리트 양의 감소에 의한 CO₂ 저감효과를 기대할 수 있다. 따라서 콘크리트의 CO₂ 평가는 단순히 1 m³에 대한 CO₂ 발생량의 평가가 아닌 단위 압축강도 (1 MPa)

의 발현을 위한 CO₂ 발생량이 평가될 필요가 있다. 본 연구에서는 Yang et al.⁹⁾이 제시한 결합재 지수(B_i)와 CO₂ 지수(C_i)를 이용하여 SCM 치환에 따른 CO₂ 배출량을 평가하였다.

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

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

여기서 B 는 콘크리트 1 m³에 대한 결합재 양이며 f_{ck} 는 콘크리트 압축강도이다.

기존 콘크리트 배합들에서 SCM 치환에 따른 실험결과들의 추세를 정리하여 f_{ck} 와 B_i 의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 결합재 지수는 SCM의 치환에 관계없이 f_{ck} 의 증가와 함께 감소하였다. 이는 f_{ck} 가 증가함에 따라 단위 압축강도(1 MPa) 발현을 위한 결합재 양의 설계가 감소됨을 의미한다. 즉, f_{ck} 가 20 MPa에서 40 MPa로 2배 증가한다고 해서 결합재 양이 2배 필요하지는 않다는 의미이다. 결합재 지수의 감소속도는 f_{ck} 가 약 60 MPa 이상에서 점차 완화되면서 SCM 치환에 관계없이 B_i 의 값은 약 4~5 kg/m³·MPa⁻¹에 수렴하는 경향을 보였다. GGBS가 치환된 콘크리트의 B_i 값은 혼화재가 치환되지 않은 OPC 콘크리트와 매우 비슷한 값을 보였다. SF가 치환된 콘크리트의 B_i 값은 f_{ck} 가 약 40 MPa 이하에서 OPC 콘크리트보다 낮게 있었다. 반면 FA가 치환된 콘크리트의 B_i 값은 동일 압축강도의 OPC 콘크리트보다 다소 높았는데, 이는 FA가 치환된 콘크리트에서는 결합재 양이 OPC 콘크리트보다 다소 증가하고 있음을 의미한다.

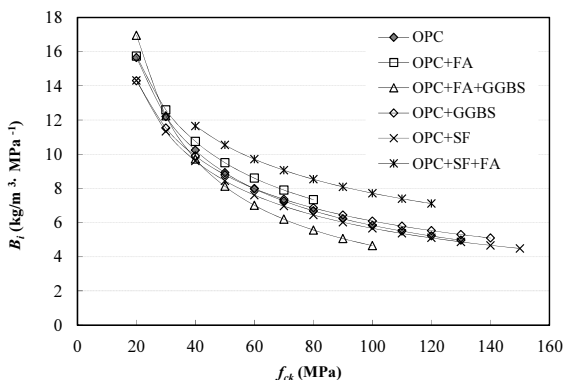


Fig. 4 Binder intensity (B_i) of different concrete types according to concrete compressive strength

기존 콘크리트 배합들에서 SCM 치환에 따른 실험결과들의 추세를 정리하여 f_{ck} 와 C_i 의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 일반적으로 동일 압축강도에 대해서는 레미콘 배합과 실내배합의 C_i 값 차이는 미미하였다. 모든 압축강도에서 SCM가 치환된 콘크리트의 C_i 값이 OPC 콘크리트의 C_i 와 비교하여 낮게 나타났다. 일반적으로 동일 f_{ck} 에서 SF가 치환된 콘크리트의 C_i 값이 가장 낮게 나타

났다. 플라이애시가 치환된 콘크리트는 비록 단위 결합재 양의 사용이 많지만 FA의 CO₂ 원단위가 낮아서 GGBS가 치환된 콘크리트에 비해 다소 낮은 C_i 값을 보였다. 한편 f_{ck}가 50 MPa 이상인 콘크리트에서는 FA와 GGBS가 함께 치환되었을 때의 C_i 값이 FA 또는 GGBS 단독 치환된 콘크리트에 비해 낮게 있었다.

콘크리트의 CO₂ 저감을 위한 효율적인 결합재 사용은 단위 압축강도를 만족하는 최소 OPC 비율과 단위 결합재 양의 관점에서 검토되어야 한다. 콘크리트 압축강도, 결합재 양, 및 CO₂ 배출량의 상호 관계는 B_i 및 C_i의 개념을 도입하여 설명할 수 있다. 이들 지수(B_i, C_i)의 관계를 유도하기 위해서 데이터들은 다음 조건들을 고려하여 분석하였다.

- 결합재 양이 0이면 CO₂ 배출량은 0으로 간주한다.
- C_i는 SCM의 종류와 치환율에 따라 결정된다. 왜냐하면 각각의 SCM은 각기 다른 전과정 목록을 가지며, 또한 콘크리트의 CO₂ 배출량에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 OPC 양이기 때문이다.
- 각 SCM은 고유의 CO₂ 원단위를 갖고 있으므로 FA, GGBS 및 SF의 치환에 따른 콘크리트 CO₂ 저감량은 개별적산법으로 산정된다.

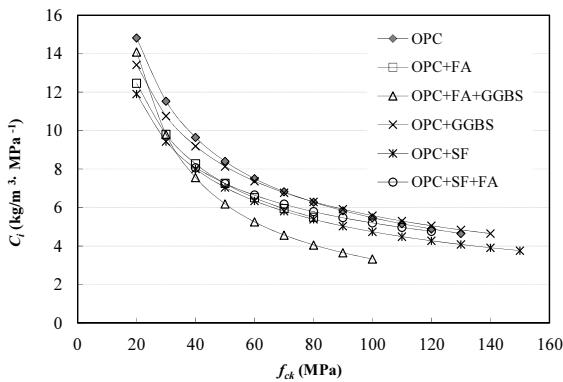


Fig. 5 CO₂ intensity (C_i) of different concrete types according to concrete compressive strength

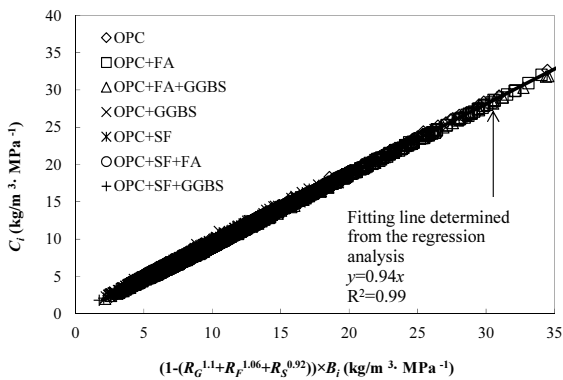


Fig. 6 Regression analysis for relationship between C_i and B_i

이와 같은 경계조건을 고려하면 B_i와 C_i의 관계는 다음 식과 같이 모델링 될 수 있다.

$$C_i = A_i [1 - (R_G^{B_i} + R_F^{C_i} + R_S^{D_i})] B_i \quad (6)$$

여기서 R_G, R_F, R_S는 각각 GGBS, FA 및 SF의 치환율이다. 식 (6)의 실험상수(A_i, B_i, C_i 및 D_i)를 결정하기 위하여 콘크리트 배합의 데이터베이스를 활용하여 회귀분석을 수행하였다. 그 결과 실험상수 A_i, B_i, C_i 및 D_i는 각각 0.94, 1.1, 1.06 및 0.92로 결정될 수 있었다(Fig. 6). 따라서 B_i와 C_i의 관계는 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_i = 0.94 [1 - (R_G^{1.1} + R_F^{1.06} + R_S^{0.92})] B_i (\text{kg/m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}) \quad (7)$$

콘크리트의 B_i와 C_i의 정의로부터 콘크리트의 배합단계에서 배출되는 CO₂ 양(C_d)은 다음 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$C_d = 0.94 [1 - (R_G^{1.1} + R_F^{1.06} + R_S^{0.92})] B (\text{kg/m}^3) \quad (8)$$

위의 식에서 (R_G^{1.1} + R_F^{1.06} + R_S^{0.92})는 OPC 콘크리트에 대한 SCM의 치환 정도에 따른 CO₂의 저감비(γ_{CO2})를 나타낸다. 따라서 목표 CO₂ 저감율에 대한 콘크리트의 배합을 결정하기 위한 SCM의 종류 및 치환율을 식 (8)을 사용하여 선택할 수 있다.

3.2 압축강도와 단위 결합재 양의 관계

콘크리트의 단위 결합재 양은 CO₂ 배출량과 함께 압축강도에 중요한 영향을 미친다. 콘크리트 압축강도에 따른 결합재 양의 선택을 위해 콘크리트 배합의 데이터베이스를 이용하여 분석하였다(Fig. 7). Fig. 7에 나타난 분석결과는 비교적 낮은 상관계수를 보였는데 이는 콘크리트 배합 자료들의 제공처(source)의 차이로 인해 사용골재들의 함수율, 강도 및 입도분포와 양생온도 및 습도 등

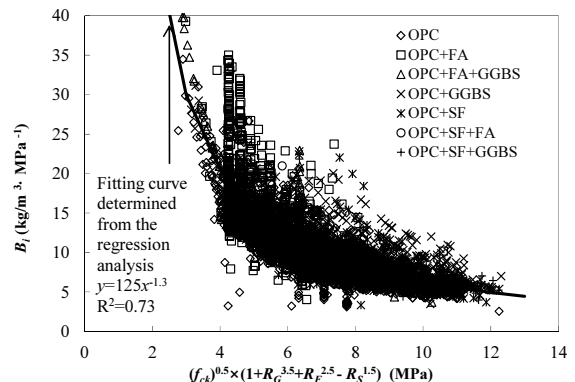


Fig. 7 Regression analysis to determine the unit binder content for a given compressive strength

이 각 배합에 따라 상이하하며, 압축강도 측정에서도 가력 속도 등이 차이가 있기 때문이다. 이 분석 결과를 통해 목표 CO₂ 배출 저감율과 설계 압축강도를 만족시키기 위한 단위 결합재 양의 설계 모델식을 제시하였다.

일반적으로 f_{ck} 의 증가에 따라 단위 결합재 양은 증가한다. 더구나 SCM의 종류 및 치환율도 콘크리트 목표강도에 대한 단위 결합재 양에 중요한 영향을 미친다. 동일한 f_{ck} 에서 OPC에 비해 FA와 GGBS로 치환된 콘크리트는 결합재 양이 많은 반면 SF로 치환된 콘크리트는 결합재 양이 감소하는 경향이 있다. 이러한 영향들을 고려하면 SCM 치환율과 f_{ck} 에 따른 B_i 값의 평가는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있으며, B_i 의 정의로부터 식 (9)는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_i = 125(f_{ck})^{-0.65}(1 + R_G^{3.5} + R_F^{2.5} - R_S^{1.5})^{-1.3}(\text{kg/m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}) \quad (9)$$

$$B = 125(f_{ck})^{0.35}(1 + R_G^{3.5} + R_F^{2.5} - R_S^{1.5})^{-1.3}(\text{kg/m}^3) \quad (10)$$

3.3 목표 압축강도에 대한 W/B 결정

일반적으로 콘크리트의 압축 강도는 물-결합재(W/B) 및 공기량(v_A)에 반비례한다. 게다가 f_{ck} 에 대한 물-결합재(W/B)의 효과는 SCM의 종류 및 치환율에 의해 영향을 받는다. 동일한 압축강도의 OPC 콘크리트에 비해 SCM이 치환된 콘크리트에서는 낮은 W/B가 요구된다. 전반적으로 이러한 영향 인자들을 고려한 콘크리트 배합 데이터베이스의 최적 비선형 회귀분석(Fig. 8)으로부터 f_{ck} 예측식은 다음과 같이 제시될 수 있다.

$$\frac{f_{ck}}{f_0} = 1.22(W/B)^{-1}[1 - (R_G^3 + R_F^2 - R_S^2)](v_A)^{-0.1} \quad (11)$$

여기서 $f_0 (= 10 \text{ MPa})$ 는 콘크리트 압축강도에 대한 참고값이며, v_A 는 목표 공기량이다.

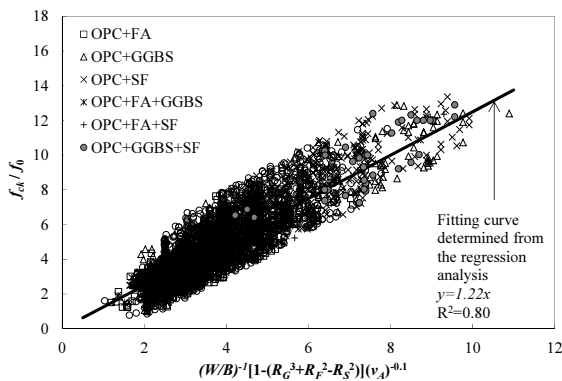


Fig. 8 Regression analysis to predict compressive strength of concrete

각 SCM의 치환율은 식 (10)을 통해 CO₂ 저감율을 고려하여 미리 결정될 수 있다. 따라서 상기 식 (11)로부터 W/B는 아래의 식 (12)에 의해 결정될 수 있다.

$$\frac{W}{B} = 1.22 \left(\frac{f_0}{f_{ck}} \right) [(1 - (R_G^3 + R_F^2 - R_S^2))(v_A)^{-0.1}] \quad (12)$$

3.4 목표 슬럼프에 대한 잔골재율 결정

콘크리트의 유동성은 감수제 종류 및 혼입양 뿐만 아니라 SCM의 종류 및 치환율에도 영향을 받는다. 유동성 향상에 대한 SCM의 기여도는 GGBS와 SF가 FA에 비해 상대적으로 낮다. 하지만 콘크리트의 슬럼프에 대한 감수제 또는 SCM의 영향을 고려하기 위해서는 감수제와 SCM 종류에 따른 화학적 성분, 투입량 및 배합수의 온도 등 고려해야할 요인이 광범위하다. 즉, 콘크리트 목표 슬럼프에 대한 잔골재율(S/a)의 영향을 평가하기 위해서는 감수제 및 SCM이 콘크리트 유동성에 미치는 영향을 우선 배제할 필요가 있다. 즉, 콘크리트 목표 슬럼프에 대해 결정되는 잔골재율은 초기 배합실험을 위한 참고값으로 활용되는 한계가 있다.

감수제를 사용하지 않은 콘크리트의 유동성은 주로 W/B, 단위수량(W), 골재직경(d_a), 조립률(F_m) 잔골재율(S/a) 및 공기량 등에 의해 결정된다. 단위수량은 결합재와 골재의 비, 잔골재 입자의 입도분포 그리고 초기 슬럼프에 대해 독립적인 것으로 가정될 수 있다. 수분 함량 및 다른 혼합비율이 고정되는 경우, 유동성은 골재직경(d_a), 조립률(F_m) 그리고 골재의 양에 의해 지배된다. 또한, W, W/B, S/a , d_a 및 F_m 과 같은 요인들이 콘크리트 유동성에 미치는 영향은 상호 의존적이다. 따라서 이들 다양한 요인이 콘크리트의 유동성에 미치는 영향을 확인할 수 있는 실험 프로그램을 찾기는 어렵다. Yang¹⁰⁾은 감수제와 SCM을 사용하지 않은 콘크리트의 초기 슬럼프와 다른 영향 인자의 관계를 분석하였다. 그 결과 콘크리트 배합단계에서 목표 슬럼프에 대한 S/a 의 초기값 결정을 위하여 다음 식과 같이 최적값, 상한값 및 하한값을 제시함으로써 임의의 범위 내에서 설계자가 선택할 수 있도록 하였다.

$$\frac{S_i}{S_0} = -5.31X^2 + 47.15X - 102.58 \quad \text{for lower limit curve} \quad (13a)$$

$$\frac{S_i}{S_0} = -4.48X^2 + 40.99X - 91.54 \quad \text{for upper limit curve} \quad (13b)$$

$$\frac{S_i}{S_0} = -3.825X^2 + 34.895X - 77.433 \quad \text{for optimum curve} \quad (13c)$$

$$X = \left(\frac{W}{B}\right)\left(\frac{S}{a}\right) + \left(\frac{W}{W_0}\right) + \left(\frac{d_a}{d_0}\right)^{0.2} + (F_m)^{0.1} \quad (14)$$

여기서 $S_0 (= 100 \text{ mm})$, $W_0 (= 100 \text{ kg/m}^3)$ 에서, 및 $d_0 (= 25 \text{ mm})$ 는 각각 콘크리트의 슬럼프값, 단위수량 및 골재의 최대직경에 대한 참고값을 의미한다. 식 (13)에서 결정된 X값에 대해 W/B 및 W 는 식 (10)과 식 (12)를 이용하여 결정하면, 소요 슬럼프에 대한 S/a 를 얻을 수 있다. 즉, 소요 슬럼프에 대한 S/a 값은 식 (13)을 이용하여 상한값과 하한값 사이에서 사용자가 적절하게 결정해야 한다.

3.5 콘크리트 배합강도(f_{cr}) 산정

콘크리트 배합강도 (f_{cr})는 콘크리트 배합설계 시 목표 콘크리트 압축강도(f_{ck})를 만족하기 위한 보정계수를 곱한 값으로 산정된다. 본 연구에서는 f_{cr} 산정에 대하여 ACI 318-11¹¹⁾에서 제시한 모델(식 15)을 사용하였다.

$$f_{cr} = A_1 f_{ck} + B_1 \quad (15)$$

여기서 A_1 와 B_1 은 계수 값으로 f_{ck} 가 21 MPa 이하일 때는 각각 1.0과 7.0이며 f_{ck} 가 21 MPa 이상 35 MPa 이하일 때는 1.0과 8.3 그리고 f_{ck} 가 35 MPa 이상인 경우에는 1.1과 5.0을 사용한다.

3.6 저탄소 콘크리트의 배합설계 프로세스

목표 CO_2 저감을 고려한 콘크리트 배합설계는 위에서

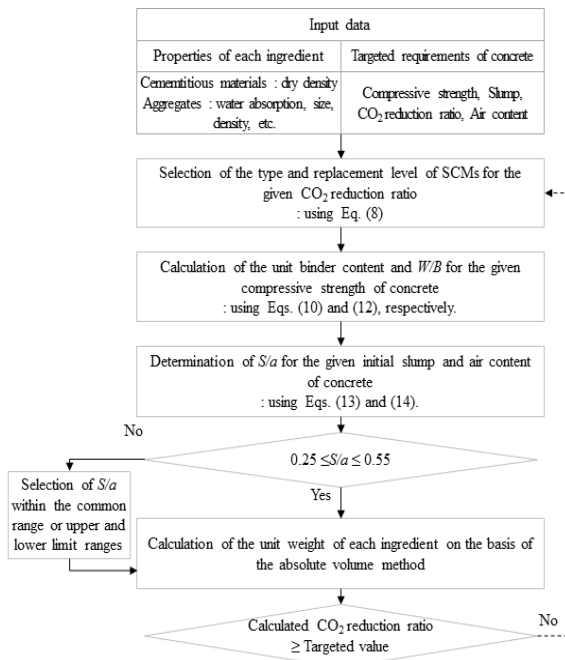


Fig. 9 Schematic procedure for low- CO_2 concrete mixture using different SCMs

제시한 각각의 모델을 기반으로 다음과 같은 프로세스로 수행될 수 있다(Fig. 9).

3.6.1 입력 데이터

이 단계에서는 사용자가 사용하는 콘크리트 구성재료들의 물리적 특성 및 목표 성능(슬럼프, 콘크리트 압축강도, 공기량 및 CO_2 저감율)을 입력한다. 콘크리트 구성재료들의 물리적 특성으로는 시멘트계 재료들의 비중 및 골재의 비중, 직경, 흡수율 등이 있다.

3.6.2 결합재 설계

목표 CO_2 저감률을 만족하기 위한 결합재 설계를 위해서는 사용되는 SCM과 그 치환율을 결정해야 한다. 이 결합재 설계는 식 (8)을 이용한다.

3.6.3 W/B 결정

결정된 결합재 양에 대해 목표 압축강도를 만족시키기 위한 W/B 는 식 (12)에 의해 산정한다.

3.6.4 S/a 산정

목표 슬럼프에 대한 초기 S/a 값은 식 (13)과 식 (14)로 산정하는데, 산정된 S/a 는 최소 값인 0.25와 최대 값인 0.55 이하의 범위에 있도록 한다.

3.6.5 절대용적 배합방법 검토

이전단계에서 결정된 콘크리트 구성재료(시멘트계 재료, 골재, 물, 공기량 등)의 용적의 합이 1 m^3 에 부합하는지 검토한다.

3.6.6 CO_2 발생량 검토

산출된 콘크리트 배합설계에 대해 CO_2 발생량을 평가하고 목표 CO_2 저감율의 만족여부를 검토한다. 만일 목표 CO_2 저감율을 만족하지 않는 경우에는 2단계 결합재 설계에서 SCM 종류와 치환율을 재설계한다.

4. 결 론

콘크리트 생산단계에서 목표성능을 만족시키면서 CO_2 배출량을 저감시키기 위한 SCM 치환율 결정 및 그에 따른 배합설계 절차를 제시하였다. 하지만 본 연구는 콘크리트 압축강도에 대한 결합재 양 및 압축강도에 대한 각 변수의 영향을 비선형 회귀분석을 통해 결정하였기 때문에 각 강도별 혼화재의 영향 및 골재조건 등을 제시된 배합설계 절차에 적절히 반영하는 데에는 한계가 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시된 SCM 기반의 저탄소 콘크리트 배합설계 절차는 다음과 같은 관점에서 활용될 수 있다: 1) 콘크리트 배합설계표로부터 CO_2 배출 양 및 CO_2 저감율을 직접 평가할 수 있다; 2) 현장에서 콘크리트

트 목표성능에 대한 최초의 시험배합용 배합설계를 결정하고 시험결과와의 비교를 통하여 배합설계를 적절하게 보정한다. 혼화제 기반의 저탄소 콘크리트 배합설계 절차에 대한 기초연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일반적으로 동일한 압축강도에서 OPC에 비해 FA와 GGBS로 치환된 콘크리트는 결합재 양이 많은 반면 SF로 치환된 콘크리트는 결합재 양이 적었다. 이에 따라 목표강도에 대한 단위 결합재 양은 각 혼화제 치환율의 함수로 제시될 수 있었다.
- 2) 혼화제들의 종류 및 치환율을 변수로 하여 CO₂ 저감율은 선형관계로 모델링 될 수 있었다. 이를 통해 목표 CO₂ 저감률과 사용되는 혼화제 종류에 따라 혼화제의 치환율을 결정할 수 있었다.
- 3) 결정된 혼화제 치환율을 고려하여 목표 압축강도 및 공기량을 만족하기 위한 단위 결합재양 및 W/B를 결정할 수 있었다.
- 4) 제시된 저탄소 콘크리트 배합절차를 이용하면, 목표성능(압축강도, 슬럼프, 공기량 및 CO₂ 저감율)에 대해 각 재료의 단위용적중량의 결정뿐만 아니라 제시된 배합표에서 CO₂ 배출량을 쉽게 산정할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 국토교통과학기술진흥원 건설기술혁신사업(과제번호:12CCTI-C063722-01)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Gartner, E., "Industrially Interesting Approaches to "Low-CO₂" Cements", *Cement and Concrete Research*, Vol.34, 2004, pp.1489-1498.
2. Yang, K. H., Seo, E. A., Jung, Y. B., and Tae, S. H., "Effect of Ground Granulated Blast-Furnace Slag on Life-Cycle Environmental Impact of Concrete", *Journal of the Korea*

- Concrete Institute*, Vol.26, No.1, 2014, pp.13-21.
3. Jung, Y. B., Yang, K. H., and Choi, D. U., "Influence of Fly Ash on Life-Cycle Environmental Impact of Concrete", *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.14, No.6, 2014, pp.515-522.
4. Yang, K. H. and Moon, J. H., "Design of Supplementary Cementitious Materials and Unit Content of Binder for Reducing CO₂ Emission of Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.24, No.5, 2012, pp.597-604.
5. Flower, D. J. M. and Sanjayan, J. G., "Green House Gas Emissions due to Concrete Manufacture", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol.12, No.5, 2007, pp. 282-288.
6. Feiz, R., Ammenberg, J., Baas, L., Eklund, M., Helgstrand, A., and Marshall, R., "Improving the CO₂ Performance of Cement, Part I: Utilizing Life-Cycle Assessment and Key Performance Indicators to Assess Development within the Cement Industry", *Journal of Cleaner Production*, 2014. DOI:10.1065/lca2007.05.327.
7. ISO 13315-2, *Environmental Management for Concrete and Concrete Structures-Part 2: System Boundary and Inventory Data*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2014, p.28.
8. Kim, T. H. and Tea, 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. Yang, K. H., Jung, Y. B., Cho, M. S., and Tae, S. H., "Effect of Supplementary Cementitious Materials on Reduction of CO₂ Emissions from Concrete," *Journal of Cleaner Production*, 2014. DOI:10.1016/j.jclepro.2014.03.01.8.
10. Yang, K. H., "Development of Concrete Mixture Proportioning Approach for Reducing CO₂ Emissions," Technical Report, Kyonggi University, 2014.
11. ACI Committee 318-11, *Building code requirements for structural concrete and commentary*, American Concrete Institute, 2008.

요약 이 연구의 목적은 다양한 혼화제를 기반으로 목표 CO₂ 저감율 뿐만 아니라 콘크리트 초기 슬럼프, 공기량 및 28일 압축강도와 같은 종래의 요구 사항을 만족하는 CO₂ 저감 콘크리트의 합리적인 배합 설계 절차를 확립하는 것이다. CO₂ 배출과 콘크리트의 압축강도에 혼화제가 미치는 영향을 평가하기 위해, 실내 배합 및 레미콘 공장 데이터(전체 12537 배합표)를 분석하였다. 콘크리트의 배합에 따른 CO₂ 배출량 평가를 위해 고려된 시스템 경계는 재료 채취 및 가공에서부터 레미콘 공장에서 콘크리트 생산단계까지이다. 구축된 12537 콘크리트 배합 데이터를 사용한 비선형 회귀 분석을 통해 혼화제의 종류 및 치환율, W/B, S/a와 같은 콘크리트 배합 설계를 결정할 수 있는 간단한 모델식을 제시하였다. 또한, 주어진 콘크리트 배합에 대한 CO₂ 배출량은 제안된 모델식을 이용하여 직접 계산 될 수 있다. 결국, 개발된 배합 설계 절차는 레미콘 분야에서 CO₂ 저감 콘크리트의 초기 배합표를 결정하는데 효율적으로 이용될 수 있다.

핵심용어 : 저탄소 콘크리트, 콘크리트, 혼화제, 배합설계 절차