



천연모래 치환율에 기반한 저탄소 경량골재 콘크리트 배합설계 모델

정연백¹⁾ · 양근혁^{2)*} · 태성호³⁾

¹⁾현대건설 건축구조설계팀 ²⁾경기대학교 플랜트·건축공학과 ³⁾한양대학교 건축학부

Mixture Proportioning Approach for Low-CO₂ Lightweight Aggregate Concrete based on the Replacement Level of Natural Sand

Yeon-Back Jung,¹⁾ Keun-Hyeok Yang,^{2)*} Sung-Ho Tae³⁾

¹⁾Building Works Structural Design Team, Hyundai Engineering & Construction, Seoul 03058, Rep. of Korea

²⁾Department of Plant·Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Rep. of Korea

³⁾School of Architecture & Architectural Engineering, Hanyang University, Ansan 15588, Rep. of Korea

ABSTRACT The purpose of this study is to propose a mixture proportioning approach based on the replacement level of natural sand for reducing CO₂ emissions from artificial lightweight aggregate concrete(LWAC) production. To assess the effect of natural sand on the reduction of CO₂ emissions and compressive strength of LWAC, a total of 379 specimens compiled from different sources were analyzed. Based on the non-linear regression analysis using the database and the previous mixture proportioning method proposed by Yang et al., simple equations were derived to determine the concrete mixture proportioning and the replacement level of natural sand for achieving the targeted performances(compressive strength, initial slump, air content, and CO₂ reduction ratio) of concrete. Furthermore, the proposed equations are practically applicable to straightforward determination of the CO₂ emissions from the provided mixture proportions of LWAC.

Keywords : low-CO₂ concrete, lightweight aggregate concrete, natural sand, mixture proportioning

1. 서 론

낮은 기건 단위질량을 갖는 경량골재 콘크리트(lightweight aggregate concrete, LWAC)는 구조물의 자중을 감소시켜 구조부재들의 단면 사이즈를 줄일 수 있다.¹⁾ 특히, 구조물의 수직증축에 LWAC를 사용할 경우 기존구조물의 하부구조 보강에 대한 비용을 줄일 수 있다. 또한, LWAC의 자중경감은 콘크리트 구조물의 밀면 전단력을 감소시킬 수 있어 내진저항에도 매우 유리하다.²⁾ LWAC는 보통 중량 콘크리트(normal-weight concrete, NWC)에 비해 부력이 크며, 이는 석유 생산시설과 같은 해양구조물 적용에도 유리하다.³⁾ LWAC의 열전도율은 NWC의 1/3 수준으로서 전체 에너지 소비의 약 36%에 달하는 건축물의 냉·난방 에너지의 소비를 저감시킬 수 있을 뿐만 아니라 화재발생 시 유독가스의 원인이 되는 유기단열재의 사용량을 줄일 수 있다.⁴⁾ 이와 같은 다양한 장점들과 함께 에

너지 절약 및 환경경영에 대한 사회적·정책적 요구사항과 맞물려 건축물에서의 LWAC의 사용은 점차 증가할 전망이다.⁵⁾

한편, 인공 경량골재는 콘크리트의 강도 발현 및 내구성에 불리하며⁶⁾ 경량골재 제조과정에서 발생하는 CO₂ 발생량이 천연골재와 비교하여 약 32배 높은 단점이 있다.⁷⁾ 이러한 문제점들을 해결하기 위한 실용적인 대안 중의 하나가 천연모래 일부 치환이다.⁷⁾ Sim and Yang^{8,9)}은 천연모래가 치환된 LWAC의 유동성 및 역학적 특성에 대한 연구를 바탕으로 프리캐스트 콘크리트 부재의 적용 기술을 제시하였다. 하지만 국내외적으로 천연모래의 치환이 LWAC의 CO₂ 배출 저감량에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 미미하며, 더불어 LWAC의 CO₂ 배출 평가에 대한 연구도 매우 부족한 실정이다.

LWAC의 배합설계 단계에서 목표 성능은 일반적으로 슬럼프, 압축강도, 공기량 외에 기건 단위질량이 고려된다. ACI 211.2-98¹⁾에서는 질량과 용적의 방법으로 구조용 LWAC의 배합설계 방법을 제안하고 있다. Chen et al.¹⁰⁾은 분계강도(dividing strength)에 기반한 LWAC 배합설계 방법을 제시하고 있으며, Bogas and Gomes¹¹⁾는 경량골재와 천연모래로 치환된 LWAC의 간단한 배합설계 방법

*Corresponding author E-mail : yangkh@kgu.ac.kr
 Received November 18, 2015, Revised June 9, 2016,
 Accepted June 28, 2016
 ©2016 by Korea Concrete Institute

을 제시하고 있다. LWAC의 배합단계에서 CO₂ 저감을 목표로 한다면 목표성능을 만족하는 범위 내에서 천연모래의 치환을 고려할 수 있다.

본 연구의 목적은 천연모래 치환에 따른 LWAC 배합에서 목표성능(압축강도, 슬럼프, 공기량, 기건 단위질량 및 CO₂ 저감률)에 대한 콘크리트 시험배합을 결정하기 위한 절차를 제시하는 것이다. 천연모래 치환이 콘크리트 압축강도 및 CO₂ 배출량 저감에 미치는 영향을 파악하기 위하여 379개의 실내배합 자료를 분석하였다. 기존 배합들에서 평가된 CO₂ 배출량을 기반으로 LWAC 목표성능에 대해 천연모래 치환율을 결정할 수 있는 식을 제안하였다.

2. CO₂ 배출량 평가 절차

2.1 시스템 경계

LWAC 배합단계에서의 CO₂ 평가를 수행함에 있어서, 그 시스템 경계는 ISO 13315-2¹²⁾에서 제시하는 시스템 경계를 고려하여 원재료 채취 및 가공에서부터 콘크리트 생산단계까지 고려하였다(Fig. 1). 시간적 경계는 1990년~2012년으로, 지역적 경계는 서울로 가정하였다. 일반적으로 콘크리트는 1 m³ 단위로 주문과 생산이 이루어지므로 콘크리트 배합단계에서 CO₂ 평가를 위한 기능단위는 1 m³로 설정하였다.

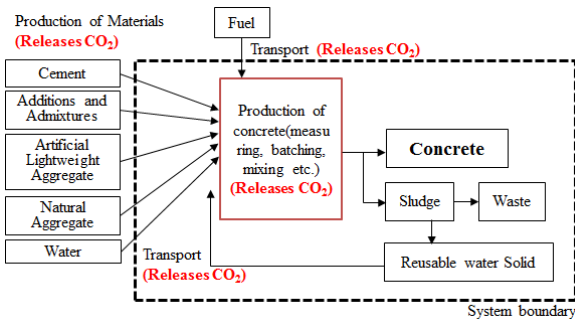


Fig. 1 System boundary for concrete production

2.2 CO₂ 평가 절차

LWAC의 배합단계에서의 CO₂ 평가 절차는 Jung and Yang¹³⁾이 제시한 절차를 이용하였다. 배합단계에서의 CO₂ 평가를 위해서 콘크리트 구성재료들의 원료채취에서부터 생산단계까지의 CO₂ 원단위와 각 재료의 생산지 출구에서부터 레미콘 공장까지의 거리 및 운송 수단의 CO₂ 원단위 등을 이용하였다.

2.3 LCI 데이터베이스

콘크리트의 CO₂ 평가를 수행하기 위한 전과정 목록(lifecycle

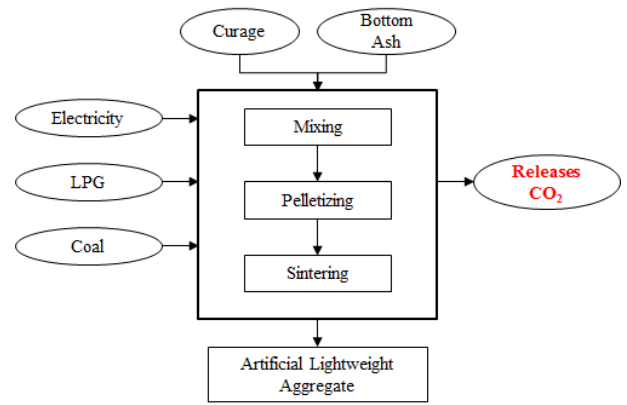


Fig. 2 Manufacturing process of artificial lightweight aggregate

inventory, LCI) 데이터는 콘크리트 구성재료들의 생산, 콘크리트 생산 단계에서 수반되는 각 활동들에서 필요한 입력요소와 배출요소들을 포함해야 한다. 콘크리트 구성재료 및 운반단계에서의 LCI 데이터 베이스는 국내 자료¹⁴⁾를 이용하였다. 경량골재에 대한 국가 LCI 데이터는 아직 구축되어 있지 않기 때문에 태성호¹⁵⁾가 제시한 인공경량골재 LCI DB를 사용하였다. 이 값은 인공경량골재 업체를 직접 방문하여 조사한 데이터(원재료 및 에너지 투입량) 등을 가지고 LCI DB 도출 프로그램인 TOTAL을 이용하여 산출한 값이다. 인공경량골재 생산 프로세스에서 경량 굵은골재와 경량 잔골재의 공정은 거의 유사하기 때문에 에너지 사용량도 거의 차이가 없으므로 LCI DB는 차이가 없다. 인공경량골재는 Fig. 2와 같이 준설토와 잔사회의 혼합, 성형 및 소성의 단계를 거쳐 제조되며, 제조 시 투입되는 연료의 사용에 따른 CO₂ 발생량이 증가하여 천연경량골재에 비해 LCI 값이 증가하게 된다. 해외 DB인 ecoinvent¹⁶⁾에서는 인공경량골재 CO₂ 원단위는 7.44E-02 CO₂-kg/kg으로 태성호¹⁵⁾가 제시한 5.61E-02 CO₂-kg/kg에 비해 약 33% 정도 크게 있었다.

3. CO₂ 저감에 기반한 콘크리트 배합설계

LWAC의 목표 CO₂ 저감 및 목표성능에 대한 천연모래 치환율 및 배합변수의 영향을 평가하기 위하여 기존 문헌들의 실험 결과들로부터 379개의 데이터베이스를 구축하였다. 다양한 자료들로부터 구축된 LWAC의 배합비 분석은 절대용적방법을 이용하였다. 골재는 경량 굵은골재와 천연모래의 조합(sand-lightweight) 또는 경량 굵은골재 및 경량 잔골재의 조합(all-lightweight)을 사용하였다. 사용된 경량골재들은 대부분 플라야에서 또는 점토를 팽창하여 제조된 것으로, 경량 잔골재와 경량 굵은골재의 단위용적질량은 각각 1,000~1,850 kg/m³와 1,000~1,600 kg/m³이다. 경량 잔골재와 경량 굵은골재의 흡수율은 5~28% 수준이었으며, 경량 굵은골재의 최대 크기는 일반적으로 19 mm 또는 25 mm이며, 조립률은 6.2~7.28이었다.

콘크리트의 28일 압축강도(f_{ck})는 모래경량 콘크리트

Table 1 Parameter distributions in LWAC mixture database (379 mixes)

f_{ck}	11-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-67
All-LWAC	20	12	11	3	-	-
Sand-LWAC	12	127	138	34	19	3

W/C	0.28-0.30	0.30-0.35	0.35-0.40	0.40-0.45	0.45-0.55	0.55-0.65
All-LWAC	6	6	13	2	12	8
Sand-LWAC	80	84	92	33	26	16

W	139-160	160-180	180-200	200-220	220-240	240-260
All-LWAC	1	7	24	9	5	1
Sand-LWAC	69	96	92	64	8	3

V_G	0.42-0.45	0.45-0.50	0.50-0.55	0.55-0.60	0.60-0.65	0.65-0.82
All-LWAC	-	2	12	9	7	1
Sand-LWAC	7	24	99	82	27	31

(Sand-LWAC) 배합에서는 15~66.6 MPa, 전경량 콘크리트 (All-LWAC) 배합에서는 11.6~42.6 MPa이었으며, 물-시멘트 비(W/C)는 모래경량 콘크리트 배합에서는 0.28~0.65, 전경량 콘크리트 배합에서는 0.3~0.65 범위에 있었다 (Table 1). 단위수량(W)은 모래경량 콘크리트 배합에서는 145~260 kg/m³, 전경량 콘크리트 배합에서는 139~240 kg/m³ 범위에 있었으며, 굵은골재 체적밀도에 대한 겉보기 밀도의 비($V_G = \gamma_{GL} v_{GL} / \rho_{GL}$)는 모래경량 콘크리트 배합에서는 0.42~0.82, 전경량 콘크리트 배합에서는 0.49~0.78 범위에 있었다. 여기서 v_{GL} 은 콘크리트 단위용적당 굵은골재의 용적 비이며, γ_{GL} 과 ρ_{GL} 은 경량 굵은골재의 겉보기 밀도(apparent density)와 체적 밀도(bulk density)이다. 경량골재는 공극률이 높아 흡수율관리가 매우 중요하며, 이러한 이유로 ACI 211.2-98¹⁾에서는 V_G 를 사용하여 경량굵은골재의 사용량을 결정하도록 제시하고 있다.

3.1 CO₂ 지수(C_i) 및 경량 굵은골재 지수($V_{G,i}$)

데이터 베이스를 이용하여 LWAC의 압축강도에 따른 CO₂ 지수(C_i) 및 경량 굵은골재 지수($V_{G,i}$)를 평가하였다.

3.1.1 CO₂ 지수(C_i)

콘크리트의 CO₂ 배출량은 압축강도에 따른 배합설계와 함께 구조부재 크기가 함께 고려되어야 한다. 이를 위해 Yang et al.¹⁷⁾은 CO₂ 지수(C_i)를 다음과 같이 제시하였다.

$$C_i = C_d / f_{ck} \quad (1)$$

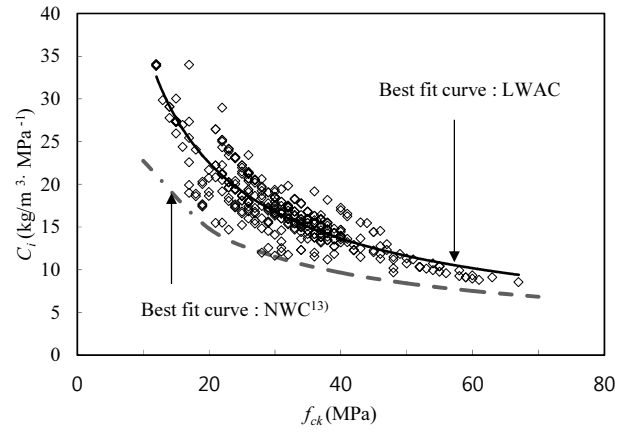


Fig. 3 C_i as a function of f_{ck} of LWAC

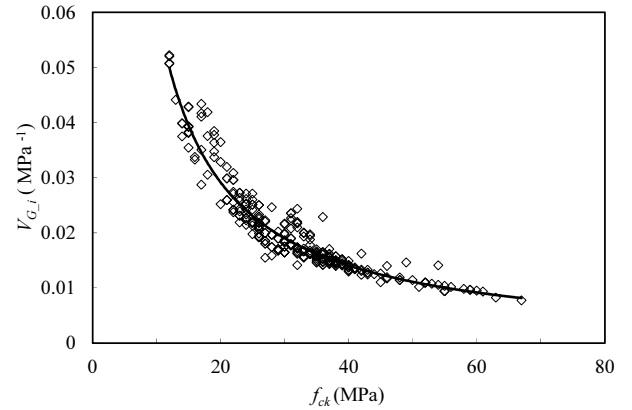


Fig. 4 $V_{G,i}$ as a function of f_{ck} of LWAC

여기서 C_d 콘크리트 1 m³에 대한 CO₂ 발생량이다.

Fig. 3에는 LWAC의 C_i 와 f_{ck} 의 관계를 나타내었다. 비교를 위해 보통중량 콘크리트(NWC)의 결과¹³⁾를 함께 나타내었다. LWAC와 NWC 모두 f_{ck} 의 증가와 함께 C_i 가 감소하였으며, LWAC의 C_i 가 동일압축강도에서 NWC에 비해 약간 크게 나타났다.

3.1.2 경량 굵은골재 지수($V_{G,i}$)

LWAC에서 단위 압축강도(1 MPa)의 발현을 위한 경량 굵은골재 양을 분석하기 위해 식 (2)와 같이 경량 굵은골재 지수($V_{G,i}$)를 제시하였으며 Fig. 4에 f_{ck} 와 $V_{G,i}$ 의 관계를 나타내었다. LWAC의 압축강도는 경량골재 양이 증가할수록 감소한다. 이는 f_{ck} 가 증가함에 따라 단위 압축강도(1 MPa) 발현을 위한 경량 굵은골재 양이 감소될 수 있음을 의미한다.

$$V_{G,i} = V_G / f_{ck} \quad (2)$$

3.2 천연모래 치환율(R_{FS})의 결정

일반적으로 콘크리트의 배합설계는 설계압축강도에 대해 W/C 를 결정하고 유동성 및 건조수축 저감을 고려하여 단위수량을 경험적으로 가정한다. 하지만 기존 방식

은 CO₂ 저감을 고려하면 천연모래 치환율 및 그에 따른 단위수량 결정이 매우 어렵다. 따라서 CO₂ 저감을 고려한 LWAC 배합설계는 천연모래 치환율의 결정과 그에 따른 단위 결합재 양의 합리적인 산정방법이 필요하다.

전과정 CO₂ 배출량은 주로 OPC 양에 의해 결정된다. OPC가 CO₂ 배출에 미치는 영향은 f_{ck} 에 따라 다르지만 천연모래의 치환율 증가와 함께 감소한다. 그러므로 목표 압축강도와 CO₂ 저감 수준을 만족하기 위한 천연모래의 치환율을 결정하는 것이 중요하다. 콘크리트의 CO₂ 저감을 위한 효율적인 천연모래 사용은 단위 압축 강도를 만족하는 최소 OPC 비율과 경량골재 양의 관점에서 검토되어야 한다. 콘크리트 압축강도, 경량 굽은골재 양, 및 CO₂ 배출량의 상호 관계는 $V_{G,i}$ 및 C_i 의 개념을 도입하여 설명 할 수 있다. LWAC에서 C_i 는 OPC 양과 함께 경량골재에 의해 영향을 받는데, 이는 경량골재의 CO₂ 원단위가 보통중량골재에 비해 매우 높기 때문이다. 이와 같은 경계조건을 고려하여 $V_{G,i}$ 와 C_i 의 관계는 식 (3)과 같이 모델링하였다.

$$C_i = A_1 \left[(B_1 - R_{FS})^{C_1} \times V_{G,i} \right] + D_1 \quad (\text{kg/m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}) \quad (3)$$

여기서 $R_{FS} (= \frac{v_{FS}}{v_{FS} + v_{FA}})$ 는 천연모래의 치환율로서 콘크리트 단위용적당 전체 잔골재 체적에 대한 천연모래 체적 (v_{FS})의 비이며, v_{FA} 는 경량 잔골재 단위용적이다. 식 (3)에서 A_1 , B_1 , C_1 및 D_1 은 실험상수로서 실험결과의 회귀 분석으로부터 각각 67, 3, 1.7 및 12로 결정될 수 있었다 (Fig. 5). 따라서 $V_{G,i}$ 와 C_i 의 관계는 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_i = 67 \left[(3 - R_{FS})^{1.7} \times V_{G,i} \right] + 12 \quad (\text{kg/m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}) \quad (4)$$

Fig. 5의 분석결과는 비교적 높지 않은 상관계수를 보였는데 이는 콘크리트 배합 자료들의 제공처(source)의 차이로 인해 사용골재들의 강도, 함수율 및 입도분포와 양생온도 및 습도 등이 각 배합에 따라 상이하기 때문인 것으로 판단된다. 특히 LWAC의 압축강도는 배합 시 경량골재의 함수상태 등에 의해 중요한 영향을 받기 때문에 상관계수가 비교적 높지 않게 나타난 것으로 판단된다. LWAC의 $V_{G,i}$ 와 C_i 의 정의로부터 콘크리트의 배합 단계에서 배출되는 CO₂ 양(C_d)은 다음 식 (5)로부터 간단하게 산정될 수 있다.

$$C_d = 67 \left[(3 - R_{FS})^{1.7} \times V_G \right] + 12 f_{ck} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (5)$$

따라서 목표 CO₂ 저감률에 대한 LWAC의 배합을 결정하기 천연모래 치환율을 식 (5)를 사용하여 선택할 수 있다.

LWAC의 경량골재 양은 CO₂ 배출량과 함께 f_{ck} 에 중

요한 영향을 미친다. f_{ck} 와 $V_{G,i}$ 의 관계는 379개의 실험 데이터를 분석하여 평가하였다(Fig. 6). 이 분석 결과를 통해 목표 CO₂ 배출 저감률과 설계 압축강도를 만족시키기 위한 V_G 설계 모델식을 개발하였다. 일반적으로 f_{ck} 의 증가에 따라 V_G 가 감소한다. 이러한 영향들을 고려하면 V_G 와 f_{ck} , CO₂ 저감률의 관계는 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{G,i} = 0.76 (f_{ck})^{-1.08} (2 - R_{FS})^{-0.108} \quad (\text{MPa}^{-1}) \quad (6)$$

$V_{G,i}$ 의 정의로부터 위의 식은 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_G = 0.76 (f_{ck})^{-0.08} (2 - R_{FS})^{-0.108} \quad (7)$$

CO₂ 저감을 고려한 LWAC 배합설계에서 경량골재 설계가 가장 중요한 단계이며 위에서 제시한 바와 같이 식 (7)을 통해 산정될 수 있다. 하지만 레미콘 공장과 같은 산업체에서 이 모델 식으로 골재를 산정하는 것은 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 복잡한 모델식이 아닌 목표 CO₂ 저감률과 사용되는 경량골재 치환율을 결정할 수 있는 골재 설계시트를 개발하였다. 이 도표는 식 (5)와 식 (7)을 이상화한 것으로 Fig. 7과 같다.

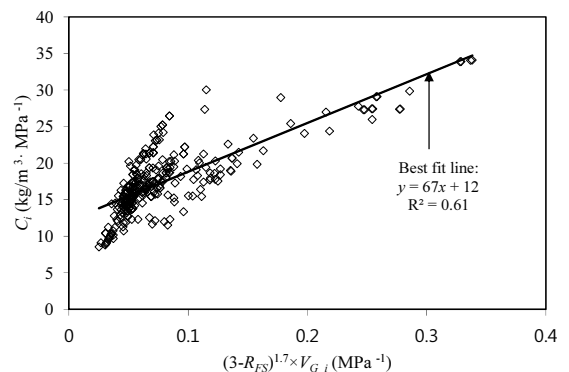


Fig. 5 Regression analysis for relationship between C_i and $V_{G,i}$.

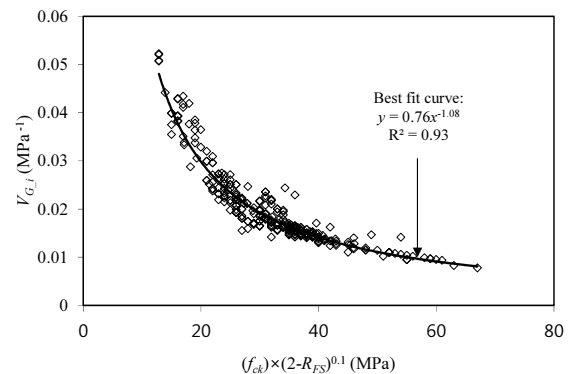


Fig. 6 Regression analysis to determine $V_{G,i}$ for a given f_{ck} .

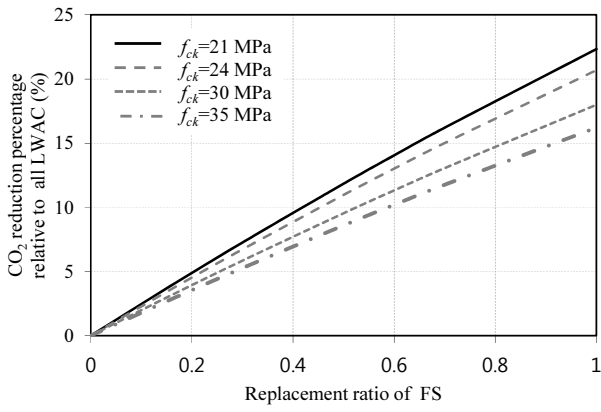


Fig. 7 Example of design chart for reducing CO₂ emissions from LWAC production.

3.3 W/C , W , γ_{con} 및 V_G 의 결정

LWAC의 물-시멘트비(W/C), 단위수량(W), 목표 기건 밀도(γ_{con}) 및 굽은골재 체적밀도에 대한 결보기 밀도의 비(V_G)에 대해 Yang et al.¹⁸⁾은 다음과 같이 제시하였다.

$$W/C = 0.72 \left(\frac{f_0}{f_{ck}} \frac{\gamma_{con}}{\gamma_o} \right) \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \quad (8)$$

여기서 f_0 (=10 MPa)는 콘크리트 압축강도의 참고값이며, γ_o (=2,300 kg/m³)는 콘크리트 기건밀도의 참고값이다.

LWAC의 목표슬럼프(S_i)에 대한 단위수량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \frac{W_0}{V_G} \left(\frac{1}{2 - R_{FS}} \right)^{0.1} \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \left(\frac{S_i}{S_0} \right)^{0.5} \quad (9)$$

여기서 S_0 (=300 mm)는 슬럼프의 참고값이며, W_0 (=100 kg/m³)은 단위수량의 참고값이다.

$$\gamma_{con} = 1.25C + G_L + F_S + F_L + 120 \quad (\text{kg/m}^3) \quad (10)$$

여기서 C , G_L , F_S 및 F_L 은 콘크리트 단위체적 당의 각각 시멘트 양, 경량 굽은골재 양, 천연모래 양 및 경량 잔골재 양이다.

$$q_1 V_G^2 + q_2 V_G + q_3 = 0 \quad (11)$$

$$q_1 = \left[-\rho_{GL} + \frac{\gamma_{FL}(1 - R_{FS})\rho_{GL}}{\gamma_{GL}} \right] \left[\frac{1}{R_{FS}\gamma_{FS}} \right] + \frac{\rho_{GL}}{\gamma_{GL}} \quad (12.a)$$

$$q_2 = \frac{\gamma_{con} - \gamma_{FL}(1 - R_{FS})(1 - v_A) - 120}{R_{FS}\gamma_{FS}} + v_A - 1 \quad (12.b)$$

$$q_3 = \frac{\left[\gamma_{FL}(1 - R_{FS})A_1 \left(\frac{1}{\gamma_W} + \frac{1}{\gamma_C X_1} \right) - \frac{1.25A_1}{X_1} \right]}{R_{FS}\gamma_{FS}} + \frac{A_1}{\gamma_W} + \frac{A_1}{\gamma_C X_1} \quad (12.c)$$

$$A_1 = W_0 \left(\frac{1}{2 - R_{FS}} \right)^{0.1} \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \left(\frac{S_i}{S_0} \right)^{0.5} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (13)$$

여기서 X_1 은 W/C 의 값이며, v_W , v_C , v_{GL} , v_{FS} 및 v_{FL} 은 콘크리트 단위체적 당의 각각 물, 시멘트, 경량 굽은골재, 천연모래 및 경량 잔골재의 체적이며, γ_W 와 γ_C 는 각각 물과 시멘트의 밀도이며, γ_{FS} 와 γ_{FL} 은 각각 천연모래와 경량 잔골재의 결보기 밀도이다.

전 경량골재 콘크리트($R_{FS}=0$)의 경우 식 (12.a)~(12.c)에서 나타낸 q_1 ~ q_3 는 다음 식 (14.a)~(14.c)에 의해 산정된다.

$$q_1 = \rho_{GL} \left(\frac{1}{\gamma_{GL}} - \frac{1}{\gamma_{FL}} \right) \quad (14.a)$$

$$q_2 = \frac{\gamma_{con} - 120}{\gamma_{FL}} + v_A - 1 \quad (14.b)$$

$$q_3 = A_1 \left(\frac{1}{\gamma_W} + \frac{1}{\gamma_C X_1} - \frac{1.25}{\gamma_{FL} X_1} \right) \quad (14.c)$$

목표 f_{ck} 와 γ_{con} 이 서로 비현실적인 경우에는 (예를 들어 높은 f_{ck} 와 상당히 낮은 γ_{con}) 식 (11)의 해가 존재하지 않을 수 있다. 이러한 경우 설계강도에 따라 합리적인 목표 γ_{con} 값을 적절히 조절해야 한다. 또한 Yang¹⁹⁾은 배합강도를 결정하기 위한 변동계수가 NWC보다는 LWAC에서 크게 있음을 고려하여 LWAC의 목표 f_{ck} 에 대한 배합강도를 $1.17f_{ck}$ 로 제시하였다.

목표 슬럼프를 고려할 경우 고성능감수제의 종류에 따라서 단위수량의 차이가 발생할 수 있으나 본 연구에서는 고성능감수제의 효과는 고려하지 않았다.

3.4 저탄소 경량콘크리트의 배합설계 프로세스 제시

목표 CO₂ 저감을 고려한 LWAC 배합설계는 위에서 제시한 각각의 모델을 기반으로 다음과 같은 프로세스로 수행 될 수 있다(Fig. 8).

3.4.1 Input data 입력

이 단계에서는 사용자가 사용하는 콘크리트 구성재료의 물리적 특성을 입력하는 것으로 Input data로는 시멘트계 재료들의 비중 및 골재의 비중, 직경, 흡수율 등이 있다. 또한 콘크리트의 목표 CO₂ 저감률과 일반적인 목표 성능(기건단위질량, 슬럼프, 콘크리트 압축강도, 공기량)을 설정한다.

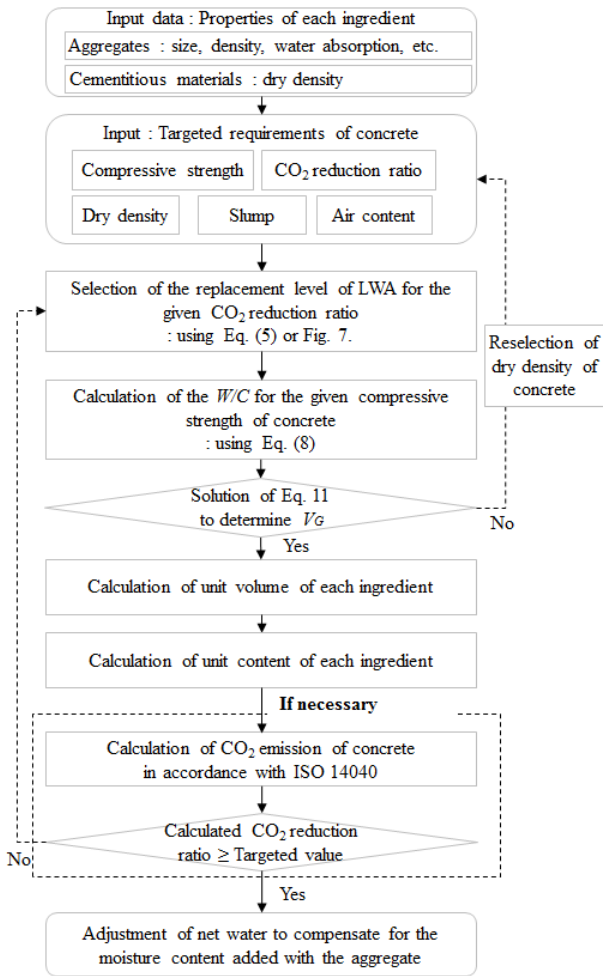


Fig. 8 Schematic procedure to determine mixture-proportioning of low-CO₂ LWAC.

3.4.2 경량골재 설계

목표 CO₂ 저감률을 만족하기 위한 LWAC 배합설계에서는 경량골재 설계단계가 가장 중요하다. 경량골재 설계를 위해서는 전 경량 콘크리트 대비 목표 CO₂ 저감률의 설정과 천연모래 치환율을 결정해야 한다.

CO₂ 저감률을 만족하기 위한 천연모래 치환율은 제시한 모델식(식 (5)) 또는 현장 적용형 도표(Fig. 7)를 이용한다.

3.4.3 W/C 결정

W/C는 Input data에서 결정한 f_{ck} 와 결정된 천연모래 치환율에 의해 식 (8)로 산정한다.

3.4.4 V_G 산정

식 (12)와 식 (14)로부터 V_G 를 산정하기 위한 각 변수들의 계산을 한다.

3.4.5 각 재료들의 단위용적 및 단위질량을 계산

골재의 단위용적질량은 골재의 흡수율을 고려하여 포

화된 질량측면에서 나타내어야 한다.

3.4.6 CO₂ 발생량 검토

산출된 콘크리트 배합설계의 CO₂ 발생량을 평가하여 목표 CO₂ 발생량에 만족하는지 검토한다. 하지만 만족하지 않는 경우에는 2단계 결합재 설계부터 재산정한다.

이상의 절차에 대해 저탄소 경량골재 콘크리트 배합설계의 예를 다음에 나타내었다.

배합설계예시: $f_{ck} = 24$ MPa, $S_i = 200$ mm,
 $\gamma_{con} = 1650$ kg/m³, $v_A = 0.035$, CO₂ 저감률=20%

- $f_{cr} = 1.17 \times 24 \approx 28.1$ MPa
- 식 (5) 또는 Fig. 7을 이용하여 CO₂ 저감률에 따른 천연모래 치환율 결정.

$$R_{FS} = 1.0$$

- 식 (9)를 이용하여 목표성능에 따라 W/C 결정.

$$\begin{aligned} \frac{W}{C} &= 0.72 \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \left(\frac{\gamma_{con}}{\gamma_0} \right) \left(\frac{f_0}{f_{ck}} \right) \\ &= 0.72 \left(\frac{1}{0.035} \right)^{0.2} \left(\frac{1650}{2300} \right) \left(\frac{10}{28.1} \right) = 0.36 \end{aligned}$$

- 굵은골재 용적비를 산정하기 위한 각 변수들의 계산.

$$\begin{aligned} A_1 &= W_0 \left(\frac{1}{2 - R_{FS}} \right)^{0.1} \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \left(\frac{S_i}{S_0} \right)^{0.5} \\ &= 100 \left(\frac{1}{1} \right)^{0.1} \left(\frac{1}{0.035} \right)^{0.2} \left(\frac{200}{300} \right)^{0.5} = 160 \text{ kg/m}^3 \\ q_1 &= \rho_{GL} \left(\frac{1}{\gamma_{GL}} - \frac{1}{\gamma_{FS}} \right) = 729 \left(\frac{1}{1210} - \frac{1}{2600} \right) = 0.322 \\ q_2 &= \frac{\gamma_{con} - 120}{\gamma_{FS}} + v_A - 1 = \frac{1650 - 120}{2600} + 0.035 - 1 = -0.38 \\ q_3 &= A_1 \left(\frac{1}{\gamma_W} + \frac{1}{\gamma_C X_1} - \frac{1.25}{\gamma_{FS} X_1} \right) \\ &= 160 \left(\frac{1}{1000} + \frac{1}{3140 \times 0.36} - \frac{1.25}{2600 \times 0.36} \right) = 0.09 \end{aligned}$$

- 식 (11)로부터 굵은골재 용적비는 0.85

- 각 재료들의 단위용적 계산.

$$\begin{aligned} v_W &= \frac{A_1}{\gamma_W V_G} = \frac{160}{1000 \times 0.85} = 0.188 \text{ m}^3; \\ v_C &= \frac{A_1}{\gamma_C X_1 V_G} = \frac{160}{3140 \times 0.36 \times 0.85} = 0.167 \text{ m}^3; \\ v_{GL} &= \frac{\rho_{GL} V_G}{\gamma_{GL}} = \frac{729 \times 0.85}{1210} = 0.511 \text{ m}^3; \\ v_{FS} &= [1 - (0.188 + 0.167 + 0.511 + 0.035)] = 0.099 \text{ m}^3. \end{aligned}$$

Table 2 Comparison of experimental values measured using concrete proportioned by proposed procedure

Mixture	Targeted requirements				R_{FS}	Content per unit volume of concrete (kg/m ³)						CO ₂ -kg/FU
	S_i (mm)	f_{ck} (MPa)	γ_{co2} (%)	γ_{con} (kg/m ³)		W	W_{net}	C	G_L	F_S	F_L	
1	200	24	0	1650	0	255	228	708	507	0	249	716.3
2	200	24	20	1650	1	188	158	523	736	262	0	543.2

g) 각 재료들의 단위용적질량 계산.

$$W = \nu_W \times \gamma_W = 0.188 \times 1000 = 188 \text{ kg/m}^3;$$

$$C = \nu_C \times \gamma_C = 0.167 \times 3140 = 523 \text{ kg/m}^3;$$

$$G_L = \nu_{GL} \times \gamma_{GL} (1 + \omega_{GL}) = 0.511 \times 1210 \times 1.19 = 736 \text{ kg/m}^3;$$

$$F_S = \nu_{FS} \times \gamma_{FS} (1 + \omega_{FS}) = 0.099 \times 2600 \times 1.019 = 262 \text{ kg/m}^3.$$

h) 경량골재의 함수량에 대한 실제 물의 양을 계산.

- 경량 굵은골재에 의한 물

$$= (736/1.19) \times 1.23 - 736 = 24.74 \text{ kg/m}^3$$

- 천연모래에 의한 물

$$= (262/1.019) \times 1.04 - 262 = 5.4 \text{ kg/m}^3$$

- 골재의 표면수를 고려한 실제 단위수량

$$= 188 - 24.74 - 5.4 = 158 \text{ kg/m}^3$$

이상의 배합에 따른 CO₂ 발생량은 Jung and Yang¹³⁾이 제시한 CO₂ 평가방법을 이용해서 계산하면 배합단계에서의 총 CO₂ 발생량은 543.2 CO₂-kg이다. 참고로 위 목표 값에 대해 전경량 콘크리트 배합을 하면, 그 때의 CO₂ 배출량은 약 716.3 CO₂-kg으로 평가된다(Table 2). 따라서 본 모래경량 콘크리트 배합절차는 콘크리트 목표 성능을 만족하면서 CO₂ 저감을 고려한 시험배합표의 결정을 위해 활용될 수 있다.

4. 결 론

LWAC 생산단계에서 목표성능을 만족시키면서 CO₂ 배출량을 저감시키기 위한 천연모래 치환율 결정 및 그에 따른 배합설계 절차를 제시하였다. 본 연구에서는 천연경량골재가 아닌 인공경량골재와 천연모래의 LCI를 사용하였으며, CO₂ 저감에 기반한 LWAC 배합설계 절차에 대한 기초연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) LWAC와 NWC 모두 f_{ck} 의 증가와 함께 C_i 가 감소하였으며, LWAC의 C_i 가 동일압축강도에서 NWC에 비해 약간 크게 나타났다. $V_{G,i}$ 는 f_{ck} 의 증가와 함께 감소하였다.
- 2) 천연모래 치환율 증가와 함께 전경량 콘크리트 대비 CO₂ 저감률이 증가하였으며, 천연모래의 치환율과 CO₂ 저감률의 관계는 선형으로 모델링 될 수 있었다. 이를 통해 목표 CO₂ 저감률과 사용되는 천연모래의 치환율을 결정할 수 있다.

3) 제시된 저탄소 경량골재 콘크리트 배합절차를 이용하면, 목표성능(압축강도, 슬럼프, 공기량 및 CO₂ 저감률)에 대해 경량골재의 단위용적질량 및 W/C의 결정뿐만 아니라 제시된 배합표에서 CO₂ 배출량을 쉽게 산정할 수 있다.

감사의 글

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

References

1. ACI Committee 211. *Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98)*, American Concrete Institute, 1998, p.20.
2. Zhang, M. H., and Gjorv, O. E., "Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol.88, No.3, 1991, pp.240-247.
3. Shin, S. W., and Choi, M. S., "Applications and Prospection of Structural Lightweight Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.10, No.4, 1998, pp.16-26.
4. Yang, K. H., Oh, S. J., and Song, J. K., "Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag-Based Concrete Using Lightweight Aggregates," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.20, No.3, 2008, pp.405-412.
5. Sim, J. I., "The Influence of Unit Weight of Concrete on Size Effect of Compressive Strength, Direct Tensile Strength and Fracture Energy," *PhD Dissertation*, Kyonggi University 2013, p.203.
6. Kim, J. H., Kim, S. H., Sa, S. H., Ji, S. W., Choi, S. K., and Seo, C. H., "An Experimental Study on the Physical Properties of Lightweight Concrete according to Aggregate Union," *Proceeding of Korea Concrete Institute*, Vol.22, No.1, 2010, pp.225-226.
7. Seo, E. A., and Yang, K. H., "Life Cycle CO₂ Assessment of Light Weight Concrete according to the Replacement Level of Natural Sand," *Proceeding of the Korea Concrete Institute*, Vol.26, No.2, 2014, pp.669-670.
8. Sim, J. I., and Yang, K. H., "Air Content, Workability and Bleeding Characteristics of Fresh Lightweight Aggregate Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.22,

- No.4, 2010, pp.559-566.
9. Sim, J. I., and Yang, K. H., "Mechanical Properties of Lightweight Aggregate Concrete according to the Substitution Rate of Natural Sand and Maximum Aggregate Size," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.5, 2011, pp.551-558.
 10. Chen, H. J., Yen, T., and Lai, T. P., "A New Proportion Method of Light-Weight Aggregate Concrete based on Dividing Strength," Holand et al.(Eds), *International Symposium for Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Vol.20, No.4, 1995, pp.463-471.
 11. Bogas, J. A., and Gomes, A., "A Simple Mix Design Method for Structural Lightweight Aggregate," *Materials and Structures*, Vol.46, 2013, pp.1919-1932.
 12. 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.
 13. Jung, Y. B., and Yang, K. H., "Mixture- Proportioning Model for Low-CO₂ Concrete Considering the Type and Addition Level of Supplementary Cementitious Materials," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.27, No.4, 2015, pp.427-434.
 14. <http://www.edp.or.kr/>
 15. Tae, S. H., Development of Mix Design Technique of Concrete for Reduction of CO₂ Emission, *Technical Report*, School of Architecture & Architectural Engineering, Hanyang University, 2014, p.87
 16. <http://www.ecoinvent.com/>
 17. 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*, Vol.103, 2015, pp.774-783.
 18. Yang, K. H., Kim, G. H., and Choi, Y. H., "An Initial Trial Mixture Proportioning Procedure for Structural Lightweight Aggregate Concrete," *Construction and Building Materials*, Vol.55, 2014, pp.431-439.
 19. Yang, K. H., Modeling of the Mechanical Properties of Structural Lightweight Concrete based on Size Effects, *Technical Report*, Department of Plant-Architectural Engineering Kyonggi University, 2011, p.89.

요약 이 연구의 목적은 인공경량골재 콘크리트의 생산에서 CO₂ 배출량을 저감시킬 수 있는 천연모래 치환 기반의 배합설계 절차를 제시하는 것이다. 379개의 경량골재 콘크리트 배합 데이터를 사용하여 CO₂ 배출량과 콘크리트의 압축강도에 대한 천연모래의 치환율의 영향을 평가하였다. Yang et al.이 제시한 배합설계절차 및 데이터베이스를 이용한 비선형 회귀 분석에 기반하여 목표 성능(압축강도, 초기 슬럼프, 공기량 및 CO₂ 저감률)을 만족하기 위한 천연모래의 치환율 및 콘크리트 배합설계를 결정할 수 있는 간단한 모델을 제시하였다. 뿐만 아니라, 제안된 모델식은 주어진 경량골재 콘크리트 배합표에서 CO₂ 배출량을 직접 계산하는데 효율적으로 이용될 수 있다.

핵심용어 : 저탄소 콘크리트, 경량골재 콘크리트, 천연모래, 배합설계