

경량골재 콘크리트의 배합설계 및 목표 콘크리트 기건밀도의 결정

Mix Design of Lightweight Aggregate Concrete and Determination of Targeted Dry Density of Concrete

양 근 혁*

Yang, Keun-Hyeok

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

Abstract

The objective of the present study is to establish a straightforward mixture proportioning procedure for structural lightweight aggregate concrete (LWAC), and evaluate the selection range of the targeted dry density of concrete against the designed concrete compressive strength. In developing this procedure, mathematical models were formulated based on a nonlinear regression analysis over 347 data sets and two boundary conditions of the absolute volume and dry density of concrete. The proposed procedure demonstrated the appropriate water-to-cement ratio and dry density of concrete to achieve the designed strength decrease with the increase in volumetric ratio of coarse aggregates. This trend was more significant in all-LWAC than in sand-LWAC. Overall, the selection range of the dry density of LWAC exists within a certain range according to the designed strength, which can be obtained using the proposed procedure.

Keywords : lightweight aggregate concrete, mixture proportioning, dry density, compressive strength.

1. 서 론

1.1 연구의 목적

구조용 경량골재 콘크리트(lightweight aggregate concrete, LWAC)는 일반적으로 KS F 2534에 부합하는 경량골재를 사용하고, 28일 압축강도가 15 MPa 이상, 기건 밀도가 1,400~2,000 kg/m³인 콘크리트로 정의된다[1]. 경량골재 콘크리트는 지속가능 기술 측면에서 다음과 같은 다양한 장점을 갖는다; 낮은 열전도율은 건축물의 냉난방을 위해 소비되는 에너지와 에너지 사용에 따른 CO₂ 배출량을 절감할 수 있으며, 낮은 밀도는 부재의 고정하중을 줄임으로써 단면 크기를 줄여 천연자원 소비를 줄일 수 있다[2]. 전 세계적으로 지속가능 건설기술에 대한 요구가 증가하고 있으

며, 특히 국내에서도 2013년도부터 연간 약 20만 m³의 인공경량골재 생산이 계획되어 있어 LWAC의 적용에 대한 관심은 지속적으로 높아지고 있다. 하지만 LWAC의 현장적용에서는 목표성능에 대한 합리적인 배합설계 방법론 및 유사 품질의 골재를 사용한 기존 배합에의 부족으로 콘크리트 생산단계에서부터 어려움이 발생하고 있는 실정이다[3-5].

일반적으로 LWAC의 배합설계는 사용골재의 높은 흡수율과 낮은 비중으로 인해 일반골재 콘크리트에 비해 다소 복잡하고 고려해야 할 요소들이 많다. 특히 일반골재 콘크리트와는 달리 배합에 이용되는 경량골재의 비중 및 단위용적중량과 투입 체적은 콘크리트의 압축강도에 중요한 영향을 미친다. 이로 인해 LWAC의 압축강도와 기건밀도는 중요한 상관관계가 있지만 배합설계 단계에서는 목표 슬럼프와 압축강도만을 주요 요소로 고려하고 있다. 경량골재 콘크리트 배합설계에 대한 지침을 제시하고 있는 ACI 211.2-98[4]에서도 콘크리트 기건밀도에 대한 목표값을 설계 입력요소로서 고려하지 않고 있다. 하지만 LWAC의 장점을 고려할 때 콘크리트의 기건밀도는

Received : May 29, 2013

Revision received : August 7, 2013

Accepted : September 2, 2013

* Corresponding author : Yang, Keun-Hyeok

[Tel: 82-31-249-9703, E-mail: yangkh@kgu.ac.kr]

©2013 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

압축강도와 함께 배합설계 단계에서 목표성능으로 중요하게 다루어져야만 한다.

본 연구의 목적은 목표성능에 대한 LWAC의 배합설계 절차를 제시하고, 이에 기반하여 골재 체적 및 설계강도에 따른 콘크리트 기건밀도의 변화를 평가하는 것이다. 배합설계 단계에서 설정한 콘크리트의 목표성능은 초기 슬럼프, 공기량, 28일 압축강도 및 기건밀도이다. 전 경량 및 모래 경량 골재 콘크리트의 전반적인 범위를 포함하기 위하여 일반 잔골재 대비 경량 잔골재 치환수준을 사용골재들의 물리적 특성과 함께 입력요소로서 고려하였다. 목표성능들에 대한 다양한 변수들의 영향을 고려하기 위하여 347 LWAC 실험결과를 분석하고 설계식을 제시하였다. 제안된 배합설계 절차로부터 설계강도에 대한 목표 콘크리트 기건밀도의 결정방법을 평가하였다.

1.2 연구의 방법 및 범위

347개의 배합에 대한 데이터베이스[5]를 기반으로 구조용 LWAC의 슬럼프, 압축강도 및 기건밀도에 대한 다양한 변수들의 영향을 비선형 회귀분석을 통해 파악하였다. 기존 배합에서 인공경량골재는 주로 플라이애쉬 또는 점토를 소성팽창시킨 것들을 이용하였는데, 굵은골재와 잔골재의 건조밀도는 각각 1000~1600 kg/m³과 1000~1850 kg/m³의 범위에 있었다. 굵은골재의 최대크기는 19 mm 또는 25 mm가 주로 이용되었으며, 그 조립률은 6.2~7.28 범위에 있었다. 콘크리트의 28일 압축강도(f_{ck})는 11~57 MPa 범위에 있었으며, 기건밀도(γ_{con})의 범위는 1,236~2,024 kg/m³이었다. 일반적으로 동일 물-시멘트 비(W/C)에서 일반 잔골재 양이 많을수록 f_{ck} 와 γ_{con} 이 증가하였다. 주요 배합 변수들의 범위는 W/C가 0.28~0.65, 단위수량(ρ)이 139~260 kg/m³, 굵은골재 체적밀도에 대한 겉보기 밀도의 비($V_G = \gamma_{GL} v_{GL} / \rho_{GL}$)는 0.33~0.82로 있었는데, 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.

경량골재 콘크리트의 배합설계 절차를 제시하기 위하여 슬럼프 및 압축강도의 평가 모델을 비선형 회귀분석에 의해 제시하였다. 기존 LWAC 데이터들의 제공원들은 골재의 품질, 배합, 타설, 양생 및 측정방법 등에 있어서 매우 다양한 조건으로 있기 때문에 높은 상관계수(R^2)를 얻기가 매우 어려웠다. 본 연구에서 제시하는 배합설계 절차는 LWAC의 목표성능에 대한 첫 번째 시험

배합을 제시하기 위한 것이다. 따라서 모델제시를 위한 회귀분석에서 R^2 는 비교적 용인될 수 있는 범위로 설정하였으며, 그에 따라 각 영향변수들을 시행착오 방법에 의해 조절하였다.

2. 배합설계 모델

2.1 압축강도 평가모델

일반적으로 일반 천연암석은 밀도의 변화가 매우 작기 때문에 보통중량 콘크리트의 γ_{con} 변화는 크지 않으며, 이에 따라 그 압축강도에 대한 γ_{con} 의 영향은 특별히 고려하지 않는다. 하지만 경량골재를 이용한 콘크리트의 경우 일반 천연골재 함유량에 따라 f_{ck} 와 γ_{con} 이 증가한다. Figure 1에는 LWAC에서 γ_{con} 과 f_{ck} 의 관계를 나타내었다. 일반적으로 콘크리트의 f_{ck} 는 W/C와 공기량(v_A)에 반비례한다[6]. 반면 경량골재 콘크리트의 f_{ck} 는 동일 W/C에서 γ_{con} 의 증가와 함께 증가하였다. 이는 γ_{con} 이 낮은 LWAC는 목표 압축강도를 얻기 위해서는 더 낮은 W/C가 필요할 수 있음을 의미한다. 경량골재 콘크리트의 f_{ck} 에 대한 각 영향변수들을 회귀분석한 결과 다음 식을 얻을 수 있었다 (Figure 2).

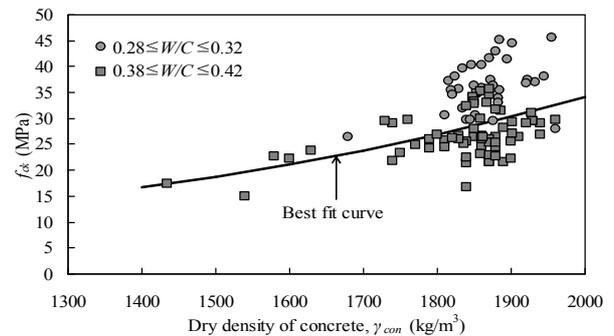


Figure 1. Effect of dry density of concrete on its strength

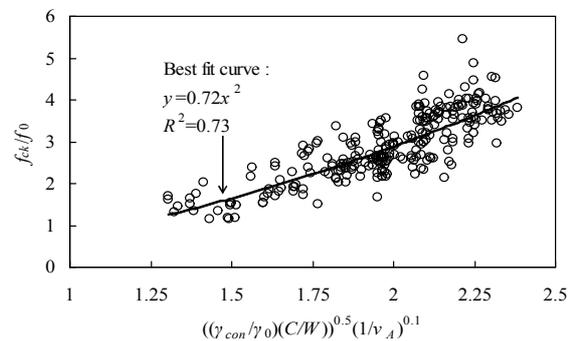


Figure 2. Regression analysis for compressive strength.

$$\frac{f_{ck}}{f_0} = 0.72 \left(\frac{\gamma_{con}}{\gamma_0} \frac{C}{W} \right)^{0.5} \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \text{-----} (1)$$

여기서 f_0 (=10 MPa)는 콘크리트 압축강도의 참고값이며, γ_0 (=2300 kg/m³)는 콘크리트 기건밀도의 참고값이다. 식 (1)로부터 목표 성능 (압축강도, 기건밀도 및 공기량)에 대한 소요 W/C 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W/C = 0.72 \left(\frac{f_0}{f_{ck}} \frac{\gamma_{con}}{\gamma_0} \right) \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \text{-----} (2)$$

2.2 단위수량(W)의 결정

목표 슬럼프(s_i)를 얻기 위한 콘크리트의 단위수량(W)은 굵은골재의 최대크기, 조립률 및 함유량과 공기량, 감수제의 종류 및 첨가량 등에 의해 영향을 받는다. 감수제는 콘크리트 구성을 위한 필수 재료가 아니며, 감수제 첨가가 콘크리트 슬럼프 변화에 미치는 영향을 일반화하는 것은 관련 자료들의 부족으로 비현실적이다. 이에 본 연구에서는 감수제가 첨가되지 않은 LWAC를 대상으로 슬럼프 평가모형을 제시하였다. 콘크리트의 s_i 는 일반적으로 W , V_G 및 v_A 가 증가할수록 증가한다[6]. 한편 LWAC의 s_i 는 동일 배합조건에서 일반 잔골재 대신 경량 잔골재 함유량이 증가할수록 증가한다. 이는 경량 잔골재의 형상은 일반적으로 일반 잔골재에 비해 표면이 매끄러운 구형이며, 배합 전 침수에 따른 함수량 (이 함수량은 배합 시 보정이 요구되지만)이 다소 높기 때문이다. 이들 영향변수들의 회귀분석으로부터 LWAC의 슬럼프(s_i)는 다음과 같이 제시될 수 있었다 (Figure 3).

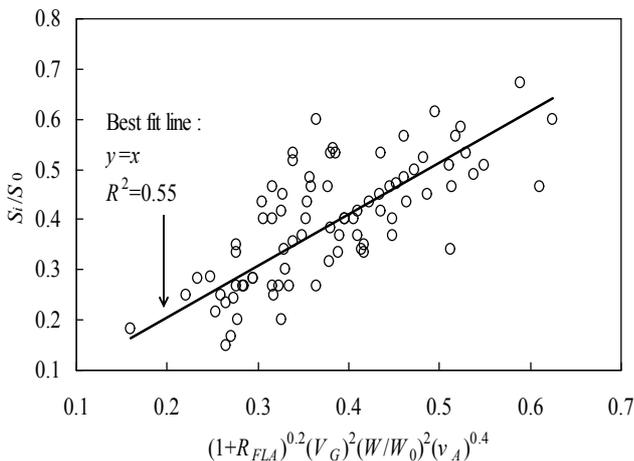


Figure 3. Regression analysis for initial slump.

$$\frac{S_i}{S_0} = (1 + R_{LFA})^{0.2} \left(V_G \frac{W}{W_0} \right)^2 (v_A)^{0.4} \text{-----} (3)$$

여기서 S_0 (=300 mm)는 슬럼프의 참고값이며, W_0 (=100 kg/m³)은 단위수량의 참고값이며, R_{LFA} (= $\frac{v_{FL}}{v_{FS} + v_{FL}}$)는 콘크리트 단위용적당 전체 잔골재 체적에 대한 경량 잔골재 체적(v_{FL})의 비이며, v_{FS} 는 일반 잔골재 단위용적이다. Figure 3에 나타난 회귀분석 결과는 비교적 낮은 R^2 값을 보인다. 하지만 ACI 211.2-98[4] 및 일본건축학회[7]에서 경량골재 콘크리트에서 목표 슬럼프에 대한 단위수량의 결정방법은 경험적으로 골재직경 및 잔골재율에 따른 설계용 표만을 제시하고 있어, 다양한 목표 슬럼프 및 배합조건에서 그 적용의 한계가 뚜렷하다. 또한 ACI 211.2-98[4]에서 제시하는 절차를 통하여 결정된 단위수량을 사용하였을 때 콘크리트의 슬럼프는 목표값과 2배 이상의 오차를 보인다 [5]. 따라서 식 (3)은 LWAC의 최초 시험배합을 위해 목표 슬럼프 및 배합조건에 따른 단위수량의 결정에 적절히 이용될 수 있다. 식 (3)으로부터 LWAC의 목표슬럼프에 대한 단위수량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \frac{W_0}{V_G} \left(\frac{1}{1 + R_{LFA}} \right)^{0.1} \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \left(\frac{S_i}{S_0} \right)^{0.5} \text{ (kg/m}^3\text{)} \text{----} (4)$$

2.3 V_G 의 결정

ACI 211.2-98[4]은 굵은골재 크기와 조립률에 따라 목표 슬럼프에 대한 V_G 의 값에 대한 경험적 설계표를 제시하고 있다. 하지만 식 (3)에서 나타낸바와 같이 LWAC의 유동성은 V_G 뿐만 아니라 W , R_{LFA} 및 v_A 등의 다양한 변수에 의해서도 영향을 받는다. 더구나 LWAC 배합을 위한 V_G 의 결정은 사용하는 골재의 물리적 특성 및 설계강도하에서 목표 γ_{con} 이 달성될 수 있는지도 고려되어야만 한다. 본 연구에서는 V_G 값의 결정에서 이들 변수들의 영향을 고려하기 위하여 두 경계조건하에서 수학적 모델을 설정하였다. 첫 번째 경계조건으로서 배합에 이용된 각 재료의 단위용적중량과 콘크리트 γ_{con} 의 상관관계를 적용하였다. 콘크리트의 수화반응을 위한 최소 물량은 시멘트 양의 20~25% 범위에 있으며 수분 증발 후 γ_{con} 는 투입재료들의 단위용적중량과 직접적인 관계가 있다[6, 7]. 이 관계를 파악하기 위하여 회귀분석을 수행하였으며 (Figure 4), 그 결과 LWAC의 γ_{con} 은 배합설계로부터 다음과 같이 평가될 수 있었다.

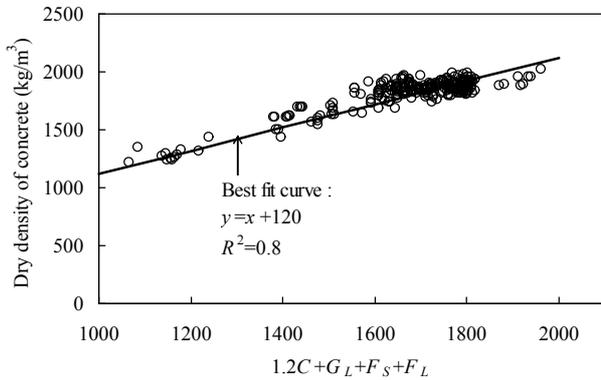


Figure 4. Regression analysis for dry density of concrete.

$$\gamma_{com} = 1.25C + G_L + F_S + F_L + 120 \quad (\text{kg/m}^3) \quad \text{--- (5)}$$

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

콘크리트 배합설계를 위한 V_G 값의 결정에서 두 번째 경계조건은 식 (6)에 나타난 절대용적 개념을 이용하였다.

$$v_W + v_C + v_{GL} + v_{FS} + v_{FL} + v_A = 1 \quad \text{--- (6)}$$

여기서 v_W , v_C , v_{GL} , v_{FS} 및 v_{FL} 은 콘크리트 단위체적 당의 각각 물, 시멘트, 경량 굽은골재, 일반 잔골재 및 경량 잔골재의 체적이다.

식 (4) 및 R_{LFA} 와 V_G 에 대한 정의로부터 식 (6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{A_1}{\gamma_W V_G} + \frac{A_1}{\gamma_C X_1 V_G} + \frac{\rho_{GL} V_G}{\gamma_{GL}} + \frac{v_{FL}}{R_{LFA}} + v_A = 1 \quad \text{--- (7)}$$

$$A_1 = W_0 \left(\frac{1}{1 + R_{LFA}} \right)^{0.1} \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \left(\frac{S_i}{S_0} \right)^{0.5} \quad (\text{kg/m}^3) \quad \text{--- (8)}$$

여기서 X_1 은 W/C 의 값이며, γ_W 와 γ_C 는 각각 물과 시멘트의 밀도이다. 콘크리트 단위체적 당 골재의 양은 골재의 단위부피와 밀도의 곱으로 나타낼 수 있으므로 식 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$1.25 \frac{A_1}{X_1 V_G} + \gamma_{GL} v_{GL} + \gamma_{FS} v_{FL} \left(\frac{1 - R_{LFA}}{R_{LFA}} \right) + \gamma_{FL} v_{FL} \quad \text{--- (9)}$$

$$+ 120 - \gamma_{com} = 0$$

여기서 γ_{FS} 와 γ_{FL} 은 각각 일반 잔골재와 경량 잔골재의 겉보기 밀도이다.

식 (7)을 v_{FL} 에 대해 정리하고 식 (9)에 대입하면 다음과 같은 V_G 의 2차 함수를 얻을 수 있다.

$$q_1 V_G^2 + q_2 V_G + q_3 = 0 \quad \text{--- (10)}$$

$$q_1 = \left[-\rho_{GL} + \frac{\gamma_{FL} R_{LFA} \rho_{GL}}{\gamma_{GL}} \right] \left[\frac{1}{(1 - R_{LFA}) \gamma_{FS}} \right] + \frac{\rho_{GL}}{\gamma_{GL}} \quad \text{--- (11.a)}$$

$$q_2 = \frac{\gamma_{com} - \gamma_{FL} R_{LFA} (1 - v_A) - 120}{(1 - R_{LFA}) \gamma_{FS}} + v_A - 1 \quad \text{--- (11.b)}$$

$$q_3 = \frac{\left[\gamma_{FL} R_{LFA} A_1 \left(\frac{1}{\gamma_W} + \frac{1}{\gamma_C X_1} \right) - \frac{1.25 A_1}{X_1} \right]}{(1 - R_{LFA}) \gamma_{FS}} \quad \text{--- (11.c)}$$

$$+ \frac{A_1}{\gamma_W} + \frac{A_1}{\gamma_C X_1}$$

전 경량골재 콘크리트($R_{LFA} = 1$)의 경우 식 (11.a)~(11.c)에서 나타낸 $q_1 \sim q_3$ 는 다음 식 (12.a)~(12.c)에 의해 산정된다.

$$q_1 = \rho_{GL} \left(\frac{1}{\gamma_{GL}} - \frac{1}{\gamma_{FL}} \right) \quad \text{--- (12.a)}$$

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

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

2.4 배합설계 절차

경량골재 콘크리트의 배합설계를 위한 목표성능은 초기 슬럼프, 공기량, 28일 압축강도 및 기전밀도이다. 일반적으로 LWAC에서 공기량은 0.035 ± 0.015 가 추천되므로[4], 공기량에 대한 특별한 요구가 없을 경우 그 값은 0.035를 이용한다. 사용골재들의 물리적 성능 및 배합 시 함수량도 입력요소로서 고려되어야 한다. 목표성능 및 골재의 물리적 성능에 대해 식 (2)를 이용하여 W/C 값을 결정하고 식 (10)에 의해 V_G 값을 결정하면 콘크리트 구성요소들의 단위용적중량은 다음에 의해 산정할 수 있다.

$$W = A_1 / V_G \quad \text{--- (13)}$$

$$C = A_1 / X_1 V_G \quad \text{--- (14)}$$

$$G_L = \rho_{GL} V_G \quad \text{--- (15)}$$

$$F_L = \gamma_{FL} R_{LFA} [1 - (v_W + v_C + v_{GL} + v_A)] \quad \text{--- (16)}$$

$$F_S = \gamma_{FS} (1 - R_{LFA}) [1 - (v_W + v_C + v_{GL} + v_A)] \quad \text{--- (17)}$$

여기서 w_{GL} , w_{FL} , w_{FS} 는 각각 경량 굽은골재, 경량 잔골재 및 일반 잔골재의 흡수율이다. 식 (6)과 식 (7)로부터

$$v_W, v_C \text{ 및 } v_{GL} \text{은 각각 } \frac{A_1}{\gamma_W V_G}, \frac{A_1}{\gamma_C X_1 V_G} \text{ 및 } \frac{\rho_{GL} V_G}{\gamma_{GL}} \text{와 같다.}$$

일반적으로 경량골재는 배합 시 부유에 의한 재료분리를 방지하기 위해 사전에 충분히 침수시킨다. 따라서 식 (15)~(17)에서 산정한 각 골재의 단위용적중량에서 골재의

함수량을 단위수량에서 보정해야 할 필요가 있다.

목표 f_{ck} 와 γ_{con} 이 서로 비 현실적인 경우에는 (예를 들어 높은 f_{ck} 와 상당히 낮은 γ_{con}) 식 (10)의 해가 존재하지 않을 수 있다. 이러한 경우 설계강도에 따라 합리적인 목표 γ_{con} 값을 적절히 조절해야 한다. 또한 본 연구에서는 제시하지 않았지만 목표 f_{ck} 에 대한 배합강도를 고려하여야 한다[5]. Nowak and Szerszen[8]은 배합강도를 결정하기 위한 변동계수가 일반 콘크리트보다는 LWAC에서 크게 있음을 보였다. 이를 고려하여 Yang[5]은 LWAC의 배합강도를 1.17 f_{ck} 로 제시하였다.

이상에서 제시한 LWAC의 배합설계 절차의 예를 부록 A에 자세히 나타내었다.

3. 콘크리트의 목표 기건밀도 설정

경량골재 콘크리트의 배합설계 절차로부터 설계강도와 임의의 V_G 값에 대해 다음 식에 의한 W/C 값($=X_1$)이 결정되면 식 (5)에 의해 γ_{con} 을 평가할 수 있다.

$$p_1 X_1^2 + p_2 X_1 + p_3 = 0 \quad (18)$$

$$p_1 = f_{ck} \gamma_0 \quad (19.a)$$

$$p_2 = -0.72 f_0 \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \times \quad (19.b)$$

$$p_3 = 0.72 f_0 \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \times \quad (19.c)$$

$$\xi = (1 - v_W - v_{GL} - v_A) \left[\left(\frac{A_1}{\gamma_C V_G} \right) (-1.25 \gamma_C + \gamma_{FS}(1 - R_{LFA}) + \gamma_{FL} R_{LFA}) \right] \quad (19.d)$$

Figure 5에는 임의의 V_G 값에 대해 f_{ck} , W/C 및 γ_{con} 의 관계를 나타내었다. 일반적으로 소요 f_{ck} 에 대한 W/C 및 γ_{con} 은 V_G 값이 증가할수록 감소하는데, 이 경향은 콘크리트 강도의 증가와 함께 그리고 모래 경량골재 콘크리트 ($R_{LFA} = 0$)보다는 전 경량골재 콘크리트($R_{LFA} = 1$)에서 현저하였다. 또한 Figure 5는 LWAC의 설계강도에 대해 목표 γ_{con} 의 범위를 설정하기 위해 이용될 수도 있다. 예를 들면, 일반적으로 콘크리트에서 V_G 값이 0.5~0.75임을 고려하면 설계강도가 30 MPa인 전 경량골재 콘크리트에서 목표로 설정할 수 있는 γ_{con} 의 범위는 1,580~1,700 kg/m³이 적절하다. 따라서 Figure 5는 LWAC의 간편한 설계용 도표의

일례로서 목표 압축강도에 대해 콘크리트 구성요소들의 단위용적중량을 결정하기 위해 소요 γ_{con} 의 선택 및 W/C 를 결정하고 그에 따른 V_G 값을 결정하는데 이용될 수 있다. 목표 슬럼프 값이 바뀌면 식 (8)을 이용하여 A_1 값을 다시 산정하고 Figure 5를 수정할 수 있는데 이는 제시된 식들을 스프레드 시트에서 적용함으로써 쉽게 얻을 수 있다.

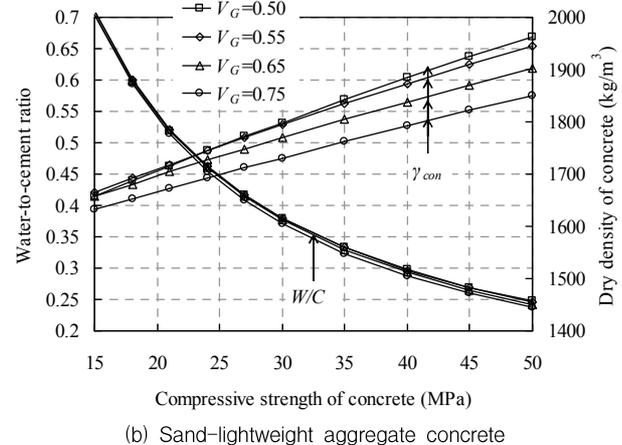
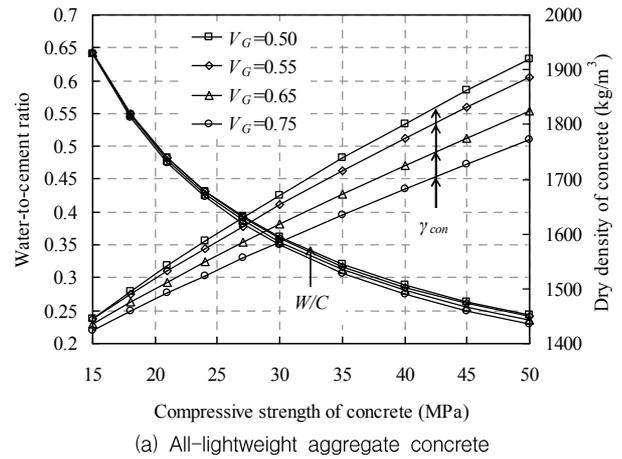


Figure 5. Water-to-cement ratio and dry density of concrete according to concrete compressive strength (Si=150 mm)

4. 결 론

경량골재 콘크리트(lightweight aggregate concrete, LWAC)의 합리적인 배합설계 절차를 제시하기 위하여 기존 347 실험데이터를 이용하여 압축강도와 슬럼프 예측모델을 제시하고 이를 이용하여 각 구성요소들의 단위용적중량을 결정하기 위한 수학적 모델을 확립하였다.

LWAC의 압축강도는 물-시멘트비와 함께 기건밀도와 밀접한 상관관계가 있으므로 이들을 평가할 수 있는 모델도 제시하였다. 본 연구에서 제시된 배합설계 절차는 기존 실험변수의 한계로 콘크리트 압축강도 15~50 MPa, 최대 골재직경 19 mm 및 25 mm로 제한되며, 혼화재 또는 감수제가 이용될 경우 본 절차로부터 결정된 각 구성요소들의 단위용적증량은 수정될 필요도 있다. 또한 경량골재의 입도 및 흡수율을 고려한 수학적 모델의 수정을 위해서는 다양한 실험연구가 뒷받침 될 필요가 있다. 경량골재 콘크리트의 배합설계 절차에 대한 모델제시로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 경량골재 콘크리트의 목표성능에 대한 배합설계 절차는 물-시멘트 비, 단위수량, 굵은골재 체적비 및 절대용적 등의 개념을 이용하여 확립될 수 있었다.
- 2) 목표 압축강도에 대한 물-시멘트비 및 콘크리트 기건밀도는 굵은골재 체적비의 증가와 함께 감소하는데, 이 경향은 콘크리트 강도의 증가와 함께 그리고 모래 경량골재 콘크리트보다는 전 경량골재 콘크리트에서 현저하였다.
- 3) 경량골재 콘크리트의 배합설계를 위한 목표성능으로서 목표 기건밀도의 설정은 설계강도에 따라 적절한 범위에서 설정되어야 하는데, 이는 식 (18)을 포함한 제안 모델들에 의해 쉽게 얻을 수 있다.

요 약

본 연구의 목적은 구조용 경량골재 콘크리트의 배합설계 절차를 확립하고, 설계강도로부터 콘크리트 목표 기건밀도의 범위를 평가하는 것이다. 본 절차를 확립하기 위해, 기존 347 실험데이터의 비선형 회귀분석 및 두 경계조건 (절대용적 및 콘크리트 기건밀도)에 기반한 수학적 모델을 구성하였다. 배합설계 모델제시 결과, 설계강도에 대한 물-시멘트비와 콘크리트 기건밀도는 굵은골재 체적비의 증가와 함께 감소하는데, 이 경향은 모래 경량보다는 전 경량골재 콘크리트에서 현저하였다. 경량골재 콘크리트의 기건단위는 설계강도에 따라 임의의 범위에서 설정되어야 하는데, 이는 제시된 모델에 의해 평가될 수 있다.

키워드 : 경량골재 콘크리트, 배합설계, 기건밀도, 압축강도

Acknowledgement

This work was supported by Kyonggi University Research Grant 2012.

References

1. Korea Concrete Institute, Standard specification of concrete, Seoul (Korea): Gimundang; 2009, 360 p.
2. Sim JI, Yang KH, Structural safety of lightweight aggregate concrete, Magazine of Korea Concrete Institute, 2011 Sep;23(5):27-32.
3. Choi JJ, Mix proportioning and constructability of lightweight aggregate concrete, Magazine of Korea Concrete Institute, 2011 Sep;23(5):18-26.
4. ACI Committee 211, Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete (ACI 211.2-98), Farmington Hills, MI: American Concrete Institute; 1998, 20 p.
5. Yang KH, Modeling of the mechanical properties of structural lightweight concrete based on size effects, Kyonggi University(Korea); 2011, Report No.: 2009-0067189, Supported by the National Research Foundation of Korea.
6. Neville AM, Properties of concrete, Edinburgh Gate: Addison Wesley Longman; 1995, 844 p.
7. AIJ, Guideline and commentary for mixture proportioning of concrete, Tokyo (Japan): Architectural Institute of Japan; 1999, 223 p.
8. Nowak AS, Szerszen MM, Reliability-based calibration for structural concrete: phase 1: University of Michigan(US); 2001, Report No.: UMCEE 01-01.

Appendix A: LWAC의 배합설계 예

- 전 경량골재 콘크리트($R_{LEA} = 1$)의 목표성능 :
 $S_i = 200$ mm, $f_{ck} = 24$ MPa, $\gamma_{con} = 1,550$ kg/m³, $v_A = 0.035$
- 사용 경량골재의 특성 : Table A.1

Table A.1. Physical properties of lightweight aggregates

Maximum size (mm)	Bulk density (kg/m ³)	Apparent density (kg/m ³)	Water absorption (%)	Fineness
19	729	1210	19	6.56
4	832	1650	14	4.34

- 배합 시 경량 굽은골재와 잔골재의 함수율은 각각 23%와 18%임.

a) 배합강도 $f_{cr}' = f_{ck} + 1.17 = 25.17$ MPa

b) 식 (2)에 의한 W/C 결정 :

$$W/C = 0.72 \left(\frac{10}{25.17} \frac{1550}{2300} \right) \left(\frac{1}{0.035} \right)^{0.2} = 0.38$$

c) V_c 값 결정을 위한 각 변수 계산

$$A_1 = 100 \left(\frac{1}{2} \right)^{0.1} \left(\frac{1}{0.035} \right)^{0.2} \left(\frac{200}{300} \right)^{0.5} = 149 \text{ kg/m}^3$$

$$q_1 = 729 \left(\frac{1}{1210} - \frac{1}{1650} \right) = 0.16$$

$$q_2 = \frac{1550 - 120}{1650} + 0.035 - 1 = -0.098$$

$$q_3 = 149 \left(\frac{1}{1000} + \frac{1}{3140 \cdot 0.38} - \frac{1.25}{1650 \cdot 0.38} \right) = -0.025$$

d) 식 (10)에 의해 V_c 를 산정하면: $V_c = 0.804$

e) 각 구성요소들의 단위용적 계산:

$$v_w = \frac{149}{1000 \cdot 0.804} = 0.185 \text{ m}^3$$

$$v_c = \frac{149}{3140 \cdot 0.38 \cdot 0.804} = 0.157 \text{ m}^3$$

$$v_{GL} = \frac{729 \cdot 0.804}{1210} = 0.484 \text{ m}^3$$

$$v_{FL} = [1 - (0.185 + 0.157 + 0.484 + 0.035)] = 0.139 \text{ m}^3$$

f) 각 구성요소들의 단위용적중량 계산:

$$W = 0.185 \cdot 1000 = 185 \text{ kg/m}^3$$

$$C = 3140 \cdot 0.157 = 492 \text{ kg/m}^3$$

$$GL = 0.484 \cdot 1210 = 586 \text{ kg/m}^3$$

$$FL = 0.139 \cdot 1650 = 229 \text{ kg/m}^3$$

g) 골재함수량을 보정한 단위수량 보정

$$- \text{경량굽은골재 함수량} = 586(0.23 - 0.19) = 23.4 \text{ kg/m}^3$$

$$- \text{경량잔골재 함수량} = 229(0.18 - 0.14) = 9.2 \text{ kg/m}^3$$

$$- \text{유효 단위수량} = 185 - 23.4 - 9.2 = 152 \text{ kg/m}^3$$