

# 바텀애시 및 준설토 기반의 인공 경량골재를 활용한 구조용 콘크리트의 배합설계 절차

## Mix Design Procedure of Structural Concrete Using Artificial Lightweight Aggregates Produced from Bottom Ash and Dredged Soils

이 경 호<sup>1</sup>

양 근 혁<sup>2\*</sup>

Lee, Kyung-Ho<sup>1</sup>

Yang, Keun-Hyeok<sup>2\*</sup>

*Department of Architectural Engineering, Graduate School, Kyonggi University, Suwon, Kyonggi-do, 16227, Korea <sup>1</sup>*

*Department of Plant-Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, Kyonggi-do, 16227, Korea <sup>2</sup>*

### Abstract

The objective of this study is to propose a reliable mixing design procedure of concrete using artificial lightweight aggregate produced from expanded bottom ash and dredged soil. Based on test results obtained from 25 mixes, empirical equations to determine water-to-cement ratio, unit cement content, and replacement level of lightweight fine aggregates were formulated with regard to the targeted performance (compressive strength, dry density, initial slump, and air content) of lightweight aggregate concrete. From the proposed equations and absolute volume mixing concept, unit weight of each ingredient was calculated. The proposed mix design procedure limits the fine aggregate-to-total aggregate ratio by considering the replacement level of lightweight fine aggregates, different to previous approach for expanded fly ash and clay-based lightweight aggregate concrete. Thus, it is expected that the proposed procedure is effectively applied for determining the first trial mixing proportions for the designed requirements of concrete.

Keywords : lightweight aggregate concrete, mix design, target performance

### 1. 서 론

구조용 경량골재 콘크리트(lightweight aggregate concrete, LWAC)는 일반적으로 천연골재 대비 절건밀도가 약 40~70% 수준의 골재를 사용한 콘크리트를 뜻한다. 국내 콘크리트 표준시방서에서는 잔골재 및 굵은골재의 절건 밀도가 각각  $1,800\text{kg/m}^3$  및  $1,500\text{kg/m}^3$  미만의 경량골재를 사용한 콘크리트로 기건 밀도가  $14,00\sim 2,000\text{kg/m}^3$ 인

콘크리트를 구조용 경량골재 콘크리트로 정의하고 있다[1]. LWAC의 낮은 밀도는 구조물의 고정하중 감소를 통하여 수직·수평 부재의 단면을 줄일 수 있다. 이는 건축물 내부 활용공간의 증가 및 구조물의 밑면전단력 감소효과도 있다 [2]. 특히 기존 건축물의 증축 시 LWAC의 적용은 낮은 추가 고정하중을 통하여 하부구조의 보강을 최소화 할 수 있다.

우리나라는 화강암 등의 천연골재자원이 비교적 풍부하고, 인공 경량골재의 주 원료인 팽창점토나 팽창혈암 등이 부족한 관계로 인공 경량골재에 대한 연구는 다소 미흡하였다. 하지만 2000년대 초반부터 국내에도 석탄회 및 준설토를 이용한 인공 경량골재 생산 시스템이 확립됨에 따라 LWAC에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 인공 경량골재의 물리적 특성 및 입형상태는 사용 원재료의 화학적 조성 및 분말도 등에 의해 중요한 영향을 받는다. 골재의 강성

Received : December 28, 2017

Revision received : January 18, 2018

Accepted : February 20, 2018

\* Corresponding author : Yang, Keun-Hyeok

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

©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

및 입형상태는 시멘트 페이스트와 골재 계면에서의 상호작용에 중요한 영향을 미치는데, 이는 결과적으로 콘크리트의 유동성 및 역학적 특성을 변화시킨다[3]. 따라서 LWAC의 배합특성 및 역학적 특성은 인공 경량골재의 원 재료에 따라 검토될 필요가 있다. 하지만 석탄회 및 준설토 기반의 인공 경량골재를 사용한 콘크리트에 대한 배합절차 및 그 특성에 대한 연구는 아직도 매우 부족한 실정이다.

콘크리트의 제조 시 그 성능을 예측하고 목표성능을 만족시키기 위해서는 사용재료를 고려한 배합설계 절차가 필요하다. 특히 LWAC의 가장 큰 장점은 경량성으로 콘크리트의 배합설계 시 목표 성능으로 절건 밀도가 고려되어야 한다. 하지만 국내의 설계기준에서는 목표성능으로 절건 밀도가 고려된 LWAC의 배합설계에 대해서 전문적으로 다루고 있지 않다. 국내 콘크리트 표준시방서에서는 LWAC의 배합설계 절차에 대한 제시는 없으며, 단순히 함수상태 및 입도 분포 보정을 통해 시방배합과 현장배합을 구분하여 표시하도록 하고 있다. 미국 콘크리트학회의 구조용 LWAC 기준(ACI 211.2)[4]에서는 비중법 및 부피법에 의한 배합설계 절차를 제시하고 있지만 목표성능으로 절건 밀도를 고려하고 있지 않다. JASS 5[5]나 CEB-FIP[6]에서는 LWAC의 배합설계에 대해서 상세하게 다루고 있지 않다. 또한 국내의 LWAC에 관한 연구에서도 주로 경량골재의 제조나 경량골재를 적용한 콘크리트의 물리·역학적 특성에 대해 주로 다루고 있으며, 배합설계에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

국내에서 LWAC의 배합설계 절차는 몇몇 연구자들에 의해 연구되었다. Choi[7]은 ACI 211.2의 배합설계 절차를 소개하였다. Yang[8]은 플라이애시 및 팽창점토를 소성·팽창시킨 경량골재를 사용한 콘크리트의 슬럼프, 압축강도 및 절건 밀도의 관계에 대한 다양한 변수 분석하였다. 이를 기반으로 압축강도 평가모델, 단위 수량의 결정, 굵은골재 체적밀도에 대한 겉보기 밀도의 비를 결정하여 LWAC의 목표성능을 만족하는 배합설계 절차를 제시하였다. 하지만 LWAC의 유동성 및 압축강도 발현은 경량골재의 밀도, 흡수율 및 표면상태에 의해 영향을 받으므로[9] 인공 경량골재 제조원의 변화는 결국 콘크리트 목표성능에 대한 배합설계 모델을 수정할 필요가 있음을 의미한다.

이 연구에서는 기존 플라이애시 및 팽창점토 기반의 경량골재 콘크리트(fly ash and expanded clay lightweight aggregate concrete, FC-LWAC)와 바텀애시 및 준설토

기반의 경량골재 콘크리트(bottom ash and dredged soil lightweight aggregate concrete, BD-LWAC)의 압축강도 및 절건 밀도를 배합상세에 따라 분석하였다. 경량골재 콘크리트의 배합설계 절차를 결정하기 위한 주요 분석 요인은 콘크리트의 절건 밀도와 압축강도에 대한 물-시멘트 비, 단위 시멘트양, 경량 잔골재 치환율의 영향이다. 이를 바탕으로 BD-LWAC의 특성이 고려된 배합설계 절차를 제시하였다.

## 2. 기존연구의 분석 범위 및 실험

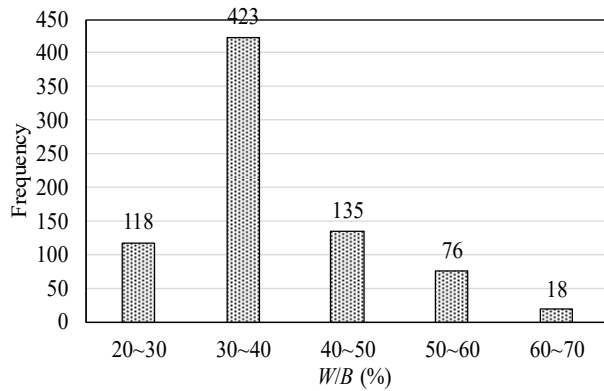
### 2.1 플라이애시 및 팽창점토 기반 경량골재 콘크리트의 데이터베이스

경량골재 콘크리트의 초기 슬럼프( $s_i$ ), 공기량( $v_A$ ), 압축강도( $f_{ck}$ ) 및 절건 밀도( $\rho_c$ )는 골재의 물리적 특성과 함께 물-시멘트 비( $W/C$ ), 단위 수량( $w_w$ ), 단위 시멘트양( $w_c$ ), 잔골재율( $S/a$ ), 경량 잔골재 치환율( $R_{LF}$ ) 등에 의해 영향을 받는다. 플라이애시 및 팽창점토 기반 경량골재 콘크리트의 배합조건에 따른  $v_A$ ,  $f_{ck}$  및  $\rho_c$ 의 특성을 분석하기 위하여 773개의 배합실험결과를 수집하였다. 이들 결과들은 BD-LWAC의 실험결과와 비교하였다.

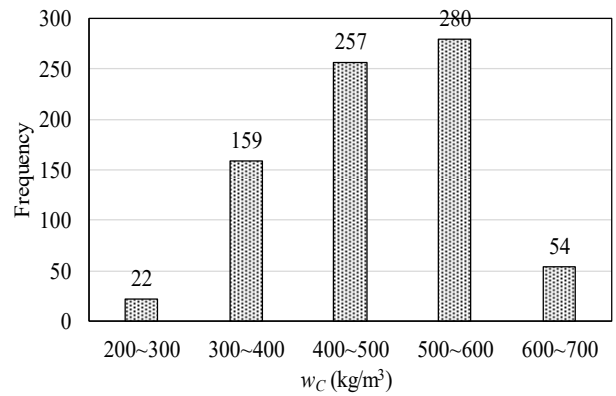
플라이애시 및 팽창점토 기반 경량골재의 물리적 특성을 분석한 결과 경량 굵은골재의 밀도( $\gamma_{GL}$ ) 및 조립률은 각각  $170\sim 1,900\text{kg/m}^3$ 과  $5.0\sim 7.3$  범위에 있었으며, 굵은골재의 최대 크기는  $15\sim 25\text{mm}$  범위에 있었다. 경량 잔골재의 밀도( $\gamma_{FL}$ ) 및 조립률은 각각  $1,070\sim 2,080\text{kg/m}^3$ 과  $2.4\sim 2.7$  범위에 있었다. Figure 1에는 FC-LWAC의 주요 배합특성 및 실험결과와 분포 범위를 요약하여 나타내었다. 플라이애시 및 팽창점토 기반 경량골재 콘크리트 배합의  $W/C$  및  $w_c$ 는 각각  $20\sim 70\%$  및  $200\sim 700\text{kg/m}^3$  범위에 있었으며,  $f_{ck}$  및  $\rho_c$ 는 각각  $10\sim 84\text{MPa}$  및  $1,200\sim 2,000\text{kg/m}^3$  범위에 있었다. 잔골재율은  $25\sim 60\%$ ,  $R_{LF}$ 는  $0\sim 100\%$ ,  $w_w$ 는  $64\sim 322\text{kg/m}^3$ ,  $v_A$ 는  $0.9\sim 9.0\%$ 의 범위에 있었다.

### 2.2 바텀애시 및 준설토 기반 경량골재를 사용한 콘크리트 실험

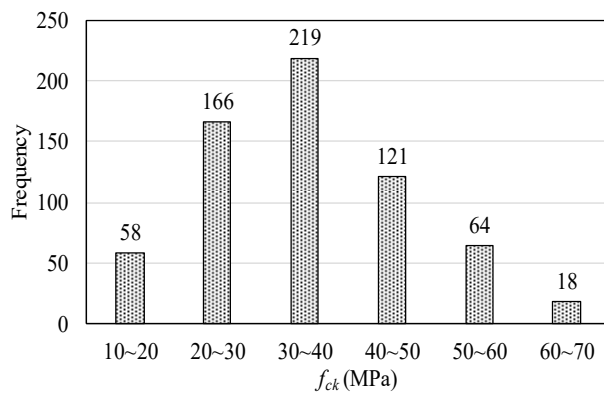
바텀애시 및 준설토 기반 경량골재 콘크리트의 배합설계 제시를 위해 총 25 배합의 콘크리트 배합을 수행하였다. 각 그룹별 배합 상세 및 실험결과 값의 범위는 Table 1에 나타



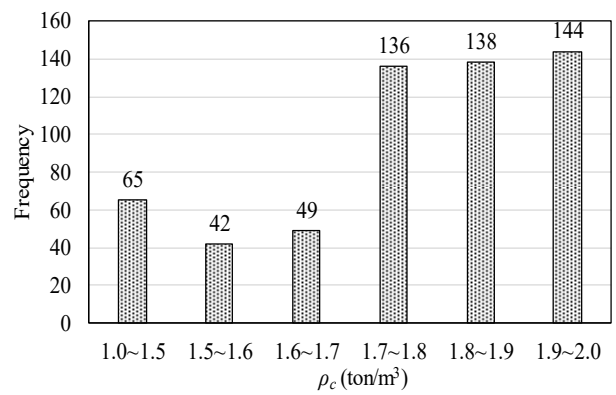
(a) Water-to-cement ratio



(b) Unit cement content



(c) Compressive strength



(d) Air-dried density

Figure 1. Frequency distribution of test parameters in the FC-LWAC

내었다. 천연모래와 경량 잔골재의 혼합 비율은 LWAC의  $\rho_c$  및  $f_{ck}$ 에 영향을 미치게 된다[10]. 따라서 그룹 I~III에서는 동일한 설계기준강도에서  $\rho_c$ 에 대한  $R_{LF}$ 의 영향성을 평가하였다. 그룹 I~III의 목표  $f_{ck}$ 를 각각 15MPa, 25MPa 및 35MPa로 설정하였으며, 각 그룹별로  $R_{LF}$ 가 0, 25, 50, 75 및 100%로 변화하였을 때 콘크리트  $\rho_c$ 를 평가하였다.

또한 모래와 경량 잔골재의 혼합사용 시 경량 잔골재의 높은 조립률을 저감시켜, 입도분포를 개선시키는 효과를 갖게 된다. 그룹 IV~V에서는 동일한  $R_{LF}$ 에서  $\rho_c$ 에 대한  $f_{ck}$ 의 영향성을 평가하였다. 그룹 IV~V의  $R_{LF}$ 가 각각 100% 및 50%일 때 물  $w/C$ 를 조절하여  $f_{ck}$ 를 변화시켰으며, 이에 따른  $\rho_c$ 의 변화를 평가하였다.

Table 1. Summary of test results of BD-LWAC

Group	$R_{LF}$ (%)	$W/C$ (%)	Unit content (kg/m <sup>3</sup> )		Test results				
			$w_C$	$w_W$	$v_A$ (%)	$s_i$ (mm)	28 day $f_{ck}$ (MPa)	$\rho_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	
I	0, 25, 50, 75, 100	52~58	319~356	185	3.6~6.2	230~250	17.1~20.8	1502~1758	
II	0, 25, 50, 75, 100	47~53	330~394	175~185	4.3~4.9	210~245	23~26.7	1455~1753	
III	0, 25, 50, 75, 100	35~41	415~486	170	4.8~5.1	165~225	35.1~38.9	1657~1860	
IV	100	30~50	400	120~200	4.0~5.0	15~220	21.8~28.9	1484~1584	
V	50	30~50	400	120~200	4.5~5.0	40~250	28.5~43.1	1684~1775	

Table 2. Properties of lightweight aggregates

Type	Source materials	Oven-dried density (kg/m <sup>3</sup> )	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	Water absorption (%)	Fineness modulus
Fine aggregate	Bottom ash and dredged soil	1,410 ~1,500	1,080 ~1,100	10.6~14.0	3.8~5.4
	Fly ash and clay	942 ~1,782	800 ~1,030	8.0~28.0	2.4~2.7
Coarse aggregate	Bottom ash and dredged soil	1,430 ~1,450	980 ~1,000	9.8~12.3	6.2~6.6
	Fly ash and clay	1,000 ~1,700	800 ~1,200	4.0~30.0	5.0~7.3

경량골재 콘크리트에서  $s/a$ 가 너무 낮을 경우 채움불량이 발생하게 되며, 너무 높을 경우 배합을 위해 요구되는  $w_w$ 이 증가하게 된다[11]. 또한 배합설계 시 콘크리트의  $\rho_c$ 에 대한  $s/a$ 의 영향성을 고려하였을 때  $s/a$ 가 0 또는 100%가 되는 배합이 발생 할 수 있게 되며 이러한 배합설계는 현실성이 떨어지게 된다. 따라서 이 연구에서는 LWAC에 대한  $s/a$ 의 영향성은 고려하지 않았으며, 모든 배합에서  $s/a$ 은 40%로 고정하였다.

Table 2에는 실험에 사용된 BD-LWAC와 FC-LWAC의 특성을 비교하여 나타내었다. 바텀애시 및 준설토 기반 경량골재 콘크리트에 사용된 인공 경량골재는 화력발전의 부산물인 바텀애시와 항만이나 항로의 수심확보 공사 시 발생하는 준설토를 혼합하여 약 1,200℃의 온도로 소성·발포시킨 것이다. 바텀애시 및 준설토 기반 인공 경량골재의 내부는 다공성 구조로 되어 있으며, 표면은 유리질 피막으로 둘러싸여 있는 구형상이다. 실험에 사용된 바텀애시 및 준설토 기반 인공 경량골재의 절건 밀도 및 겉보기 밀도는 각각 1,410~1,500kg/m<sup>3</sup> 및 1,080~1,100kg/m<sup>3</sup>이며, 흡수율 및 조립률의 범위는 각각 10.6~14.0% 및 3.8~5.4이다. 인공 경량골재의 최대 사이즈는 5mm 이다. 바텀애시 및 준설토 기반 인공 경량골재의 절건 밀도 및 겉보기 밀도는 각각 1,430~1,450kg/m<sup>3</sup> 및 980~1,000kg/m<sup>3</sup>이며, 흡수율 및 조립률의 범위는 각각 9.8~12.3% 및 6.2~6.6이다. 골재 최대 크기는 10~25mm이다. 바텀애시 및 준설토 기반 경량골재의 절건 밀도 및 겉보기 밀도는 플라이애시 및 팽창점토 기반 경량골재의 중간

값에 해당하였지만 골재의 흡수율은 상대적으로 낮았다. 조립률의 경우 바텀애시 및 준설토 기반 인공 경량골재가 플라이애시 및 팽창점토 기반 골재의 중간 값에 해당한 반면, 경량골재는 상대적으로 높은 범위에 있었다.

콘크리트 실험의 경우 경량골재의 높은 흡수율이 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향성을 최소화 하기 위해 골재의 프리웨팅을 통해서 흡수율일 최대 흡수율의 85% 이상을 만족하는 골재를 사용하였다. 경량골재의 흡수율 100%에 대한 나머지 수량은 단위 수량의 보정을 통해 추가하였다. 경량골재의 계량은 흡수율을 고려하여 중량계량법으로 계량하였다. 콘크리트 배합은 0.3 m<sup>3</sup>의 강제식 믹서기를 사용하여 3분이상 비빔을 실시하였다. 굳지 않은 콘크리트의  $s_f$ 는 KS F 2402에 따라 측정하였으며,  $v_a$ 의 경우 간편성 및 현장 적용성을 고려하여 KS F 2409(압력법)에 따라 측정하였다. 배합이 끝난 콘크리트는 항온·항습(20℃, 상대습도 60%)의 환경에서 재령 28일까지 양생을 실시하였다. 콘크리트의 압축강도는 재령 28일에서 KS F 2405에 따라 측정하였다. 콘크리트의  $\rho_c$ 는 28일간 양생시킨 시험체를 100±5℃의 온도에서 72시간 이상 건조시킨 후 질량과 부피 측정을 통해 결정하였다.

### 3. 배합설계를 위한 기초 모델식 제안

#### 3.1 단위 시멘트양의 결정

일반적으로 콘크리트의  $\rho_c$ 는 구성재료들의 양에 의해 영향을 받는다. ACI 318(2014)에서도  $w_c$ , 단위 잔골재량( $w_F$ ) 및 단위 굽은골재량( $w_G$ )을 통해 콘크리트의  $\rho_c$  예측 모델을 식 (1)과 같이 제안하고 있다[12].

$$\rho_c = 1.2w_c + w_F + w_G + 50 \text{ ----- (1)}$$

콘크리트의  $\rho_c$ 는 일반적으로  $w_c$ 의 양이 증가할수록 증가한다. 또한  $w_c$ 의 증가는 결과적으로  $w/C$ 를 감소시켜 콘크리트의  $f_{ck}$ 를 향상시킨다[11]. 이러한 사항을 고려하여 LWAC의  $f_{ck}$  및  $\rho_c$ 와  $w_c$ 의 상관관계에 대한 회귀분석 결과를 Figure 2에 나타내었다. 경량골재 콘크리트의  $w_c$ 는  $f_{ck}$  보다  $\rho_c$ 에 대해 큰 영향을 받았으며,  $w_c$ 에 대한  $\rho_c$ 의 영향은 BD-LWAC가 FC-LWAC 대비 낮았다. 따라서 BD-LWAC의  $w_c$ 는 실험결과와 회귀분석으로부터 다음과 같이 제시 될 수 있다(Figure 3).

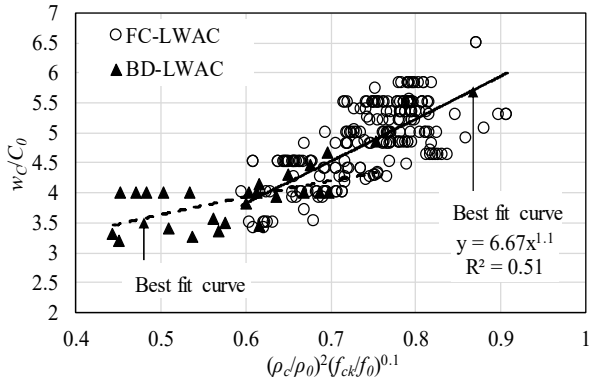


Figure 2. Regression analysis for  $w_c$

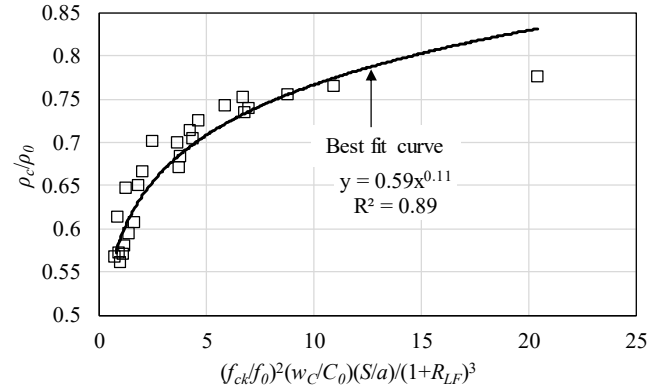


Figure 5. Regression analysis for  $\rho_c$  of BD-LWAC

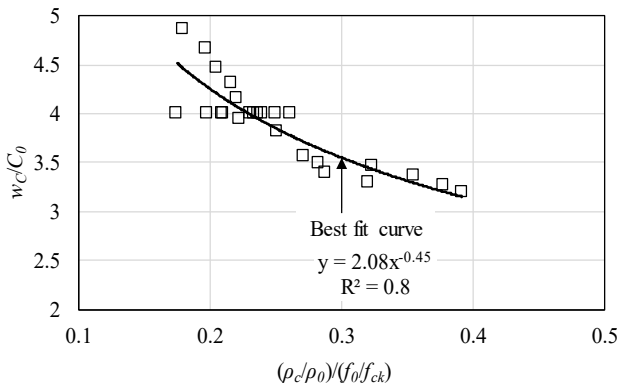


Figure 3. Regression analysis for  $w_c$  of BD-LWAC

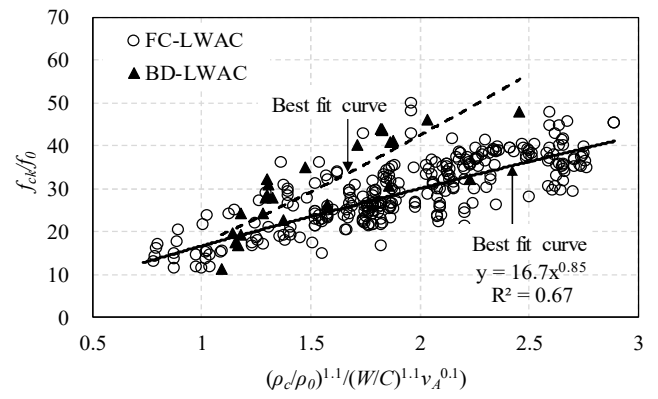


Figure 6. Regression analysis for  $f_{ck}$

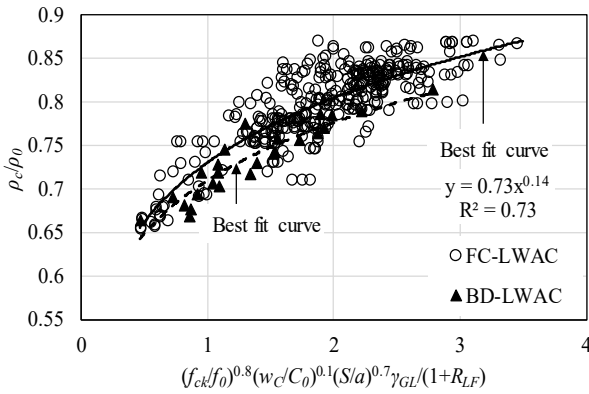


Figure 4. Regression analysis for  $\rho_c$

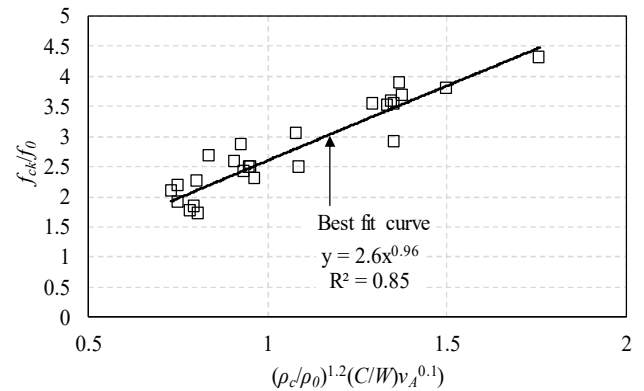


Figure 7. Regression analysis for  $f_{ck}$  of BD-LWAC

$$\frac{w_c}{C_0} = 2.08 \left( \frac{\rho_c}{\rho_0} \cdot \frac{f_0}{f_{ck}} \right)^{-0.45} \quad (2)$$

여기서,  $C_0 (=100\text{kg/m}^3)$ ,  $f_0 (=10\text{MPa})$ ,  $\rho_0 (=2,300\text{kg/m}^3)$  는 각각  $w_c$ ,  $f_{ck}$  및  $\rho_c$  에 대한 참고 값이다.

### 3.2 절건 밀도의 모델링을 통한 경량 잔골재 치환율의 결정

식 (2)에 나타낸바와 같이 LWAC의  $\rho_c$  는  $f_{ck}$  외에도 사용되는 재료의 비중,  $w_c$ ,  $(S/a)$  및  $R_{LF}$  등에 영향을 받는다. 경량골재 콘크리트의  $\rho_c$  는 재료의 비중  $w_c$  의 증가와 함께 증가한다. 콘크리트의  $\rho_c$  와  $S/a$  및  $R_{LF}$  의 관계는 잔골재 비

중이 굵은골재 비중 대비 높을 경우 비례관계를 형성하며, 잔골재 비중이 굵은골재 비중 대비 낮을 경우 반비례관계를 형성한다. 이를 고려하여 LWAC의  $R_{LF}$ 에 대한 실험결과의 회귀분석 결과를 Figure 4에 나타내었다. 바텀애시 및 준설토 기반 LWAC의  $\rho_c$ 는 동일  $f_{ck}$ 와 배합조건( $w_c, S/a, R_{LF}$ )을 갖는 FC-LWAC 대비 낮은 범위에 있었다. 따라서 BD-LWAC의  $\rho_c$ 는 실험결과의 회귀분석으로부터 다음과 같이 제시 될 수 있다(Figure 5).

$$\frac{\rho_c}{\rho_0} = 0.59 \left[ \frac{\left(\frac{f_{ck}}{f_0}\right)^2 \frac{w_c}{C_0} \cdot \frac{S}{a}}{(1 + R_{LF})^3} \right]^{0.11} \quad (3)$$

식 (3)을 통해 BD-LWAC의 목표성능에 대한  $R_{LF}$ 는 식 (4)로부터 결정 될 수 있다.

$$R_{LF} = \left[ \frac{\left(\frac{f_{ck}}{f_0}\right)^2 \frac{w_c}{C_0} \cdot \frac{S}{a}}{\left(\frac{\rho_c}{0.59\rho_0}\right)^{8.76}} \right]^{0.33} - 1 \quad (4)$$

### 3.3 압축강도 모델링을 통한 물-시멘트 비 결정

보통중량 콘크리트의  $\rho_c$ 는 약 2,200~2,400kg/m<sup>3</sup>의 범에 있으며,  $\rho_c$ 에 대한  $f_{ck}$ 의 영향성은 작다. 따라서 콘크리트의 배합설계 시  $\rho_c$ 에 대한  $f_{ck}$ 의 영향성을 특별히 고려하고 있지 않다. 반면, LWAC의 경우 콘크리트  $\rho_c$ 와  $f_{ck}$ 는 중요한 상관관계를 형성하고 있다. 또한 콘크리트의  $f_{ck}$ 는  $W/C$ 와  $v_A$ 에 대해 중요한 영향을 받는다. 이를 고려하여 LWAC의  $f_{ck}$ 에 대한  $\rho_c, W/C$  및  $v_A$ 의 회귀분석 결과를 Figure 6에 나타내었다. 동일한  $W/C$  및  $v_A$ 에서  $f_{ck}$ 에 대한  $\rho_c$ 의 영향은 BD-LWAC가 FC-LWAC 대비 더 큰 것으로 나타났다. 결과적으로 BD-LWAC의  $f_{ck}$ 는 실험결과의 회귀분석으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다(Figure 7).

$$\frac{f_{ck}}{f_0} = 2.6 \left[ \left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^{1.2} \frac{C}{W} \cdot v_A^{0.1} \right]^{0.96} \quad (5)$$

식 (5)을 통해 BD-LWAC의 목표성능에 대한  $W/C$ 는 식 (6)로부터 결정 될 수 있다.

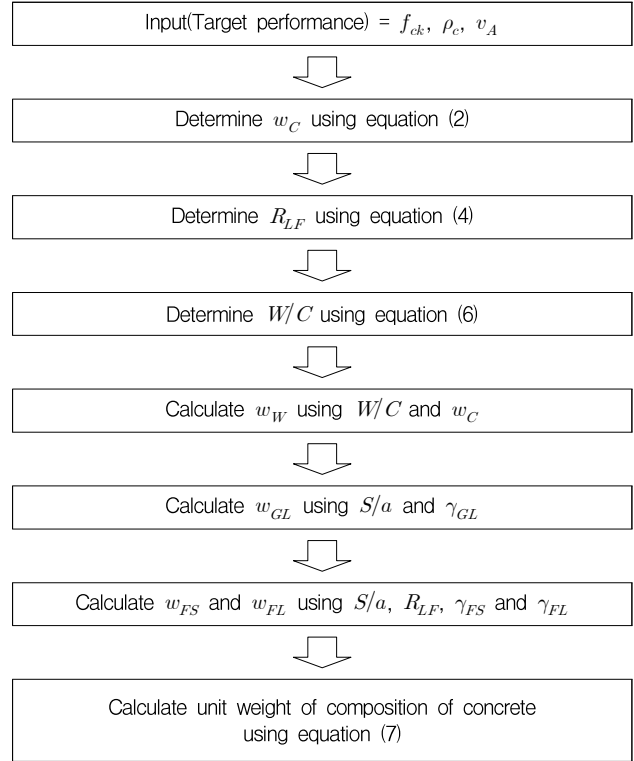


Figure 8. Mixing design procedure of LWAC using bottom ash and dredged soil

$$\frac{W}{C} = \frac{\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^{1.2} v_A^{0.1}}{\left(\frac{f_{ck}}{2.6f_0}\right)^{1.04}} \quad (6)$$

## 4. 배합설계 절차

콘크리트의 배합설계는 절대용적 개념을 이용해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{w_C}{\gamma_C} + \frac{w_W}{\gamma_W} + \frac{w_{GL}}{\gamma_{GL}} + \frac{w_{FS}}{\gamma_{FS}} + \frac{w_{FL}}{\gamma_{FL}} + v_A = 1 m^3 \quad (7)$$

여기서,  $w_{GL}, w_{FS}$  및  $w_{FL}$ 는 각각 경량 굵은골재, 천연모래 및 경량 잔골재의 단위용적질량이며,  $\gamma_C$  및  $\gamma_W$ 는 각각 시멘트 및 물의 비중이다. Figure 8에 BD-LWAC의 목표성능에 대한 초기 배합설계 절차를 나타내었다. 경량골재 콘크리트의 배합설계에서 목표 성능을 만족하기 위한 목표 설정 요소는  $f_{ck}, \rho_c$  및  $v_A$ 이다. 이 연구의 배합설계에서는  $S/a$ 에 따른

품질 저하를 최소화하기 위해  $s/a$ 는 40~60%의 범위에서 자유롭게 선택한다. 먼저 목표성능인  $f_{ck}$  및  $\rho_c$ 와 식 (2)를 통해  $w_c$ 를 결정한다. 다음으로  $f_{ck}$ ,  $s/a$ ,  $w_c$  및  $\rho_c$ 와 식 (4)를 통해  $R_{LF}$ 를 결정한다. 경량 잔골재의 경우 1 이상 또는 음수의 값을 가질 수 없으므로 1이상의 값에서는 1을 음수(-)일 때는 0을 사용한다. 다음으로  $f_{ck}$ ,  $\rho_c$  및  $v_A$ 와 식 (6)를 통해  $W/C$ 를 결정한다. 앞서 결정된  $w_c$ 와  $W/C$ 를 통해  $w_w$ 를 결정한다. 최초로 선택한  $s/a$ 를 통해 경량 굵은 골재의 체적을 결정할 수 있으며  $\gamma_{GL}$ 을 통해  $w_{GL}$ 을 결정한다. 결정된  $s/a$ 와  $R_{LF}$ 를 통해 경량 잔골재와 천연모래의 체적을 결정할 수 있으며,  $\gamma_{FS}$ 와  $\gamma_{FL}$ 로  $w_{FS}$  및  $w_{FL}$ 를 결정한다. 마지막으로 식 (7)을 통해 단위용적( $m^3$ )에 대한 콘크리트 구성요소의 양을 결정한다.

콘크리트의 초기 슬럼프는 혼화제(감수제 및 공기연행제)를 사용하여 자유롭게 변경할 수 있다. 혼화제의 성능은 구성 성분 및 고형분 비에 따라 변화가 크기 때문에 적정 사용량에 대한 제시가 어려우며, 각 배합 특성에 따라 예비 실험 등을 통해 적정 사용량을 결정하여야 한다. 따라서 이 연구에서는 콘크리트의 목표 슬럼프는 혼화제의 사용을 통해 만족하도록 하고 있으며, 배합절차에서 목표 슬럼프에 대한 고려를 하고 있지 않다.

또한 기존에 연구에서 제시된 FC-LWAC의 배합설계는  $s/a$ 에 대한 고려를 하지 않고 있으며,  $R_{LF}$ 는 배합설계를 위한 입력 값이다. 경량골재 콘크리트에서  $R_{LF}$ 는  $\rho_c$ 에 중요한 영향을 미친다. 또한 콘크리트의  $s/a$ 는 콘크리트의 품질확보 측면에서 사용범위가 제한될 필요가 있다. 이를 고려하여 BD-LWAC의 배합설계는 콘크리트의 소요 품질 확보를 위해 적정범위 내에서  $s/a$ 를 선택하도록 하였으며,  $\rho_c$ 에 대한  $R_{LF}$ 를 결정하는 방식의 배합설계 절차를 제시 하였다. 제시된 절차로부터 결정된 초기 배합설계는 실내배합의 검증을 통하여 수정될 수 있다. 즉, 제시된 배합설계 절차는 현장에서 BD-LWAC의 초기 배합설계 결정 및 시행착오를 줄이는데 효율적으로 이용될 수 있다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 바텀애시 및 준설토 기반의 경량골재 콘크리트의 배합조건에 따른 절건 밀도 및 압축강도 특성을 분석하고 이를 바탕으로 목표성능에 대한 배합설계 모델을 제시

하였다. 배합조건에 따른 콘크리트 특성의 변화에 대한 분석 결과는 플라이애시 및 팽창점토 기반 경량골재 콘크리트의 결과와 비교하였다. 이들 비교 및 배합설계 모델 제시로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 바텀애시 및 준설토 기반 경량골재의 절건 밀도에 대한 단위 시멘트양의 영향은 경량골재 콘크리트 단위 시멘트양에 대한 절건 밀도의 영향은 플라이애시 및 팽창점토 기반 콘크리트 대비 바텀애시 및 준설토 기반 콘크리트에서 더 낮았다.
- 2) 바텀애시 및 준설토 기반 경량골재 콘크리트의 절건 밀도는 동일 압축강도와 배합조건을 갖는 플라이애시 및 팽창점토 기반 경량골재 콘크리트에 비해 낮았다.
- 3) 제시된 배합설계 절차는 기존 플라이애시 및 팽창점토 기반 경량골재 콘크리트의 배합설계 대비  $\rho_c$ 에 대한  $R_{LF}$ 의 영향성을 고려하고 있으며,  $s/a$ 의 사용제한을 통해 콘크리트의 품질확보 측면에서 효과적으로 이용될 수 있다.

## 요 약

이 연구의 목적은 바텀애시 및 준설토 기반의 인공 경량골재 콘크리트의 합리적 배합설계 절차를 제시하는 것이다. 25 배합의 실험결과를 바탕으로 경량골재 콘크리트의 목표 성능(압축강도, 절건 밀도, 초기 슬럼프, 공기량)에 대하여 물-시멘트 비, 단위 시멘트양, 경량 잔골재 치환율을 결정하는 식을 제시하였다. 제안된 식과 절대용적 배합의 개념으로부터 각 구성요소들의 단위용적중량을 산정하였다. 제시된 배합설계 절차는 기존 결정에 효율적으로 이용될 수 있다.

**키워드** : 경량골재 콘크리트, 배합설계, 목표성능

## Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea Government (MSIP) (No. NRF-2017R1A2B3008463)

References

1. Korea Construction Standard Center, Standard Specification of Concrete, Seoul: Ministry of Land, Infrastructure and Transport; 2016, p. 96–106.
2. Sim JI, Yang KH, Structural safety of lightweight aggregate concrete, Magazine of the Korea Concrete Institute, 2011 Sep;23(5):27–32.
3. Korea Concrete Institute, Choisin concrete gonghak [The newest engineering of concrete], Seoul (Korea): Kimoondang; 2011, 930 p.
4. ACI Committee 211.2, Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete (ACI 211.2–98), MI, Farmington Hills: American Concrete Institute; 1998, 18 p.
5. Architectural Institute of Japan, Japanese architectural standard specification for reinforced concrete work (JASS 5) english version, Tokyo (Japan): Architectural Institute of Japan; 2009, 171 p.
6. Comité Euro-International du Béton, fib model code for concrete structures 2010, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (Fib); 2000, 402 p.
7. Choi JJ, Mix proportioning and constructability of lightweight aggregate concrete, Magazine of the Korea Concrete Institute, 2011 Sep;23(5):18–26.
8. Yang KH, Mix design of lightweight aggregate concrete and determination of targeted dry density of concrete, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2013 Oct;13(5):491–7.
9. Sim JI, Yang KH, Effect of the maximum aggregate size on the workability and mechanical properties of lightweight concrete, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 2015 May;28(5):61–8.
10. Sim JI, Yang KH, mechanical properties of lightweight aggregate concrete according to the substitution rate of natural sand and maximum aggregate size, Journal of the Korea Concrete Institute, 2011 Oct;23(5):551–8.
11. Neville AM, Properties of concrete, 5th ed, UK, Harlow: Pearson Education Limited; 2011, 846 p.
12. ACI Committee 318, Building code requirements for structural concrete (ACI 318–14), MI, Farmington Hills: American Concrete Institute; 2014, 519 p.

Appendix A: BD-LWAC의 배합설계 예

- 경량골재 콘크리트의 목표성능:

$$f_{ck}=24\text{MPa}, \rho_c=1650\text{kg/m}^3, v_A=0.035$$

- 사용 재료의 밀도 (Table A)

Table A. Density of source materials

Properties	Cement	Lightweight fine aggregate	Sand	Lightweight coarse aggregate
Density (kg/m <sup>3</sup> )	3,150	1,500	2,600	1,400

a) 식 (2)에 의한 단위 시멘트양 결정:

$$\cdot \frac{w_C}{C_0} = 2.08 \left( \frac{1550}{2300} \cdot \frac{10}{24} \right)^{-0.45} = 3.66, w_C = 366\text{kg/m}^3$$

b) 식 (4)에 의한 경량 잔골재 치환율 결정:

$$\cdot R_{LF} = \left[ \frac{\left( \frac{24}{10} \right)^2 \frac{372}{100} \cdot 0.4}{\left( \frac{1650}{0.59 \times 2300} \right)^{8.76}} \right]^{0.33} - 1 = 0.37, R_{LF} = 37\%$$

c) 식 (6)에 의한 물-시멘트 비 결정:

$$\cdot \frac{W}{C} = \frac{\left( \frac{1550}{2300} \right)^{1.2} \cdot 0.035^{0.1}}{\left( \frac{24}{2.6 \times 10} \right)^{1.04}} = 0.48, W/C = 48\%$$

d) 물-시멘트 비 및 단위 시멘트양을 이용한 단위 수량의 결정:

$$\cdot W/C = \frac{w_W}{w_C}, 0.48 = \frac{w_W}{366}, w_W = 177\text{kg/m}^3$$

e) 식 (7), 잔골재율 및 경량 굵은골재 밀도를 이용한 경량 굵은골재량의 결정:

$$\cdot \frac{366}{3150} + \frac{177}{1000} + 0.035 + \text{골재 체적} = 1 \text{ m}^3$$

$$\cdot \text{골재 체적} : 0.67\text{m}^3$$

$$\cdot \text{경량 굵은골재량} : 0.67 \times (1-0.6) \times 1400 = 564\text{kg/m}^3$$

f) 식 (7), 잔골재율, 경량 잔골재 치환율, 천연모래 밀도 및

경량잔골재 밀도를 이용한 경량 잔골재 및 천연모래양 결정:

$$\cdot \frac{366}{3150} + \frac{177}{1000} + \frac{564}{1400} + 0.035 + \text{잔골재 체적} = 1 \text{ m}^3$$

$$\cdot \text{잔골재 체적} = 0.27 \text{ m}^3$$

$$\cdot \text{경량 잔골재량} : 0.27 \times 0.37 \times 1500 = 149\text{kg/m}^3$$

$$\cdot \text{천연모래양} : 0.27 \times (1-0.37) \times 2600 = 440\text{kg/m}^3$$

g) 식 (7)에 의한 배합 상세 결정:

$$\cdot \frac{366}{3150} + \frac{177}{1000} + \frac{564}{1400} + \frac{440}{2600} + \frac{149}{1500} + 0.035 = 1 \text{ m}^3$$

$$\cdot \text{단위 시멘트양} : 366\text{kg/m}^3$$

$$\cdot \text{단위 수량} : 177\text{kg/m}^3$$

$$\cdot \text{단위 경량 굵은골재량} : 564\text{kg/m}^3$$

$$\cdot \text{단위 천연모래양} : 440\text{kg/m}^3$$

$$\cdot \text{단위 경량 잔골재량} : 149\text{kg/m}^3$$