50 MPa급 자기충전 경량 콘크리트의 최적 배합 및 품질 특성에 관한 실험적 연구

Optimal Mix Design and Quality Properties of 50 MPa Self-Consolidating Lightweight Concrete

홍세희* · 최진석** · 이재훈*** · 윤영수****

Hong, Se-Hee*, Choi, Jin-Seok**, Lee, Jaehoon***, and Yoon, Young-Soo****

Abstract

In this study, basic data were used to quantitatively determine the initial properties of self-consolidating lightweight concrete by analyzing various characteristics, such as air content, workability, segregation resistance, filling capacity, air/dry density, and strength according to the incorporating ratio of lightweight aggregate. With the exception of Mixture (LF75-LC100) that uses 100% lightweight coarse aggregate (LC) and 75% lightweight fine aggregate (LF), all the mixtures satisfied the performance criteria for workability, segregation resistance, and filling capacity, as suggested in the JSCE, and air/dry density, as suggested in the Concrete Standard Specification. The compressive strength of all the variables, except the LF75-LC100, was measured to be at least 50 MPa, but the strength decreased in a manner similar to that depicted in previous research when LC was incorporated. The results of the above experiments indicated that 100% of the LC and 50% of the LF was the optimal mix for self-consolidating lightweight concrete.

Key words : Self-consolidating Concrete, Lightweight Aggregate, Workability, Segregation Resistance, Strength

요 지

본 연구에서는 경량골재의 혼입률에 따라 공기량, 유동성, 재료분리저항성, 충전성, 기진 및 절건 밀도, 강도 등 다양한 특성을 분석하여 자기충전 경량 콘크리트의 초기 물성을 정량적으로 판단할 수 있는 기초자료를 제공하였다. 100% 경량 굵은 골재와 75% 경량 잔골재를 사용한 배합(LF75-LC100)을 제외하고는 모든 배합들은 JSCE에서 제시하는 유동성, 재료분리 저항성능, 충전성 및 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 기진/절건 밀도의 목표성능 기준을 만족하였다. LF75-LC100 변수를 제외한 모든 변수의 압축강도는 50 MPa 이상을 발현하였지만, 경량 굵은골재가 혼입될 경우 기존의 연구 경향과 유사하게 강도의 저하가 나타났다. 이상의 실험결과, 경량 굵은 골재 100%와 50% 경량 잔골재의 사용 배합이 자기충전 경량 콘크리트의 최적배합으로 판단된다.

핵심용어 : 자기충전 콘크리트, 경량골재, 유동성, 재료분리저항성, 강도

*정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정(E-mail: bestshhong@korea.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

**정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정(E-mail: radiance@korea.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

***고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정(E-mail: dlwogns1994@korea.ac.kr)

Master's Course, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

****교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수(Tel: +82-2-3290-3320, Fax: +82-2-3290-5999, E-mail: ysyoon@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

1. 서론

자기충전 콘크리트는 구조물의 고층화·다양화 등 대규모 건설이 증가하고 과밀 배근 및 복잡해지는 구조물이 늘어나면서 많은 발전이 거듭되어 왔다. 이를 바탕으로 건설 시공의 효율성 및 품질향상을 고려한 고성능 및 콘크리트의 자중감소와 단면 축소를 위한 고강도 경량 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 즉 자기충전 콘크리트의 혁신 개발 중 하나인 자기충전 경량 콘크리트이다(Choi et al., 2003; Shi and Wu, 2005; Kwon, 2017; Yoon and Han, 2018).

일반적으로 자기충전 콘크리트는 유동성 및 재료분리 저항성이 우수하여 추가 다짐작업 없이 용이하게 타설할 수 있다. 이러한 특성은 경량골재를 사용한 경량 콘크리트의 재료 자체의 특수성으로 인하여 발생하는 재료분리 및 강도 저하 현상 등을 해결할 수 있는 것으로 제시되고 있다. 즉 굳지 않은 콘크리트의 점성을 증대시킴으로써 유동성 및 재료분리 현상을 방지할 수 있으며, 콘크리트의 품질안전을 확보할 수 있다고 제시되고 있다(Choi et al., 2003; Yoon and Han, 2018). 자기충전 콘크리트는 충전성, 통과성, 재료 분리저항성의 3가지 성능을 만족하기 위하여 굵은 골재, 잔골재의 함수율, 입도, 굵은 골재 부피, 잔골재의 종류 등의 원재료 품질 뿐만 아니라 단위수량, 분체, 페이스트, 공기량 등이 자기충전 콘크리트의 품질에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이렇게 다양한 배합요인에 민감한 자기충전 콘크리트에 고강도 및 경량 특성을 부가한 고강도 자기충전 경량 콘크리트 개발은 도전적이지만 활발히 연구되고 있다(Choi et al., 2003; Bello et al., 2017; Lee et al., 2019; Yang, 2019).

기존 자기충전성 경량 콘크리트의 연구는 대부분 자기충전 콘크리트에 경량골재의 혼입을 변화 시켜 유동성, 재료분리 저항성, 충전성 등의 변화경향을 주로 확인되어왔고, 강도 및 중량감소량(밀도) 경향은 추가 확인된 것으로 나타나고 있다. 기존 연구 및 개발된 자기충전성 경량 콘크리트들을 정리한 Fig. 1에서 나타내듯이 압축강도 50 MPa 및 비강도 (Strength efficiency) $2.5 \text{ MPa} \cdot \text{kg/m}^3$ 이상의 고강도 자기충전성 경량 콘크리트 개발은 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구자들의 잔골재를 범위 (Fig. 1(c))를 참고하여 사전 배합을 통한 경량골재를 사용할 경우에 압축강도 50 MPa 이상을 발현할 수 있는 기준 자기충전 콘크리트의 배합을 결정하였다. 기준 자기충전 콘크리트의 배합설계를 적용하여 개선된 배합방법으로 경량골재 콘크리트를 제조하였으며, 경량골재의 혼입은 체적을 고려하여 일반골재를 대체하여 사용하였다. 자기충전 콘크리트의 품질은 재령별 압축 및 쪼갬인장강도, 기전 및 절전 단위용 적질량 등을 측정하여 검토하였다. 본 연구를 통하여 고강도 자기충전 경량 콘크리트의 초기 물성을 정량적으로 판단할 수 있는 기초자료를 제공하고자 하였다.

(a) Relationship Between Density and Compressive Strength

(b) Relationship Between Slump Flow and Strength Efficiency

(c) Relationship Between Density and S/a

Fig. 1. Analysis on the Previous Research

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구에서 사용한 배합설계 방법은 자기충전 콘크리트의 배합설계 방법(Su et al., 2001; Shi and Wu, 2005)과 ACI 211.2 (1998)를 통하여 설계하였다. 물·시멘트 비(w/c)는 0.31 이하일 경우 압축강도(재령 28일) 50 MPa 이상(Su et al., 2001), 잔골재율(S/a)는 0.45 이상 일 경우 $2,000 \text{ kg/m}^3$ 이하(Fig. 1)의 고강도 자기충전 경량 콘크리트 제조가 가능할 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 사전 예비 배합실험을 통하여 경량 굵은 골재를 사용할 경우에 압축강도 50 MPa 이상을 발현할 수 있는 기준 고강도 자기충전 경량 콘크리트 배합을 결정하였다. 즉 기준 배합은 w/c 0.3, S/a 52.2%, 경량 굵은 골재를 100% 사용하였다. 비교 변수들

로는 경량 잔골재 혼입률 0%, 25%, 50%, 75%의 4종류로 총 5개의 변수로 실험을 계획하였다. 경량골재의 혼합은 제적을 고려한 골재를 대체하여 사용하였다. 배합 변수 및 실험 계획은 Table 1과 같다. 각 변수들의 자기충전 성능평가는 일본토목학회(JSCE, 1999)에서 제시하고 있는 기준을 적용하여 평가하였고, 밀도특성 및 공기량은 KCS 14 20 20 (2018)과 ACI 211.2 (1998)에서 제시한 기준을 적용하여 평가하였다(굵은 골재 최대 치수 20 mm인 경우 $5 \pm 1.5\%$). 또한, 재령별 압축강도, 쪼갬인장강도 등을 측정하여 검토하였다.

2.2 사용재료

본 연구의 사용재료로서, 비표면적 $3,413 \text{ cm}^2/\text{g}$ 및 밀도 3.15 g/cm^3 인 국내산 보통 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 경량골재는 H사의 바텀에서 경량 골재를 사용하였다. 경량 굵은 골재의 최대치수 및 밀도는 각각 20 mm 및 1.87 g/cm^3 이고 경량 잔골재의 밀도는 2.17 g/cm^3 이다. 일반 잔골재는 부순잔골재를 사용하였고 밀도는 2.60 g/cm^3 이다. 일반 골재 및 경량골재의 물리적 특성은 Table 2에 나타냈고, 경량 골재의 화학적 특성은 Table 3에 나타내었다(KCS 14 20 20 (2018)의 0.08 mm체 통과량 7% 이하 만족). 감수제(Superplasticizer, SP)는 KS F 2560 (콘크리트용 화학 혼화제)에 적합한 폴리카본산계 국내산 고성능 감수제 및 공기연행

제(Air entraining agent, AE)를 사용하였다.

2.3 실험방법

경량 콘크리트의 유동성은 사용되는 골재의 함수율에 영향을 받게 되며, 콘크리트의 유동성은 자기충전성에 영향이 매우 크다. 일반 경량골재 콘크리트 배합은 경량골재 표면건조 포화상태의 조건으로 수행한다. 경량골재의 표면건조 포화상태는 콘크리트 배합 24시간 전에 Pre-wetting과정을 통하여 수분을 충분히 흡수시킴으로써 표면건조 내부포화상태를 유도 및 콘크리트 제조 시 유동성 손실을 최소화하기 위함이다. 배합 직전에 표면건조 포화상태인 경량골재들의 함수율을 측정하고 단위수량에서 그 양을 보정함으로서 설계된 w/c 를 유지한다(KCS 14 20 20, 2018; Lee et al., 2019; Park et al., 2019).

그러나 Pre-wetting 과정을 수행하더라도 야적된 경량골재의 내부까지 충분하게 흡수되지 않고 골재 표면 수분 증발도 균일하지 않다. 이에 따라 경량골재는 균일한 함수율을 갖지 못하게 되며, 경량골재를 활용할 경우 일정한 품질을 유지하는 콘크리트의 제조가 어렵게 된다(Bello et al., 2017; Kim et al., 2017; Park et al., 2019). 또한, 경량골재를 Pre-wetting 없이 콘크리트용 골재로 사용한 결과, 굳지 않는 콘크리트의 심각한 유동성 손실은 발생하였으나 역학적 특성은 일반골재 콘크리트와 우수하거나, 큰 차이가 없는 것으로 보고되고 있다 (Park et al., 2019).

Table 1. Mixture Proportions

Specimens	w/c (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m^3)						SP (%)	AE (%)	Air Content (%)
			cement	water	NF	LF	NC	LC			
NF100-NC100	30	52.2	566.6	170	800.89	-	752.12	-	0.55	0.03	4.8
NF100-LC100					800.89	-	-	526.76	0.55	0.03	6.4
LF25-LC100					600.67	167.11	-	526.76	0.55	0.02	6.0
LF50-LC100					400.45	334.22	-	526.76	0.63	0.05	6.4
LF75-LC100					200.22	501.33	-	526.76	0.63	0.05	8.1

Note. NF: natural fine aggregate; LF: lightweight fine aggregate; NC: natural coarse aggregate; LC: lightweight coarse aggregate; SP: superplasticizer, AE: air entraining agent.

Table 2. Physical Properties of Aggregate

Type		Maximum particle size (mm)	Density (kg/m^3)	Water absorption (%)	Fineness modulus
Fine aggregate	Natural aggregate	2.5	2.60	1.1	2.9
	Light weight aggregate	1.5	2.17	2.2	2.2
Coarse aggregate	Natural aggregate	19.0	2.67	0.7	6.6
	Light weight aggregate	20.0	1.87	6.1	6.7

Table 3. Chemical Properties of Light weight Aggregate (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
51.3	22.1	9.53	4.42	1.40	0.79	1.00	1.2	0.37	0.13

따라서, 본 연구에서는 경량골재의 흡수율에 의한 유동성 및 자기충전성 손실을 최소화하고자 예비 배합실험을 통하여 기존 경량콘크리트 배합방법 및 순서(Kabay and Aköz, 2012; Park et al., 2019)를 보완하였다. 즉 콘크리트 배합은 0.5 m³의 강제식 믹서기를 이용하여, 골재의 수분 보정을 위해 먼저 골재와 1/2 배합수를 4-5분 혼합하여 골재의 충분한 수분흡수를 유도하였다. 수분의 흡수가 끝난 골재는 다시 시멘트, 1/2 배합수, 감수제와 3-4분 혼합하여 실시하였다. 배합이 끝난 콘크리트는 슬럼프 플로를 측정하였고, 슬럼프 측정 중 슬럼프플로가 500 mm에 도달할 때까지 걸리는 시간을 측정하여 평가하였다(T_{500}). 굳지 않은 콘크리트의 공기량은 KS F 2421 규격에 의거하여 수행하였으며, 자기충전 경량 콘크리트의 재료분리 저항성 및 충전성에 대한 평가를 위해 V-funnel 및 U-box 시험을 수행하였다. V-funnel 시험의 경우, 입구가 막힌 V형 모양의 깔때기에 콘크리트 시료를 채웠으며 이후, 토출구를 개방하여 시료가 모두 유출되는데 걸리는 시간을 측정하여 평가하였다. U-box 시험의 경우, U형 모양의 장치의 절반을 시료로 채워 실험을 준비하였다. 이후, 격리판을 제거하여 시료가 반대편까지 상승되는 높이를 측정하여 충전성을 평가하였다. 또한, 본 연구에서는 KS F 2533 및 KS F 2405를 활용하여 단위용적 질량 및 압축강도를 평가하였으며, 온도 20 ± 1 °C와 습도 $60 \pm 5\%$ 가 일정하게 유지되는 항온·항습실에서 시험체의 양생을 수행하였다(Table 4).

Table 4. Required Performance and Test Items

Types	Target value	Remarks
Air contents	$5 \pm 1.5\%$	KCS 14 20 20: 2018
Slump flow	650 ± 50 mm	JSCE
	3-15 s@500 mm	
V-funnel test	7 - 13 s	
U-box test	≥ 300 mm	
Density	$< 1,950$ g/cm ³	KS F 2533
Compressive strength	50 MPa	KS F 2405 ($\phi 100 \times 200$ mm)

Fig. 2. Aggregates Used in This Study

3. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 공기량 $5 \pm 1.5\%$ 와 슬럼프 플로 650 ± 50 mm 범위를 만족하기 위하여 고성능 감수제 및 공기연행제 사용량을 조절하여 배합설계를 수정하였다. Figs. 2, 3 및 4는 각각 자기충전 경량콘크리트의 유동성, 재료분리 저항성 및 충전특성을 정리한 것이다.

3.1 유동성 시험 결과

슬럼프 플로의 실험결과는 Fig. 3과 같이 모든 배합에서 650 ± 50 mm의 슬럼프 플로 값을 만족하였다. 경량 굵은 골재를 100% 치환할 경우 슬럼프 플로는 NF100-NC100보다 증가 되었으나, 경량 잔골재의 혼입률이 증가할수록 LF25-LC100보다 슬럼프 플로가 감소하는 경향을 확인되었다. 이는 SP와 AE제 혼입률이 증가하여도 경량 잔골재 혼입률이 증가할수록 콘크리트에 포함된 미립분양이 증가하기 때문으로 판단된다. Okamura (1999)에 의하면 경량 잔골재에서 0.08 mm체 통과 미립분은 분체로 고려하여야 하며, 본 연구에서는 경량 잔골재 내 미립분의 증가로 인하여 유동성의 저하가 나타난 것으로 판단된다(Kim and Choi, 2010). 또한 이는 기존 연구들(Kim et al., 2010; Yang, 2019)에서 발표한 유동성 거동과 상이한 것을 알 수 있다. 본 연구에서의 배합방법은 기존 연구들에서 제시한 주된 원인을 해결한 것으로 판단된다. 즉 경량 골재 사용으로 보정된 흡수율 및 배합수가 배합시간동안 경량골재로 완전히 흡수되지 못한 문제를 해결하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 3. Test Results of Slump Flow

3.2 재료분리 저항성 시험 결과

Fig. 4는 슬럼프 플로 500 mm 도달시간(T_{500})과 V-funnel 유하시간의 관계로 재료분리 저항성을 나타낸 것이다.

T_{500} 은 굳지 않은 콘크리트의 점도를 간접적으로 측정할 수 있는 방법으로 JSCE에서는 3~15초 범위를 제시하고 있다. T_{500} 이 2초보다 작으면 점도가 낮고 5초 이상이면 점도가 높다는 것으로 ACI에서 제시하고 있다. 본 연구에서 경량 잔골재 75%를 혼입한 변수 외 모든 변수들은 목표 성능기준 범위를 만족하였다. 경량골재의 혼입률이 증가할수록 T_{500} 의 시간이 증가하였고, 특히 경량 잔골재의 치환율

이 증가할수록 슬럼프 플로 성능기준 범위를 벗어나지 않는 범위에서 공기량, T_{500} 과 V-funnel 시간이 증가하였음을 확인할 수 있다. LF75-LC100은 AE제를 사용하지 않을 경우 공기량 6.5% 이내의 범위를 만족할 수 있으나, 슬럼프 플로 (430 mm), T_{500} 및 V-funnel의 성능범위를 만족하지 못하였다. 이는 미립분(경량잔골재)의 증가로 인해 점성이 증가하였기 때문이다. 따라서, AE제 0.05%를 사용할 경우 높은 공기량으로 분체간 흡착성능이 감소함으로써 슬럼프 플로를 만족할 수 있었으나 공기량, T_{500} 및 V-funnel의 성능범위를 벗어났다. 이는 높은 공기량에 따라 콘크리트의 점도가 낮아졌기 때문에 고유동을 발휘하기 위한 일정 수준 이상의 점도에 도달하지 못했기 때문이다(Yoon and Han, 2018).

Fig. 4. Segregation Resistance

3.3 충전성 시험 결과

자기충전 경량 콘크리트의 충전성 평가를 위한 U-box 충전높이를 Fig. 5에 나타냈다. U-box 실험은 콘크리트를 다짐 없이 철근 사이를 통과하여 수직으로 채워지는 특성 평가하는 것이다. JSCE에서 U-box 실험은 일반적으로 충전 높이(H2) 300 mm 이상 또는 H1-H2 값이 120 mm 이하로 간극 충전성을 평가하고 있다.

목표 슬럼프 플로 600~700 mm를 만족한 모든 배합 변수들은 충전높이 300 mm 이상을 나타냈고, U-box의 좌우 콘크리트의 높이 차이 값(H1-H2)은 80 mm 이하를 나타내었다. 그러나 경량 잔골재의 혼입률이 증가할수록 충전높이가 감소하는 경향을 확인할 수 있었는데, 이는 경량 잔골재의 혼입률이 증가할수록 Fig. 3의 결과와 같이 콘크리트의 재료 분리저항성 및 점성이 증대되어 충전성에 불리한 영향을 미친 것으로 판단된다(Choi et al., 2003).

충전성 및 간극 통과성을 개선하기 위해서는 콘크리트의 분체양을 늘리거나 매트릭스 자체 점성이 낮춰야하는데, 수차례 예비 실험에서 75% 경량 잔골재 및 100% 경량 굵은 골재를 사용할 경우, 콘크리트의 공기량 및 슬럼프 플로를 모두 만족할 수 없는 것을 확인하였다. 슬럼프 플로를 만족할 경우 낮은 점성으로 인한 골재분리가 발생하여 U-box 충전높이를 만족하지 못하는 반면, 공기량을 만족할 경우 높은 점성으로 인하여 U-box 충전높이를 만족하지 못하는

것을 확인하였다.

따라서 동일 종류의 경량 잔골재와 굵은 골재를 사용하여도 경량 골재의 사용 비율에 따라 공기량 및 점성이 다르기 때문에 자기충전성이 크게 변화하여 충분한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 5. Test Results of U-Box Test

3.4 단위 질량 시험 결과

Fig. 6은 경량골재 혼입률에 따른 콘크리트의 자중감소 효과를 알아보기 위하여 기진 및 절건 단위용적질량을 측정하여 나타낸 것이다. 경량골재 혼입률이 증가할수록 콘크리트의 단위질량은 점진적으로 감소하였다. 경량 굵은 골재 100% 사용할 경우 KCS에서 제시한 경량콘크리트 최대 단위질량 기준치를 만족하였음을 알 수 있다. 즉 경량 굵은 골재를 100% 사용할 경우 19.8~21.2%의 자중 감소효과가 있었고, 경량 잔골재도 동시에 혼입할 경우 20.8~26.1%의 자중 감소 효과를 나타냈다. 경량 잔골재를 25% 치환 사용할 경우 NF100-LC100 변수보다 약 1.1~1.5%의 미흡한 자중감소를 나타냈고, 경량잔골재 75% 치환 사용할 경우 5.0~6.1%의 자중감소 효과를 나타냈다. 그러나 자기충전 콘크리트 및 경량콘크리트의 성능범위를 모두 만족한 변수는 경량 잔골재 50% 및 경량 굵은 골재 100%를 사용한 변수에서 우수한 1,920 (1,810) kg/m³ 값을 나타냈다.

Fig. 6. Test Results of Density

따라서 자기충전 경량 콘크리트를 제조할 경우 경량 잔골재와 경량 굵은 골재를 동시에 혼합 사용하는 것이 충전성 및 자중 감소에 유리할 것으로 판단된다.

3.5 강도 시험 결과

Figs. 7과 8은 자기충전성 경량 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 및 쪼갬인장강도 실험결과를 나타낸 것이다.

Fig. 7. Results of Compressive Strength

Fig. 8. Results of Splitting Tensile Strength

압축강도 실험 결과, 경량 잔골재 75%를 사용한 변수 외 기타 모든 배합변수에서 재령 28일 압축강도가 50 MPa 이상을 나타냈다. 경량 굵은 골재를 100% 사용할 경우, 일반 굵은 골재를 사용한 변수보다 7% 이상의 압축강도 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 경량 굵은 골재의 파쇄율이 일반 굵은 골재 보다 높아 골재 자체의 강도가 낮은 것으로 판단된다(Türkmen and Kantarcı, 2007). 또한, 경량 잔골재와 경량 굵은 골재를 혼입 사용한 변수들에서, 경량 잔골재의 치환율이 증가할수록 경량 굵은 골재만 사용한 변수보다 압축강도 발현이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 경량 잔골재의 혼입률이 증가할수록 미립분이 많아져 콘크리트 내부의 공극을 채워주는 역할을 한 것으로 판단된다(Kim and Choi, 2010). 그러나 변수 LF75-LC100은 높은 공기량 등으로 인해 50 MPa의 목표강도를 발현하지 못하였다.

Fig. 8은 재령에 따른 쪼갬인장강도를 나타낸 것이며, 압축강도가 커짐에 따라 쪼갬인장강도가 비례적으로 증가하였다. 또한 기존의 CEB-FIP Model Code (CEB-FIP Committee, 1993)에서는 Eqs. (1)-(2)와 같이 쪼갬인장강도에 대한 예측식을 제안하고 있다. Eq. (3)은 Eqs. (1)-(2)의 평균을 나타낸 것이다.

$$f_{st, \max} = 1.85 \times \left(\frac{f_c}{10}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

$$f_{st, \min} = 0.95 \times \left(\frac{f_c}{10}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

$$f_{st, \text{mean}} = 1.40 \times \left(\frac{f_c}{10}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

여기서, f_c 는 압축강도이다.

본 연구에서 사용된 변수들은 최대 및 최소 쪼갬인장강도 범위 내에 포함되며, $f_{st, \text{mean}}$ 과 유사한 경향이 나타났다.

경량골재는 일반골재와 비교하여 품질이 현저히 떨어지기 때문에 경량골재 및 일반골재 사용 콘크리트를 상호 비교할 경우 강도를 비롯한 기타 역학적 특성이 저감하는 것이 일반적인 현상이다. 주로 콘크리트의 강도와 기전상태의 단위용적중량의 관계로 압축강도와 단위용적중량의 배합범위를 예측할 수 있다. 단위용적중량에 대한 압축강도의 비로 산정되는 비강도는 경량콘크리트의 구조적 활용 가능성을 평가할 수 있는 지표이며, Fig. 9는 경량골재의 혼입률 별 비강도를 나타낸 것이다. 경량골재의 혼입률이 증가할수록 비강도는 13.5% 증가하는 것을 알 수 있으나, 경량잔골재 50%와 경량 굵은 골재 100%를 사용한 변수에서 27.6%의 가장 효율적인 비강도를 나타냈다.

Fig. 9. Results of Structural Efficiency

4. 결 론

본 연구에서는 경량 굵은 골재와 경량 잔골재의 종류, 공기량, 유동성, 재료분리저항성, 충전성, 기전 및 절건 밀도, 강도 특성 등과 같은 다양한 배합 요인의 영향을 분석하여 자기충전 경량 콘크리트의 초기 물성을 정량적으로 판단할 수 있는 기초자료를 제공하였다.

본 연구의 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유동성 분석결과 100% 경량 굵은 골재와 75% 경량 잔골재를 사용한 배합을 제외한 모든 배합에서 목표 성능기준을 만족하였으며, 재료분리저항성 및 충전성도 동일한 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 동일 종류의 경량 잔골재 및 굵은 골재를 사용하여도 경량 골재의 사용 비율에 따라 공기량 및 점성이 다르기 때문에 자기충전성이 크게 변화하여 충분한 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- (2) 경량 굵은 골재를 100% 사용할 경우 19.8~21.2%의

자중 감소효과가 있었으나, 경량 잔골재도 동시에 혼입할 경우 20.8~26.1%의 자중 감소 효과를 나타냈다. 따라서 경량 잔골재와 경량 굵은 골재를 동시에 혼합 사용하는 것이 충전성 및 자중 감소에 유리할 것으로 판단된다.

- (3) 경량 굵은 골재를 사용한 자기충전 콘크리트의 압축강도는 기준 콘크리트와 비교하여 최대 7%의 강도 감소하는 경향이 있었으나 경량 잔골재의 혼입률이 증가할수록 기준 콘크리트와 유사한 경향을 나타냈다. 또한, 100% 경량 굵은 골재와 75% 경량 잔골재를 사용한 배합을 제외한 모든 배합에서 50 MPa 이상을 나타냈다.

이상을 종합하여 볼 때, 경량 굵은 골재 100%와 경량 잔골재 50%를 사용한 배합에서 우수한 유동성, 재료분리 저항성, 충전성, 강도특성을 나타냈다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(20NANO-B156177-01)으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- ACI 211.2. (1998). *Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- Andiç-Çakır, Ö., and Hızal, S. (2012). Influence of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of self consolidating lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 34, pp. 575-583.
- Bello, L., Garcia-Diaz, E., and Rougeau, P. (2017). An original test method to assess water absorption/desorption of lightweight aggregates in presence of cement paste. *Construction and Building Materials*, Vol. 154, pp. 752-762.
- Choi, Y.W., Shin, H.C., An, S.I., Chung, J.S., and Cho, S.K. (2003). A study on the properties of lightweight self compacting concrete with mixing proportion of lightweight aggregate. *Proceedings of 2003 Annual Conference*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 1102-1106.
- Comité Euro-International Du Béton (CEB) and Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP) Committee. (1993). *CEB-FIP model code 1990*. London, UK: Thomas Telford.
- Dymond, B.Z. (2007). *Shear strength of a PCBT-53 girder fabricated with lightweight, self-consolidating concrete*. Master thesis, Virginia Tech.
- Floyd, R.W., Hale, W.M., and Bymaster, J.C. (2015). Effect of aggregate and cementitious material on properties of lightweight self-consolidating concrete for prestressed members. *Construction and Building Materials*, Vol. 85, pp. 91-99.
- Hwang, C.L., Bui, L.A.T., Lin, K.L., and Lo, C.T. (2012). Manufacture and performance of lightweight aggregate from municipal solid waste incinerator fly ash and reservoir sediment for self-consolidating lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, No. 10, pp. 1159-1166.
- Ismail, M.K., and Hassan, A.A. (2016). Use of metakaolin on enhancing the mechanical properties of self-consolidating concrete containing high percentages of crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 125, pp. 282-295.
- Japan Society of Civil Engineering (JSCE). (1999). *Recommendations for self-consolidating concrete*. JSCE, Tokyo, Japan.
- Kabay, N., and Aköz, F. (2012). Effect of prewetting methods on some fresh and hardened properties of concrete with pumice aggregate. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, No. 4, pp. 503-507.
- Karahan, O., Hossain, K.M.A., Ozbay, E., Lachemi, M., and Sancak, E. (2012). Effect of metakaolin content on the properties self-consolidating lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 31, pp. 320-325.
- KCS 14 20 20. (2018). *Light weight aggregate concrete*. Korean Construction Specification, Ministry of Land, Infrastructure and Transport..
- Kim, Y.J., and Choi, Y.W. (2010). The quality properties of self consolidating concrete using lightweight aggregate. *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 30, No. 6A, pp. 573-580.
- Kim, Y.J., Choi, Y.W., and Lachemi, M. (2010). Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 1, pp. 11-16.
- Kim, Y.U., Kim, D.B., Kim, S.J., Kim, H.J., Jeong, S.B., and Choi, S.J. (2017). A compressive strength and drying shrinkage properties of mortar using lightweight aggregate by pre-wetting time. *Proceeding*

- of 2017 Fall Conference, Korean Recycled Construction Resource Institute, Vol. 17, No. 2, pp. 124-125.
- Korea Concrete Institute (KCI). (2009). *Concrete standard specification*.
- Kwon, Y.H. (2017). An experimental study on the construction performances and economical evaluation of the self-compacting concrete by cementitious materials. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 29, No. 3, pp. 315-322.
- Lachemi, M., Bae, S., Hossain, K.M.A., and Sahmaran, M. (2009). Steel-concrete bond strength of lightweight self-consolidating concrete. *Materials and Structures*, Vol. 42, No. 7, pp. 1015-1023.
- Lee, K.H., Yang, K.H., and Choi, B.S. (2019). Effect of natural sand content on the mechanical properties of lightweight aggregate concrete with different compressive strengths. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 31, No. 2, pp. 113-121.
- Lotfy, A., Hossain, K.M., and Lachemi, M. (2014). Application of statistical models in proportioning lightweight self-consolidating concrete with expanded clay aggregates. *Construction and Building Materials*, Vol. 65, pp. 450-469.
- Madandoust, R., Ranjbar, M.M., and Mousavi, S.Y. (2011). An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 9, pp. 3721-3731.
- Okamura, H. (1999). *Self compacting high performance concrete*. Social System Institute, Tokyo.
- Palanisamy, M., Kolandasamy, P., Awoyera, P., Gobinath, R., Muthusamy, S., Krishnasamy, T.R., et al. (2020). Permeability properties of lightweight self-consolidating concrete made with coconut shell aggregate. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, No. 3, pp. 3547-3557.
- Park, C.B., Kim, Y.H., Jun, Y.B., Kim, J.H., and Ryu, D.H. (2019). Properties comparison of concrete using lightweight aggregate with different water conditions and natural aggregate. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 31, No. 5, pp. 459-466.
- Sancak, E., Hossain, K.M.A., and Lachemi, M. (2017). Bond loss between metakaolin-incorporated structural lightweight self-consolidating concrete and corroded steel reinforcement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 29, No. 5, 04016283. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001811
- Shi, C., and Wu, Y. (2005). Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrete containing glass powder. *ACI Materials Journal*, Vol. 102, No. 5, pp. 355-363.
- Su, N., Hsu, K.C., and Chai, H.W. (2001). A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 12, pp. 1799-1807.
- Türkmen, İ., and Kantarcı, A. (2007). Effect of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete. *Building and Environment*, Vol. 42, No. 6, pp. 2378-2383.
- Wang, H.Y. (2009). Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 6, pp. 2332-2337.
- Wu, Z., Zhang, Y., Zheng, J., and Ding, Y. (2009). An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 5, pp. 2087-2092.
- Yang, K.H. (2019). Evaluation of mechanical properties of lightweight concrete using bottom ash aggregates. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 31, No. 4, pp. 331-337.
- Yoon, S., and Han, M.C. (2018). Effect analysis of mix designing factors on workability and rheological parameters of self-compacting concrete. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 18, No. 3, pp. 235-242.
- Zarnaghi, V.N., Fouroghi-Asl, A., Nourani, V., and Ma, H. (2018). On the pore structures of lightweight self-compacting concrete containing silica fume. *Construction and Building Materials*, Vol. 193, pp. 557-564.

Received	October 21, 2020
Revised	October 22, 2020
Accepted	November 2, 2020