

# 단위중량 2,000kg/m<sup>3</sup>급 고강도 시멘트 복합체 개발을 위한 기초연구

## Preliminary Study on Development of High Strength Cement Composites at 2,000kg/m<sup>3</sup> of Specific Weight

정연웅<sup>1</sup> · 임귀환<sup>2</sup> · 강용학<sup>3</sup> · 정상화<sup>4</sup> · 김주형<sup>5\*</sup>Yeon-Ung Jeong<sup>1</sup> · Gwi-Hwan Lim<sup>2</sup> · Yong-Hak Kang<sup>3</sup> · Sang-hwa Jung<sup>4</sup> · Joo-Hyung Kim<sup>5\*</sup>

(Received November 18, 2020 / Revised December 10, 2020 / Accepted December 10, 2020)

This study explores manufacturing technology and basic properties of high strength cement composites at 2,000kg/m<sup>3</sup> of specific weight. It is suggested that lightweight-high strength cement composites can be produced by substituting silica sand in ultra-high performance concrete mixture with lightweight materials such as solid bubbles and lightweight fine aggregates. The 28-day compressive strengths of cement composites with solid bubbles were from 116MPa to 141MPa at below 2.0g/cm<sup>3</sup> of unit density while the cement composites with lightweight aggregates possessed lower compressive strength and higher unit density. The specific weight calculated from mixture proportions did not have significant difference with unit density of hardened cement composites, indicating that unit density of hardened cement composites can be estimated from the specific weight in mixture proportions.

**키워드** : 고강도, 경량, 배합설계, 압축강도, 단위중량**Keywords** : High strength, Lightweightness, Mix design, Compressive strength, Specific weight

### 1. 서론

혼화제 기술의 발달로 물-시멘트 비(w/c) 0.2 이하의 콘크리트 개발이 가능해졌으며, 압축강도 150MPa 이상의 콘크리트를 초고 성능콘크리트(ultra-high performance concrete, UHPC)라 칭하고 있다(Zhu et al. 2020). UHPC의 원재료는 시멘트, 실리카 흙, 석영 분말(quartz powder), 석영 모래(quartz sand), 고성능감수제(superplasticizer) 및 강섬유 등이 사용되는 것으로 알려져 있다(Shi et al. 2015). 사용되는 원재료들의 입도를 고려하여 내부 충전(packing)을 극대화하여 공극을 줄임으로써 역학적 성능을

향상시키는 설계방법이 도입되어 150MPa 이상의 고성능을 발현한다(de Larrard and Sedran 1994). UHPC의 역학적 성능을 향상시키기 위해 경화 후 60℃ 혹은 90℃의 고온 양생을 실시되며, 쌀겨재(rice husk ash), 탄산칼슘(calcium carbonate) 분말 및 나노재로 등이 원재료로 사용되기도 한다(Kang et al. 2019a; Kang et al. 2019b; Ghagari et al. 2015).

반면, 다양한 경량재료를 활용하여 단위용적중량을 낮춘 경량 콘크리트의 개발 또한 활발히 수행된다. 단위용적중량 2,000kg/m<sup>3</sup> 이하의 콘크리트를 경량 콘크리트로 분류하고 있다(Yang 2013). 경량 콘크리트의 개발을 위해 다양한 경량 골재들이

\* Corresponding author E-mail: kjhmole@kcl.re.kr

<sup>1</sup>(재)한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터 선임연구원 (Construction Technology Research Center, Korea Conformity Laboratories, Seoul, 08503, Korea)<sup>2</sup>(재)한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터 주임연구원 (Construction Technology Research Center, Korea Conformity Laboratories, Seoul, 08503, Korea)<sup>3</sup>(재)한국건설생활환경시험연구원 대구경북지원 책임연구원 (Daegu & Gyeongbuk Branch, Korea Conformity Laboratories, Daegu, 42994, Korea)<sup>4</sup>(재)한국건설생활환경시험연구원 영남본부 본부장 (Yeongnam Division, Korea Conformity Laboratories, Daegu, 42994, Korea)<sup>5</sup>(재)한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터 책임연구원 (Construction Technology Research Center, Korea Conformity Laboratories, Seoul, 08503, Korea)

Copyright © 2020 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

제시되고 있다. Choi and Kim(2018)은 바텀애시와 소성된 인공경량골재를 사용한 경량 콘크리트를 제안하였으며, Kim et al.(2009)은 폐유리를 가공한 인공경량골재의 사용을 제안하였다. 국외에서는 야자수 껍데기(palm oil shell) 등의 재료를 경량 골재로 활용하는 연구들도 활발히 수행되고 있다(Aslam et al. 2016).

일반적으로 강도 및 시멘트 복합체의 밀도는 반비례 관계를 갖는 것으로 알려져 있다. 경량 콘크리트의 압축강도는 15MPa~40MPa 수준으로 고강도 발현이 어려운 것으로 알려져 있으며, UHPC의 경우 밀도가 약 2.3 수준인 것으로 알려져 있다. Kılıç et al.(2003)은 경량골재와 혼화재의 사용으로 단위용적중량 1,944kg/m<sup>3</sup> 수준에서 재령 3개월 압축강도 43MPa 발현이 가능한 것을 보고하였으나, 고강도 콘크리트의 범주에 속하기에는 부족한 강도수준이다. 또한, 이후 경량 고강도 콘크리트의 개발은 미진한 수준이다.

본 연구에서는 경량 고강도 시멘트 복합체 개발을 위해 UHPC 배합의 잔골재를 경량재료인 솔리드버블 및 경량골재로 치환하여 단위용적중량 2,000kg/m<sup>3</sup> 수준의 시멘트 복합체를 제조한다. 시

멘트 복합체의 역학적 성능을 확인하기 위해 휨강도 및 압축강도 실험을 실시하고, 제작한 시편의 밀도를 측정하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료

본 연구에서는 A사에서 제조한 1종 포틀랜드 시멘트(OPC), E사의 실리카 흙(SF), S사의 실리카 샌드(SS) 및 실리카 분말(SP), M사의 솔리드버블(SB) 4종, B사의 경량골재(LA) 2종 및 D사의 폴리 카르본산계(polycarboxylate) 고성능감수제(superplasticizer, PC)를 사용하였다. 사용한 분말형 재료 및 골재의 입도분포를 Fig. 1에 나타내었다. 사용한 SF 및 SP는 OPC보다 입도가 낮은 것으로 조사되었으며, 4종의 SB는 OPC보다 입도가 높은 것으로 조사되었다. 또한, 4종의 SB는 종류에 무관하게 비슷한 수준의 입도를 갖는 것으로 조사되었다. 각 재료들의 단위 중량은 OPC 3,150kg/m<sup>3</sup>, SF 2,200kg/m<sup>3</sup>, SP 2,650kg/m<sup>3</sup>, SS 2,648kg/m<sup>3</sup>, SB1 420kg/m<sup>3</sup>, SB2 460kg/m<sup>3</sup>, SB3 600kg/m<sup>3</sup>, SB4 600kg/m<sup>3</sup>, 두 종류의 LA는 1,700kg/m<sup>3</sup>으로 나타났다. LA의 흡수율은 Kim et al.(2018)이 제시한 것과 동일하게 3일 기준 10% 수준이다.

사용한 분말형 재료의 원소분석 결과 및 강열감량(loss on ignition, LOI)를 Table 10에 나타내었다. 단, 원소 함량이 0.1% 이하인 원소는 제외하고 나타내었다. Table 10에 나타난 바와 같이 OPC의 화학조성은 일반적인 포틀랜드 시멘트와 유사한 것으로 조사되었으나, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 강열감량이 다소 낮은 것으로 나타났다. SF 및 SP는 순수한 SiO<sub>2</sub>에 가까운 화학조성을 보였으며, SB 4종은 SiO<sub>2</sub>, CaO 및 Na<sub>2</sub>O를 주요 원소로 갖는 것으로 나타났다. 다만, SB 종류에 따른 화학조성의 차이는 미비한 것으로 조사되었다.

원재료의 광물상 조성을 X-선 회절(X-ray diffraction, XRD)로 조사하였으며, OPC의 광물상 정량분석 결과 및 분말형 재료의 광물성 정성분석 결과를 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타내었다. 사용한 OPC는 C<sub>3</sub>S 51.0%, β-C<sub>2</sub>S 32.7%, C<sub>4</sub>AF 9.0%, C<sub>3</sub>A 2.6%, 석고 3.1%, 무수석고 1.7%의 조성을 갖고 있는 것으로 조사되었다. 일반적인 포틀랜드 시멘트와 비교하여 C<sub>3</sub>A 함량이 다소 낮은 것으로 조사되었으나, Table 1의 원소분석 결과에서 OPC에 함유된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 낮은 것과 일치하는 경향을 갖는 것으로 조사되었다. SP는 quartz(SiO<sub>2</sub>)와 소량의 cristobalite(SiO<sub>2</sub>)로 구성되어 있는 것으로 나타났으며, SF는 quartz 및 cristobalite와 함께 moissanite(SiC)를 소량 포함하고 있는 비정질(amorphous)인 것으로 나타났다. 4종의 SB는 결정상(crystalline phase)을 포함하지 않는 비정질로

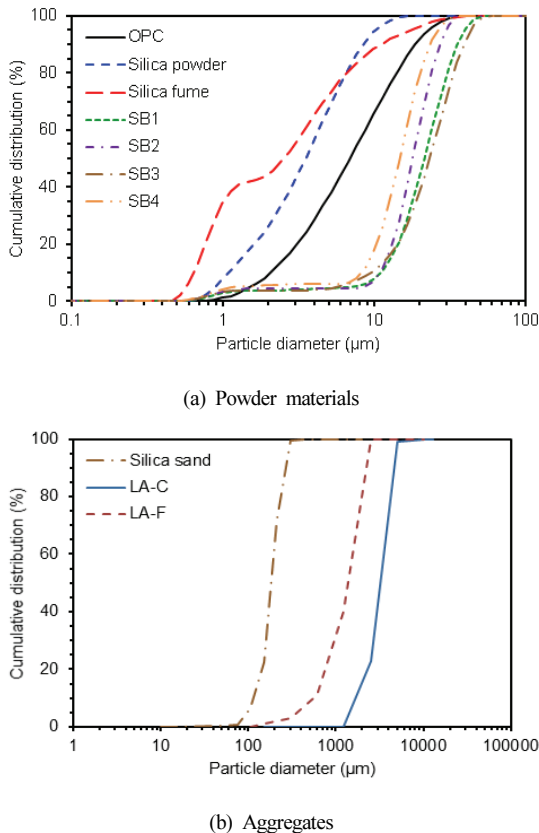


Fig. 1. Cumulative particle size distribution

Table 1. Oxide chemical compositions of raw powder materials

Elements	Raw materials						
	OPC	SP	SF	SB1	SB2	SB3	SB4
CaO	61.9	0.1	0.1	12.9	13.1	12.8	13.4
SiO <sub>2</sub>	22.6	99.1	96.0	78.3	78.5	78.3	79.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.8	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
MgO	2.6	-	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
SO <sub>3</sub>	2.5	-	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.5	-	0.3	-	-	-	-
K <sub>2</sub> O	1.2	-	0.4	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> O	0.3	-	0.3	6.4	6.1	6.5	5.2
TiO <sub>2</sub>	0.2	0.1	-	-	-	-	-
ZnO	0.2	-	-	-	-	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.2	-	-	0.7	0.6	0.7	0.6
MnO	0.1	-	-	-	-	-	-
SrO	0.1	-	-	-	-	-	-
LOI	1.0	0.4	2.1	0.9	0.9	0.9	0.7

구성된 것으로 나타났으며, SB 종류에 따른 광물상 조성의 차이는 없는 것으로 나타났다.

사용한 PC의 고형분 함량은 38.5%인 것으로 조사되었다.

## 2.2 실험 방법

분말형 원재료의 입도분석을 위해 광회절 분석(Malvern Instruments LTD., MS 3000)을 실시하였으며, 에탄올을 용매로 사용하여 분석을 진행하였다. 실리카 샌드 및 경량 골재의 입도분포는 KS F 2502에 따라 체가름 시험으로 입도분석을 실시하였다. 분말형 원재료의 원소분석은 X-선 형광분석법(X-ray fluorescence, XRF)(Bruker Co, Ltd., S8 TIGER)을 이용하였으며, 분말형 재료를 글래스 비드로 제작하여 측정을 진행하였다. 원재료의 광물상 분석을 위해 X-선 회절(X-ray diffraction, XRD)(Rigaku Company, SmartLab)분석을 실시하였으며, 사용한 X-선의 파장은  $\lambda=1.5418(\text{Cu-K}\alpha)$ , 측정범위는  $2\theta = 5^\circ \sim 70^\circ$ , scanning step은  $0.02^\circ$ , 및 scanning rate은  $1^\circ/\text{min}$  이다. 측정된 회절패턴은 X'pert HighScore Plus 소프트웨어와 ICSD (Inorganic Crystal Structure Database)를 이용하여 정성분석을 실시하였다. OPC의 샘플을 대상으로 X'pert HighScore Plus 소프트웨어를 이용하여 Rietveld 정량분석을 실시하였다.

경량 고강도 시멘트 복합체 제조를 위해 선행연구(Kang et al. 2019a)에서 제시한 초고성능콘크리트(ultra-high performance concrete, UHPC) 배합을 기준배합(control)으로 선정하였다. 선정

한 배합의 물-결합재(w/B) 비는 0.20이고, 배합표 상의 단위용적중량은  $2,380\text{kg}/\text{m}^3$ 이다. 기준배합을 바탕으로 경량 고강도 시멘트 복합체 제조를 위해 배합표상의 단위용적중량이  $2,000\text{kg}/\text{m}^3$ 이 되도록 기준배합의 SS를 경량재료인 SB 및 LA로 치환하여 배합표를 구성하였다. SB의 경우 SS를 일부 치환하는 것만으로 단위용적중량  $2,000\text{kg}/\text{m}^3$ 을 달성할 수 있는 반면, LA는 SS를 전부 치환하더라도 목표하는 단위용적중량을 도달하는 배합이 불가능하였다. 따라서, LA를 사용하는 배합의 경우 결합재와 SP의 함량을 동일비율로 감소시키며 배합표상의 단위용적중량을  $2,000\text{kg}/\text{m}^3$ 이 되도록 구성하였다. 고강도 배합임을 감안하여 공기량은 1%로 가정하였으며, 물-결합재 비, 결합재-혼화제 비는 고정하였다. 구성한

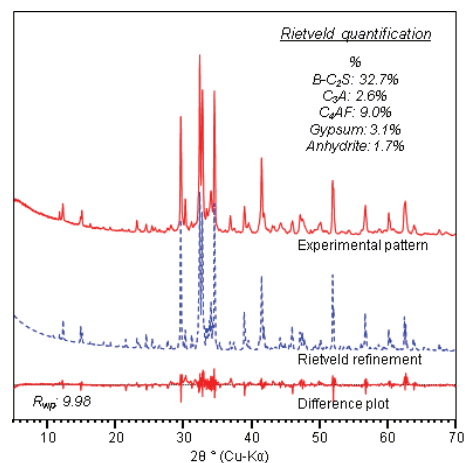


Fig. 2. XRD quantitative phase analysis of OPC

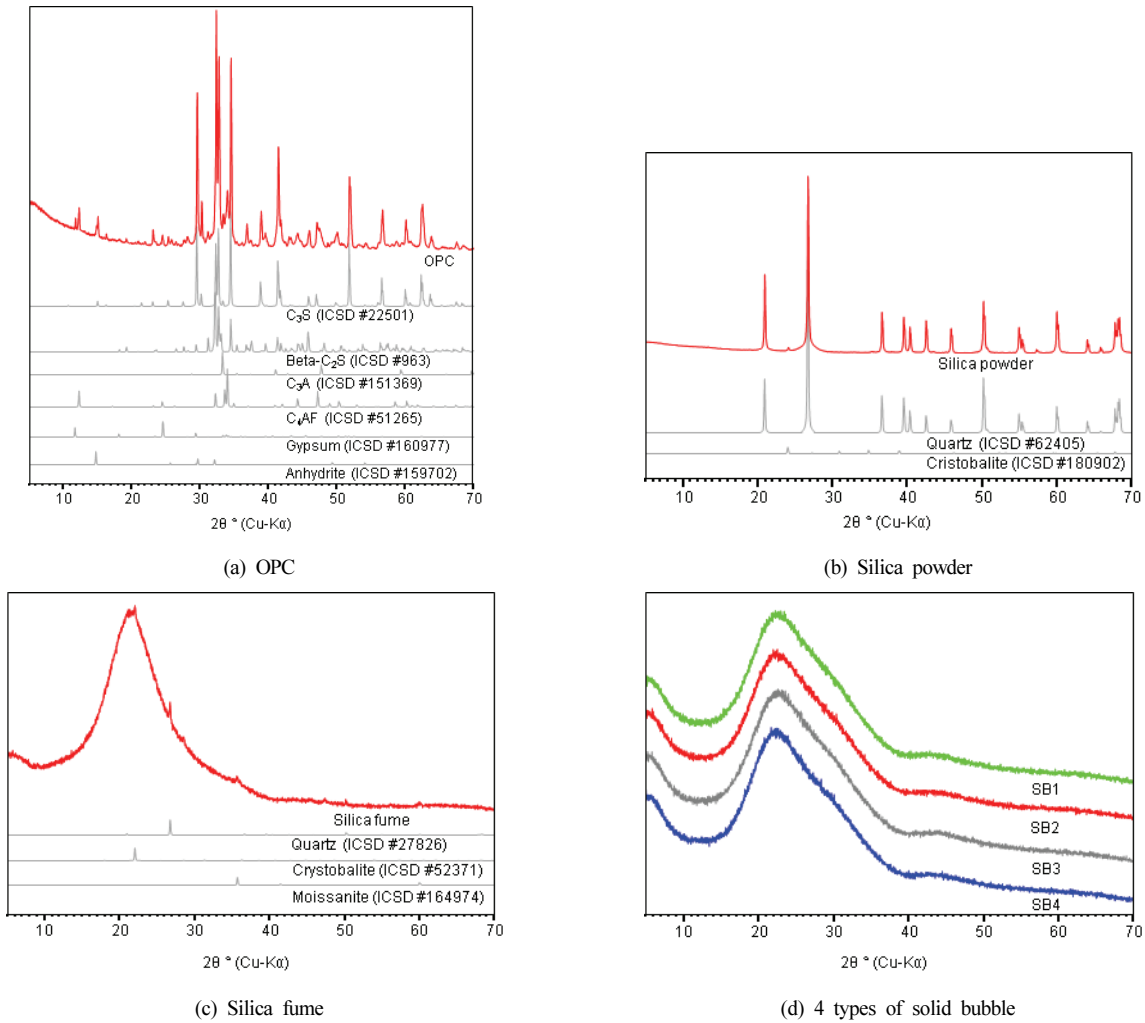


Fig. 3. Qualitative phase analysis of raw materials

배합표는 Table 2와 같다. Table 2에 나타난 PC 함량은 고형분 함량을 기준으로 나타낸 것이며, 배합 실험시 PC에 함유된 수분함량을 고려하여 배합수를 조정하였다.

기준배합의 경우 Table 2에 나타난 고상(solid phase)재료를 기계식 믹서에 투입하고 5분간 건비빔을 실시하였다. 이후 물과 PC를 투입하여 시멘트 복합체의 유동성이 확보될 때 까지 기계식 믹서의 중속으로 배합을 실시하였으며, 유동성 확보이후 고속에서 1분, 저속에서 1분 추가배합을 실시하였다. 경량재료(SB 및 LA)를 포함하는 샘플의 경우 재료의 날림으로 인한 재료 손실 및 기계식 믹서에 의한 재료의 파손을 방지하기 위해 경량재료를 제외한 재료들을 우선 배합하고 유동성이 확보된 이후 경량재료를 투입하여 고속 1분, 저속 1분 추가배합을 실시하였다. SB는 절건상태, LA는 표건상태의 재료를 사용하였다.

배합이 완료된 시멘트 복합체는 KS L ISO 679에 따라 40×40×160mm<sup>3</sup> 몰드에 타설하여 20℃ 상대습도(RH) 99% 항온항습기에서 2일간 양생하였다. 채령 2일의 시멘트 복합체를 탈형(demolding)하여 20℃ 상대습도 65% 및 90℃ 상대습도 99%에서 2일간 추가 양생을 실시하였으며, 이후 채령 14일 및 28일까지 20℃ 상대습도 65%의 항온항습실에서 양생을 실시하였다.

채령 2일, 4일, 14일, 및 28일 시멘트 복합체를 대상으로 휨강도 실험을 실시하였으며, 휨강도 측정이 완료된 시편을이용하여 압축강도 측정을 실시하였다. 동일 채령 시편의 표면건조포화상태(saturated surface dry condition, SSD condition)에서의 중량을 측정하고, 동일 시편을 50℃ 건조기에서 24시간 건조 후 절대건조상태의 중량을 측정하여 SSD 상태의 단위중량과 절대건조상태의 단위중량을 산출하였다.

Table 2. Mixture proportions of cement composites

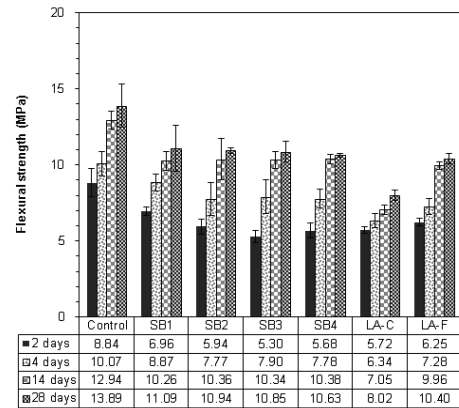
Label	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Binder		Silica powder (kg/m <sup>3</sup> )	Silica sand (kg/m <sup>3</sup> )	SB1 (kg/m <sup>3</sup> )	SB2 (kg/m <sup>3</sup> )	SB3 (kg/m <sup>3</sup> )	SB4 (kg/m <sup>3</sup> )	LA-C (kg/m <sup>3</sup> )	LA-F (kg/m <sup>3</sup> )	PC (kg/m <sup>3</sup> )	Air (%)	w/B	Sum	
		Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Silica fume (kg/m <sup>3</sup> )													
Control	Mass(kg)	208.0	832.0	208.0	208.0	915.2	0	0	0	0	0	0	9.6	1%	0.2	2380.8
	Volume(m <sup>3</sup> )	0.208	0.264	0.095	0.078	0.346	0	0	0	0	0	0	9.6	0.01	0.2	1.0
SB1	Mass(kg)	208.0	832.0	208.0	208.0	463.0	72.0	0	0	0	0	0	9.6	1%	0.2	2000.6
	Volume(m <sup>3</sup> )	0.208	0.264	0.095	0.078	0.175	0.171	0	0	0	0	0	9.6	0.01	0.2	1.0
SB2	Mass(kg)	208.0	832.0	208.0	208.0	455.0	0	80.0	0	0	0	0	9.6	1%	0.2	2000.6
	Volume(m <sup>3</sup> )	0.208	0.264	0.095	0.078	0.172	0	0.174	0	0	0	0	9.6	0.01	0.2	1.0
SB3	Mass(kg)	208.0	832.0	208.0	208.0	418.0	0	0	117.0	0	0	0	9.6	1%	0.2	2000.6
	Volume(m <sup>3</sup> )	0.208	0.264	0.095	0.078	0.158	0	0	0.195	0	0	0	9.6	0.01	0.2	1.0
SB4	Mass(kg)	208.0	832.0	208.0	208.0	418.0	0	0	0	117.0	0	0	9.6	1%	0.2	2000.6
	Volume(m <sup>3</sup> )	0.208	0.264	0.095	0.078	0.158	0	0	0	0.195	0	0	9.6	0.01	0.2	1.0
LA-C	Mass(kg)	178.5	713.9	178.5	178.5	0	0	0	0	743.0	0	0	8.2	1%	0.2	2000.4
	Volume(m <sup>3</sup> )	0.178	0.227	0.081	0.067	0	0	0	0	0.437	0	0	8.2	0.01	0.2	1.0
LA-F	Mass(kg)	178.5	713.9	178.5	178.5	0	0	0	0	0	743.0	0	8.2	1%	0.2	2000.4
	Volume(m <sup>3</sup> )	0.178	0.227	0.081	0.067	0	0	0	0	0	0.437	0	8.2	0.01	0.2	1.0

### 3. 연구결과

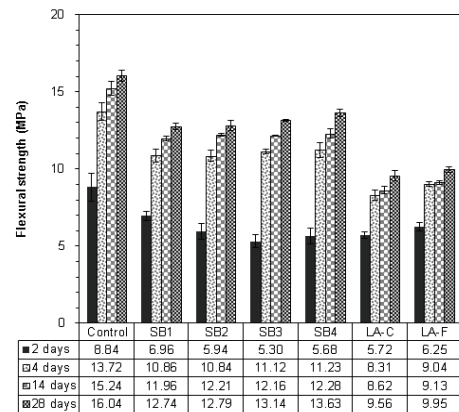
#### 3.1 휨강도 실험 결과

Fig. 4에 휨강도 실험 결과를 나타내었다. 기준배합의 경우 20°C에서만 양생하는 경우 재령 28일에 13.9MPa 수준의 휨강도를 갖는 것으로 나타났으며, 2일간 90°C 양생을 실시하는 경우 휨강도가 16.0MPa 수준으로 고온양생으로 약 15% 정도의 강도가 증진되는 것으로 나타났다. SB를 포함하는 시편의 경우에도 2일간의 90°C 양생으로 적게는 14.9%에서 많게는 28.2%까지 휨강도가 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 20°C 양생 시편의 경우 재령 2일에서 28일까지 휨강도가 재령일에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 보이거나, 90°C에서 2일간 양생하는 경우 양생 직후인 재령 4일에 강도가 큰 폭으로 상승하고 이후 미세하게 증가하는 경향을 갖는다. 이는 초기 고온 양생으로 인해 미수화 시멘트 입자 또는 실리카 흡의 수화반응을 촉진하며 공극을 충전한 것에 기인한 것으로 추정된다(Lee et al. 2020).

LA를 혼입한 시편의 경우 동일한 단위용적중량으로 배합설계를 실시했음에도 불구하고 휨강도의 수준이 SB를 혼입한 시편보다 낮은 것으로 조사되었다. 이는 LA의 다공성 특성으로 인한 불안정한 SSD 상태 발현, 콘크리트-골재 계면(ITZ)에서의 국부적인 물-결합재 비 상승, 또는 낮은 LA의 강도에 기인한 골재의 파괴인 것으로 판단된다(Park et al. 2019). LA를 혼입한 시편에서도 90°C



(a) 20°C Curing



(b) 90°C Curing

Fig. 4. Results of flexural strength tests

양생으로 인한 초기 강도 발현은 다른 시편들과 동일한 양상을 보이는 것으로 나타났다.

### 3.2 압축강도 실험 결과

Fig. 5에 압축강도 실험 결과를 나타내었다. 고온양생을 실시하지 않은 기준배합의 재령 28일 강도는 137.9MPa으로 Kang et al.(2019)의 선행연구의 결과와 유사한 것이나 나타났다. 고온양생을 실시하는 경우 재령 28일 강도는 175.5MPa 수준으로 휨강도 실험 결과와 유사하게 고온양생으로 인해 재령 28일 강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 증가폭은 약 27% 수준으로 휨강도의 증가폭 보다 큰 것으로 나타났다.

SB 및 LA를 포함하는 시편의 경우 20℃에서 양생한 시편들의 재령 28일 압축강도는 약 100MPa 수준에서 130MPa 수준으로 다량의 경량 재료를 혼입하였음에도 고강도 발현이 가능한 것으로

조사되었다. LA를 혼입한 시편이 고온양생으로 추가적인 강도발현이 없는 반면, SB를 혼입한 시편의 경우 고온양생으로 재령 28일 강도를 상당 수준 끌어 올릴 수 있는 것으로 나타났다. LA를 혼입한 시편의 경우 경량골재의 낮은 역학적 특성으로 경화된 매트릭스의 경도가 올라갈지라도 골재에서 파괴가 시작되어 추가적인 강도 발현이 어려운 것으로 판단된다. 반면, SB의 경우 높은 경도와 낮은 분말도로 인해 높은 하중에 대한 저항성이 확보되어 고온양생으로 인해 매트릭스의 경도가 상승한 것이 시멘트 복합체의 강도발현으로 이어진 것으로 판단된다.

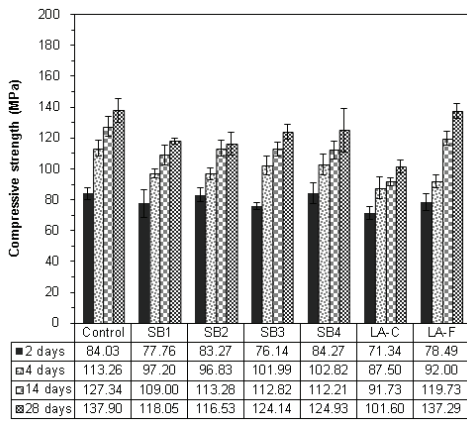
### 3.3 시멘트 복합체의 단위중량

Fig. 6에 경화된 시멘트 복합체의 밀도를 나타내었다. 기준배합의 경우 SSD 상태의 밀도가 2.36 및 2.35인 것으로 조사되었다. 이는 Table 2의 배합표에서 계산한 단위용적중량과 유사한 값을 갖는다. 완전 건조상태의 밀도는 각각 2.33 및 2.34로 고온 양생을 실시하는 경우 시편내부의 자유수(free water)가 수화반응에 더 적극적으로 참여하면서 자유수의 양이 감소하여 밀도가 증가한 것으로 판단된다.

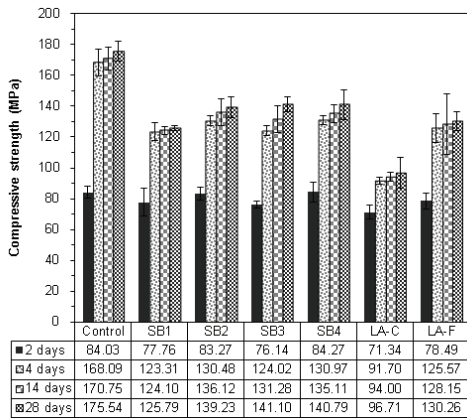
SB를 혼입한 시편의 경우 SSD 상태에서의 밀도가 1.95g/cm<sup>3</sup>~1.99g/cm<sup>3</sup>으로 기준배합과 유사하게 Table 2의 배합표상에서의 단위용적중량과 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는, 배합설계시 계산한 단위용적중량이 경화된 시멘트 복합체의 밀도와 큰 차이 없이 발현될 수 있음을 의미한다. 또한, Fig. 5에 나타난 바와 같이 SB를 혼입한 시편의 압축강도가 116MPa~ 141MPa 수준인 점을 고려했을 때, 경화된 시멘트 복합체 밀도 2.0cm/m<sup>3</sup> 이하에서의 역학적 성능이 기존에 개발된 경량콘크리트를 크게 상회한다(Yang 2013). 이는 UHPC 배합의 SS를 SB로 치환하는 배합을 사용할 경우 경량과 동시에 고강도를 발현하는 시멘트 복합체의 제조가 가능하다는 것을 나타낸다.

LA를 혼입한 시편의 경우 시멘트 복합체의 밀도가 2.0~2.1 수준인 것으로 조사되었으며, 이는 Table 2의 배합표에서 계산한 단위용적중량을 상회하는 것으로 나타났다. 이는 LA의 높은 흡수율로 인해 SSD 밀도 및 배합수 조절이 완전하지 않았음을 나타내며, 선행 연구에서도 경량골재의 흡수율 및 이로 인한 배합수 조절의 어려움을 보고한 사례가 있다(Choi et al. 2019).

경화된 시멘트 복합체의 SSD 상태의 밀도와 절대건조 상태의 밀도를 이용하여 Fig. 7과 같이 시멘트 복합체의 함수율(moisture content)을 계산하였다. 경화된 시멘트 복합체의 함수율을 재령에 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 90℃에서 2일 고



(a) 20℃ Curing



(b) 90℃ Curing

Fig. 5. Results of compressive strength tests

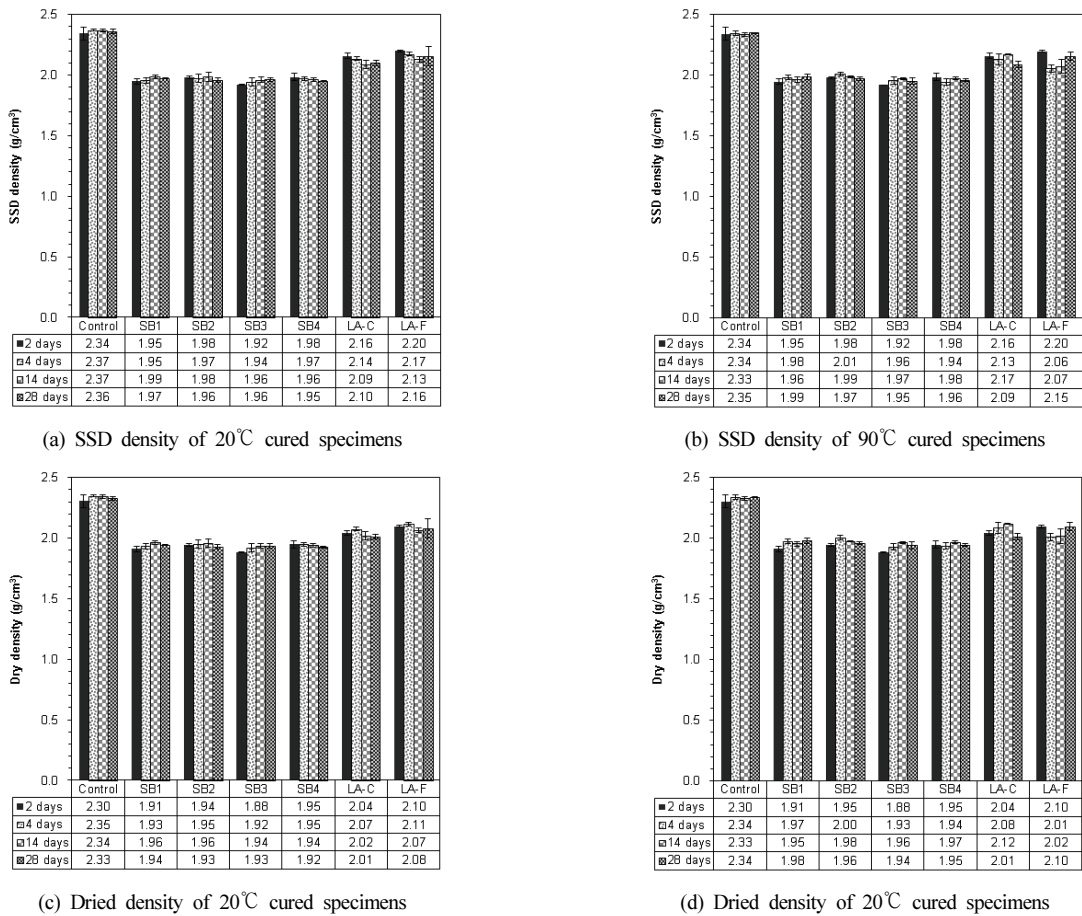


Fig. 6. Specific density of hardened cement composites

온 양생을 실시하는 경우 함수율은 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 재령일 증가 및 고온 양생으로 인해 시멘트 복합체 내부의 자유수가 수화반응에 참여한 것에 기인한다. Mather and William(2002)은 일반적인 포틀랜드 시멘트의 완전 수화를 위해 w/c 비 0.4 정도가 필요하다고 주장하였다. 반면, 본 연구에서의 w/B 비는 0.2 수준으로 상당한 양의 미수화 시멘트 입자 및 실리카 흄 존재하는 것을 알 수 있다. 이러한 미수화 입자들이 90°C의 고온 양생을 통해 수화 반응에 참여하고 이로 인해 역학적 성능에 크게 기여했음을 알 수 있다. 반면, LA를 혼입한 시편의 경우 고온 양생으로 인한 역학적 성능 향상이 식별되지 않았다. 이는 Fig. 7에서와 같이 LA를 포함한 시편의 높은 함수율과 관계될 수 있다. LA를 포함한 시편의 경우 고온양생을 실시하더라도 매우 높은 수준의 함수율을 유지하며, 고온양생으로 인한 역학적 성능 발현을 제한시킨 것으로 판단된다.

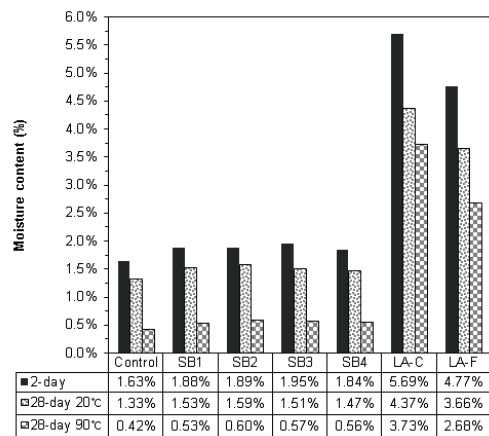


Fig. 7. Moisture content of hardened cement composites

## 4. 결론

본 연구에서는 솔리드 버블(SB) 및 경량골재(LA)로 초고성능콘크리트(UHPC)의 실리카 샌드(SS)를 치환하여 고강도 경량 시멘트 복합체를 제조하고 휨강도, 압축강도 및 경화체의 밀도 측정을 통해 제조한 시멘트 복합체의 물성을 검토하였다. 본 연구에서의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. UHPC 배합에 SB 및 LA 등 경량재료를 치환하는 방식으로 경량 고강도 시멘트 복합체의 제조가 가능한 것을 확인하였다. SB를 사용한 시멘트 복합체의 경우 밀도 2.0g/cm<sup>3</sup> 이하에서 재령 28일 강도 116MPa~141MPa 수준으로 기존의 경량콘크리트 보다 매우 우수한 성능발현이 가능한 것으로 나타났다. LA를 사용한 경우 밀도 2.01g/cm<sup>3</sup>~2.15g/cm<sup>3</sup> 수준에서 압축강도 약 100MPa 수준의 성능 발현이 가능한 것으로 나타났다.
2. 사용하는 원재료의 밀도를 이용하여 배합표에서 계산된 단위용적 중량과 경화된 시멘트 복합체의 밀도가 거의 유사하게 발현되는 것으로 나타났으며, 이는 배합설계시 계산된 단위용적 중량을 통해 경화된 시멘트 복합체의 밀도를 추정할 수 있는 것을 보여준다. 다만, LA를 사용하는 경우 골재의 다공성 특성으로 표면건조포화상태 밀도 계산에 오차가 생겨 경화체 밀도와 단위용적 중량이 완전히 일치하지 않을 수 있다.
3. SB를 혼입한 시편의 경우 재령 초기 2일의 90℃ 양생을 통해 역학적 성능을 크게 개선할 수 있는 것으로 나타났으나, LA를 혼입한 시편의 경우 초기 고온 양생으로 역학적 성능 개선이 발생하지 않는 것으로 나타났다.
4. 제조한 경량 고강도 시멘트 복합체의 휨강도 발현과 압축강도 발현은 사용하는 경량재료의 종류와 무관하게 동일한 경향을 갖는 것으로 나타났다.
5. LA를 혼입한 시멘트 복합체의 경우 고온양생을 하더라도 매우 높은 수준의 함수율을 갖는 것으로 조사되었으며, 이로 인해 골재와 시멘트 복합체 계면의 국부적인 물-시멘트 비증가로 시멘트의 추가 수화반응을 통한 계면 충진이 충분하지 못해 시멘트 복합체의 역학적 성능을 크게 높이지 못하는 것으로 판단된다.
6. 본 연구의 결과는 2,000kg/m<sup>3</sup>급 고강도 시멘트 복합체를 대상으로만 연구가 수행되어져 추후 2,000kg/m<sup>3</sup> 이하의 밀도를 갖는 고강도 시멘트 복합체 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## Conflicts of interest

None.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 「나노기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼 나노 콘크리트 기술개발」사업의 지원에 의해 수행되었습니다(과제번호: 20NANO-B156177-01). 이에 감사드립니다.

## References

- Aslam, M., Shafiqh, P., Jumaat, M.Z. (2016). Oil-palm by-products as lightweight aggregate in concrete mixture: a review, *Journal of Cleaner Production*, **126**, 56–73.
- Choi, S.J., Kim, D.B., Lee, K.S., Kim, Y.U. (2019). The study on the physical and strength properties of lightweight concrete by replacement ratio of artificial lightweight aggregate, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **19(4)**, 313–322 [in Korean].
- Choi, H.B., Kim, J.M. (2018). Fundamental properties of lightweight concrete with dry bottom ash as fine aggregate and burned artificial lightweight aggregate as coarse aggregate, *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*, **6(4)**, 267–274 [in Korean].
- de Larrard, F., Sedran, T. (1994). Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model, *Cement and Concrete Research*, **24(6)**, 997–1009.
- Ghagari, E., Costa, H., Júlio, E. (2015). Critical review on eco-efficient ultra high performance concrete enhanced with nano-materials, *Construction and Building Materials*, **101**, 201–208.
- Kang, S.H., Lee, J.H., Hong, S.G., Moon, J. (2017). Microstructural investigation of heat-treated ultra-high performance concrete for optimum production, *Materials*, **10(9)**, 1106.
- Kang, S.H., Hong, S.G., Moon, J. (2019a). The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, **115**, 389–400.
- Kang, S.H., Jeong, Y., Tan, K.H., Moon, J. (2019b). High-volume use of limestone in ultra-high performance fiber-reinforced concrete for reducing cement content and autogenous



- shrinkage, *Construction and Building Materials*, **213**, 292–305.
- Kılıç, A., CAtış, C.D., Yaşar, E., Özcan, F. (2003). High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures, *Cement and Concrete Research*, **33(10)**, 1595–1599.
- Kim, J.H., Choi, S.W., Lee, K.M., Choi, Y.C. (2018). Influence of internal curing on the pore size distribution of high strength concrete, *Construction and Building Materials*, **192**, 50–57.
- Kim, S.S., Lee, J.B., Nam, B.R., Park, K.P. (2009). Performance evaluation of artificial lightweight aggregate mortar manufactured with waste glass, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **21(2)**, 147–152 [in Korean].
- Lee, N., Jeong, Y., Kang, H., Moon, J. (2020). Heat-induced acceleration of pozzolanic reaction under restrained conditions and consequent structural modification, *Materials*, **13(13)**, 2950.
- Mather, B., William, G.H. (2002). Amount of water required for complete hydration of Portland cement, *Concrete International*, **24(6)**, 56–58.
- Park, C.B., Kim, Y.H., Jun, Y.B., Kim, J.H., Ryu, D.H. (2019). Properties comparison of concrete using lightweight aggregate with different water conditions and natural aggregate, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **31(5)**, 459–466 [in Korean].
- Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., Fang, Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design, *Construction and Building Materials*, **101**, 741–751.
- Yang, K.H. (2013). Mix design of lightweight aggregate concrete and determination of targeted dry density of concrete, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **13(5)**, 491–497 [in Korean].
- Zhu, Y., Zhang, Y., Hussein, H.H., Chen, G. (2020). Flexural strengthening of reinforced concrete beams or slabs using ultra-high performance concrete(UHPC): A state of the art review, *Engineering Structures*, **205**, 110035.

#### 단위중량 2,000kg/m<sup>3</sup>급 고강도 시멘트 복합체 개발을 위한 기초연구

본 연구에서는 단위중량 2,000kg/m<sup>3</sup> 이하의 고강도 시멘트 복합체 제조기술 및 기초 물성을 탐구한다. 선행연구에서 제시한 초고성능콘크리트의 배합에서 잔골재를 경량 재료인 솔리드 버블과 경량잔골재로 치환하여 경량 고강도 시멘트 복합체를 제조기술을 제안한다. 솔리드 버블을 혼입한 시멘트 복합체는 밀도 2.0g/cm<sup>3</sup> 이하에서 재령 28일 강도 116MPa~141MPa의 고강도 발현이 가능한 것으로 나타났다. 경량잔골재를 사용하는 경우 솔리드 버블을 혼입한 시멘트 복합체보다 역학적 성능이 떨어지는 것으로 나타났다. 배합표상에서 계산된 단위용적중량과 경화된 시멘트 복합체의 밀도가 큰 차이를 보이지 않았으며, 이는 배합표상에서 계산된 단위용적중량을 통해 경화된 시멘트 복합체의 밀도를 추정할 수 있는 것을 보여준다.