

# 플라이애시 세노스피어를 활용한 경량 무시멘트 복합체 개발

## Development of lightweight cementless composites using fly ash cenospheres



서정일 Jung-Il Suh  
(재)한국건설생활환경시험연구원  
건설기술연구센터  
선임연구원  
E-mail : rgtonesuh@kcl.re.kr



송해민 Haemin Song  
울산과학기술원  
도시환경공학과  
박사 후 연구원  
E-mail : songhaemin@unist.ac.kr

### 1. 서론

자재 및 건물 평가의 핵심 기준으로 ‘탄소 중립’이 채택됨에 따라 에너지 효율 증대 및 CO<sub>2</sub> 배출량 저감에 대한 관심이 집중되고 있다. 따라서 지속가능한 건설 재료의 신중한 선택은 환경에 대한 부정적인 영향을 최소화할 수 있으며, 건물의 효율과 품질을 높이기 위해 수요맞춤형 시멘트계 재료의 개발이 주목받고 있다. 특히, 경량화된 시멘트계 재료는 저밀도, 우수한 단열 및 내화성능 등의 장점을 지녀 건축물 내외부 마감을 위한 단열 재료로써 널리 사용될 수 있다.

플라이애시(fly ash, FA), 고로슬래그(ground granulated blast-furnace slag, GGBFS) 등 혼화제(supplementary cementitious materials, SCMs)의 시멘트계 재료는 시멘트 내구성능 및 경제성에 유익한 효과를 나타냈다. 특히 FA를 구성하는 부분 중 하나인 플라이애시 세노스피어(fly ash cenosphere, FAC)는 50~100 μm의 속이 빈 구형 입자이며, FA와 크게 다르지 않은 화학 조성, 경량 특성, 부분 반응성으로 인해 경량 결합재를 제작하는 데 유리한 물질이 될 수 있다. 그러나 FAC의 반응성은 유리질 표면, 입자 크기 및 중공으로 인해 제한되기 때문에 강도 형성을 위한 반응은 상대적으로 느릴 뿐만 아니라 강도 증진에 제약이 될 수 있으므로 알칼리 활성화 및 고온 양생 등의 반응 촉진을 위한 조치가 필요하다.

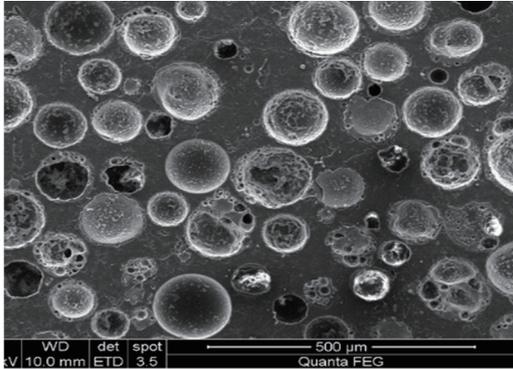


그림 1. 플라이애시세노스피어 입자

FA의 석회 활성화는  $\text{Na}(\text{OH})_2$  및  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 와 같은 강알칼리성 물질을 사용하지 않고 시멘트의 보편적인 반응생성물인 C-S-H를 주로 생성하여 강도를 형성할 수 있다. Jeon et al. (2015)은  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 를 활용한 FA의 활성화를 통해 50 MPa 이상의 강도 증진을 보고하였으며, Suh et al. (2017)은 ANOVA를 활용한 통계적 접근을 통해 다양한 변수가 경화체 강도에 미치는 영향을 규명하였다.

이에 따라 산업부산물인 FA 및 FAC과 저가형 활성화제인  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 를 이용하여 경량 무시멘트 복합체 개발을 목표로 하여 FA 및 FA 기반 경량 복합체의 물리적 특성과 열적 성능을 평가하였다.

## 2. 경량 무시멘트 복합재료 개발

### 2.1 배합비

[표 1]은  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 를 활성화제로 활용한 FA 및

FAC 결합재의 배합비를 나타낸다. FAC의 혼입률을 변수로 하여 FA100은 FA, FA50FAC50은 FA:FAC이 50:50, FAC100은 FAC로 구성되며, 활성화제인  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 의 첨가량은 모두 동일하다. 물/결합재비는 0.4로 설정하였으며, 배합 시 유동성 확보를 위해 소량의 지연제를 첨가하였다.

### 2.2 실험항목

7일 및 28일 재령의 압축강도와 밀도 측정을 통해 기계적 특성을 분석하고, 수은압입법(MIP) 측정을 통해 결합재 내 공극 특성 분석을 수행하였다. 또한, TLP 300(Taurus Instruments, Germany)을 활용한 열전도도 측정과 IR camera(FLIR T540, Teledyne FLIR, USA)를 활용한 샘플 표면온도 측정을 통해 FAC 혼입에 따른 열적 성능을 확인하였다.

### 2.3 실험결과

FAC 혼입량 증가에 따라 압축강도 및 밀도가 감소하는 경향을 나타냈다(<그림 2> 및 <그림 3>). FA100의 압축강도는 28일 재령 기준 48 MPa을 나타낸 반면 FAC가 혼입된 FA50FAC50 및 FAC100의 강도는 각각 35%, 80% 감소하였다. 다만, FAC100 결과로부터 FAC가 단순히 매트릭스 내 필러의 역할이 아닌 일부 활성화되어 강도를 증진시키는 반응생성물을 형성할 수 있는 출발물질(precursor)이 될 수 있음을 확인하였다. 밀도 측정 결과, FAC100의 밀도는  $677.9\text{kg/m}^3$ 로, ASTM C1693 내 AAC-5 및 AAC-6의 밀도 성능기준( $550\sim 750\text{kg/m}^3$ )을 만족하였다.

<그림 4>와 같이 FAC 혼입량이 증가할수록 평균 공극 크기 및 공극률이 증가하였다. 공극크기 분포 측정 결과, FA100의

[표 1] 배합표

Sample	Material by weight (g)					
	Precursor		Activators			Water
	FA	FAC	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	Retarder	
FA100	70.0	0	20.0	9.5	0.5	40
FA50FAC50	35.0	35.0	20.0	9.5	0.5	40
FAC50	0	70.0	20.0	9.5	0.5	40

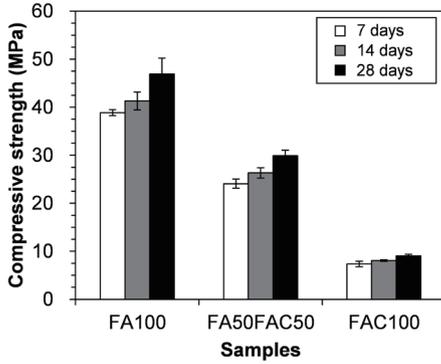


그림 2. 압축강도

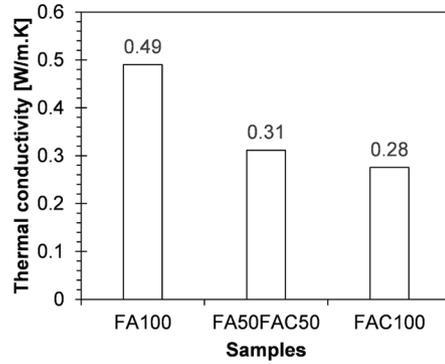


그림 5. 열전도도

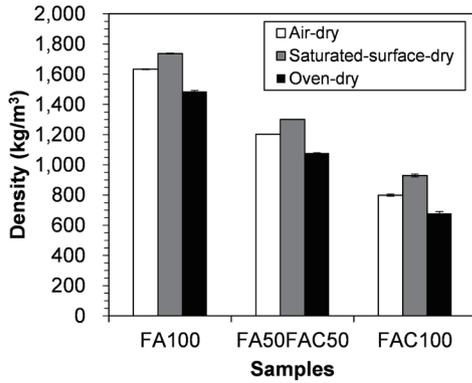


그림 3. 밀도

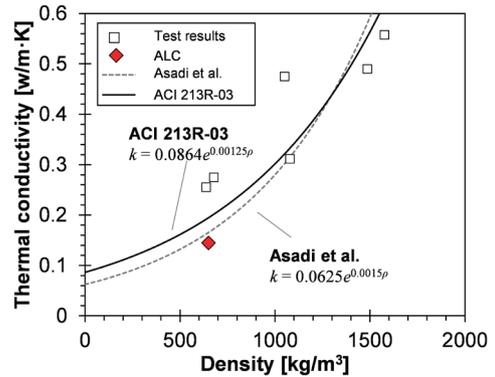


그림 6. 밀도-열전도도 관계

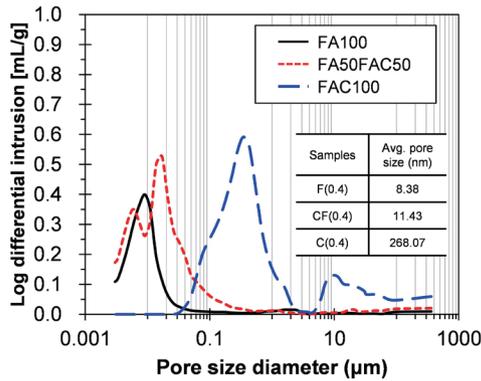


그림 4. 공극분포

평균 공극크기는 8.38 nm로 가장 작았으며 FAC100의 평균 공극크기는 268.07 nm로 FA100 대비 30배 이상 증가하였다. 다만, FAC 자체의 D50이 82.8 µm이고 FAC 두께를 고려하여 이보다 조금 더 작다고 가정했을 때, FAC100의 평균 공극크기는 이보다 훨씬 작게 나타나 대부분의 FAC가 활성화되어 결합제

매트릭스에 포함된 것으로 판단된다.

열전도도 측정 결과(그림 5), FA100의 열전도도는 0.48 ~ 0.56 W/m·K, FA50FAC50, FAC100는 0.26~0.31 W/m·K로 측정되었으며, FAC를 일부 대체하는 것만으로도 단일 효과가 향상되는 것을 확인하였다. FAC 혼입에 의한 밀도 감소는 더 높은 공기 함량과 관계가 있으며, 이는 MIP 분석에 따른 공극구조 결과를 통해 확인할 수 있었다. 특히, <그림 6>과 같이 선행연구의 경험식과 ACI 213R-14의 제안식을 바탕으로 밀도와 열전도도 간 상관관계를 도출한 결과 밀도 범위 500~2,000 kg/m³에서 예측값과 유사한 경향을 나타내어 상용 제품의 경향성을 따르는 것을 확인하였다.

<그림 7>은 40 °C 챔버에서 꺼낸 직후 상온(24 °C) 조건에서 180분 동안 촬영된 샘플 표면 IR 이미지이다. 촬영한 이미지를

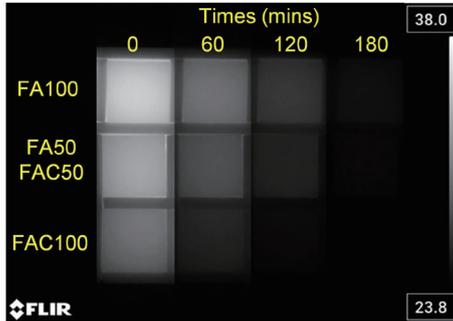


그림 7. 샘플 표면 IR 이미지

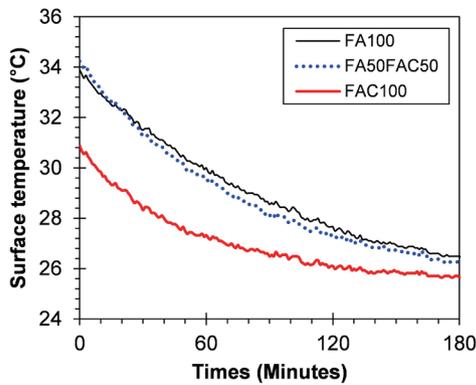


그림 8. 온도 추적

대상으로 샘플 표면의 온도값을 추적하였다. <그림 8>과 같이 40 °C 챔버 내에서 유지되었을 때(0분) 샘플 초기온도는 30.6 ~34.2 °C로 분포하였다. 외부에서의 온도하강 시점(0분)으로부터 실험 종료(180분)까지 온도측정 결과 FA100의 경우 온도 하강폭이 7.4 °C인 것에 반해 FAC100의 온도 하강폭은 5.23 °C로 나타나 FAC 혼입에 따른 단열 효과를 검증하였다.

### 3. 결론

본 고에서는 FAC가 혼입된 경량 복합체의 물리적 특성과 열적 성능을 평가하였다. 그 결과, FAC를 결합재 대비 50 % 이상 대체할 경우 상용 경량블록의 물리적 성능기준을 만족하였다. 또한 FAC는 활성화되어 강도를 형성하는 반응생성물을 형성함과 동시에 매트릭스 내 공간을 형성함으로써 출발물질과 필러의 역할을 동시에 수행하였다. 따라서 FAC를 일부 대체하는 것만으로도 열전도도를 큰 폭으로 감소시켜 유익한 열적 성능을 기대할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. A. Nithyanandam, T. Deivarajan, Development of fly ash cenosphere-based composite for thermal insulation application, International Journal of Applied Ceramic Technology, 18(5), 2021, p. 1825–1831.
2. D. Jeon, Y. Jun, Y. Jeong, J.E. Oh, Microstructural and strength improvements through the use of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> in a cementless Ca(OH)<sub>2</sub>-activated Class F fly ash system, Cement and Concrete Research, 67, 2015, p. 215–225.
3. J.-I. Suh, D. Jeon, S. Yoon, J.E. Oh, H.-G. Park, Development of strong lightweight cementitious matrix for lightweight concrete simply by increasing a water-to-binder ratio in Ca(OH)<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-activated fly ash system, Construction and Building Materials, 152, 2017, p. 444–455.
4. I. Asadi, P. Shafiqh, Z.F.B. Abu Hassan, N.B. Mahyuddin, Thermal conductivity of concrete – A review, Journal of Building Engineering, 20, 2018, p. 81–93.
5. ACI Committee 213, ACI 213R–14 Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete, American Concrete Institute, 2014, p. 53.

담당 편집위원 : 박병선(고려대학교)