

## 경량 UHPC의 보수용 모르타르 및 시멘트 패널로서의 활용 가능성에 대한 실험적 검토

# Experimental Review on Application of Lightweight UHPC as Repair Mortar and Cement Panel

안재성<sup>1</sup> · 김형기<sup>2\*</sup>

Jae Sung Ahn<sup>1</sup> · Hyeong-Ki Kim<sup>2\*</sup>

(Received July 18, 2023 / Revised August 2, 2023 / Accepted August 3, 2023)

Various performances of ultra-high performance concrete (UHPC) applied with microplastics and expanded polystyrene (EPS) beads were evaluated. Compressive and flexural strength, performance after ignition, flow-down in fresh state, and effective bond strength were evaluated. Designed weight of the cement panel with these mixtures was calculated based on the flexural strength. As a result of the experiments, it was confirmed that the EPS could reduce the density of UHPC with largest range. By maximum addition of EPS beads, the density of UHPC decreased to 1300 kg/m<sup>3</sup>, and the compressive and flexural strengths for this mixtures were in ranges of 20-30 MPa and 15-20 MPa, respectively. On the other hand, lightest cement panel could be designed with UHPC having a density ranges about 2.0 g/cm<sup>3</sup>.

**키워드** : 초고성능 콘크리트, 경량, 미세플라스틱, 발포폴리스틸렌, 보수용 모르타르, 패널

**Keywords** : Ultra-high performance concrete, Lightweight, Microplastics, Expanded polystyrene, Repair mortar, Panel

## 1. 서론

콘크리트의 고강도화 및 경량화는 지난 100년의 콘크리트연구에서 꾸준히 진행되었다. 과거에는 구조용 콘크리트의 성능을 개선하기 위해 고강도화와 경량화가 필요했으며, 주로 현장타설 및 프리캐스트 콘크리트를 대상으로 했기 때문에 장기 내구성과 시공성 등에 대한 시방상의 제약이 있었다. 그러나 최근에는 시멘트 복합재료(cement composites)의 관점에서 좀 더 넓은 범위인 보수/보강용 바름재나 채움재, 내외장재 뿐 아니라 가구, 인테리어 용품 등, 상대적으로 부가가치가 높은 기능성 소재로서의 고성능화가 진행되고 있다. 이 경우 상대적으로 시방상의 제약에서 자유로울 수 있다(Bajaber and Hakeem 2021).

고강도화와 경량화는 이론적으로 반대되는 개념으로, 강도를 높이기 위해서는 좀 더 치밀한 미세조직이 필요한 것에 반해, 경량

화를 위해서는 조직이 가능한 덜 치밀해야 한다. 콘크리트를 포함한 시멘트 복합재료의 고강도화와 경량화를 동시에 달성하기 위해서는 1) 복합재료 자체를 가능한 치밀하게 만들어 고강도화 한 뒤, 이 재료를 이용해 만드는 제품을 상대적으로 얇게 설계해 제품을 경량화하는 방법과, 2) 복합재료 자체에 미세조직(skeleton) 자체는 최대한 고강도화 하면서 동시에 내부에 가능한 작은 크기의 공극/경량소재를 혼입하는 방법이 있다(Lee et al. 2022a). 본 연구는 이 중 두 번째 방법에 대한 것이다. 고강도의 미세조직을 갖으면서도 경량화를 달성하기 위해서 주로 물결합재비(water-to-binder ratio, w/b)가 낮은 배합에 경량소재를 혼입하는 경우가 일반적인데, 이 때 대표적인 경량소재로서는 경량골재가 있다(Pyeon et al. 2022). 경량골재는 주로 고온소성(sintering)을 통해 제작되며, 공극 주변의 skeleton이 소성 세라믹이기 때문에 강도가 높다(Jeong et al. 2020). 또한 내부에 상대적으로 공극의 크기가 작기 때문에 크기효과 및 파괴역학 측면에서 매우 유리

\* Corresponding author E-mail: [hyeongki@chosun.ac.kr](mailto:hyeongki@chosun.ac.kr)

<sup>1</sup>모아건설산업(주) 사원 (Moa construction Co.,Ltd., Gwangju, 61946, Korea)

<sup>2</sup>조선대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Chosun University, Gwangju, 61452, Korea)

한, 즉 비강도(중량 대비 강도)가 높은 경량소재라 할 수 있다(Dixit et al. 2019). 그러나 국내에서는 아직 경제성 있는 경량골재가 생산되지 않는 한계가 있다(Jeong et al. 2021). 현재까지 연구결과를 통해 가장 밀도 대비 압축강도가 가장 우수한 배합 중 하나는 hollow glass microsphere를 이용한 압축강도 97 MPa 건조밀도 1,500 kg/m<sup>3</sup>의 고온양생 Ultra-high performance concrete(UHPC) 배합이지만, 이 역시 가격 측면에서 매우 활용이 어렵다(Lee et al. 2022).

과거 우리의 연구(Ahn et al. 2023)에서는 폐기물 자원화 과정에서 생산되는 미세 플라스틱을 UHPC 배합에 도입해 경량화를 시도해 보았으며, 압축강도 및 휨강도와 밀도간의 관계를 확인 하였다. 본 연구에서는 추가적으로 시멘트 샌드위치 패널에 자주 사용되는 발포폴리스틸렌(expanded polystyrene, EPS)를 UHPC에 도입하였다. 과거 Dixit et al.(2019)에서도 3-5 mm의 EPS를 함유가 없는 UHPC에 도입해 강도와 열전도도 등을 평가하였다. 본 연구에서는 파괴 역학 관점에서 이보다 작은 1 mm의 EPS 비즈를 추가로 적용하였으며, 압축강도와 휨강도, 고온노출 후 성능, 굳지 않은 상태에서의 흘러내림, 유효 부착강도 등을 평가하였다. 마지막으로 휨강도를 이용해 패널로 설계했을 때 예상 제품의 무게를 계산하였다. 이를 통해 본 경량 고강도 재료가 보수용 모르타르 혹은 시멘트 패널로 사용될 수 있을지에 대해 검토해 보았다. 본 연구는 상대적으로 다양한 실험이 진행되었기 때문에, 각각의 실험계획 및 결과를 하나의 장에 정리하는 형태로 논문을 구성하였다.

## 2. 사용재료 및 배합비

본 연구는 지난 본 연구진의 연구결과(Ahn et al. 2023)에 대한 후속 연구로, 동일한 기본적으로 동일한 재료를 사용하였다. 기존 연구와 사용된 경량소재 크게 다섯 종류로, 플라스틱 재생공장에서 발생한 폐 PET 분말(WP, 비중 1.30, 평균입도 0.65 mm), 입도의 크기가 다른 두 종류의 PP filler(P1: 평균입도 0.45 mm, P2: 평균입도 0.28 mm), 팽창혈암 경량골재(expanded shale(ES), 비중 2.09, 평균입도 2.2 mm) 및 소성 점토-플라이애시 경량골재(sintered clay-fly ash(SCF), 비중 1.80, 평균입도 0.95 mm)였다. 이 중 본 연구에서는 P1만이 사용되었다. 한편 새롭게 1 mm 크기의 EPS 비즈가 사용되었다. 각각의 밀도와 평균크기는 Table 1에 제시되어 있다. 그 외에 보통 포틀랜드 시멘트 1종, 실리카퐁(비중 2.30, 평균입도 0.3 μm), 실리카 미분말(비중 2.65, 평균입도 3.9 μm), 규사(비중 2.65, 평균입도 0.53 mm), 고성능 유동화제, 그리고 동 코팅 강섬유(길이 19.5 mm, 지름 0.2 mm, 최대인장강도

2,450 MPa)가 사용되었다.

본 연구에서 사용된 배합의 종류는 Table 1에 정리한 바와 같다. 여기서 배합한계 비율(proportion of mixable limit)이라는 개념이 사용되었는데, 이는 기존 UHPC 배합(Table 1의 N 배합)에서 규사를 제거한 뒤, 경량소재를 가능한 최대한 투입했을 때의 배합비를 의미한다. 이 때 ASTM C 230의 테이블 플로우를 기준으로 최종 흐름 면적이 110 mm 이하인 경우를 배합한계비율로 설정하였다. 이를 100 %로 정한 뒤 경량소재를 이에 25 %, 50 %, 75 % 씩 혼입하였다. 한편 P1 역시 최대값으로 설정해 배합 하였으며, 이에 대한 이때 일반배합 N 및 P1 사용 배합에 대한 세부 내용은 Ahn et al.(2023)에도 나타나 있다.

Table 1. Specific gravity and mean particle size of lightweight fillers

Material	Specific gravity (SSD)	Mean particle size in mm (measurement method)
Synthetic polymer powder 1 (P1) <sup>a</sup>	0.95	0.45 (laser diffraction)
Expanded polystyrene beads (EPS) <sup>b</sup>	0.04	1.0 (scale ruler)

a) and b) from Ahn et al. (2023) and present work, respectively

Table 2. Mix proportion of UHPC

Type of lightweight filler <sup>a</sup>	Proportion of mixable limit <sup>c</sup> (%)	Weight proportion (per cement)	
		Lightweight filler	Silica sand
N <sup>b</sup>	-	0.000	1.10
P1	100	0.375	0
EPS	25	0.010	
	50	0.020	
	75	0.030	
	100	0.040	

Note) Weigh ratio of other materials per cement: Silica fume 0.25, silica powder 0.30, water 0.21, water reducer 0.06, steel fiber 0.2

a) mix proportions of mixtures with N and P1 are adopted from Ahn et al. (2023).

b) Mortar flow of N mixture: 250 ± 10 mm (ASTM C 230)

c) Mortar flow at mixable limit: 110mm (ASTM C 230)

## 3. 압축 및 휨강도

본 배합의 압축강도는 5 cm<sup>3</sup>의 정육면체를 이용해, 그리고 휨강도는 4 × 4 × 16 cm<sup>3</sup>의 직육면체 시편을 이용해 측정 하였다. 10분간 비빔 후 몰드에 넣고 24시간 20 °C에서 밀봉 보관 하였으며, 일부 시편은 그 온도조건에서 그대로 28일간 상온 수중 양생

을, 일부는 2일간 90 °C 수중에서 고온 수중 양생을 진행하였다. 압축 및 휨강도 측정 시 기본 측정 방법은 각각 KS L 5105 및 KS ISO 679를 참고하였다.

이렇게 측정된 UHPC의 밀도와 압축강도 및 휨강도를 Figs. 1 및 2에 각각 정리하였다. 밀도 대비 압축 강도의 관계에서 가장 우수한 성능을 나타낸 경량소재, 즉 Fig. 1에서 가장 기울기가 완만한 종류의 소재는 소성점토-플라이애시 경량골재(SCF)였다. 이는 상대적으로 크기가 가장 작은 공극을 가지고 있었기 때문이다. 그러나 배합 할 수 있는 최대한계가 적기 때문에 결과적으로 고강도 경량 UHPC에 적합하지 않았다. ESP 배합은 기존의 다른 플라스틱, 폴리

머계 경량소재 활용 배합과 매우 유사한 의 밀도-압축강도 경향을 나타내는데, ESP의 장점은, 좀 더 낮은 수준의 경량화가 가능하다는 점 이다. 다른 경량소재들의 경우, 배합한계까지 사용했을 때에도 주로 2,000 kg/m<sup>3</sup> 이하로는 배합 밀도를 줄일 수 없었던 것에 반해 ESP는 최대한 혼입 시 1,300 kg/m<sup>3</sup> 수준 까지도 경량화가 가능하다. EPS가 다른 플라스틱, 폴리머, 경량골재에 비해 상대적으로 비중이 가장 낮기 때문이다. 기존에도 EPS를 사용한 UHPC의 연구결과인 Dixit et al.(2019)에서도 본 연구결과와 유사한 수준의 밀도-압축강도 결과를 얻을 수 있었으나, 기존 결과에서는 강섬유를 사용하지 않아 휨강도를 얻을 수 없었다는 한계가 있다.

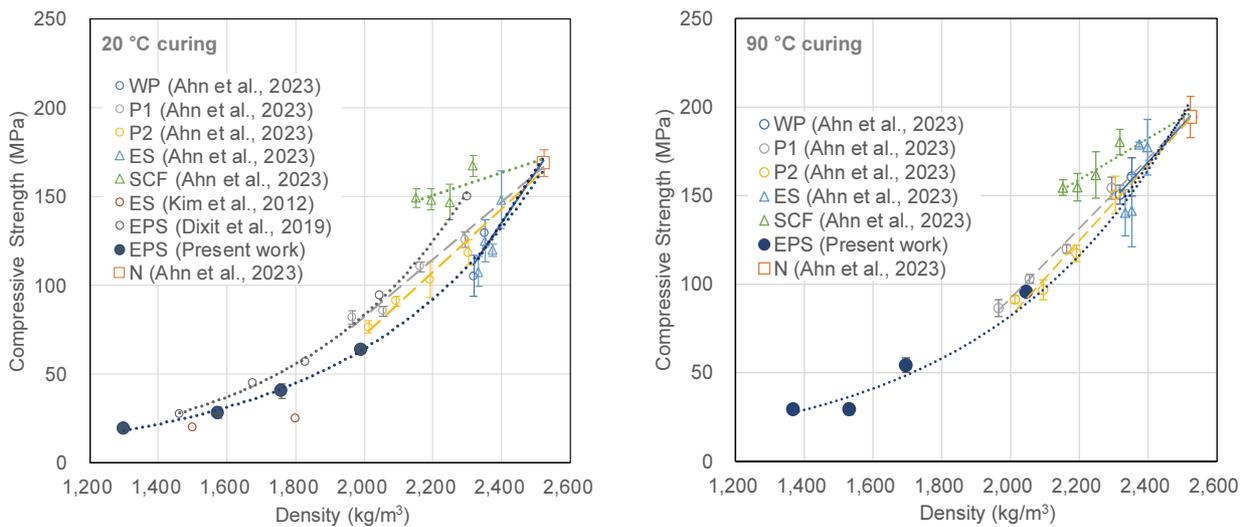


Fig. 1. Compressive strength of hardened mixtures

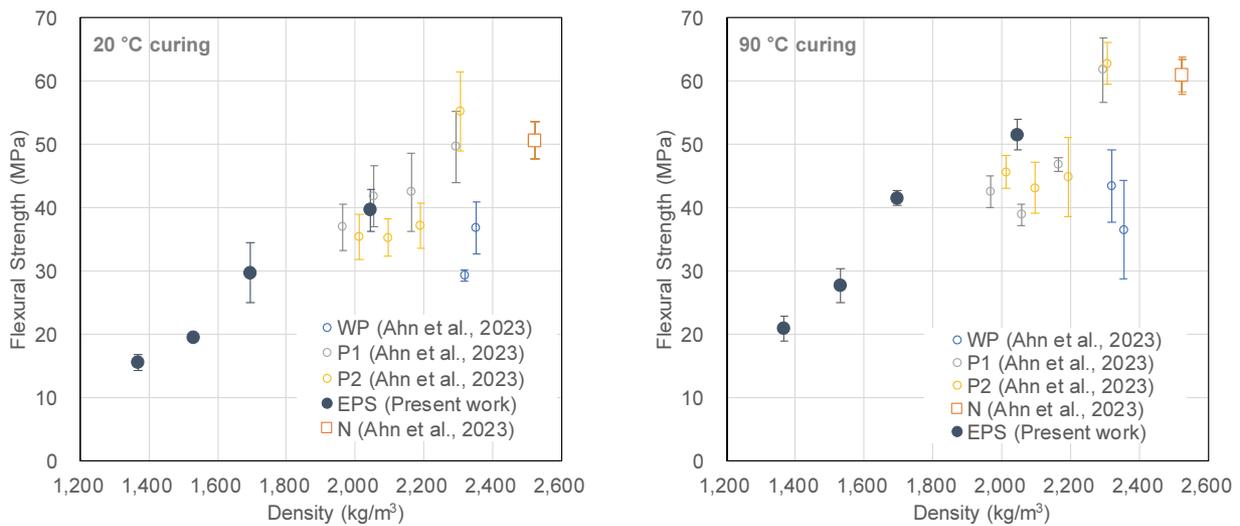


Fig. 2. Flexural strength of hardened mixtures

배합을 경량화 하면서도 강섬유를 혼합한 이유는 압축강도보다 휨강도를 확보하기 위해서이다. 패널을 포함한 비구조용 제품에 본 초고강도 경량 UHPC를 사용하기 위해서는 상대적으로 압축강도보다 휨강도가 사용성 측면에서 필요할 수 있다. 실험 결과 밀도-휨강도 관계 측면에서 본 연구의 EPS 배합은 과거 P1의 그것과 유사하거나 더 우수한 경향을 나타내지만, 역시 더욱 경량화가 가능하다는 측면에서 장점이 있다. 그러나 최종적으로 제품화를 고려할 때는 이에 대한 실제 제품의 최소 두께 등이 고려되어야 한다.

#### 4. 고온노출

고온노출 실험을 위해, 압축강도 측정을 위해 제조된 시편과 동일한 형태로 5 cm<sup>3</sup> 정육면체 시편을 90 °C 고온양생으로 제작하였다. 양생 후 28일간 추가로 상온에서 수중양생을 진행 하였으며, 이후 이를 1,000 °C 까지 온도상승이 가능한 30 L 전기로에서 단계적으로 온도를 상승시켰다. 먼저 포화된 시편을 상온에서 200 °C 까지 높힌 후 6시간 노출 후 전기로 가열을 중지해 다시 상온으로 온도를 낮추었다. 온도가 낮아진 시편을 다시 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1,000 °C까지 단계적으로 가열-냉각-재가열 하는 과정을 반복하였다. 이 때 냉각 단계 시 시편의 무게를 측정 하였다. 각 단계에서 전기로 내부가 목표온도에 이르는 데 소요된 시간은 3시간이었다. 마지막으로 1,000 °C 노출 후 이 시편을, 모르타르의 관입 저항 측정 장비를 이용해 관입저항을 측정하였다(Fig. 3). 관입저항 측정 자체는 KS F 2436을 준용하였으며, 관입 깊이는 3 cm 였다.

실험 결과, 고온노출 시 온도에 따른 무게 감소량은 Fig. 4에 정리되어 있다. 상대적으로 사용된 경량소재의 무게가 매우 가벼운 EPS 배합의 경우, 고온노출 후에도 연소되는 무게가 매우 적기

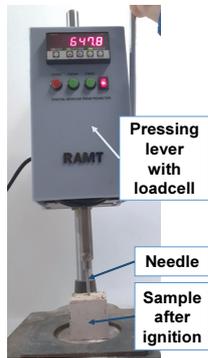
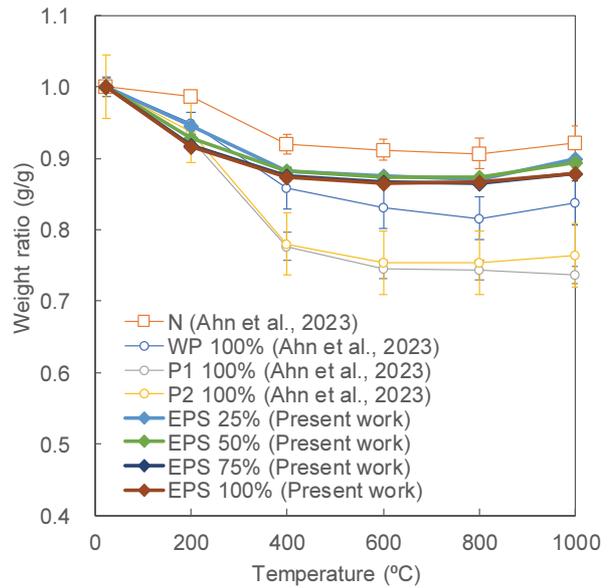


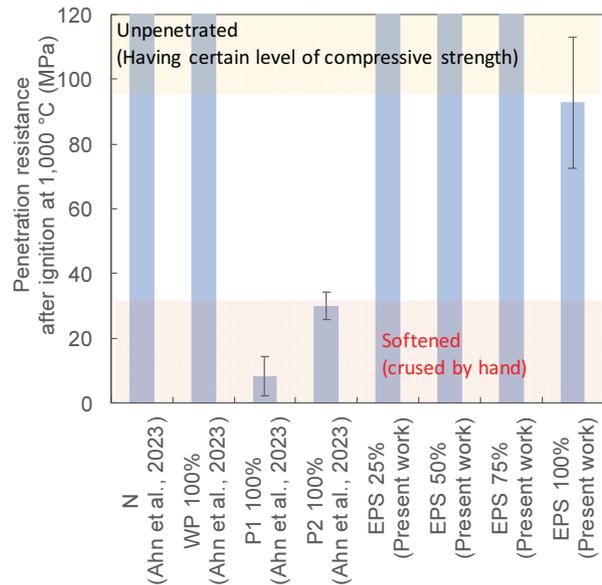
Fig. 3. Measurement setup of penetration resistance of hardened mixtures experiencing ignition at 1,000 °C (modified from Ahn et al. 2023)

때문에 무게 감소비율은 경량소재를 사용하지 않은 N 배합과 거의 유사한 수준이었다.

한편, 1,000 °C 노출 후의 관입 저항의 경우, 일반 UHPC인 N 배합의 경우 단면적이 최소인 관입침을 이용하더라도 관입되지 않았으며, 측정된 관입저항이 100 MPa 이상이었는데, 이는 EPS 배합



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Weight loss of hardened mixtures by elaborated temperatures; (b) Penetration resistance of hardened mixtures experiencing ignition at 1,000 °C

의 경우도 거의 유사한 수준이었다. 참고로 본 배합에서는 부피비 1.5 %의 강섬유가 혼입되어 있기 때문에 고온 노출 후에도 폭열이 발생하지 않았다. 한편 Ahn et al.(2023)에서 보고한 바와 같이, 상대적으로 고온 노출 시 자기 스스로 연소를 하면서도 비중이 높아 발열량이 큰 WP, P1, P2 등의 경우 혼입량이 크면 관입저항이 크게 감소할 수 있다. 그런 점에서 비중이 매우 작아 발열량이 작은 EPS를 혼입한 배합의 경우 화재 후에도 자기의 형상을 유지할 수 있을 정도의 강도가 확보됨을 알 수 있었다. 단지 EPS를 최대한 혼입한 100 % 배합의 경우는 약간의 관입저항 감소가 확인 되었다.

### 5. 시공 후 흘러내림

본 연구에서는 UHPC 배합을 콘크리트 구조물의 표면 보수용 마감재로 활용할 경우를 가정해, 표면에서의 흘러내림 정도를 단순한 방법으로 확인해 보았다. 굳지 않은 배합의 흘러내림을 확인하기 위해서, 실험용 배합은 총 6 종류가 준비 되었다. 먼저 두 종류의 시판 레디믹스드 모르타르(premixed mortar 1, 2)를 사용 하였다. 각각의 제품은 국내에서 생산된 H사와 U사의 마감용 모르타르 제품이었다. 한편 이와 동시에 실험실에서 배합된 모르타르(시멘트 대비 모래 중량 2.45)도 동시에 사용되었다. 그리고 Table 1에 제시된 일반 UHPC (N), P1 100 % 배합이 사용되었다. 일반 모르타르의 수량은 ASTM C 230 플로우 테이블을 이용한 25회 타격 모르타르 플로우 160 mm (타격전 100 mm)에 맞추어 배합되었으며, 이는 일반적인 마감용 모르타르의 유동성이었다. 한편 UHPC 계열의 유동성은 유동화제 양으로 조절되었으며 타격 전 모르타르 플로우 100 mm, 타격 후 150 mm로 조절 되었다.

이 배합들은 건조한 목재합판 거푸집에 가로, 세로, 두께 각각 20 cm, 15 cm, 2 cm로 채워진 뒤, 아래 Fig. 5에서와 같이 80°의 경사로 세워져 흘러내림을 확인 하였다. 본 실험에서는 콘크리트 표면 대신 건조한 목재 합판 면을 적용한 것으로 마감 후 두께 유지 여부를 확인 한 것이다. 이렇게 세워진 모르타르는 실험 시작 후 30분, 60분, 90분, 120분에 각각 흘러내린 거리를 측정하였다.

실험결과, 먼저 일반 모르타르들은 0~1.8 cm 수준의 흘러내림이 발생했다. 미장용 모르타르 시공 시 수직면에 대한 일반적인 1회 바름 두께는 약 3~6 mm 수준이며, 본 연구에서 사용한 2 cm는 매우 두꺼운 수준이다. 일반 UHPC의 경우 낮은 유동항복응력으로 인해 시간에 따라 두께를 유지 하지 못하고 점차 흘러내려가는 것을 확인 할 수 있었다. 즉 비록 타격전 모르타르 플로우가 100 mm로 초기 유동성이 극단적으로 적게 배합 되었음에도 불구하고 시간에 따라 점성 거동에 의해 매우 천천히 흘러내렸다. 한편

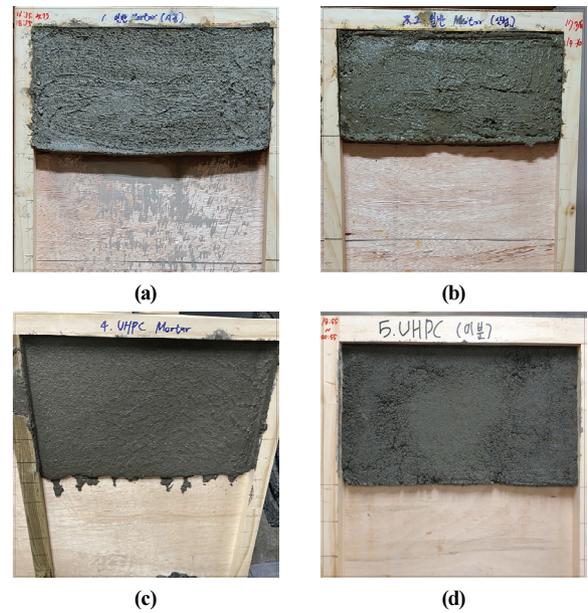


Fig. 5. Flowing test of mixtures: (a) premixed mortar, (b) mortar mixed in lab, (c) UHPC-N, and (d) UHPC-P 100 %

Table 3. Flows of mixtures by test setup in Fig. 5 (unit: mm)

Mixtures	30 min	60 min	90 min	120 min
Premixed mortar 1	18	18	18	18
Premixed mortar 2	0	0	0	0
Normal mortar	4	4	4	4
UHPC (N)	Flow down			
UHPC (P1 100 %)	0	0	0	0

플라스틱 미분을 혼입한 P1 100 % 배합은 미분이 점성유동을 방해하는 특성이 있으므로 흘러내리지 않았다. 이에 대해서는 이후 정식적인 실험 방법을 통해 추가 실험이 필요하다.

### 6. 간접적 부착강도

본 연구에서는 UHPC 배합과 콘크리트와의 부착강도를 확인하기 위해 정식 직접인발부착시험(예: KS F 4042 등)을 진행하기 전 모르타르 힘강도시험법을 응용하여 간접적으로 부착강도를 확인 하였다. 먼저, 4 × 4 × 16 cm<sup>3</sup>의 직육면체 몰드에 일반 콘크리트(물 180 kg/m<sup>3</sup>, 1종 포틀랜드 시멘트 360 kg/m<sup>3</sup>, 모래 876 kg/m<sup>3</sup>, 자갈 915 kg/m<sup>3</sup>)를 타설하였다. 이 때 사용된 자갈은 10 cm 체 100 % 통과분 이었다. 이 크기는 시편의 최소 길이 4 cm의 1/4 이다. 일부의 콘크리트 시편은 중간부에 힘파괴를 유발해 파단면을 생성을 유도하였다. 한편 일부의 시편은 시편 제조 초기에

길이의 절반(8 cm)만 채워 제작하였다. 시편을 절반만 채워 상대적으로 평평한 모르타르면이 생성된 시편을 'smooth'로 명명하였다. 이에 반해 힘파괴를 유발해 파단면이 생성된 시편을 'rough'로 명명하였다. 이 절반의 콘크리트(재령 28일)를 다시 몰드에 넣고 (Fig. 6), 새롭게 다양한 모르타르를 나머지 절반에 채워넣었다. 이 때 사용된 모르타르 등은 위의 흘러내림 시험에서 사용한 배합과 같았다. 이 시편들은 20 °C에서 28일 밀봉 양생, 1일 상온양생 후 3일간 90 °C에서 3일간 고온 밀봉양생을 진행 하였다. 양생 완료 후 3축 휨시험을 이용해 중간면의 부착 인장강도를 계산하였다. 이 때 중심부로부터 지점까지의 거리는 5 cm 였다. 참고로 본 방법은 1) 시편의 크기가 매우 작기 때문에, 그리고 2) 지점거리 설정 상 휨응력과 함께 전단응력이 동시에 시편에 가해지기 때문에, 일반적인 방법으로 측정된 콘크리트/모르타르의 휨강도 혹은 인장강도에 비해 매우 큰 값을 나타내는 것을 주의해야 한다.

이러한 방법으로 측정된 간접적인 부착강도는 Table 4와 같다. 시편간 표준편차가 크기 때문에 3개의 시편에 대해 모든 결과를 각각 제시 하였다. 먼저 모든 시편의 경우 smooth 면에 대해 휨강도를 측정할 수 없을 정도로 부착강도가 약한 경우가 발생한다. 그에 반해 rough 면에서는 강대적으로 높은 강도가 발생 했다. 본 실험을 통해 확인할 수 있는 결과는, 모든 경우에 대해, 플라스틱 미분이 적용된 UHPC가 일반 모르타르와 동등 이상의 부착강도를 발현한다는 것을 알 수 있었다.

### 7. 패널 설계

본 연구에서는 위 2장에서 진행한 휨강도 결과를 이용해, 본 경량 UHPC를 패널로 제작 했을 때의 설계 두께 및 최종 제품의 무게에 대해 해석적으로 검토 하였다. 경량 충전재의 사용에 의해 비록 자신의 밀도가 감소하지만, 동시에 휨강도도 감소한다. 먼저 패널 설계를 위해 재료의 설계 휨강도(최소 휨강도  $\sigma_{min}$ )는 식 (1)에서와 같이 평균 휨강도  $f_b$ 에 대해 표준편차  $s$  값을 고려해 설정 하였다.

$$\sigma_{max} = f_b - 2.33s \tag{1}$$

한편 직사각형 단면을 갖는 패널의 3점 휨 조건에 대한 모멘트 및 휨강도 간의 관계식을 고려해 패널의 최소 두께  $h_{min}$  는 다음의 식으로 계산하였다.

$$h_{min} \geq \sqrt{\frac{3PL}{b\sigma_{max}}} \tag{2}$$

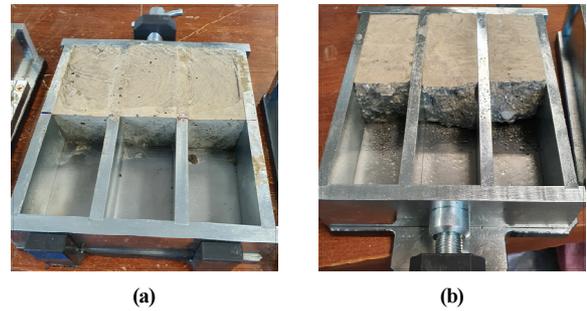


Fig. 6. Concrete sample preparation for bonding strength measurement: (a) smooth and (b) rough interfaces

Table 4. Effective bonding strength between concrete and covering mixtures

Curing temperature	20 °C		90 °C	
Interface condition	Smooth	Rough	Smooth	Rough
Premixed mortar 1	2.8	3.3	2.2	2.8
	0.0	4.6	2.8	3.0
	0.0	6.0	0.0	2.9
Premixed mortar 2	2.6	4.3	2.2	8.4
	0.0	6.1	3.4	7.0
	0.0	6.9	1.4	7.4
Normal mortar	2.5	9.5	2.8	6.7
	0.0	10.2	4.2	8.8
	0.0	11.1	6.8	8.5
UHPC (N)	11.7	15.4	14.1	10.4
	0.0	19.0	0.0	17.5
	0.0	14.8	0.0	21.5
UHPC (P1 100%)	4.9	18.0	9.7	17.3
	3.6	17.3	7.0	13.0
	0.0	12.9	8.1	16.1

여기서 P는 패널에 가해지는 수직방향 하중(N), L 3점 휨 조건에서의 지점간 거리(mm), b는 휨패널의 폭(mm)을 의미한다.

본 연구에서는 KS F 4735에 제시된 압축성형콘크리트 패널의 기성 제품 중 하나인 가로 1200 mm, 세로 600 mm, 두께 60 mm의 패널을 기준으로 하였다. 따라서 본 가정에서 식 (2)의 L와 b의 값은 각각 1200 mm와 600 mm로 설정하였다. 또한 위 KS 기준에서  $\sigma_{min}$ 는 14.0 MPa로 설정되어 있으므로, 위 식 (2)의 결과를 설정해 P값을 8100 N으로 고정하였다. 이후 재료의 변경에 따라 P, L, b 값이 고정된 상태에서 각 재료의  $\sigma_{min}$ 값에 따라  $h_{min}$ 값이 변화하도록 설계 하였다.

이 계산에 의해 얻어진 제품의 최소 두께, 두께를 이용해 계산된 제품의 최소 부피, 배합비 상의 밀도, 그리고 부피와 밀도를 이용

**Table 5. Specific flexural strength, minimum thickness, volume, density, and weight of UHPC panels**

Mixture	$\sigma_{max}$ (MPa)	$h_{min}$ (mm)	Volume ( $m^3$ )	Density ( $g/cm^3$ )	Weight (kg)
Extruded cement panel	14.0	60.0	0.043	2.4	103.7
Normal mortar	5.3	97.5	0.140	2.2	151.7
UHPC (N)	28.1	42.3	0.061	2.4	73.2
UHPC (WP 100%)	15.4	57.1	0.082	2.4	97.9
UHPC (P1 50%)	21.9	49.9	0.069	2.0	67.3
UHPC (P1 100%)	21.0	49.0	0.070	2.0	71.9
UHPC (P2 50%)	23.0	46.8	0.067	2.3	80.9
UHPC (P2 100%)	24.1	45.7	0.066	2.3	79.0
UHPC (EPS 100%)	8.9	75.3	0.108	1.2	130.2

해 계산된 제품의 무게를 Table 5에 정리 하였다. 계산 결과 기존의 압축성형 시멘트 패널에 비해 일반 UHPC 사용시 제품의 중량이 30 % 가량 감소하는 것을 확인 하였다. 최종 제품이 가장 가벼운 재료는 P1을 사용한 배합으로 이에 대한 배합비는 Ahn et al.(2023)에 제시되었다. 재료의 밀도가 가장 낮은 UHPC EPS 100 %의 경우 상대적으로 휨강도가 약해 제조된 패널의 중량은 압축성형 시멘트 패널 보다 오히려 약 30 % 이상 증가된 결과를 확인하였다.

### 8. 결론

본 연구는 과거 우리의 연구(Ahn et al. 2023)에서 사용한 미세 플라스틱 뿐 아니라 1 mm의 EPS 비즈를 추가로 적용한 UHPC의 다양한 성능에 대해 검토한 것이다. 압축강도와 휨강도, 고온노출 후 성능, 굳지 않은 상태에서의 흘러내림, 유효 부착강도 등을 평가하였다. 마지막으로 휨강도를 이용해 패널로 설계했을 때 예상 제품의 무게를 계산하였다.

실험결과, UHPC를 배합 가능한 범위에서 가장 경량화 시킬 수 있는 재료는 EPS임이 확인 되었다. 배합이 가능한 최대한까지 EPS를 추가 했을 때 UHPC의 밀도는 1300 kg/m<sup>3</sup> 수준까지 감소 하였으며 이 때의 압축강도와 휨강도는 각각 20–30 MPa, 15–20 MPa였다. 압축강도 대비 휨강도가 큰 이유는 강섬유의 혼입 때문이다. 밀도와 강도간의 관계를 확인한 결과 사용되는 경량소재가 플라스틱 미분말인 경우와 EPS인 경우 모두 유사한 경량을 나타

내었다. 단지 EPS의 경우 경량화 범위가 넓었다. 1000 °C 노출 시험 결과 플라스틱 미분말 혼입 배합은 UHPC의 조직이 붕괴하는 것에 비해 EPS 배합은 일반 UHPC와 유사한 수준의 조직 강도 유지가 가능했다. 이는 경량재료의 밀도에 따른 발열량의 차이 때문으로 추측된다. 플라스틱 미분말에 의해 UHPC의 흘러내림을 막을 수 있었으며 동시에 일반 마감용 모르타르 이상의 부착강도도 확인되었다. 마지막으로, 시멘트 패널 설계 시 배합의 밀도 2.0 g/cm<sup>3</sup> 수준의 UHPC에서 가장 경량의 제품이 제조됨을 확인 하였다. 그러나 이 값은 일반 UHPC 패널과 비교하였을 때 크게 개선된 값이라 하기는 어렵다.

### Conflicts of interest

None.

### 감사의 글

본 연구는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(과제관리번호: 2021RIS-002)의 지원에 의해 수행되었습니다.

### References

Ahn, J.S., Moon, J.H., Pae, J.I., Kim, H.K. (2023). Microplastics as lightweight aggregates for ultra-high performance concrete: mechanical properties and autoignition at elevated temperatures, *Composite Structures*, **321**, 117333.

Bajaber, M.A., Hakeem, I.Y. (2021). UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review, *Journal of Materials Research and Technology*, **10**, 1058–1074.

Dixit, A., Dai Pang, S., Kang, S.H., Moon, J. (2019). Lightweight structural cement composites with expanded polystyrene(EPS) for enhanced thermal insulation, *Cement and Concrete Composites*, **102**, 185–197.

Jeong, Y.U., Lim, G.H., Kang, Y.H., Jung, S.H., Kim, J.H. (2020). Preliminary study on development of high strength cement composites at 2,000 kg/m<sup>3</sup> of specific weight, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **8(4)**, 562–570.

Jeong, Y.U., Oh, S.W., Cho, Y.K., Jung, S.H., Kim, J.H. (2021). Characteristics of compressive strength development of high

- strength cement composites depending on its mix design, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **9(4)**, 585–593.
- Lee, D.K., Lee, D.K., Oh, J.H., Yoo, S.W. (2022a), Comparison of bond-slip behavior and design criteria of high strength lightweight concrete with compressive strength 50 MPa and unit weight 16 kN/m<sup>3</sup>, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **10(2)**, 168–175.
- Lee, N., Pae, J., Kang, S.H., Kim, H.K., Moon, J. (2022), Development of high strength & lightweight cementitious composites using hollow glass microsphere in a low water-to-cement matrix, Cement and Concrete Composites, **130**, 104541.
- Pyeon, S.J., Kim, G.Y., Lee, S.S., Nam, J.S. (2022), Hydration properties of high-strength cementitious composites incorporating waste glass beads, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **10(1)**, 74–79.

### 경량 UHPC의 보수용 모르타르 및 시멘트 패널로서의 활용 가능성에 대한 실험적 검토

미세 플라스틱 및 발포폴리스틸렌(EPS) 비즈를 적용한 UHPC의 다양한 성능을 검토하였다. 압축강도와 휨강도, 고온노출 후 성능, 굳지 않은 상태에서의 흘러내림, 유효 부착강도 등을 평가하였다. 마지막으로 휨강도를 이용해 패널로 설계했을 때 예상 제품의 무게를 계산하였다. 실험결과, UHPC를 배합 가능한 범위에서 가장 경량화 시킬 수 있는 재료는 EPS임이 확인 되었다. 배합이 가능한 최대한까지 EPS를 추가 했을 때 UHPC의 밀도는 1300 kg/m<sup>3</sup> 수준까지 감소하였으며 이 때의 압축강도와 휨강도는 각각 20–30 MPa, 15–20 MPa였다. 시멘트 패널 설계 시 배합의 밀도 2.0 g/cm<sup>3</sup> 수준의 UHPC에서 가장 경량의 제품이 제조됨을 확인 하였다.