

Research Paper

## UHPC를 활용한 건축용 외장 패널 특성에 관한 실험적 연구

# Experimental Study of Exterior Panel Properties using Ultra High Performance Concrete

박오성<sup>1,2</sup> · 조형규<sup>3\*</sup>

Park, Oh-Seong<sup>1,2</sup> · Cho, Hyeong-Kyu<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Master's Course, Graduate School, Department of Materials Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

<sup>2</sup>Researcher, Carbon Neutrality & Materials Digitalization Division, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju, 52851, Korea

<sup>3</sup>Senior Researcher, Carbon Neutrality & Materials Digitalization Division, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju, 52851, Korea

\*Corresponding author

Cho, Hyeong-Kyu

Tel : 82-55-792-2472

E-mail : hkcho@kicet.re.kr

Received : April 25, 2022

Revised : May 18, 2022

Accepted : May 26, 2022

### ABSTRACT

Ultra High Performance Concrete(UHPC) is a construction material that has a low water-binder ratio (W/B), a high-performance chemical admixture(SP), mixing material and steel fiber, and performance superior to that of regular concrete in terms of liquidity and strength. In the study, UHPC was used to prepare construction external panels that can replace existing stone panels. In addition, experiments were conducted to access the effects of differences in chemical admixture input amount, the number of fillers, antifoaming agent and steel fiber. An evaluation, was conducted, such of concrete compressive strength, flexural strength, impact strength, absorption rate, and frost resistance. The results showed compressive strength up to 115.5MPa, flexural strength of 20.3MPa, and an absorption rate of 1%. In this case, impact strength and frost resistance evaluation were satisfied with outward observed.

**Keywords :** ultra high performance concrete, concrete, panel, chemical admixture, steel fiber

## 1. 서론

초고성능 콘크리트는 100MPa 이상의 우수한 압축강도를 보유하고 있으며, 인장하중 하에서 취성적인 거동을 막기 위해 적절한 양의 섬유를 혼입하고 인장강도가 15MPa 이상을 나타내는 재료로 정의된다[1]. 이러한 높은 역학적 성능은 0.3이하의 낮은 물-바인더비를 갖지만 고체 혼합물들의 입도를 최적화하여 충전 밀도를 증가시키고 고성능 감수제를 사용하여 높은 유동특성을 갖으면서 재료를 밀실하게 함으로써 나타난다[2]. 초고성능 콘크리트에 사용되는 섬유는 주로 직경 수백 마이크로미터의 고강도 강섬유이며, 일반적으로 체적비(vol.%)로 0.5%~2.0%가 섬유가 혼입된다[1].

일반 콘크리트에 비해 UHPC는 재료 구성비율과 양생 온도 및 습도 조건에 따라 경화 전·후 성능에 많은 차이를 나타내며, 심지어 믹서의 형태, 크기 및 회전 속도에 따라 성능차이를 나타낸다[3]. 현장타설 UHPC 제품은 일반적으로 물을 제외한 다른 재료들이 프리믹스 형태로 출시되기 때문에, 실제로 현장 제조 및 타설시 영향을 미치는 재료 변수는 물-바인더비와 강섬유 혼입률이다[4]. 2%가 혼입된 강섬유가 UHPC 재료비의 절반 가량을 차지할 정도로 강섬유는 고가의 재료이다. 따라서 현장에서 UHPC의 인장 성능 및 균열 저항 성능의 요구 정도에 따라 강섬유 혼입률이 조절 될 수 있다. 이러한 강섬유



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

는 경화 전 UHPC가 흐르는 것을 방해하기 때문에 혼입물이 유동성 또는 충전성에 영향을 미치게 된다[5]. 강섬유가 혼입된 UHPC 배합의 물 또는 고성능 감수제 비율이 그렇지 않은 배합보다 높은 것은 바로 이러한 이유 때문이다. 따라서 UHPC에서는 경제성을 고려한 최적배합 도출 및 물성 확보가 중요한 요인이라 할 수 있다[6].

한편, 건축 외장용 패널에서 사용되는 대표적인 기존 석재 패널의 경우 중량으로 인해 이동이 어렵고 가공성 및 성형성이 떨어지며 재단 시 효율이 좋지 않은 단점이 있으며 일정 두께 이하의 가공이 불가능한 단점이 있다[7]. 주택시장은 매년 증가추세에 있으며 정부에서도 노후주택 개선, 안전기반 리모델링 사업으로 정책 방향을 확대하고 있으며 신축현장에서도 인테리어와 외장재에 대한 관심이 증대되고 있다[8]. 본 연구진에서 상기 언급하였던 UHPC는 다양한 색상이나 질감을 표현할 수 있으며 우수한 성형성과 압축강도 및 인장강도로 석재보다 얇은 두께도 가공이 가능하다. 현재 세계적으로 UHPC는 건축, 토목 분야에서 구조용뿐만 아니라 디지털 3D건축, 스타디움, 갤러리 등 대형 건축, 파사드 등 고부가가치 영역의 외장 패널로 이미 사용되고 있으며 국내에서도 기존 건축 외장재의 한계를 넘는 디자인 구현이 가능한 UHPC 외장 마감 수요가 발생하고 있으며 다양한 프로젝트 등이 기획되고 있다[9].

본 연구에서는 UHPC를 활용한 건축 외장 패널 적용을 위하여 UHPC 구성 재료 및 배합에 따른 물성 평가 및 내구성 평가를 실시하고, 기존의 건축 외장용 석재 패널을 대체할 수 있는 건축 외장 패널 형태의 실험체를 제작하여 UHPC를 활용한 건축용 외장 패널 적용 가능성을 평가하고자 한다.

## 2. 실험계획

본 연구에서는 UHPC를 활용한 건축용 외장패널 개발을 위하여 UHPC를 제작하고 경화 후 물성 및 내구성 평가를 목적으로 실험계획을 수립하였다. UHPC 건축용 외장 패널의 목표 물성 압축강도 115MPa, 휨강도 18MPa 이상을 만족하며 두께 20mm, 내구성 평가(KS F 2221 건축용 보드류의 충격시험 방법, KS F 2518 석재의 흡수율 및 비중 시험방법, KS F 2604 건축용 외벽 재료의 내동해성 시험방법)결과를 만족시키는 초고성능 모르타르 제작을 목표로 설정하였다. 압축강도, 휨강도 측정은 KS L ISO 679의 규격에 따라 40×40×160mm 몰드를 사용하여 측정하였으며, 300×300×20mm, 350×150×20mm의 특수 제작한 아크릴 몰드를 사용하여 패널 형태 실험체의 내구성을 평가하였다.

### 2.1 사용재료 및 배합

사용재료로서 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC), 잔골재는 시중에 고강도용으로 사용되는 Sand Mill을 사용하였으며, 혼화제는 S사의 폴리카본산계 혼화제를 사용하였다. 실리카 폼은 200,000cm<sup>2</sup>/g급 분말도를 갖는 제품을 사용하였으며, 충전재로서 시멘트와 실리카 폼의 중간 크기를 갖는 6,000cm<sup>2</sup>/g급 분말도의 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 실험체 내부 공극을 제거하기 위한 목적으로 소량의 소포제를 사용하였으며, 강섬유는 콘크리트 전체 체적 대비 0.5%를 혼입하였으며 직경 0.2mm, 길이 13mm, 인장강도 2500MPa 이상의 직선형을 사용하였다.

본 실험의 배합 표는 Table 1에 나타내었으며, 동일한 W/B 20%를 갖는 4가지 그룹과 최저 W/B 18% 1그룹으로 배치하였다.

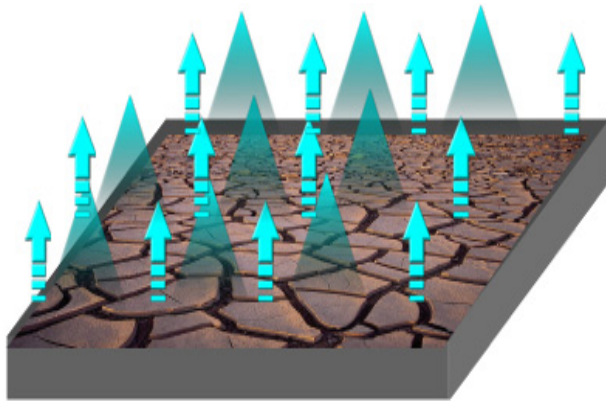
소포제와 강섬유의 혼입에 따른 결과 차이를 확인하기 위해 배합별 혼입 유무를 변수로 나타냈다. Figure 1, 2는 패널 형태의 시편 제조 시 경화 과정의 윗면에서 발생하는 표면건조 및 균열을 나타낸다. 상대 습도 20%, 콘크리트 시편의 온도 20°C에서 Figure 2에 나타난 증발속도 0.5kg/hour로 수분이 표면에서부터 증발하는 것을 확인할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 표면 발수제 도포를 활용하였다.

**Table 1.** Mix proportion of UHPC

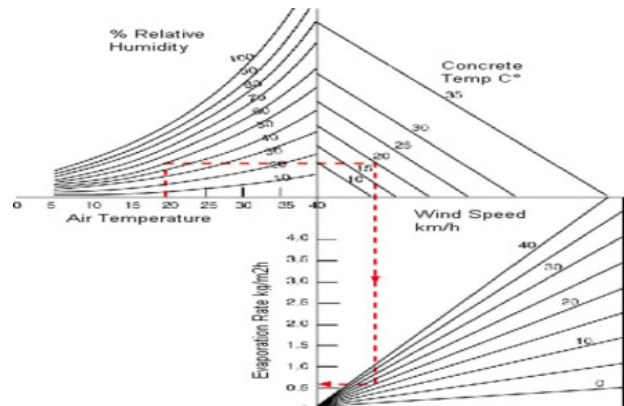
Name	W/B*	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )							
		Water	Cement	Slica fume	BFS**	Sand	Super-plasticizer	Air detraining admixture	Steel fiber
UHPC-1	0.2	214	1070	223	56	410	27.89(2.5)	1.16	33.68
UHPC-2	0.2	214	1070	223	56	410	27.89(2.5)	-	33.68
UHPC-3	0.2	214	1070	223	56	410	27.89(2.5)	1.16	-
UHPC-4	0.2	214	1070	223	56	410	27.89(2.5)	-	-
UHPC-5	0.18	214	1190	223	56	410	27.89(2.5)	1.16	33.68

\* Water-binder ratio

\*\* Blast furnace slag



**Figure 1.** Process of drying the surface of concrete



**Figure 2.** Concrete surface drying progress graph

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 실험체 제조

모르타르는 대형 믹서를 사용하여 혼합하였으며, 동일한 물-바인더비 20% 4그룹, 최저 물-바인더비 18% 1그룹으로 배치하여 Figure 3과 같이 믹싱을 진행하였다. 혼화제는 전체 혼입량을 SP1과 SP2로 나누었으며, SP1은 물을 투하하기 전 시멘트와 골재만의 믹싱 상태에서 혼입하고 이후 물을 투하한 후 믹싱 진행 중 혼입하였다. 실험 결과, 모든 믹싱 과정에서 고성능 감수제 전량을 한꺼번에 혼입하는 방법보다 두 번으로 나누어 혼입하는 방법이 유동성 향상을 나타내었다. 이는 SP1에 의한 1차 반발작용이 일어난 상태에서 일정시간 이후 혼입된 SP2가 수화작용이 일부 진행된 페이스트 층에서 다시 2차 반발작용을 하여 나타난 결과로 설명될 수 있다. 시멘트 입자와 혼화제 간의 반발작용은 수중에서 음이온과 칼슘 양이온으로 분리하여 발생하는 음이온 활성을 나타내고 응집상태의 입자계면에 흡착된 시멘트 입자를 정전기적으로 반발 분산시키는 현상을 의미한다. SP1과 SP2의 최적 비율은 50% : 50%로 진행하였다[10].



Figure 3. Process of manufacturing specimen

### 2.2.2 압축강도 및 휨강도 평가 방법

실험체는 KS L ISO 679에 의거하여 40×40×160mm몰드를 사용하여 제작하였다. 믹싱 후 타설한 모르타르 실험체는 24시간 습윤 양생(온도 20°C, 습도 90%)이후 재령 28일 동안 수중양생을 거친 후 만능재료시험기를 사용하여 압축 및 휨강도를 측정하였다. 압축강도 측정은 좌측부와 우측부에서 10mm 떨어진 지점으로 하중을 가하여 측정하였으며, 휨강도 측정은 직육면체 시편에 대한 3점 휨강도 실험을 진행하였다. 실험 진행을 Figure 4에 나타내었으며, 시험 평가 기준에 대한 항목을 Table 2에 나타내었다.



(a) Compressive strength test



(b) Flexural strength test

Figure 4. Types of strength test

Table 2. Experiment outline and test standards

Category	Evaluation method	Code	Determinations	Characteristic
Compressive strength	1d, 3d, 7d, 28d	KS L ISO 679	Target 110MPa	Physical property evaluation
Flexural strength	1d, 3d, 7d, 28d	KS L ISO 679	Target 20MPa	Physical property evaluation
Impact strength	Visual inspection	KS F 2221	Check surface condition	Durability identification
Absorption rate	Moisture absorption	KS F 2518	Target 5%	Durability identification
Freeze resistance	Visual inspection	KS F 2604	Check surface condition	Durability identification

### 2.2.3 내구성 시험 평가 방법

KS F 2221 건축용 보드류의 충격시험 방법 규격에 따른 측정을 위해 Figure 6에 나타낸 가지형 추를 특수 제작하였다. 추의 규격은 Table 3에 나타내었다. 각 무게별 추를 낙하하여 실험을 진행하였으며 규격 내 명시되어있는 지지대로 표준사를 사용하여 평가하였다. 건조기 내에 시편을 7일간 보존하여 내부에 수분을 제거한 후 일정한 질량의 기건 상태가 될 때까지 방치시켜 지지대에 수평으로 놓고 규정하는 추를 시험체 중앙의 연직 상부 50cm 높이에서 자연 낙하하여 파괴 상황 및 표면 상태를 확인하였다.

KS F 2518 석재의 흡수율 및 비중 시험방법의 규격 내 시험 방법에 따라 공시체를 건조기 속에서 (105±5)°C의 온도로 24시간 건조시킨 후 48시간 동안 (20±5)°C 온도의 증류수에 침수시킨 후 무게의 차를 통한 아래의 식에 따라 흡수율을 계산하였다.

$$\text{흡수율 (\%)} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (1)$$

여기에서

A: 건조 공시체의 질량(g)

B: 침수 후 공시체의 질량(g)

KS F 2604 건축용 외벽 재료의 내동해성 시험방법(동결 융해법)의 규격에 따라 -18°C~4°C 온도 구간을 100Cycle 시험하였고 시험 결과의 평가 내용에 따라 결모양 관찰 결과를 확인하였다. 규격 내 시험의 종류는 수중 동결 수중 융해법으로 동결 조건과 융해 조건 모두 수중에서 진행되었다. 전체 면에 물을 공급하는 방법으로 수중에 침지하여 시험을 진행하였다. 1사이클의 조건은 동결 융해 필요 시간 3시간 이상 5시간 이내로 하였고 융해 필요 시간은 1사이클의 25%이상으로 설정하였다.

본 실험의 내구성 시험 평가는 Figure 5와 같이 300×300×20mm, 350×150×20mm 패널 형태의 시편으로 시험을 진행하였다.

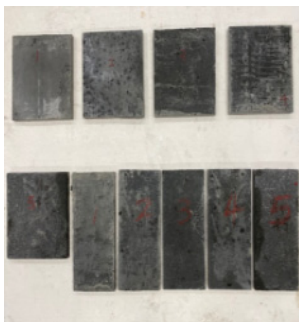


Figure 5. Types of panel specimens

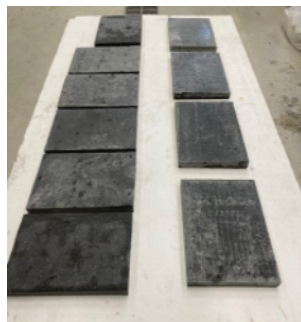
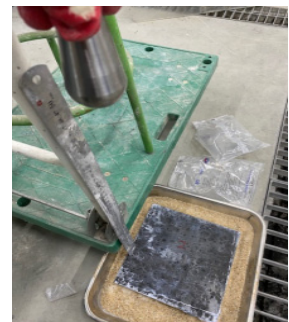


Figure 6. Types of impact strength test



**Table 3.** Specifications of eggplant shaped weight

Type of weight	Sign	Weight(g)	Nominal length	Diameter(mm)
Eggplant shaped weight	W <sub>1</sub> 500	500	-	42
	W <sub>1</sub> 1,000	1 000	-	52
	W <sub>1</sub> 2,000	2 000	-	66
Spherical weight	W <sub>2</sub> 300	286	1 $\frac{5}{8}$	41
	W <sub>2</sub> 500	530	2	51
	W <sub>2</sub> 1,000	1 042	2 $\frac{1}{2}$	64

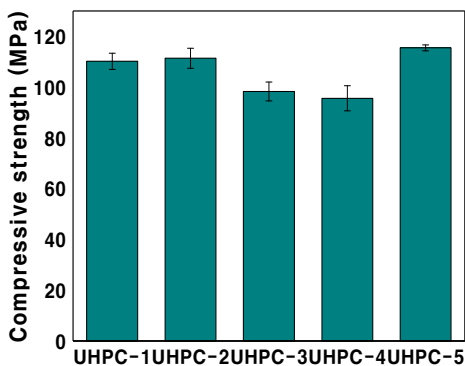
### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 압축강도 및 휨강도 결과 및 분석

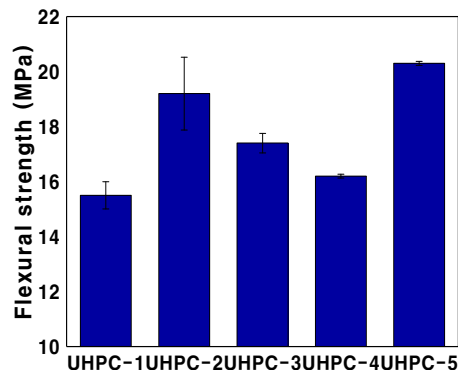
각각의 배합에 따라 제작한 실험체의 재령 별 압축강도 및 휨강도 측정결과를 Figure 7, 8에 나타내었다.

Figure 7은 28일 양생 이후 최대 압축 강도를 측정한 결과이다. W/B 18% 배합에서 최대 115.5MPa까지 압축강도 값이 도달했으며, 소포제와 강섬유의 혼입을 제외한 UHPC-4 배합에 비해 19.9MPa 가량 증진된 결과를 나타낸다. 강섬유의 혼입을 제외한 UHPC-3,4 배합에서 각각 98.3MPa, 95.6MPa으로 다른 강섬유가 혼입된 배합은 모두 100MPa 이상의 높은 압축강도 결과 값을 나타내는 것에 비해 상대적으로 저조한 결과를 나타낸다. 가장 우수한 압축강도 결과를 나타내는 UHPC-5 배합에서 결과 데이터간의 표준편차가 상대적으로 가장 균일한 것을 확인하였다. 이는 결합재와 골재 계면 사이의 공극을 최소화 하여 충전 밀도가 향상된 것으로 판단된다. 소포제의 사용에 따른 압축강도의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 40×40×160mm 크기의 직육면체 시편에 대한 3점 휨강도 실험을 진행하였다. 모든 배합에서 강섬유의 혼입률은 vol 0.5%로 고정하였으며 이는 콘크리트 인장성능 및 균열 저항 성능에 요구되는 최적 혼입률을 확인하여 설정한 값이다. Figure 8은 28일 양생 이후 각 배합별 휨강도 측정 결과를 나타낸다. 압축강도 결과와 마찬가지로 W/B 18% 배합에서 가장 우수한 휨강도 값을 나타내며 최대 20.3MPa을 도달하였다. 최저 휨강도 결과를 나타내는 UHPC-1 배합보다 4.8MPa 가량 증진되었다. 압축강도와 마찬가지로 최저 물-바인더비 배합에서 휨강도 데이터간의 표준편차가 균일한 것을 확인할 수 있다. 강섬유가 혼입된 UHPC-3,4 배합에서는 각각 17.4MPa, 16.2MPa으로 다소 휨강도 결과 값이 저하되는 결과를 나타내었다. 압축강도 및 휨강도 시험 결과표를 Table 4에 나타내었다.



**Figure 7.** Results of compressive strength test



**Figure 8.** Results of flexural strength test

**Table 4.** Results of flexural strength and compressive strength tests

	Compressive Strength(MPa)	Flexural Strength(MPa)
UHPC-1	110.2	15.5
UHPC-2	111.4	19.2
UHPC-3	98.3	17.4
UHPC-4	95.6	16.2
UHPC-5	115.5	20.3

### 3.2 경화 후 콘크리트 내구성 평가

#### 3.2.1 충격강도 시험 결과 및 분석

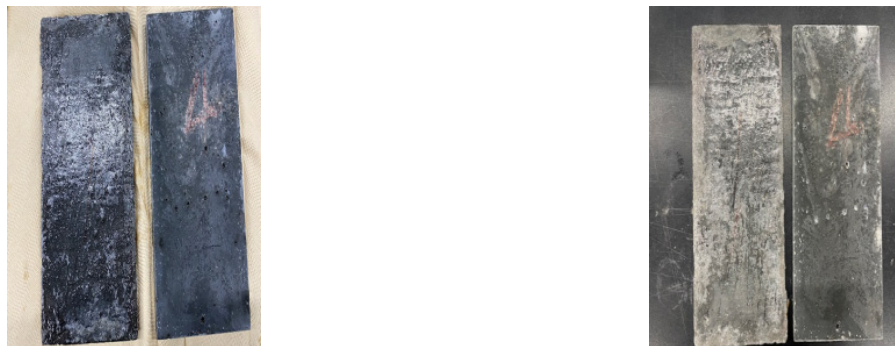
KS F 2221 건축용 보드류의 충격시험 규격에 따라 50cm 높이에서 500g, 1000g, 2000g, 가지형 추를 낙하하여 충격 시험을 진행 하였으며 표면의 균열이나 Crack 발생 여부 관찰 결과 이상 없음 결과를 만족 하였다. UHPC의 고인성, 고강도의 물리적 성능과 재료간의 복합적인 작용으로 기존의 석재 패널의 취성 및 연성 파괴의 취약점 보완이 가능한 것으로 판단된다.

#### 3.2.2 흡수율 시험 결과 및 분석

KS F 2518 석재의 흡수율 및 비중 시험방법 내 규격에 따라 건조된 공시체와 수분을 함량한 공시체의 무게차를 산출하여 흡수율을 계산하였으며 표면 발수제 도포 처리를 한 시험 결과의 경우 최대 1%를 만족하였으며, 발수 도포 처리를 하지 않은 시편의 경우 최대 2.9% 결과 값을 나타내었다.

#### 3.2.3 내동해성 시험 결과 및 분석

KS F 2604 건축용 외벽 재료의 내동해성 시험방법(동결 용해법)으로, 규격 내 명시되어 있는 Cycle 횟수를 100으로 지정하여 -18°C~4°C 온도 구간에서 시험을 진행하였다. 용해 상태의 시험편에 발생하는 갈라짐, 잔금, 부풀, 박리 등의 유무 및 그 정도를 육안으로 관찰한 결과를 Figure 9에 나타내었고 겉보기 표면 이상 유무의 이상 없음 결과를 만족 하였다.



**Figure 9.** Results of absorption rate and freeze-resistance tests

### 3.3 역학적 특성 결과 고찰

UHPC의 압축강도는 주로 시멘트 복합체의 강도에 영향을 받기 때문에 W/B, 혼화제 종류 및 양, 굳지 않은 특성의 영향 인자에 좌우된다.

본 연구에서는 UHPC의 동일한 W/B, 배합별 혼화제 투입량, 충전재의 혼입량, 소포제 및 강섬유 혼입 유무의 차이로 변수를 가지고 실험을 진행하였다. 혼화제 투입량은 강도에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 판단되며, 가장 큰 실험적 변수로 작용한 것은 강섬유의 혼입에 따른 강도 결과 차이로 나타났다. 강섬유가 혼입된 배합의 경우 강섬유가 혼입되지 않은 배합보다 우수한 압축, 휨 강도를 나타내는 결과를 나타내었다. 패널 시편의 내구성 평가 시험에서 모든 배합이 일반 건축용 석재를 대체할 수 있다고 판단되는 결과를 나타내었으며, 이는 차후 최종 외장재로서 활용 될 수 있는 UHPC의 연구 개발에 발판이 될 수 있을 것으로 보인다.

## 4. 결론

본 연구에서는 기존의 건축 외장용 석재 패널을 대체할 수 있는 UHPC의 최적 배합 도출 및 제조를 위한 일련의 실험을 통해 최종적으로 UHPC를 활용한 건축용 외장 패널을 개발하기 위한 물성 및 내구성을 평가를 진행하고 이에 대한 역학적 특성을 고찰하였다. 본 연구범위에서 이를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 동일한 W/B 20% 4개의 그룹과 최저 W/B 18% 1개 그룹으로 설정하여 소포제와 강섬유의 혼입 유무의 차이를 두어 압축강도와 휨강도를 측정된 결과 압축강도와 휨강도 모두 최저 W/B 18% 배합에서 최대 강도 결과를 나타내었으며, 압축강도는 115.5MPa, 휨강도는 20.3MPa로 우수한 강도를 확보할 수 있었다. 강섬유의 혼입의 유무에 따른 결과 또한 압축강도와 휨강도 결과 값에 영향을 미치는 결과를 확인할 수 있었다. UHPC의 안정적인 고성능 특성을 확보하기 위해서는 강섬유의 혼입이 필수적인 것으로 나타났다.
- 2) 300×300×20mm, 350×150×20mm 의 두 가지 패널 시편을 이용하여 내구성 평가를 진행한 결과 KS F 2221 건축용 보드류의 충격시험 방법에서 표면 이상 없음을 만족하였으며, KS F 2518 석재의 흡수율 및 비중 시험방법에서 표면 발수제 도포 처리를 진행한 시편과 그렇지 않은 시편의 흡수율 결과 최대 1.0%, 2.9% 결과를 만족하였다. KS F 2604 건축용 외벽 재료의 내동해성 시험방법(동결 용해법) 규격에 따라 시험한 결과 표면 결보기 관찰 결과 이상 없음 결과를 만족하였다.

이상을 종합하면, 물성 테스트 결과 UHPC-5 배합에서 목표 압축강도 115MPa 이상, 휨강도 20MPa 이상 발현되었다. 패널 시편의 내구성 시험 결과 또한 모든 목표 결과를 만족하였으며, 향후 UHPC를 활용한 최종 외장재로서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## 요약

초고성능 콘크리트(UHPC)는 낮은 물-바인더비(W/B), 고성능 감수제(SP), 혼화제 및 강섬유(Steel Fiber)의 혼입으로 일반 콘크리트보다 유동성, 강도 등에서 월등히 우수한 성능을 지닌 건설 재료이다. 본 연구에서는 UHPC를 활용하여 기존의 석재 패널을 대체할 수 있는 건축용 외장 패널을 제작하였다. 또한, UHPC의 W/B비 배합별 동일한 혼화제 투입량, 충전재의 혼입량, 소포제 및 강섬유 혼입 유무의 차이로 변수를 가지고 실험을 진행하였다. 평가 항목으로는 콘크리트 압축강도, 휨강도, 충격강도, 흡수율, 내동해성 등 물성 및 내구성 테스트를 진행하였다. 실험결과, 압축강도 최대 115.5MPa, 휨강도 20.3MPa를 확보하였으며 흡수율 1%이내, 충격강도 및 내동해성 평가는 규격 내 결보기 관찰 결과 이상 없음 결과를 만족하였다.


키워드 : 초고성능 콘크리트, 콘크리트, 패널, 혼화제, 강섬유




## Funding

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education(2021R1F1A1053209).

## ORCID

Oh-Seong Park,  <http://orcid.org/0000-0001-9090-1803>

Hyeong-Kyu Cho,  <http://orcid.org/0000-0003-0011-1790>

## References

1. Bae BI, Choi HK, Choi CS. Correlation between tensile strength and compressive strength of ultra high strength concrete reinforced with steel fiber. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2015 Feb;27(3):253-63. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2015.27.3.253>
2. Yang IH, Joh CB, Kim BS. Structural behavior of Ultra High Performance Concrete beams subjected to bending. *Engineering Structures*. 2010 Nov;32(11):3478-87. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.07.017>
3. Yoo HJ, Lee SS, Song HY. Physical properties of artificial interior stone using waste resources. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2014 Jun;14(3):237-43. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2014.14.3.237>
4. Park JH, Pyeon SJ, Lee SS. A study on the properties of cementless artificial stone by recycled coarse aggregate and red mud according to replacement ratio. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*. 2019 Mar;7(1):50-6. <https://doi.org/10.14190/JRCR.2019.7.1.50>
5. Park JW, Lee GC. Effect of compressive strength and curing condition on the direct tensile strength properties of ultra high performance concrete. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2017 Apr;17(2):175-81. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2017.17.2.175>
6. Letelier V, Tarela E, Moriconi G. Mechanical properties of concrete with recycled aggregates and waste brick powder as cement replacement. *Procedia Engineering*. 2017 Feb;171:627-32. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.396>
7. Park JW, Lee GC, Koh KT, Ryu GS. Study on direct tensile properties and reliability review of steel fiber reinforced UHPC. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2018 Apr;18(2):125-32. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2018.18.2.125>
8. Manzi S, Mazzotti C, Bignozzi MC. Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate : Study of the long-term properties. *Construction and Building Materials*. 2017 Dec;157:582-90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.129>
9. Park JB, Yoon HS, Yang KH. Fundamental tests on Compressive strength development and thermal conductivity of cement pastes including fumed silica. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2018 Oct;18(5):413-18. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2018.18.5.413>
10. Kang SH, Hong SG. Performance of fresh and hardened ultra high performance concrete without heat treatment. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2014 Feb;26(1):23-34. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2014.26.1.023>