



## 고속충격을 받는 외장 UHPC 패널의 내충격성능

강현구<sup>1)\*</sup> · 김상희<sup>1)</sup> · 김민수<sup>1)</sup> · 홍성걸<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 건축학과

### Impact Resistance of UHPC Exterior Panels under High Velocity Impact Load

Thomas H.-K. Kang,<sup>1)\*</sup> Sang-Hee Kim,<sup>1)</sup> Min-Soo Kim,<sup>1)</sup> and Sung-Gul Hong<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Rep. of Korea

**ABSTRACT** This experimental study aims to evaluate the impact performance of UHPC exterior panels through high velocity impact tests. The impact performance of UHPC was compared with that of granite in terms of panel thickness, and strain histories were recorded on the rear face of panel specimens. The UHPC turned out to be a good exterior facade material, because the appearance of UHPC is natural enough and impact performance was superior to granite. After colliding, compression pulse reached to the rear face but that pulse was reflected in tension pulse with respect to the free point outside the rear face of the panel. This tension pulse caused the scabbing from the rear side, as the strain histories on the rear face showed three different regions as compression region, steady region and tension region. The shear plug deformation by shear force also was one of the primary reasons for the scabbing based on the observation. Therefore, the scabbing seemed to be affected by both tension and shear forces.

**Keywords** : exterior, UHPC, high velocity impact load, rear strain history, shear plug

### 1. 서 론

일반적으로 외장재는 1차적으로 건물 외관의 미적 아름다움을 더해주고, 외부로부터 물리적 충격을 견딜 수 있어야 한다. 기존 벽돌, 화강암, 대리석, 유리 등의 외장재로는 현대의 진보해가는 건축물이 요구하는 다양한 형태를 구현하기 쉽지 않다. 더구나 최근에는 비정형, 초고층, 특수 건축물의 증가로 인하여 여러 가지 성능의 외장재가 요구되고 있다. 그러나 강한 풍속을 타고 모래 또는 파편이 충돌하게 되면 건물 외장재가 깨지거나 탈락할 수 있다. 이는 건물 주변의 인명 피해를 발생시킬 수 있을 뿐만 아니라 건축물 외형을 크게 손상시킬 수 있다. 특히 앞서 언급한 비정형 건축물의 보수와 보강은 경제적으로 큰 부담일 수 있다. 이러한 단점을 개선하고자 최근 새로운 외장재로의 대안으로 초고성능 콘크리트(ultra-high performance concrete, UHPC)가 각광받고 있다. UHPC는 1990년대 프랑스를 중심으로 활발히 연구되었으며, 국내에는 2000년부터 연구되어 UHPC 제조기술이 개발되었다.<sup>1,2,3)</sup>

UHPC는 압축강도 150 MPa 이상과 인장강도 8~20 MPa의 고강도, 고인성을 가진 재료로서, 재료의 분말도가 높아 공극이 작고 밀실하다.<sup>4)</sup> 또한 일반 콘크리트에 비해 폭이 작은 균열이 고르게 분산되기 때문에 내구성이 뛰어나다. UHPC는 내구성과 균열저항성능 그리고 유동성과 압축강도 등에 있어 우수한 점이 많아 보수, 보강 등에 자주 사용되고 있다.<sup>1)</sup> 이러한 여러 가지 장점을 이용하면 얇으면서도 단단한 외장재를 만들 수 있다. UHPC는 콘크리트이기 때문에 가장 큰 장점은 다양한 형태로 제작이 가능하다는 것이다. 탁월한 성형성을 보유한 UHPC를 외장재로 활용할 경우 혁신적인 경량화가 가능하며 이로 인한 재료비, 노무비를 절감할 수 있기 때문에 경제적인 외장재로 활용될 것으로 전망된다.

특히 UHPC는 높은 변형률 속도에서 우수한 인장특성을 갖기 때문에 내충격성이 우수하다고 연구되었으며,<sup>5)</sup> 강섬유를 보강한 콘크리트는 내충격성이 우수하다고 평가받고 있다.<sup>6,7)</sup> 따라서 강섬유가 함유된 UHPC를 외장재로 사용할 경우 내충격성에 장점이 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 외장재의 기본적인 요구 성능인 고강도, 가공성, 외관 중에서 내충격성을 평가하고자 한다. 기존 콘크리트의 내충격성 연구는 두꺼운 패널 위주로 연구되었지만, 본 연구에서는 UHPC를 활용한 외장재의 내충격

\*Corresponding author E-mail : tkang@snu.ac.kr  
 Received February 5, 2016, Revised June 1, 2016,  
 Accepted June 9, 2016  
 ©2016 by Korea Concrete Institute

성을 파악하고자 얇은 패널을 실험대상으로 하였다. 기존에 일반적으로 많이 사용된 화강암 외장재 패널을 기준 실험체로 하였으며, UHPC 패널에 대해서는 외장재로 사용 가능할 정도로 얇게 제작하였다. 이러한 UHPC의 내충격성을 정량적으로 평가하고 고속충격을 받을 때 UHPC의 변형에 대해서 연구하고자 한다.

## 2. SFRC의 내충격성 평가 실험

### 2.1 실험 계획

이 연구에서는 UHPC를 활용하여 제작한 외장재 패널의 내충격성을 평가하기 위한 실험을 계획하였다. 외장패널의 경량화 제작에 적합하다고 판단되는 설계강도 180 MPa 콘크리트를 사용하여 제작하였다. 그리고 가장 대표적인 외장재인 화강암 패널과 비교 평가하고자, 문경석과 고흥석을 준비하였다.

콘크리트 제조는 한국건설기술연구원에서 개발한 K-UHPC 배합과 믹서, 양생과정을 따랐다. K-UHPC는 한국에서 개발된 UHPC로서 굵은골재를 사용하지 않고 수화물과 채움재의 입자간격을 좁혀 밀도를 높인 콘크리트이다. 얇은 패널임을 감안하여 지름 0.2 mm이고 길이 16 mm인 강섬유( $l/d=80$ )는 0.5%, 동일 지름의 길이 20 mm인 강섬

유( $l/d=100$ )는 1.0%를 혼합하여 총 강섬유는 체적대비 1.5%를 혼입하였다. 이전 UHPC의 강섬유 혼입률은 2% 이지만, K-UHPC는 2 종류의 강섬유를 1.5% 혼합사용함으로써 다른 UHPC와 동등한 인장강도를 나타내는 것이 특징이기 때문에 K-UHPC 배합에 따라 2가지를 혼합사용하였다.<sup>8)</sup> 강섬유의 인장강도는 1600 MPa이다.

실험체의 넓이는 400×400 mm, 두께는 외장재로서 활용할 수 있도록 10, 20, 30 mm로 얇게 제작하였다. 실험체명은 콘크리트 강도와 두께에 따라서 SC180-10, SC180-20, SC180-30으로 하였으며, 실험 순서에 따라 연번을 붙였다. 대조군으로 준비한 화강암(Granite) 실험체 중에서 10 mm 두께의 화강석 패널은 일반적으로 생산되거나 사용되지 않으므로 평가대상에서 제외하였다. 문경석(G-White)은 20 mm 1개, 30 mm 2개를 준비하였으며, 고흥석(G-Black)은 30 mm 3개를 준비하였다.

실험체에 충돌하는 충돌에너지량은 권총에서 발사되는 총알이 가지는 운동에너지와 유사하게 설정하였다. 양중 및 운반 중 충격을 받기도 하는 외장재인 만큼 외부에서 발생 가능한 충격이나 태풍, 돌풍 등에 날리는 돌맹이 등을 고려하였을 때 충격에 의한 탄환에너지가 가장 적당하다고 판단하여서 권총에 의한 운동에너지를 기준으로 충격실험을 계획하였다. 본 실험에서는 총알이 가지는 운동에너지와 유사할 수 있도록 지름 20 mm, 무게 32 g의 쇠구슬을 비상체로 하여 약 180 m/s의 속도로 발사하였다. 발사된 비상체는 약 9 mm 권총과 스미스웨슨(40 S&W) 중간정도의 운동에너지를 가지는 비상체이다(Fig. 1).

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1 시험체 제작 및 압축강도 시험

콘크리트는 대형 팬믹서를 사용하여 믹서하였으며, 뭉침현상(fiber balling)을 억제하기 위하여 강섬유를 조금씩 팬믹서에 투하하였다. 패널형 시험체의 제작을 위해서 400×400 mm 넓이에 10, 20, 30 mm 깊이의 몰드를 각각

Table 1 Mix proportion of concrete

Material	Value	
Specified compressive strength ( $f_{ck}$ )	180 MPa	
W/B (%)	20	
$V_f$ (%)	16 mm	0.5%
	20 mm	1.0%
Water	150 kg/m <sup>3</sup>	
Premixing of binder constitutions	400 kg/m <sup>3</sup>	
Fine aggregate	867.4 kg/m <sup>3</sup>	
Antifoaming agent	0.5 kg/m <sup>3</sup>	
Superplasticizer	18.1 kg/m <sup>3</sup>	

W/B = water-binder ratio,  $V_f$  = steel fiber volume fraction, Premixing of binder constitutions is consist of cement, expansive admixture for cement mixture, zirconia silica fume, shrinkage reducing admixtures, filler.

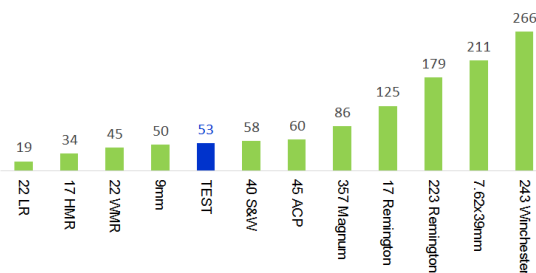


Fig. 1 Muzzle energy of various cartridges (kgf.m)<sup>9)</sup>

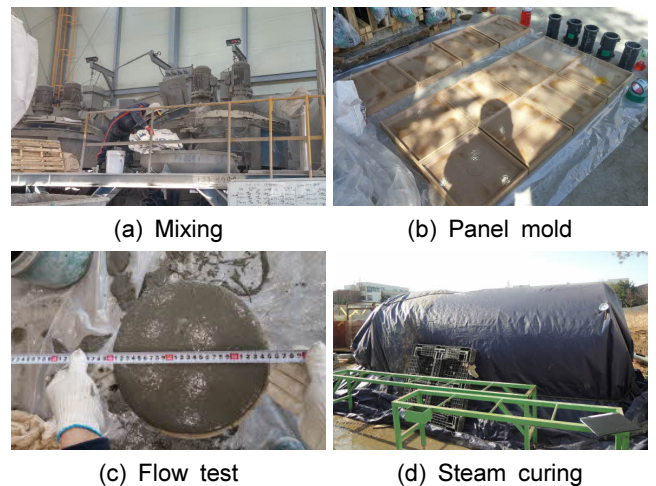


Fig. 2 UHPC mixing and mold

나무로 제작하였다(Fig. 2). 압축강도 시험을 위해서  $\varnothing 100 \times 200$  mm의 원형실린더 5개를 제작하였다. 혼합된 생콘크리트를 패널형 시험체와 실린더 공시체에 담은 후 밀봉양생하였고 콘크리트가 경화된 후에는 밀봉한 봉합(seal)을 제거하고 48시간 동안 80~90°C에서 증기양생하였다. 증기양생된 시험체를 기건 양생과정을 거친 후 탈형하였다. 탈형된 패널형 시험체와 실린더 공시체를 20±2°C의 수조에서 4주간 수중양생을 하였다. 시험방법은 KS F 2405<sup>10)</sup>에 따라 시험당일 날 만능재료시험기를 사용하여 압축강도를 측정하였다. 콘크리트의 평균 압축강도는 168 MPa으로 나타났다. 콘크리트 흐름시험 평균 결과는 250 mm으로 측정되었다.

### 2.2.2 충격 실험

패널의 내충격성능을 평가하는 방법으로는 KS F 4735<sup>11)</sup>에 충격원을 낙하높이 1 m에서 낙하시켜 패널의 모서리, 중앙, 임의위치 각각 1곳을 타격하는 방법의 규준이 있으며, ASTM E 661-03<sup>12)</sup>에 따라 충격하중과 집중하중을 번갈아 가며 반복재하하는 방법이 있다. 그리고 가스압력 방식이나 자유낙하를 통해 큰 충격에너지를 주는 방법이 있다.<sup>13)</sup> 본 연구에서는 단순 이동, 시공 등에 발생할 수 있는 충격을 비롯해 그보다 더 큰 에너지를 상대로 장기적이며 우수한 내충격성을 평가하고자 가스압력 방식과 동일한 공기압축 방식을 통한 고속 비상체 충돌 실험을 수행하였다.

내충격 시험장치는 Fig. 3과 같으며, 공기압을 이용하여 비상체를 발사하여 챔버 안 패널 시험체에 충돌하게 하였다. 에어컴프레서가 에어탱크와 리시버탱크에 공기압을 저장한 후 솔밸브를 열어서 저장된 공기압을 일순간에 총열로 토출하여 비상체를 가속하였다. 총열을 통해 지속적으로 압력을 받는 비상체는 속도가 증가하였다. 챔버 내 앞쪽에는 속도측정기를 설치하여 비상체 속도를 측정하였으며, 중간 부위에 400×400 mm 시험체를 고정



Fig. 3 Impact test machine

할 수 있는 고정틀에 설치하였다. 즉, 각 구석에 전산볼트를 끼울 수 있는 구멍을 가진 이동틀을 시험체 앞에 놓은 후 고정틀과 이동틀을 전산볼트로 체결하였고, 이동틀과 고정틀로 고정된 시험체는 고정틀과 20 mm 겹치게 고정되었다.

180 m/s의 속도를 가질 수 있도록 리시버 탱크가 약 1 MPa로 측정될 때 솔밸브를 열어서 비상체에 압력을 가하였다. 이 때 비상체는 지름 20 mm (32.6 g)의 쇠구슬을 사용하였다. 발사관의 토출부와 시험체간의 거리는 700 mm이다. 비상체가 패널 시험체에 충돌한 후 파괴형상에 따라 표면파괴, 배면파괴, 관통 3등급으로 나누어 평가하였다. 그리고 중량 손실량, 전면과 배면의 손실범위, 관입깊이를 측정하였다.

실험체 배면 중심에 배면의 변형률 이력을 조사하기 위해서 콘크리트 변형률 측정게이지를 실험체 배면의 중심에 부착하였다. 내충격성 실험은 실험시간이 0.5초 이내이기 때문에 동적데이터로거를 사용하여 실험데이터를 수집하였다. 동적데이터로거 FFT EDX-2000A 제품을 사용하여 0.0001초당 데이터를 수집하였다. 수신된 데이터를 0.005초로 평균값을 내어서 실험결과를 분석하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 외장재 패널로써의 미적 평가

외장재 패널로써의 중요한 요소 중 하나가 미적요소이다. Fig. 4는 화강암, 일반 콘크리트 그리고 UHPC 패널의 표면을 나타내었다. 화강암은 물갈기공법(web rubbing)으로 마감처리하여 표면이 매끈하고 광택을 가지고 있다. 일반콘크리트는 화강암을 고운다듬한 것 만큼 표면이 매끈하지 못하며 시멘트와 골재가 거칠게 나타나 있다. UHPC의 28일 후 외관 상태를 살펴보면 전체적으로 공극이 없어 외관이 깔끔하였다. UHPC는 일반콘크리트처럼 거친 느낌이 없으며, 약간의 윤기와 광택이 발현되었다. 물갈기 공법을 한 화강암 패널보다 광택은 떨어졌지만, 많은 UHPC 실험체에서 외장재로서 충분한 윤기와 광택을 가지고 있다고 판단되었다. 윤기와 광택을 가지고 있는 면은 거푸집면이었으며, 타설면은 거칠었다. 모든 시험체가 우수한 품질의 광택을 나타내지는 않았다. 하지만, 외관상태로 보아 UHPC를 제작할 때 품질관리가 이루어진다면, 외장재로 사용하기에 무난한 외관을 가지고 있다고



(a) Granite (b) Normal concrete (c) UHPC

Fig. 4 Comparison of appearance of each material

사료된다. 또한 UHPC는 기본적으로 콘크리트의 우수한 성형성을 가지고 있으므로, 다양한 형태와 크기의 제품으로 제작이 가능하다고 사료된다. 뿐만 아니라 백색시멘트와 다양한 염료를 첨가해 컬러 UHPC를 구현할 수 있다.

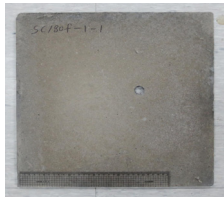

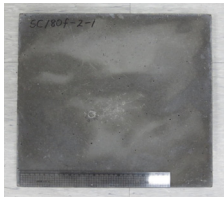
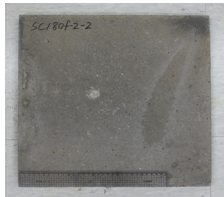
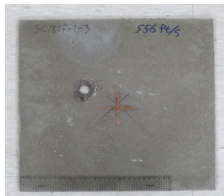
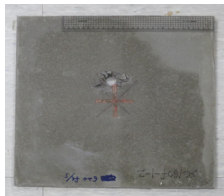
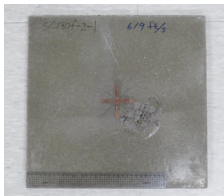
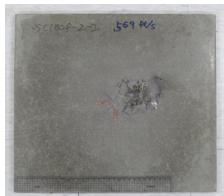
### 3.2 UHPC의 내충격성 평가

Table 2는 실험결과를 실험체, 중량 손실량, 관입깊이, 파괴면적을 측정하여 표로 정리한 것이다. 그리고 Table 3에는 일부 실험체의 실험 후 전면과 배면의 상태를 촬영

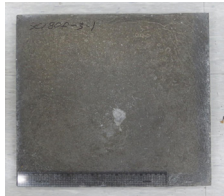
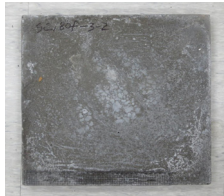
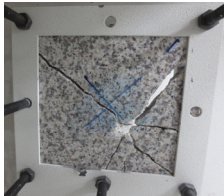
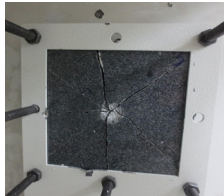
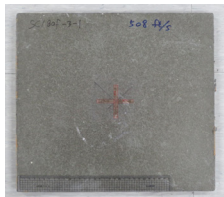
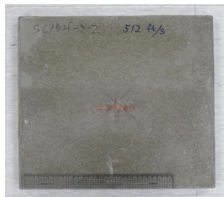


**Table 2** Results of specimens

Specimen No.	Velocity (m/s)	Failure mode	Weight			Front		Rear	
			Before (kg)	After (kg)	Loss (%)	Area (mm <sup>2</sup> )	Depth (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Depth (mm)
SC180-10-1	178.3	Perforation	4	3.98	0.50	333	-	2447	-
SC180-10-2	189.0	Perforation	4.28	4.24	0.93	324	-	2970	-
SC180-10-3	169.5	Perforation	3.96	3.94	0.51	338	-	2012	-
SC180-10-4	179.8	Perforation	4.08	4.06	0.49	336	-	2458	-
SC180-20-1	188.7	Scabbing	7.86	7.82	0.51	137	3.5	7350	13.6
SC180-20-2	173.4	Scabbing	7.94	7.9	0.50	259	4	7871	13.6
SC180-20-3	187.1	Scabbing	7.62	7.6	0.26	177	4	4409	13
SC180-20-4	188.7	Scabbing	8.06	8.04	0.25	320	4	6830	13.3
SC180-30-1	154.8	Spalling	11.84	11.82	0.17	479	4	-	-
SC180-30-2	156.1	Spalling	11.92	11.92	0.00	573	4	-	-
SC180-30-3	179.5	Spalling	12.04	12.02	0.17	1178	3	-	-
SC180-30-4	210.6	Spalling	11.72	11.7	0.17	345	3.5	-	-

**Table 3** Selected specimens

Specimen	SC180-10-1	SC180-10-2	SC180-20-1	SC180-20-2
Front face				
Rear face				

Specimen	SC180-30-1	SC180-30-2	G-White	G-Black
Front face				
Rear face				

영하여 나타내었다. Table 2에 화강암의 데이터는 포함되어 있지 않다. Table 3에서 보여지듯이 화강암은 비상체가 충돌 후 많은 조각으로 파괴되어서 시험장치의 고정틀에서 화강암 패널을 분리하여 측정하는 것이 불가능하였다.

10 mm 두께의 SC180-10 시험체에서는 모두 관통파괴가 발생하였다. 파괴된 실험체는 공통적으로 전면에 탈락없이 깨끗하게 뚫린 형태로 관찰되었다. 전면의 뚫린 넓이의 평균은 약 332 mm<sup>2</sup>로 지름 20 mm 비상체의 단면적인 314 mm<sup>2</sup>과 거의 비슷하였으며, 배면에만 탈락(scabbing)이 발생하였다. 일반적으로 배면에 탈락이 발생할 때 전면 탈락(spalling)도 동시에 발생하는데, SC180-10 시험체에서는 이러한 파괴양상이 없었다. 전면탈락이 없이 배면 탈락만 발생한 원인은 비상체가 가지는 외부에너지가 콘크리트가 흡수할 수 있는 내부에너지보다 월등히 컸기 때문에 사료된다. 두께 20 mm의 SC180-20 시험체의 경우 관통파괴가 발생하지 않고 충돌 전면으로 약 4 mm 정도 관입되었고 배면파괴가 발생하였다. SC180-20에서는 배면탈락과 전면탈락이 동시에 발생하는 일반적인 파괴양상이 발생하였다. 배면에서 평균적으로 6615 mm<sup>2</sup>의 넓은 배면탈락 면적과 13.4 mm의 배면탈락 깊이를 보였다. 두께 30 mm의 SC180-30 시험체는 4개의 시험체에서 동일하게 전면탈락과 약 3.6 mm의 관입깊이가 측정되었다. 배면에서는 미세한 균열이 발생하였다.

화강석 패널의 경우 20 mm의 시험체는 비상체가 관통하였으며, 여러 파편으로 산산조각 부서졌다. 30 mm의 시험체는 비상체가 관통하지는 않았으나 충돌로 인해 20 mm 시험체와 유사하게 여러 조각으로 파괴되었다. 화강암의 특성인 취성으로 인해 이러한 실험결과가 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 5는 실험체의 중량 손실량을 그래프로 표현한 것이다. SC180-10 패널은 평균적으로 0.61%의 질량 손실률을 보였으며, 전면보다 배면에서 많은 손실률을 보였다. 그리고 20 mm 패널은 0.38%의 질량손실률을 보였으며, 배면에서 넓고 깊은 탈락이 발생하였다. 30 mm 패널은 평균 0.16%의 중량손실률을 보였으며, 전면에서만 탈락이 발생하였다. 두께에 따른 충돌 후 시험체 총 질량 대비 질량손실률은 패널의 두께가 증가함에 따라 감소하였다.

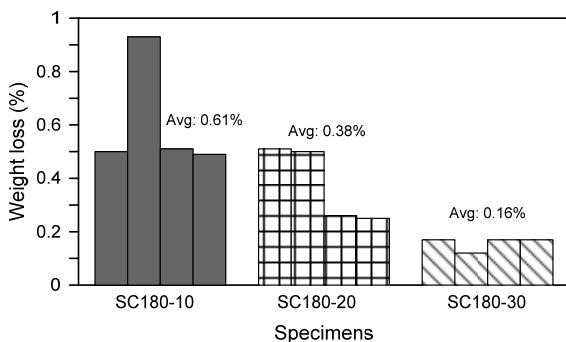


Fig. 5 Weigh loss for UHPC specimens

10 mm 두께의 패널은 모두 관통파괴가 발생하여 질량손실률이 컸으며 패널두께 20 mm에서는 전면 관입보다는 배면 파괴로 인해 질량손실이 비교적 크게 발생하였다. 패널두께 30 mm의 경우 배면에 균열만 발생하여 충돌로 인한 질량손실이 적었다.

Fig. 6은 전면과 배면의 탈락면적을 그래프로 나타낸 것이다. SC180-10과 SC180-20는 전면보다 배면에서 더 큰 탈락면적을 보였다. SC180-30은 전면에서만 탈락하여, 배면탈락 면적을 나타내지 않았다. SC180-10 실험체의 배면에서 넓고 기울기가 낮은 각도의 파괴형태가 나타난 것은 전단파괴와 유사하였다. 전단파괴의 형태를 띠는 현상은 다른 연구자의 실험에서도 많이 나타났는데, 이러한 이유는 shear plug 현상<sup>14,15,16</sup>에 의한 것으로 판단된다. Shear plug 현상은 충돌에너지가 관통하기에 충분히 클 때 콘 형태의 사선 방향 파괴형태를 보이는 것을 말한다 (Fig. 7). 비상체의 끝부분과 배면탈락의 바깥쪽 사이의 콘의 기울기는 shear plug를 설명하는데 중요한 변수이며, 특히 콘크리트 강도에 따라서 콘의 기울기는 다르다는 연구가 있다. SC180-20의 전면 탈락면적은 평균 223 mm<sup>2</sup> 이었으며, 배면의 평균 탈락면적은 약 6615 mm<sup>2</sup>로 나타났는데, 전면탈락면적의 약 30배 정도로 크게 차이가 났다. 이는 비상체가 관통하지 않은 상황에서 배면에서는 인장에 의한 배면파괴가 발생하였다고 추측할 수 있다. SC180-30은 관입깊이가 SC180-20과 비슷하지만 배면에서 파괴가 발생하지 않았다. 즉, SC180-30은 동일한 외부 충격에너지 하에서 발생하는 배면의 인장력에 견딜 수 있는 충분한 두께라고 판단할 수 있다.

UHPC와 화강석 시험체를 비교해 보면 20 mm 두께의 SC180-20는 30 mm 두께의 화강석 시험체에 비해 취성적

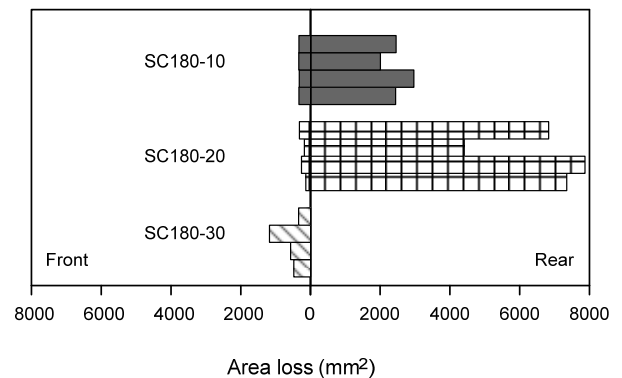


Fig. 6 Area loss for UHPC specimens

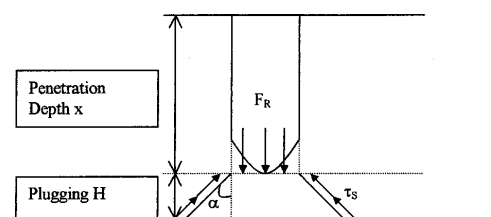


Fig. 7 Shear plug model<sup>14)</sup>

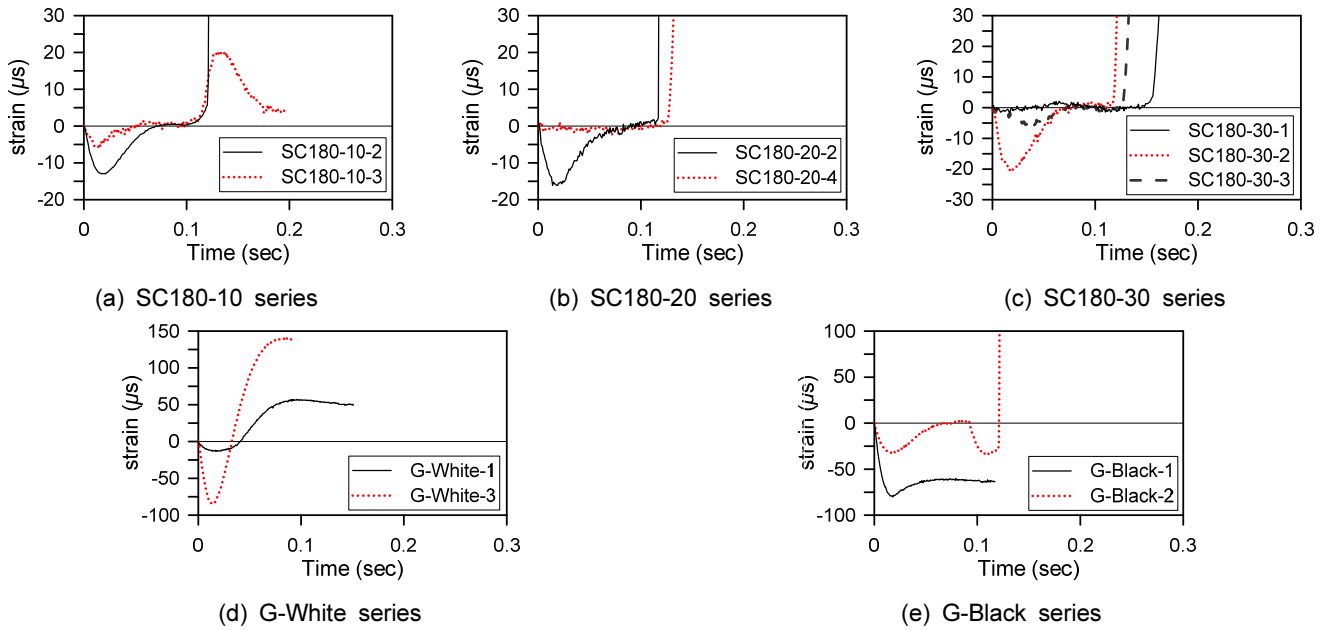


Fig. 8 Strain histories at rear face under impact

파괴와 관통이 발생하지 않았으며, 또한 UHPC 패널의 손상범위가 상당히 적은 것으로 보아 내충격성능이 보다 우수한 것으로 판단된다. 따라서 견고한 외장재로 알려진 화강석 패널에 비해 UHPC의 활용 패널의 내충격성능이 뛰어난 것으로 판단된다.

### 3.3 배면의 변형률과 충격하중의 관계

Fig. 8은 각 시험체의 배면 변형률을 그래프로 나타내었다. 배면탈락 이론(scabbing theory)<sup>17)</sup>에 따르면 비상체가 충돌하게 되면 전면에서는 비상체가 시험체의 한 점(P)을 누르는 힘에 의해 압축파가 발생하고 압축파는 콘크리트 내부에 전달하게 되어 배면에 도달한다. 배면에 도달된 압축파를 저항하고자 배면에서는 자유단(P')을 중심으로 반사 인장파가 발생한다(Fig. 9). 이 때 자유단을 중심으로 생성된 인장응력이 재료의 파괴강도를 초과하면서 배면의 콘크리트가 탈락하게 된다. Fig. 8에서 나타나듯이 실험체의 배면은 최초에 압축파를 받게 되어 압축방향으로 변형이 발생하였다. 그 후 반사 인장파에 의해 압축파가 상쇄됨과 동시에 인장력이 더 커지게 될 것이라 예상되며, Fig. 8에서도 예상과 비슷한 그래프가 보여진다. 몇몇 시험체에서는 압축변형률이 측정되지 않은 시험체도 있다. Beppu<sup>18)</sup>의 연구에서는 동일 시험체의 중앙 부근에 x, y방향으로 부착한 콘크리트게이지일지라도 압축구간이 측정된 콘크리트게이지와 측정되지 않은 콘크리트게이지가 있었다. 이것은 게이지의 부착정도, 게이지와 충돌지점의 이격거리 등의 사유에 의한 것으로 사료된다. 하지만 Fig. 8에서 보면 대부분 시험체는 변형률 압축구간이 측정되었음을 파악할 수 있다.

Fig. 8을 좀 더 상세히 살펴보면 인장파피가 발생한 시

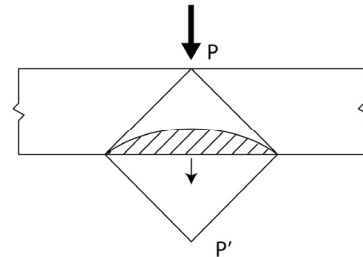


Fig. 9 Scabbing theory<sup>16)</sup>

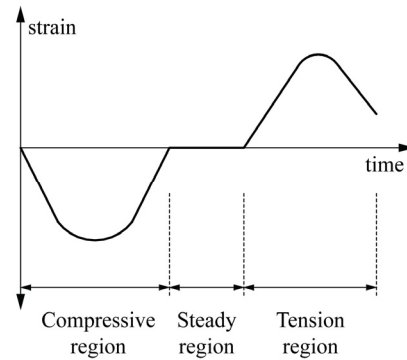


Fig. 10 Rear face strain history

험체의 배면 변형률을 배면탈락 이론과 연결하여 Fig. 10와 같이 세 구간으로 나눌 수 있다. 1구간은 충격 압축파에 의해 배면에 압축력이 작용하였다가 반사 인장파에 의해 상쇄되어가는 압축구간(compression region)이다. 그 후 2 구간은 보합단계(steady region)로서 자유단의 인장력에 의해 배면에 인장력이 주로 작용하면서 변형률을 0로 유지하는 구간이다. 그리고 3구간은 초과인장력을 받는 단계로서 콘크리트의 인장력을 초과하는 인장력을 받을 경우 배면탈락이 발생하는 인장구간(tension region)이

**Table 4** Compressive strain and each region time

	$\epsilon_{\max,C}$	$sec_C$	$sec_S$
SC180-10	13.0 $\mu s$	0.071	0.049
SC180-20	16.1 $\mu s$	0.083	0.034
SC180-30	20.5 $\mu s$	0.070	0.048
G-White	84.2 $\mu s$	0.033	-
G-Black	80.3 $\mu s$	-	-

C = compressive region, S = steady region

다. 변형률 기록은 김홍섭 외 5인<sup>19)</sup>의 연구와 Beppu<sup>17)</sup>의 연구에서도 유사하게 측정되었다. 인장응력이 재료의 파괴강도를 초과하는 배면에 파괴가 나타나는데, 앞서 언급하였듯 전단파괴의 영향을 고려할 때 재료강도실험을 통한 1축 인장강도보다 작은 인장강도에서도 배면파괴가 발생할 수 있다고 사료된다.

UHPC의 배면에 발생하는 최대 압축변형률은 13~20  $\mu s$ 로 유사하게 측정되었다. 화강암의 최대 압축변형률은 80~84  $\mu s$ 로 측정되었다. 즉 동일 재료일 경우 최대 압축변형률이 유사하였으며, 재료특성에 따른 압축변형률 값이 다를 수 있다. Fig. 8(a)의 SC180-10-2 시험체에서 최대 압축변형률은 13.0  $\mu s$ 였으며, 압축구간의 총 시간은 0.071초였고 보합구간의 시간은 0.049초였다. Fig. 8(b)의 최대 압축변형률은 16.1  $\mu s$ 였으며, 압축구간의 총 시간은 0.083초, 보합구간의 시간은 총 0.034초로 나타났다. Fig. 8(c)에서 SC180-30-2의 최대 압축변형률은 20.5  $\mu s$ 였으며 압축구간 총 시간은 0.069초였다. 보합구간의 시간은 총 0.048초로 측정되었다. 두께가 두꺼워지면 최대 압축변형률의 누적 변형이 커진다는 사실을 알 수 있다. 즉 반사파가 발생하는 P'지점이 P로부터 가깝기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 또한 보합구간은 실험체가 두꺼워질수록 길어졌다. 반대로 실험체가 얇거나 취성적인 성질의 재료일 경우 보합구간은 거의 없었다. 화강암 G-White, G-Black 실험체는 보합구간이 없다는 점이 이를 뒷받침한다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 고속 비상체에 의한 충격하중을 받는 UHPC의 내충격성을 평가하였다. 기준 실험체로는 화강암이었으며, 패널의 두께를 변수로 하였다. 또한 고속 비상체의 충격에너지는 일반적인 상황의 총알 운동에너지와 유사하게 설정하였다. 이상과 같은 실험 및 분석연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 본 연구에서 사용한 UHPC는 기준 실험체보다 월등한 내충격성을 보였다. 화강암은 고속 비상체에 의해 여러 파편으로 나뉘면서 취성적인 파괴형태를 보였다. 반면 UHPC는 20 mm 이상에서는 관통이 발생하지 않았으며, 30 mm에서는 전면파괴만 발생하였

다. 또한 심미적으로도 UHPC의 결면은 매끈하였으며 반들반들하여 우수하였다.

- 2) 비상체가 충돌한 후 콘크리트 패널의 배면의 파괴형태는 전단파괴의 형태를 가졌다. 이는 shear plug 현상에 의하여 충돌지점에서 사선 방향으로 전단파괴가 발생한 것이다.
- 3) 배면 중심의 변형률은 압축구간, 과도기 그리고 인장구간으로 나눌 수 있다. 압축구간은 비상체가 처음 충돌할 때 시험체의 내부에 압축응력파가 배면에 도달하면서 생기는 구간으로 판단된다. 그 후 자유단의 중심으로 반사파가 발생하게 되며, 반사파는 인장력이 되어서 비상체의 의한 압축파를 상쇄시킨다. 상쇄 후 압축파와 인장파가 비슷해지는 구간, 즉 보합구간이 발생한다. 그 후 비상체의 운동에너지가 소진하면서 자유단을 중심으로 발생하는 인장응력이 콘크리트 파괴강도를 초과하면서 배면 탈락이 발생한 것으로 사료된다. 즉, 배면의 탈락현상은 shear plug현상에 의한 전단력과 배면탈락 이론에 의한 인장응력이 동시에 영향을 끼쳐 발생한 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

#### References

1. Kang, S.-H., and Hong, S. G., "Performance of Fresh and Hardened Ultra High Performance Concrete without Heat Treatment", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 26, No.1, 2014, pp.23-34 (in Korean).
2. Koh, K.T., Park, J.J., Ryu, G.S., and Kang, S.T., "Effect of the Compressive Strength of Ultra-High Strength Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites on Curing Method", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.27, No.3, 2007, pp.427-432 (in Korean).
3. Koh, K.T., Ryu, G.S., Park, J.J., and Kim, S.W., "Material Characteristics of K-UHPC", *Proceedings of the Korean Concrete Institute*, Vol.24, No.2, 2012, pp.861-862 (in Korean).
4. Lee, J.H., Hong, S.G., Joh, C., Kawhk, I., and Lee, J.W., "Biaxial Tension-Compression-Strength of UHPC in Structural Panels", *Proceedings of the Korean Concrete Institute*, Vol. 27, No.2, 2015, pp.213-214 (in Korean).
5. Pyo, S., Sherif, El-Tawil, S., and Naaman, A.E., "Characteristics of Ultra High Performance Concrete (UHPC) under Tension at High Strain Rates", *Proceedings of the Korean Concrete Institute*, Vol.26, No.2, 2014, pp.521-522 (in Korean).
6. Kim, G.-Y., Nam, J.-S., and Miyauchi, H., "Evaluation on

- Impact Resistance Performance of Fiber Reinforced Mortar under High-Velocity Impact of Projectile”, *Journal of Korea Architecture Institute*, Vol.27, No.9, Sep. 2011, pp.101-108 (in Korean).
7. Jang, S.-J., Son, S.-K., Kim, Y.-H., Kim, G.-Y., and Yun, H.-D., “Face Damage Characteristic of Steel Fiber-Reinforced Concrete Panels under High-Velocity Globular Projectile Impact”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.27, No.4, 2015, pp.411-418 (in Korean).
  8. Koh, K.T., Ryu, G.S., Park, J.J., and Kim, S.W., “Material Characteristics of K-UHPC”, *Proceedings of Korean Concrete Institute*, Vol.24, No.2, pp.861-862 (in Korean).
  9. <http://www.shooterscalculator.com/>
  10. Korea Agency for Technology and Standards, *Concrete Compressive Strength Test Method, KS F 2405:2010, Bulltin No. 2010-0654*, Korea Standards Association, 2010 (in Korean).
  11. Korea Agency for Technology and Standards, *Soundproof panel - Metallic, KS F 4770-1:2015*, Korea Standards Association, 2015 (in Korean).
  12. ASTM International, *Standard Test Method for Performance of Wood and Wood-Based Floor and Roof Sheathing Under Concentrated Static and Impact Loads (ASTM E661-03)*, American Society for Testing and Materials, 2015.
  13. Kim, G.-Y., Nam, J.-S., and Miyauchi, H., “Evaluation on Impact Resistance Performance of Fiber Reinforced Mortar under High-Velocity Impact of Projectile”, *Journal of Korea Architecture Institute*, Vol.27, No.9, Sep. 2011, pp.101-108 (in Korean).
  14. Li, Q.M., Reid, S.R., and Ahmad-Zaidi, A.M., “Critical Impact Energies for Scabbing and Perforation of Concrete Target”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.236, No.11, 2006, pp.1140-1148.
  15. Li, Q. M., and Tong, D. J., “Perforation Thickness and Ballistic Limit of Concrete Target Subjected to Rigid projectile Impact”, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol.29, No.9, 2003, pp.1083-1091.
  16. Yankelevsky, D.Z. “Local Response of Concrete Slabs to Low Velocity Missile Impact”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.19, No.4, 1997, pp.331-343.
  17. Yang, I.Y., Yang, D.R., and Lee, C.M., *Impact Engineering*, Won Chang Publishing Co. Ltd., 2010, p.371 (in Korean).
  18. Beppu, M., Miwa, M., Katayama, M., and Ohno, T., “Damage Evaluation of Concrete Plates by High-Velocity Impact”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.35, 2008, pp.1419-1426.
  19. Kim, H.-S., Kim, G. Y., Koo, K.-M., Cheo, G.-C., Yoo, J.-C., and Kim, M.-H., “Evaluation of Local Failure of Concrete by High-Velocity Impact”, *Proceeding os Architectural Institute of Korea*, Vol.33, No.2, 2013, pp.617-618.

**요 약** 본 실험적 연구는 고속 비상체 충돌 시 UHPC 외장재의 내충격성을 파악하는데 그 목적이 있다. 이 연구에서는 두께를 주요 변수로 UHPC와 화강암 패널 실험체에 고속충격을 가하여 실험체의 성능을 비교하였으며, 배면의 변형률을 기록하였다. UHPC는 외관이 우수하였으며, 내충격성도 화강암에 비해 우수하여 외장재로 사용하기에 적합하다고 판단된다. 비상체가 시험체에 충돌한 후 압축파가 배면에 도달하고 그 후 자유단 지점을 중심으로 인장파가 발생하여서 배면파괴를 일으킨 것으로 사료된다. 이러한 배면파괴 발생 메커니즘은 변형률 기록이 압축파구간, 보합구간, 인장구간으로 나누어지는 것을 통해 알 수 있다. 관통파괴 형태를 살펴보면 고속 충돌 시 전단력이 배면에 작용하여 파괴가 발생하는 shear plug 현상이 나타난 것으로 판단된다. 즉 충격하중에 대하여 배면의 파괴는 전단력과 인장응력에 의해 동시에 영향을 끼쳐 발생한 것으로 사료된다.

**핵심용어** : 외장재, UHPC, 고속충격하중, 배면 변형률 이력, shear plug