

## 압축강도 수준에 따른 HPFRCC의 동적충격 인장강도 평가

박기준<sup>1</sup>, 김원우<sup>1</sup>, 박정준<sup>2</sup>, 문재흠<sup>2</sup>, 김성욱<sup>3\*</sup>

### Evaluation of Dynamic Tensile Strength of HPFRCC According to Compressive Strength Level

Gi-Joon Park<sup>1</sup>, Won-Woo Kim<sup>1</sup>, Jung-Jun Park<sup>2</sup>, Jae-Heum Moon<sup>2</sup>, Sung-Wook Kim<sup>3\*</sup>

**Abstract:** This study evaluates the dynamic tensile behavior of HPFRCC according to compressive strength levels of 100, 140 and 180 MPa. Firstly, the compressive stress-strain relationship of 100, 140 and 180 MPa class HPFRCC was analyzed. As a result, the compressive strengths were 112, 150 and 202 MPa, respectively, and the elastic modulus increased with increasing compressive strength. The static tensile strengths of HPFRCC of 100, 140 and 180 MPa were 10.7, 11.5 and 16.5 MPa, and tensile strength also increased with increasing compressive strength. On the other hand, static tensile strength and energy absorption capacity at 100 and 140 MPa class HPFRCC showed no significant difference according to the compressive strength level. It was influenced by the specification of specimen and the arrangement of steel fiber. As a result of evaluating the dynamic impact tensile strength of HPFRCC, tensile strength and dynamic impact factor of all HPFRCCs tended to increase with increasing strain rate from 10-1/s to 150/s. In the same strain rate range, the DIF of the tensile strength was measured higher as the compressive strength of HPFRCC was lower. It is considered that HPFRCC of 100 MPa is the best in terms of efficiency. Therefore, it is advantageous to use HPFRCC with high compressive strength when a high level of tensile performance is required, and it is preferable to use HPFRCC close to the target compressive strength for more efficient approach at a high strain rate such as explosion.

**Keywords:** Dynamic tensile strength, Dynamic impact factor, Steel fiber, HPFRCC, Compressive strength

## 1. 서 론

콘크리트는 경제성이 우수하여 오랫동안 현대사회의 인프라를 구축한 주요 건설재료로 이용되어 지고 있다(Aitcin 2000). 그러나 일반강도 콘크리트는 중량대비 낮은 강도 발현과 취성적인 파괴거동 등 여러 문제점을 포함하고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 연구로는 압축강도가 현저히 높으면서도 연성거동을 갖는 고성능 섬유보강 시멘트 복합체(High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, 이하 HPFRCC)를 들 수 있다. HPFRCC는 일반적인 콘크리트에 비해 중성화 및 알칼리 골재 반응 등에 상당히 강하며 물-결합재비(W/B)가 상당히 낮고, 굵은 골재를 사용하지 않으며 고분말의 혼화재료를 강섬유를 사용하기 때문에 내구성과 연

성이 우수하고 강도발현이 뛰어나다(Larrard, F.D., 1989) (Richard & Cheyrezy, 1995).

또한 HPFRCC는 일반적인 정적하중에 대응하는 구조부재에 있어서, 동일 하중에 대응할 수 있는 부재의 단면을 감소시킬 수 있기 때문에 그 중요성이 증대되고 있다(Kamen, 2009; Kim et al., 2006; KICT, 2006). HPFRCC를 방호기능을 갖는 민간 시설물에 적용한다면 공간 활용도를 높여 경제적 이익과 동시에 충격과 폭발로부터 안전성을 확보할 수 있는 장점이 있다. 후크형 및 직선형 강섬유를 HPFRCC에 혼입할 경우 폭발과 같은 고속 변형률 속도에서의 최종균열강도와 에너지 흡수능력 증가에 효과적으로 알려져 있다(Tran et al, 2015) (Park et al, 2016). 하지만 아직까지 고속 변형률 속도에서의 HPFRCC의 역학적 거동에 대한 분석 자료는 많이 부족한 실정이며 지속적인 연구가 필요하다.

따라서 이 연구에서는 다양한 강도와 상대적으로 경제성을 가지는 HPFRCC의 배합설계를 목적으로 100 MPa, 140 MPa 및 180 MPa급 압축강도 수준을 갖는 HPFRCC에 19.5 mm의 직선형 강섬유를 사용하여 이때의 동적충격 인장강도를 평가하고자 하였다.

<sup>1</sup>정회원, 한국건설기술연구원 연구원

<sup>2</sup>정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원 선임연구위원, 교신저자

\*Corresponding author: swkim@kict.re.kr

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), Goyang-Si, 10223, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 2. 실험방법

### 2.1 사용재료 및 시험체 제작 방법

본 실험에는 1종 보통 포틀랜드 시멘트 및 입경 0.5 mm 이하의 잔골재, 98%의 SiO<sub>2</sub>를 포함한 충전재, 노르웨이산 실리카퓌, 분말도가 약 6000 cm<sup>2</sup>/g인 고로슬래그 미분말, 국내산 플라이 애시(Class F), 1.06 g/cm<sup>3</sup>의 밀도를 가진 폴리칼보산계 고성능 감수제 등을 사용하였다. 결합재로 사용된 재료들의 물리·화학적 성분은 Table 1과 같다.

**Table 1** Physical & Chemical properties of materials

| Composition % (mass)                  | Cement | Silica fume (SF) | Blast -furnace slag (BS) | Fly-ash (FA) |
|---------------------------------------|--------|------------------|--------------------------|--------------|
| CaO                                   | 61.33  | 0.38             | 42.1                     | -            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 6.40   | 0.25             | 14.50                    | 16.60        |
| SiO <sub>2</sub>                      | 21.01  | 96.00            | 33.80                    | 3.80         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 3.12   | 0.12             | 0.01                     | 5.58         |
| MgO                                   | 3.02   | 0.10             | 5.80                     | 0.82         |
| SO <sub>3</sub>                       | 2.30   | -                | 1.89                     | 0.51         |
| Specific surface (cm <sup>2</sup> /g) | 3,413  | 200,000          | 6,240                    | 3,850        |
| Loss ignition (%)                     | 1.40   | 1.50             | 0.05                     | 3.82         |
| Density (g/cm <sup>3</sup> )          | 3.15   | 2.10             | 2.91                     | 2.13         |

압축강도에 따른 HPFRCC의 동적충격 인장강도 특성을 파악하기 위해 압축강도 100 MPa 및 140 MPa, 180 MPa 수준을 발현할 수 있도록 물-결합재비를 변화시키고, 사용되는 충전재와 모래를 변경시켜 제조하였다. 먼저 180 MPa 배합에서는 물-결합재비(W/B)를 20%로 하고 사용된 재료중 모래는 호주산 규사(SiO<sub>2</sub> 98%)와 평균입경 4 μm인 충전재를 사용하였다. 140 MPa는 물-결합재비(W/B)를 25%로 증가시키고 국내산 규사(SiO<sub>2</sub> 90%), 평균입경 14 μm인 충전재를 사용하여 압축강도를 낮추었다. 마찬가지로 100 MPa에서도 물-결합재비(W/B)를 30%로 증가시키고 140 MPa에서 사용한 모래와 충전재를 동일하게 사용하였다. 140 MPa에서는 고로슬래그 미분말의 분말도가 100 MPa 배합에 사용된 플라이 애시의 분

**Table 3** Mix proportions of HPFRCC (ratio in weight)

| Designation | W/B  | Cement | SF   | BS  | FA  | Filler       | Sand | Superplasticizer | Steel fiber (Volume fraction, V <sub>f</sub> ) | Flow [mm] |
|-------------|------|--------|------|-----|-----|--------------|------|------------------|--|-----------|
| HPF 180     | 0.2  | 1      | 0.25 | 0   | 0   | 0.30 (4 μm)  | 1.10 | 0.02             | 2%   | 220       |
| HPF 140     | 0.25 | 1      | 0.1  | 0.2 | 0   | 0.30 (14 μm) | 1.10 | 0.0075           | 2%   | 240       |
| HPF 100     | 0.3  | 1      | 0.1  | 0   | 0.2 | 0.30 (14 μm) | 1.20 | 0.005            | 2%   | 245       |

말도보다 높기 때문에 상대적으로 더 큰 필터효과를 나타내며, 물결합재비 감소에 따른 영향과 더불어 강도 증진을 얻고자 배합하였다. 또한 HPFRCC의 인성을 향상시키기 위하여 사용되는 강섬유는 HPFRCC 전체 부피의 2%에 해당하는 직선형 강섬유(Straight steel fiber)를 압축강도 종류별로 동일하게 혼입하여 압축강도에 따른 HPFRCC 시험체의 동적충격 인장강도 특성을 파악하고자 하였다. 강섬유의 물리적 성질은 Table 2와 같으며, 시험체 제작에 사용된 배합표는 Table 3에 나타내었다.

**Table 2** Properties of steel fiber

| Type of fiber  | Density (kg/cm <sup>3</sup> ) | Tensile strength (MPa) | l <sub>f</sub> <sup>1)</sup> (mm) | l <sub>f</sub> /d <sub>f</sub> <sup>2)</sup> (mm/mm) |
|----------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------------|--|
| Straight fiber | 7.8                           | 2,500                  | 19.5                              | 97.5   |

Note, 1) l<sub>f</sub>: length of fiber, 2) d<sub>f</sub>: diameter of fiber

HPFRCC를 배합하기 위해 120리터 용량을 지니고 100 rpm의 속도를 발휘할 수 있는 팬타입의 실험실 믹서를 사용하였다. 배합된 HPFRCC는 자기충전(self-leveling)이 될 정도의 유동성을 나타내기 때문에 별도의 다짐작업 없이 시험체를 제작하였다. HPFRCC는 다양한 분체 재료를 다량으로 사용하기 때문에 타설 직후부터의 양생방법이 HPFRCC의 강도 및 내구성에 많은 영향을 미친다(Park & Han, 2015). 이에 제작된 시험체는 먼저 온도 20°C, 상대습도 65%가 되는 조건에서 1일간 습윤양생을 실시한 후 탈형을 실시하였고, 이후 온도 90±2°C에서 고온증기양생을 72시간 동안 실시한 뒤 시험평가를 실시하였다.

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1 유동성 및 압축강도 실험

굳지 않은 HPFRCC의 유동성을 평가하기 위하여 플로 테이블 실험(flow table test)을 KS L 5105에 따라 수행하였으며 제시된 시험기구를 이용하여 테이블 플로 값을 측정하였다. 압축강도(KS F 2405)는 φ 100 x 200 mm인 원주형 공시체를 변수별로 제작하고 최대용량 3,000 kN의 UTM (Universal Testing Machine)을 이용하여 Fig. 1과 같이 측정하였다. 또한 120° 간격으로 총 3개의 LVDTs를 설치하여 하중재하에 따른

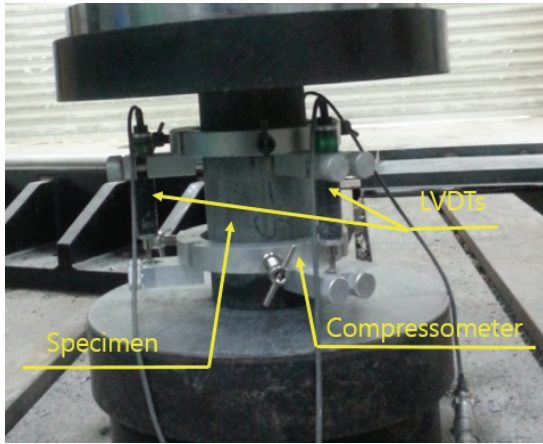


Fig. 1 Test method for compressive strength

변위를 측정하였고 이를 토대로 HPRCC의 탄성계수를 KS F 2438에서 제시한 식으로 계산하였다.

### 2.2.2 정적 인장강도 실험

정적 인장강도 측정을 위해 Fig. 2와 같이 Dog-Bone 형태의 시험체를 제작하였으며 3,000 kN 용량의 UTM을 이용하여 1 mm/min의 재하속도에서 인장강도를 측정하였다. 정적 인장 시험 장치의 구성을 Fig. 3에 나타내었으며, 시험체에 가해지는 인장하중은 UTM 상단의 로드셀을 이용하여 측정하였다. 인장변위 측정구간(Gage length)은 50 mm로 하였으며, 양쪽에 LVDT를 설치하여 변형률을 측정하였다. 인장변위 측정구간 이외의 범위에는 균열과 파단을 방지하기 위해 와이어메시(Wire-mesh)가 보강되었다.

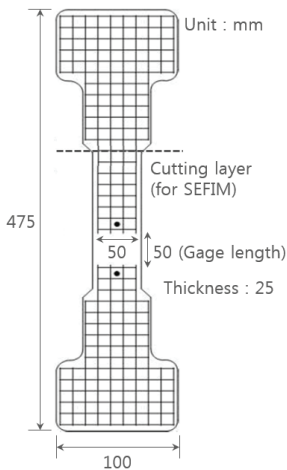


Fig. 2 Specimen for tensile test

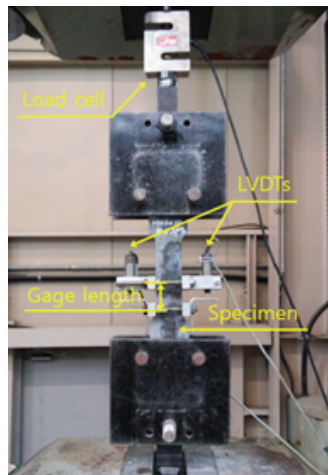


Fig. 3 Test method for static tensile strength

### 2.2.3 동적충격 인장강도 실험

동적충격 인장강도 실험은 Improved Strain Energy Frame

Impact Machine(I-SEFIM)을 이용하였으며, 이때의 시험체는 Fig. 2에 나타난 인장시험체의 절단면을 기준으로 아랫부분을 사용하였다. I-SEFIM은 Fig. 4와 같이 펌프의 압력에 의해 발생하는 탄성 변형 에너지가 커플러에 축적되었다가 순간적인 파단이 발생하며 에너지 프레임에 의해 순간적으로 하중을 전달하게 되는 동적충격 인장물성 평가시스템이다(Park et al., 2016). 시험체에 전달되는 응력은 트랜스미터 바의 양쪽에 부착된 스트레인 게이지를 통해 측정되며, 변형률 및 변형률 속도(Strain rate)는 초고속 카메라의 영상촬영과 이미지 분석에 의해 측정된다. 변형률 속도는 펌프의 압력과 커플러의 두께 및 형상, 에너지 프레임의 재질에 따라 최대 150/s까지 조절이 가능하다. 동적인장실험에 의해 측정된 HPRCC 시험체의 변형률 속도 값은 식 (1)에 의해 계산되며, 초고속 카메라에 의해 촬영된 영상(Fig. 5)에서 인장변위 측정구간의 양 끝점을 Point 1과 Point 2로 설정하고 목표지점에서 발생하는 속도의 차를 인장변위 측정구간으로 나눈 값이다(Kim et al., 2014). 이때의 인장변위 측정구간은 정적 인장강도 실험과 마찬가지로 50 mm이다.

$$\text{Strain rate} (/s) = \frac{V_2 - V_1}{\text{Gage length}} \quad (1)$$

실험에 의해 구해지는 동적 데이터(변형률, 변형률 속도, 최대 인장강도, 에너지 흡수능력 등)는 재료의 특성에 따라 다르며 변형률 속도 효과를 보다 효과적으로 나타내기 위해 동적증가계수(Dynamic Increase Factor)로써 비교된다(Kim et al., 2009). 동적증가계수는 식 (2)에 나타난 것과 같이 정적 물성에 대한 동적 물성의 증가분으로 표현되며 인장강도에 대한 동적증가계수는 동적인장강도를 정적인장강도로 나눈 값이다.

$$\text{Dynamic Increase Factor (DIF)} = \frac{\text{Dynamic properties}}{\text{Static properties}} \quad (2)$$

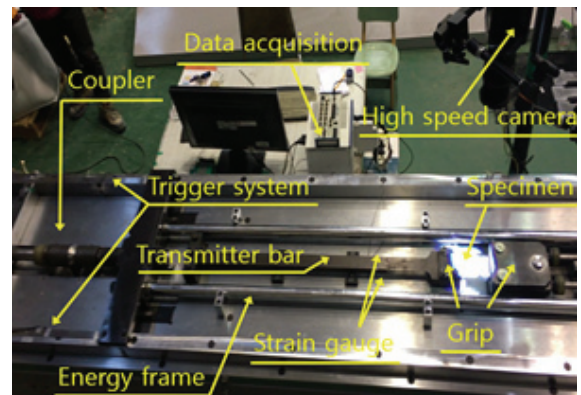


Fig. 4 Test method for dynamic tensile strength

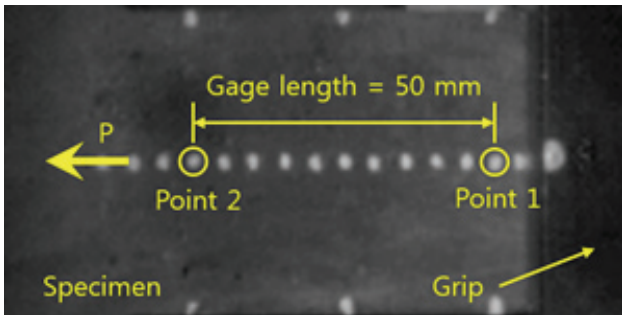


Fig. 5 Target points for image analysis

### 3. 실험결과

#### 3.1 유동성 및 압축강도 특성

각 배합별 유동성 시험결과는 Table 3에 나타내었다. HPFRCC의 압축강도 수준이 높을수록 배합에서의 물-결합재비가 낮기 때문에 HPF 180에서 약 220 mm의 가장 낮은 테이블 플로가 측정되었다. 압축강도 및 탄성계수 측정을 통한 평균값을 활용하여 압축응력-변형률 관계 거동을 Fig. 6에 나타내었다. HPF 100의 압축강도 및 탄성계수는 112 MPa, 35.9 GPa, HPF 140은 150 MPa, 43.6 GPa, HPF 180은 202 MPa, 47.1 GPa를 각각 나타내었고 HPFRCC의 압축강도가 높아짐에 따라 탄성계수도 높아지는 경향을 나타내었다.

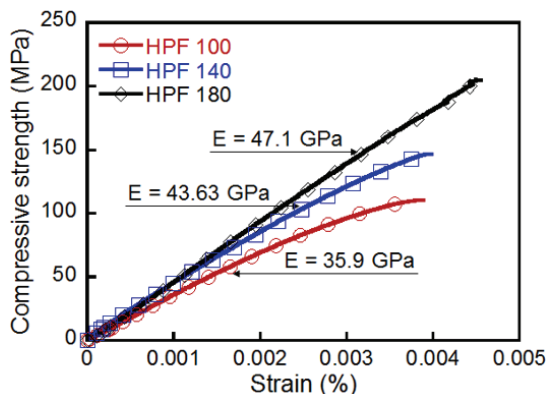


Fig. 6 Compressive stress-strain relationship of HPFRCC

#### 3.2 정적 인장강도

정적인장실험 결과의 평균값을 활용하여 Fig. 7에 인장응력-변형률의 관계를 나타내었다. 정적 상태(변형률 속도 : 0.000333/s)에서의 인장강도는 HPF 100, 140, 180가 각각 평균 10.7, 11.5, 16.5 MPa로 나타났으며, 압축강도 수준이 높을수록 인장강도도 높게 측정되었다. 응력-변형률 곡선의 면적으로 계산되는 에너지 흡수능력(Toughness)은 HPF 180이 가장 우수하였으며, HPF 140과 HPF 100은 서로 큰 차이를 보이

지 않았다. 압축강도의 경우 상대적으로 비례적인 모습을 보이는 반면 인장강도는 큰 차이를 보이지 않았는데 이는 시험체의 규격과 인장강도를 지배하는 강섬유의 배열에 영향을 받은 것으로 판단된다.

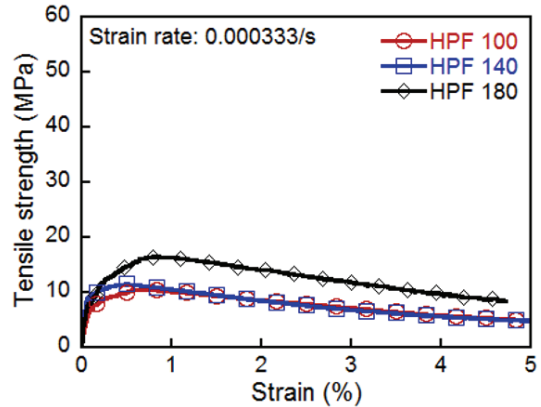


Fig. 7 Static tensile stress-strain relationship of HPFRCC

#### 3.3 동적충격 인장강도

압축강도 수준에 따른 HPFRCC 동적충격 인장강도 실험 결과를 Table 4에 나타내었다. HPF 100의 인장강도는 최소 16.9 MPa에서 최대 38.5 MPa까지 측정되었으며, HPF 140은 23.2~40 MPa, HPF 180은 21.9~47.1 MPa까지 측정되었다. 변형률 속도 100/s 이상에 대한 HPF 100, 140, 180의 평균값을 활용하여 인장응력-변형률 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 이때의 평균 인장강도는 33.9, 35.7, 42.5 MPa로 정적 상태에서의 인장강도보다 2.6~3.2배 증가하였다. 한편 변형률 속도 100~150/s에서 HPF 180의 평균 변형률(1.3%) 및 에너지 흡수능력(316.3 kJ/m<sup>3</sup>)은 HPF 140의 변형률(2.9%) 및 에너지 흡수능력(509.6 kJ/m<sup>3</sup>)보다 오히려 감소하였는데 시험체 파단면에서 섬유가 끊어지는 현상에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

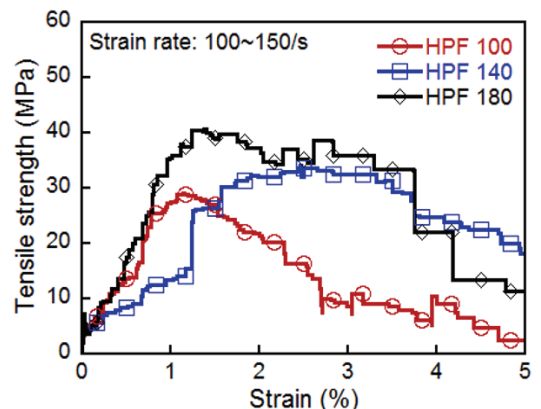


Fig. 8 Dynamic tensile stress-strain relationship of HPFRCC at strain rate 100~150/s

동적충격 인장실험에 수행된 모든 시험체들의 인장강도와 변형률 속도의 관계를 Fig. 9에 나타내었으며, 변형률 속도가 증가하면서 압축강도 수준에 관계없이 모두 인장강도가 증가하는 것을 확인하였다. I-SEFIM은 순간적인 파단에 의해 발생하는 동적인장물성을 측정하기 때문에 동일한 변형률 속도에서의 객관적인 비교는 어렵다. 그러나 변형률 속도를 짧은 구간( $10^{-1}$ ~50, 50~100, 100~150/s)으로 구분지어 비교할 경우 압축강도 수준이 높을수록 평균 인장강도가 높게 측정된 것을 알 수 있다.

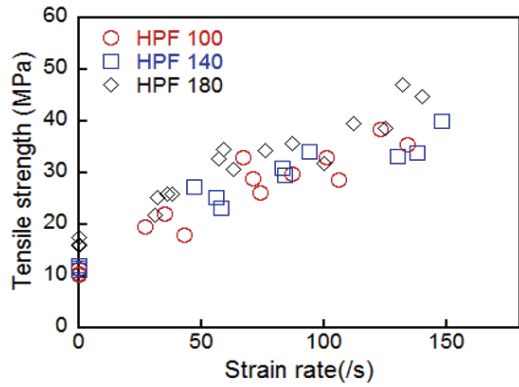


Fig. 9 Relationship between tensile strength and strain rate

변형률 속도 구간을  $10^{-1}$ ~50, 50~100, 100~150/s로 구분하여 평균 인장강도에 대한 동적증가계수를 Fig. 10에 나타내었다. 인장강도와 마찬가지로 변형률 속도가 증가함에 따라 DIF도 증가하는 경향을 보였다. 변형률 속도 100~150/s에서 HPF 100, 140, 180의 인장강도에 대한 평균 DIF가 각각 최대 3.2, 3.1, 2.6을 나타내었다. 압축강도 수준에 따른 HPFRCC의 동적증가계수를 비교한 결과 정적 상태에서의 압축강도가 높을수록 인장강도에 대한 DIF가 오히려 낮게 측정되는 것을 확인하였다. 이는 DIF가 정적 물성에 대한 동적 물성의 증가분으로써 표현되며, HPFRCC의 압축강도가 낮을수록 변형률 속도에 민감한 영향을 받은 것으로 판단된다.

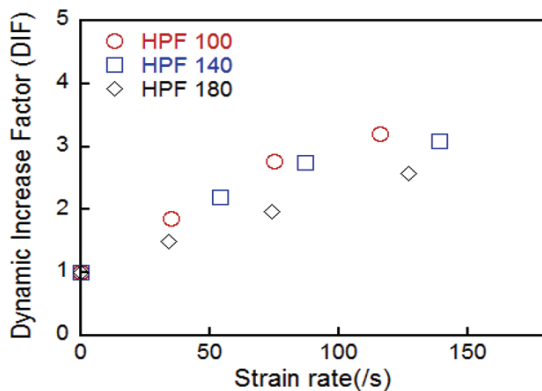


Fig. 10 Dynamic Increase Factor on the tensile strength of HPFRCC

Table 4 Test results on the tensile strength test of HPFRCC

| Test series | Specimen | Strain rate (s <sup>-1</sup> ) | Post cracking strength |      | Strain capacity |        | Peak toughness    |       |
|-------------|----------|--------------------------------|------------------------|------|-----------------|--------|-------------------|-------|
|             |          |                                | MPa                    | DIF  | %               | DIF    | kJ/m <sup>3</sup> | DIF   |
| HPF 100     | SP1      | 0.000333                       | 11.31                  | -    | 0.64            | -      | 61.52             | -     |
|             | SP2      | 0.000333                       | 10.54                  | -    | 0.95            | -      | 81.63             | -     |
|             | SP3      | 0.000333                       | 10.19                  | -    | 0.75            | -      | 64.48             | -     |
|             | Average  |                                | 10.68                  | 1.00 | 0.78            | 1.00   | 69.21             | 1.00  |
|             | SP4      | 35                             | 22.01                  | 2.10 | 0.78            | 1.00   | 45.66             | 0.70  |
|             | SP5      | 27                             | 16.93                  | 1.80 | 0.96            | 1.20   | 83.16             | 1.20  |
|             | SP6      | 43                             | 18.04                  | 1.70 | 1.16            | 1.50   | 100.02            | 1.40  |
|             | SP7      | 71                             | 28.92                  | 2.70 | 0.68            | 0.90   | 69.23             | 1.00  |
|             | SP8      | 67                             | 32.86                  | 3.10 | 1.05            | 1.40   | 179.84            | 2.60  |
|             | SP9      | 87                             | 29.84                  | 2.80 | 1.38            | 1.80   | 241.11            | 3.50  |
|             | SP10     | 74                             | 26.07                  | 2.40 | 1.15            | 1.50   | 185.63            | 2.70  |
|             | SP11     | 134                            | 25.52                  | 3.30 | 1.12            | 1.40   | 152.03            | 2.20  |
|             | SP12     | 106                            | 28.56                  | 2.70 | 1.33            | 1.70   | 271.64            | 3.90  |
|             | SP13     | 101                            | 32.92                  | 3.10 | 2.08            | 2.70   | 350.18            | 5.10  |
| SP14        | 123      | 38.52                          | 3.60                   | 1.83 | 2.40            | 382.70 | 5.50              |       |
| HPF 140     | SP1      | 0.000333                       | 11.15                  | -    | 0.49            | -      | 47.89             | -     |
|             | SP2      | 0.000333                       | 11.97                  | -    | 0.50            | -      | 51.05             | -     |
|             | SP3      | 0.000333                       | 11.49                  | -    | 0.53            | -      | 52.76             | -     |
|             | Average  |                                | 11.54                  | 1.00 | 0.50            | 1.00   | 50.57             | 1.00  |
|             | SP4      | 47                             | 27.21                  | 2.36 | 1.33            | 2.64   | 211.84            | 4.19  |
|             | SP5      | 56                             | 25.31                  | 2.19 | 1.25            | 2.49   | 201.74            | 3.99  |
|             | SP6      | 58                             | 23.17                  | 2.01 | 1.28            | 2.54   | 202.57            | 4.01  |
|             | SP7      | 94                             | 34.12                  | 2.96 | 1.96            | 3.88   | 335.73            | 6.64  |
|             | SP8      | 84                             | 29.56                  | 2.56 | 1.69            | 3.36   | 311.41            | 6.16  |
|             | SP9      | 83                             | 31.02                  | 2.69 | 2.56            | 5.07   | 463.99            | 9.18  |
|             | SP10     | 138                            | 33.92                  | 2.50 | 3.75            | 7.43   | 500.54            | 9.90  |
|             | SP11     | 148                            | 40.02                  | 3.47 | 2.46            | 4.87   | 519.57            | 10.28 |
| SP12        | 130      | 33.16                          | 2.87                   | 2.45 | 4.85            | 508.72 | 10.06             |       |
| HPF 180     | SP1      | 0.000333                       | 17.55                  | -    | 0.78            | -      | 104.63            | -     |
|             | SP2      | 0.000333                       | 16.14                  | -    | 0.97            | -      | 129.42            | -     |
|             | SP3      | 0.000333                       | 15.89                  | -    | 0.85            | -      | 105.18            | -     |
|             | Average  |                                | 16.53                  | 1.00 | 0.87            | 1.00   | 113.08            | 1.00  |
|             | SP4      | 32                             | 25.24                  | 1.53 | 0.91            | 1.05   | 140.59            | 1.24  |
|             | SP5      | 31                             | 21.92                  | 1.33 | 1.32            | 1.52   | 229.99            | 2.03  |
|             | SP6      | 38                             | 26.01                  | 1.57 | 1.07            | 1.24   | 181.98            | 1.61  |
|             | SP7      | 36                             | 25.93                  | 1.57 | 0.90            | 1.04   | 165.25            | 1.46  |
|             | SP8      | 57                             | 32.69                  | 1.98 | 1.01            | 1.17   | 183.27            | 1.62  |
|             | SP9      | 63                             | 30.72                  | 1.86 | 0.82            | 0.95   | 134.66            | 1.19  |
|             | SP10     | 59                             | 34.50                  | 2.09 | 1.72            | 1.99   | 339.79            | 3.00  |
|             | SP11     | 87                             | 35.63                  | 2.16 | 1.14            | 1.32   | 170.98            | 1.51  |
|             | SP12     | 99                             | 31.85                  | 1.93 | 1.14            | 1.32   | 191.00            | 1.69  |
|             | SP13     | 76                             | 34.42                  | 2.08 | 1.46            | 1.69   | 313.21            | 2.77  |
|             | SP14     | 112                            | 39.62                  | 2.40 | 1.41            | 1.63   | 283.10            | 2.50  |
|             | SP15     | 140                            | 44.72                  | 2.71 | 1.78            | 2.05   | 455.56            | 4.03  |
|             | SP16     | 125                            | 38.62                  | 2.34 | 1.09            | 1.26   | 254.42            | 2.25  |
| SP17        | 132      | 47.08                          | 2.85                   | 1.00 | 1.15            | 272.10 | 2.41              |       |

HPFRCC의 압축강도와 동적충격 인장강도의 상관관계에 대해 분석한 결과 압축강도가 증가함에 따라 최대 동적충격 인장강도가 증가함을 확인하였으며, HPFRCC의 압축강도가 낮을수록 DIF가 높게 측정을 확인하였다. 구조물 제작에 있어 보다 높은 수준의 성능이 요구될 경우 높은 압축강도를 적용한 HPFRCC를 사용한 것이 적합한 것으로 판단되며, 반면 폭발과 같은 고속변형률 속도에서 보다 효율적인 접근을 위해서는 사용자의 판단 하에 목표로 하는 압축강도에 근접한 HPFRCC를 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

이 논문은 압축강도 수준에 따른 HPFRCC의 동적충격 인장강도를 분석한 것으로 결론은 다음과 같다.

- 1) 100, 140, 180 MPa급 HPFRCC의 압축응력-변형률 관계를 분석한 결과 압축강도는 각각 112, 150, 202 MPa로 나타났으며, 압축강도가 높아짐에 따라 탄성계수도 높아지는 경향을 나타내었다.
- 2) 100, 140, 180 MPa급 HPFRCC의 정적 인장강도는 각각 10.7, 11.5, 16.5 MPa로 나타났으며, 압축강도가 높아질수록 인장강도도 증가하는 경향을 나타내었다. 이때 100 및 140 MPa급 HPFRCC에서의 인장강도 및 에너지 흡수 능력은 압축강도와 비교하여 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 시험체의 규격 및 강섬유의 배열에 영향을 받은 것으로 판단된다.
- 3) 변형률 속도가  $10^{-1}/s$ 에서  $150/s$ 로 증가할수록 모든 HPFRCC의 인장강도와 동적증가계수는 증가하는 경향을 보였다.
- 4) 반면 동일한 범위의 변형률 속도에서 HPFRCC의 압축강도가 낮을수록 인장강도에 대한 DIF가 높게 측정되어 효율적인 측면에서는 100 MPa급 HPFRCC가 가장 우수한 것으로 나타났다.
- 5) 따라서 높은 수준의 인장성능이 요구되는 경우 높은 압축강도를 가지는 HPFRCC를 사용하는 것이 유리하며, 폭발과 같은 고속변형률 속도에서 보다 효율적인 접근을 위해서는 목표 압축강도에 근접한 HPFRCC를 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업(과제번호: 17SCIP-B128706-01)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### References

- Aitcin, P. C. (2000), Cements of yesterday and today - Concrete of tomorrow, *Cement and Concrete Research*, 30, 1349-1359.
- Kamen, A., Denarić, E., Sadouki H., and Brühwiler, E. (2009), UHPFRCC ARC tensile creep at early age, *Materials and Structures*, 42(1), 113-122.
- Kim, D. J., El-Tawil, S., and Naaman, A. E. (2009), Rate-dependent tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites, *Materials and Structures*, 42(3), 399-414.
- Kim, J. J., Park, G. J., Kim, D. J., Moon, J. H., and Lee, J. H. (2014), High-rate tensile behavior of steel fiber-reinforced concrete for nuclear power plants, *Nuclear Engineering and Design*, 266, 43-54.
- Kim, S.W., Kang, S.T., and Han, S.M. (2006), Characteristics and application of ultra high performance cementitious composite, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 18(1), 16-21.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology. (2006), Development of technology to improve the durability of concrete bridges, Report No. KICT 2006-89.
- Park, J. K. (2016), Direct tensile behavior of high-performance hybrid-steel-fiber-reinforced cementitious composites at high strain rates, M.S. dissertation, Sejong University, Department of civil & environmental engineering.
- Park, C. J., Han, M. C. (2015), Mechanical Properties and Autogenous Shrinkage of Ultra High Performance Concrete Using Expansive Admixture and Shrinkage Reducing Agent depending on Curing Conditions, *Korea Academy Industrial Cooperation Society*, 16(11), 7910-7916.
- Park, S. H., Kim, D. J., and Kim, S. W. (2016), Investigating the impact resistance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete using an improved strain energy impact test machine, *Construction and Building Materials*, 125, 145-159.
- Richard, P., and Cheyrezy, M.H. (1995), Composition of reactive powder concrete, *Cement and Concrete research*, 25(7), 1501-1511.
- Tran N.T., Tran, T.K., Jeon, J.K., Park, J.K., Kim, D.J. (2016), Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates, *Cement and Concrete Research*, 79, 169-184.

Received : 11/24/2017

Revised : 02/03/2018

Accepted : 02/21/2018

---

**요 지** : 이 논문은 압축강도 수준(100, 140, 180 MPa급)에 따른 HPFRCC의 동적충격 인장강도를 평가하였다. 먼저 100, 140, 180 MPa급 HPFRCC의 압축응력-변형률 관계를 분석한 결과 압축강도는 각각 112, 150, 202 MPa로 나타났으며, 압축강도가 높아짐에 따라 탄성계수도 증가하는 경향을 나타내었다. 100, 140, 180 MPa급 HPFRCC의 정적 인장강도는 각각 10.7, 11.5, 16.5 MPa로 나타났으며, 압축강도가 높아질수록 인장강도도 증가하는 경향을 나타내었다. 반면 100 및 140 MPa급 HPFRCC에서의 인장강도 및 에너지 흡수능력은 압축강도 수준에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 시험체의 규격 및 강섬유의 배열에 영향을 받은 것으로 판단된다. HPFRCC의 동적충격 인장강도를 평가한 결과, 변형률 속도가 10-1/s에서 150/s로 증가할수록 모든 HPFRCC의 인장강도와 동적증가계수는 증가하는 경향을 보였다. 한편 동일한 범위의 변형률 속도에서 HPFRCC의 압축강도가 낮을수록 인장강도에 대한 DIF가 높게 측정되어 효율적인 측면에서는 100 MPa급 HPFRCC가 가장 우수한 것으로 나타났다. 따라서 높은 수준의 인장성능이 요구되는 경우 높은 압축강도를 가지는 HPFRCC를 사용하는 것이 유리하며, 폭발과 같은 고속변형률 속도에서 보다 효율적인 접근을 위해서는 목표 압축강도에 근접한 HPFRCC를 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 동적충격 인장강도, 동적증가계수, 강섬유, 고성능 섬유보강 시멘트 복합체, 압축강도

---