

# 섬유 종류 및 혼입량에 따른 고강도 섬유보강 복합재료의 충돌 저항 성능

## Impact Resistance Properties of High Strength Fiber-Reinforced Composites According to Types and Amounts of Fibers

최정일<sup>1</sup> · 박세연<sup>2</sup> · 김규용<sup>3</sup> · 이상규<sup>4</sup> · 이방연<sup>5</sup>\*Jeong-Il Choi<sup>1</sup> · Se-Eon Park<sup>2</sup> · Gyu-Yong Kim<sup>3</sup> · Sang-Kyu Lee<sup>4</sup> · Bang Yeon Lee<sup>5</sup>\*

(Received August 19, 2020 / Revised September 20, 2020 / Accepted September 21, 2020)

The purpose of this study is to investigate the effects of types and amounts of fibers on the compressive strength and tensile behavior high strength fiber-reinforced composites under a static load and impact resistance properties of composites under a high-velocity projectile impact load. Three kinds of mixtures were designed and specimens were manufactured. compressive strength, uniaxial tension, and high velocity projectile impact load tests were performed. Test results showed that the amount of fiber has a greater effect on the tensile strength and tensile strain capacity than the compressive strength, and the tensile strain capacity was improved by using hybrid fibers. It was also found that the amount of steel fiber had a great influence on the impact resistance capacity of panels. Although the impact resistance capacity of panels could be improved by using hybrid fibers, the difference of impact resistance capacity between specimens was found to be larger than the case of use of single fiber.

**키워드 :** 복합재료, 고강도, 충돌 저항 성능, 강섬유, 폴리에틸렌 섬유

**Keywords :** Composite, High strength, Impact resistance property, Steel fiber, Polyethylene fiber

### 1. 서론

일반적인 철근콘크리트 구조물은 사용 환경 하에서 다양한 위험요소에 놓이게 된다. 돌풍 및 태풍에 의한 비상체들의 충격, 교량 및 교각 등의 구조물에 가해지는 트럭이나 차량에 의한 충격, 폭탄 및 비행기 등의 테러에 의한 건물 폭파, 이 외에도 공장 등의 구조물에서 발생할 수 있는 다양한 원인에 의한 폭발 등 예상치 못한 다양한 원인의 충격하중이 구조물에 가해질 수 있다. 전통적인 설계하중에 대한 기존 일반 구조물의 힘의 흐름과 분배와 달리, 폭발하중, 충격하중을 받는 방호방폭 구조물의 힘의 흐름을 보면, 인장과 압축을 포함한 다축의 힘이 형성되어 방사형으로 확산되고, 인장과 압축이 미소한 시간차로 동일지점에서 발생하기도 한

다. 따라서 고속 비상체의 충격하중을 받는 일반적인 철근콘크리트 구조물은 콘크리트의 취성적 성질과 낮은 에너지 흡수능력의 한계로 인하여 비상체의 관입(Penetration) 및 관통(Perforation), 구조물의 표면 박락(Spalling) 및 배면 박락(Scabbing) 등이 발생할 수 있다.

이러한 충격하중의 저항 성능을 향상시키기 위한 일반적인 방법으로는 철근콘크리트 구조에서 철근의 배근 방법을 향상시키는 방법, 구조물 주요부위에 방호벽을 설치하는 방법, 부재의 치수를 증가시키는 방법, 부재 외부에 섬유보강 폴리머(Fiber reinforced polymer) 시트 또는 섬유보강 콘크리트(Fiber reinforced concrete) 벽으로 보강하는 방법 등이 있다.

기존 연구에서 시멘트 매트릭스의 강도를 증가시키고 섬유보강

\* Corresponding author E-mail: bylee@jnu.ac.kr

<sup>1</sup>전남대학교 바이오하우징연구소 박사후 연구원 (Biohousing Research Center, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

<sup>2</sup>전남대학교 건축학부 연구원 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

<sup>3</sup>충남대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea)

<sup>4</sup>충남대학교 건축공학과 박사과정 (Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea)

<sup>5</sup>전남대학교 건축학부 교수 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

을 통해 콘크리트의 충격 저항성을 효과적으로 향상시킬 수 있으며, 압축강도 150MPa 이상을 나타내면서 0.5% 정도의 인장변형성능을 나타내는 UHPFRC(Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete)는 우수한 충격 저항성을 나타낸다고 보고하였다 (Bindiganavile et al, 2002; Habel and Gauvreau 2008; Máca et al, 2014; Sovják et al, 2015; Yu et al, 2014; Yu et al, 2016). Kim et al.(2018)은 동일한 실험조건에서 강도가 큰 UHPFRC와 인장 연성이 큰 HDFRC(High Ductile Fiber Reinforced Composite)의 고속 비상체 충돌 실험을 수행하였다. 두 재료의 정적 인장하중하에서 인성은 유사하게 나타났으며, UHPFRC가 HDFRC에 비하여 충돌저항성이 더 큰 것으로 나타났다. Kang et al.(2016)는 하이브리드 섬유보강에 따른 UHPFRC의 압축강도와 인장성능에 대한 실험을 수행하였다. 실험결과 강섬유의 33%를 폴리에틸렌 섬유로 대체한 경우 100% 강섬유를 혼입한 경우에 비하여 압축강도는 4.7% 감소하지만, 인장변형성능은 39% 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 UHPFRC는 다른 시멘트계 재료들에 비하여 충격 저항성이 높은 것으로 나타났지만 동일 충격하중 조건에서 섬유 혼입량과 하이브리드 섬유 혼입에 따른 충격 저항성에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 이에 이 연구의 목적은 강섬유의 혼입량과 하이브리드 섬유 사용에 따른 고강도 섬유보강 복합재료의 고속 비상체 충격 저항성을 조사하는 것이다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1 실험 재료 및 실험 변수

매트릭스는 압축강도 150MPa 정도의 고강도를 나타내는 고강도 모르타르를 사용하였고, Table 1은 매트릭스의 배합과 실험 변수별 섬유 종류 및 양을 나타낸다. 결합재는 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 실리카 흙을 사용하였으며, 실리카 흙은 시멘트의 질량 대비 20%만큼 대체 혼입하였다. 실리카 흙은 분말형 재료의 충전 밀도

를 증가시켜 유동성을 개선하고, 포졸란 반응을 통한 강도 증진을 목적으로 사용되었다. BET(Brunauer–Emmett–Teller) 방법으로 측정된 실리카 흙의 비표면적은 7,05m<sup>2</sup>/g이고, 96% 이상의 SiO<sub>2</sub>로 구성되어 있다. 물-결합재비는 19%이며, 충전재는 평균 입경 2.2μm의 순수 실리카를 결합재 대비 24% 혼입하였다. 잔골재는 평균 입경 0.5mm인 구사 7호를 결합재 대비 88% 혼입하였으며, 굵은 골재는 사용하지 않았다. 혼화제로는 수축량을 저감시키기 위하여 팽창제 및 수축 저감제를 사용하였으며, 섬유 분산성을 최적화할 수 있는 유동상태를 만들기 위하여 고성능 감수제를 사용하였다.

보강 섬유 중 강섬유는 직선 형태의 길이 16.5mm, 직경 200μm, 인장강도 2,500MPa, 탄성계수 200GPa인 것을 사용하였고, 폴리에틸렌 섬유는 길이 18mm, 직경 12μm, 인장강도 2,700MPa, 탄성계수 88GPa의 물성을 갖고 있다.

### 2.2 실험체 제작

매트릭스의 혼합은 공전자전혼합기(Planetary mixer)를 이용하여 분말형 재료인 시멘트, 실리카 흙, 충전재, 잔골재, 수축 저감제 및 팽창제를 넣고 10분간 혼합하였다. 건비빔이 종료된 후, 액상형 재료인 혼합수, 고성능 감수제를 넣고, 재료가 액체 상태로 바뀔 때까지 혼합하였다. 이 후 섬유와 소포제를 혼입하여 5분 동안 고속으로 혼합하였으며, 마지막으로 저속으로 1분 동안 혼합하여 기포제거 및 안정화를 실시하였다.

혼합이 완료된 후, 50mm 입방형 압축강도 실험체, 아령 형태의 일축인장 실험체와 너비 × 높이 × 두께가 200mm × 200mm × 40mm 크기의 내충격성 실험체를 제작하였으며, 48시간 동안 기중양생을 실시한 후, 탈형하였다. 기중양생은 양생온도 23℃ ± 3℃, 상대습도 60% ± 5%의 양생실에서 실시하였다. 실험체 탈형 후, 재령 28일까지 양생온도 23℃ ± 3℃의 양생수조에서 수중양생을 실시하였다.

Table 1. Mixture proportion of matrix

Name	Binder		Water/ Binder	Filler/ Binder	Sand/ Binder	EA* Binder	SRA* Binder	SP* Binder	AF* Binder	Fiber(vol.%)	
	Cement	Silica fume								Steel fiber	Polyethylene fiber
M-S0.3	0.80	0.20	0.19	0.24	0.88	0.06	0.008	0.023	0.0006	0.3	
M-S1.5	0.80	0.20	0.19	0.24	0.88	0.06	0.008	0.023	0.0006	1.5	
M-H1.5	0.80	0.20	0.19	0.24	0.88	0.06	0.008	0.030	0.0006	1.0	0.5

\* EA: Expansive admixture, SRA: Shrinkage reducing agent, SP: Superplasticizer, AF: Anti-foamer

### 2.3 실험 방법

압축강도는 KS L 5105에 따라 각 배합별로 50mm 입방형 실험체 3개를 30톤 용량의 압축시험기를 사용하여 측정하였다. 일축인장 실험은 일본토목학회에서 제안한 방법에 따라 각 배합별로 Fig. 1(a)의 형상을 갖는 실험체 3개를 측정하였다(JSCE 2008). 일축인장 실험은 2톤 용량의 인장시험기를 사용하였으며, 실험체의 변형을 측정하기 위하여 Fig. 1(b)와 같이 실험체에 지그(Jig)를 설치하

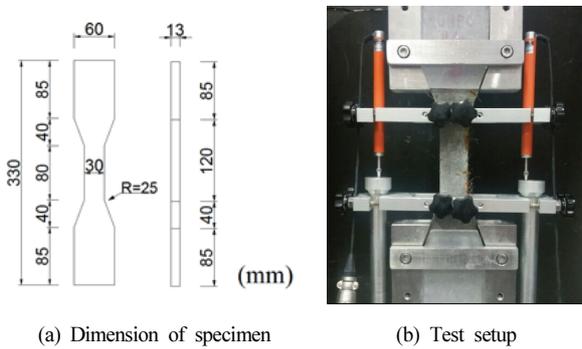


Fig. 1. Dimension of specimen and test setup

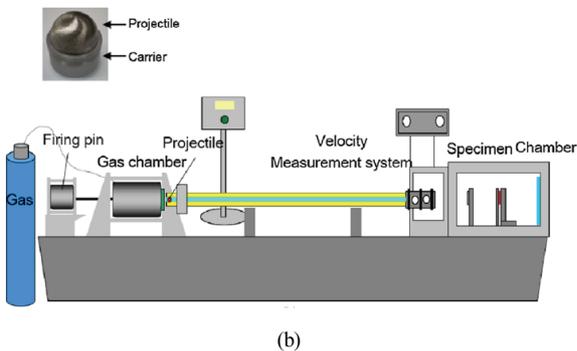
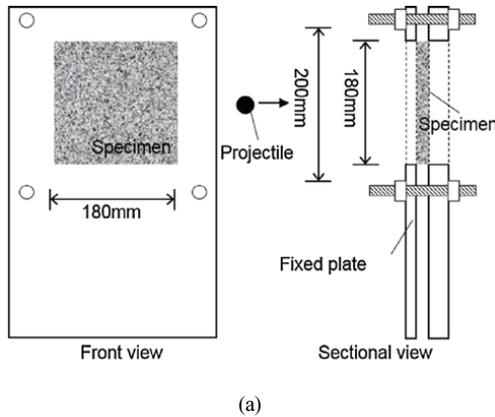


Fig. 2. Setup for high velocity projectile impact test: (a) installation of specimen and (b) test device

고 지그의 양쪽에 변위측정기를 부착하였다. 변형은 단면적의 모양과 넓이가 같은 실험체 가운데 부분 80mm 구간에서 측정하였다.

Fig. 2는 고속 비상체 충격실험의 실험체 설치와 실험 장비를 나타낸다. 충격하중하에서 실험체가 완전구속될 수 있도록 실험체 각 변 4개 부위를 고정하였다. 고속 비상체 충격실험에 사용된 비상체는 금속 재질이며, 전면 형상은 반구형이다. 비상체의 무게와 직경은 각각 66.1g, 25mm이며, 비상체의 속도는 217m/s이다. 비상체의 속도는 가속 관의 끝부분에 설치되어 있는 속도 측정 장비를 이용하여 측정하였다. 비상체의 무게와 속도로부터 계산된 충격에너지는 1,556J이다. 고속 비상체 충돌에 의한 손상 면적 비는 충격실험 이후 실험체를 촬영한 후 주 손실된 영역의 경계를 지정한 후 영상처리를 통해 실험체 전단면적 대비 손상 면적의 비를 계산하였다. 또한 중량 손실률은 고속 비상체 충돌실험 전·후의 실험체 중량을 측정하여 계산하였다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 역학특성

M-S0.3, M-S1.5, M-H1.5 배합의 28일 재령 압축강도는 각각 139MPa, 146MPa, 그리고 145MPa로 측정되었다. 섬유의 혼입량이 증가할수록 압축강도가 크게 나타났으며, 하이브리드 섬유 사용이 압축강도 미치는 영향은 그리 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 3은 각 배합별 인장응력과 변형을 그래프를 나타낸다. 섬유 혼입량이 작은 M-S0.3 배합의 경우 균열강도는 8.7MPa로 나타났으며, 모든 실험체에서 첫 번째 균열 발생 이후 연화거동이 나타났다. 균열 강도의 약 40%의 응력부터 응력이 감소하는 비율이 급격히 줄어들었는데 이는 섬유가교에 의한 것이며, 강섬유를 0.3% 보강하는 경우 변형경화거동이 나타나기에는 충분하지 않은 것으로 나타났다. 강섬유를 1.5% 보강한 M-S1.5 배합의 경우 첫 번째 균열발생 이후 변형이 증가하면서 응력이 증가하는 변형경화 거동이 나타났다. 이는 매트릭스 균열강도 보다 최대 섬유가교응력이 더 크기 때문이다. 첫 번째 균열강도는 10.4MPa로 나타났으며, 인장강도는 17.0MPa로 나타났다. M-S1.5 배합의 인장강도는 M-S0.3 배합에 비하여 약 2배에 해당된다. 인장변형성능은 0.47%로 나타났으며, 단일 균열만 발생한 M-S0.3 배합에 비하여 약 47배 큰 변형성능이다. 강섬유를 폴리에틸렌 섬유로 33.3% 대체한 M-H1.5 배합의 경우 인장강도는 16.5MPa로 M-S1.5 배합에 비하여 2.8% 낮게 나타났지만, 인장변형성능은 0.87%로 나타나 M-S1.5 배합에 비하여 85% 높은 것으로 나타났다.

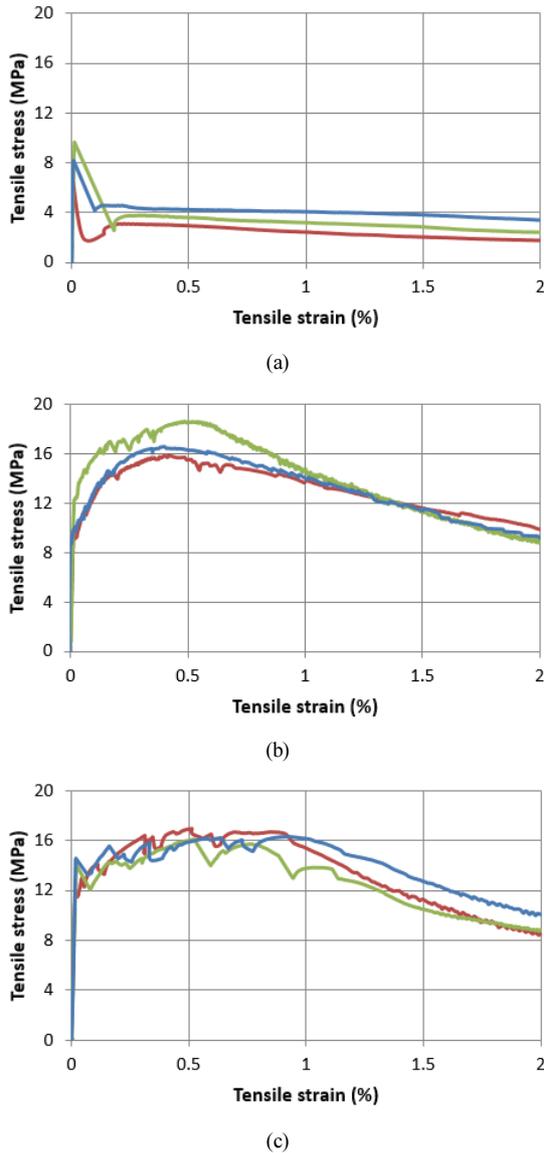


Fig. 3. Tensile stress and strain curves: (a) M-S0.3, (b) M-S1.5 and (c) M-H1.5

### 3.2 고속 비상체 충돌 하중에 의한 파괴 형태

고속 비상체 충돌에 의한 각 배합별 파괴 형태는 Table 2와 같다. M-S0.3 배합 실험체는 2개 모두 관통되어 비상체가 배합 반대편으로 지나갔으며, 전면부에 표면 박락이 나타나고 주 손상 영역 주위로 방사형으로 균열이 발생하였다. 후면부에서는 배면 박락이 발생하였고 크레이터(crater) 주위로 전면부보다 많은 수의 방사형 균열이 발생하였다. 보강 섬유량이 증가한 M-S1.5 배합 실험체의 경우 관통이 발생하지 않고 관입만 발생하였다. 전면부에 표면 박락이 발생하였지만 M-S0.3 배합 실험체에 비하여 손상 영역의

크기가 작고 방사형 균열이 관찰되지 않았다. 후면부의 경우 손상이 발생한 크기는 비슷하였지만 배면 박락이 발생하지 않았으며, 비상체는 실험체 안에 박혀 있었다. M-H1.5 배합 실험체의 경우 전면부는 M-S1.5 배합 실험체와 유사한 파괴 형태가 나타났다. 후면부의 경우 하나의 실험체는 배면 박락이 발생한 반면 다른 하나의 실험체에서는 배면 박락이 발생하지 않았다. 배면 박락이 발생한 실험체에서도 비상체는 실험체를 통과하지 못하고 실험체의 중앙부에 박혀있어 M-S0.3 배합 실험체와는 다른 파괴 형태를 나타내었다. 배면 박락이 발생하지 않은 실험체의 경우 M-S1.5 배합 실험체들에 비하여 후면의 손상이 더 적게 나타났다. M-S0.3 과 M-S1.5 배합 실험체들에 비하여 M-H1.5 배합 실험체들에서 파괴 형태의 변동이 크게 나타난 이유는 M-H1.5 배합 실험체들은 두 종류의 섬유가 혼입되어 있어서 섬유의 분산성과 방향성의 균질성이 상대적으로 낮기 때문으로 판단된다.

### 3.3 관입 깊이, 손상 면적, 질량 손실률

Table 3은 각 배합별 배합의 손상 형태를 정량적으로 나타내는 관입 깊이, 질량 손실률, 그리고 손상 면적을 나타낸다. 손상 면적은 실험체가 관통되는 경우 크레이터의 면적으로 정의하였고, 관통되지 않은 경우 전단파괴에 의해 원형으로 나타나는 주 손상 영역으로 정의하였다. 관통되지 않은 M-S1.5와 M-H1.5 배합 실험체들은 관입 깊이가 거의 같게 나타났다. 전면부 주 손상 면적의 경우 M-S0.3와 M-S1.5 배합 실험체들은 유사하였으며, M-H1.5 배합 실험체의 경우 M-S0.3 배합 실험체에 비하여 28% 작게 나타났다. 후면부 주 손상 면적에서 M-S1.5 배합 실험체는 M-S0.3 배합 실험체에 비하여 13% 작게 나타났으며, M-H1.5 배합 실험체의 경우 주 손상 면적이 6.6% 증가하는 것으로 나타났다. 후면부의 주 손상 면적비는 충돌 에너지의 소산과 관련되기 때문에 손상 면적이 작을수록 항상 충돌 저항성이 크다고 판단하기는 어렵다. 부재에서 탈락하여 파편이 되는 양을 나타내는 질량 손실률의 경우, M-S1.5 배합 실험체의 질량 손실률은 M-S0.3 배합 실험체에 비하여 82% 낮은 것으로 나타났으며, M-H1.5 배합 실험체의 질량 손실률은 M-S0.3 배합 실험체에 비하여 45% 낮은 것으로 나타났다. M-H1.5 배합 실험체의 질량 손실률이 M-S1.5 배합 실험체에 비하여 크게 나타난 이유는 비상체가 관통되지는 않았으나 하나의 실험체에서 배면 박락이 발생하였기 때문이다. 배면 박락이 발생하지 않은 실험체의 중량 손실률은 0.30%로 M-S1.5 배합 실험체보다 더 작게 나타났다.

Table 2. Failure pattern of each mixture after the impact test

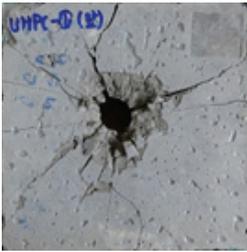
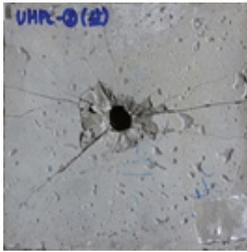
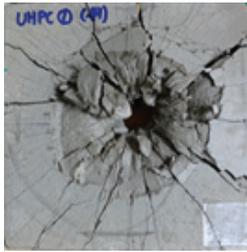
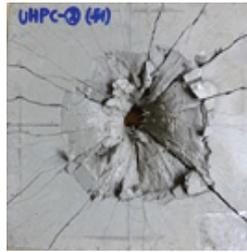
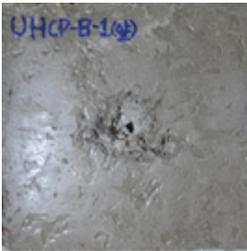
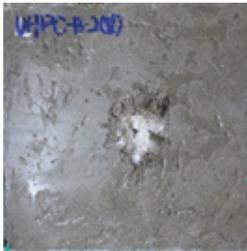
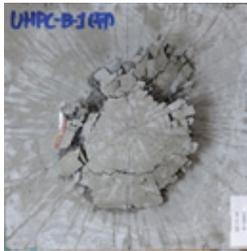
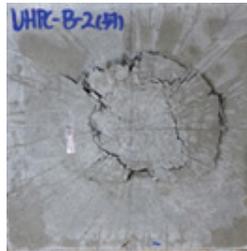
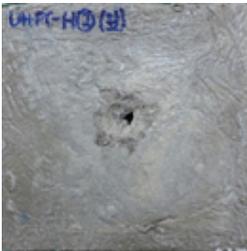
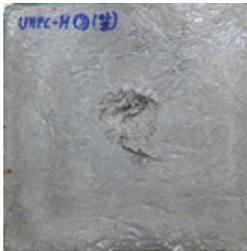
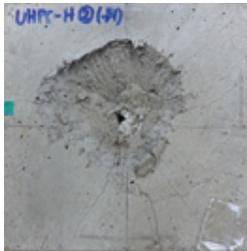
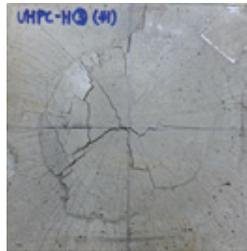
	Front		Rear	
M-S0.3				
M-S1.5				
M-H1.5				

Table 3. Damage patterns

Name	Penetration depth(mm)	Main damaged area(%)		Mass loss(%)
		Front	Rear	
M-S0.3	Perforation	6.0	28.8	5.28
M-S1.5	9.61	6.4	25.1	0.97
M-H1.5	9.60	4.3	30.7	2.92

### 3.4 경험식에 의한 충격 저항성 예측 및 비교

미국국방연구위원회인 NDRC(national defense research committee)는 비상체에 의한 고속충돌을 받는 콘크리트 부재의 내충격성을 이론적으로 계산할 수 있도록 계산식을 제안하였다. 제안된 계산식을 통하여 구조물이 비상체에 의한 충격하중을 받을 경우, 구조물의 관입 깊이, 관통 한계 두께, 배면 박락 한계 두께 등을 해석적으로 파악할 수 있다(Kennedy 1976; Rahman et al. 2010). 식 (1)부터 식 (3)은 관입 깊이에 대한 제안식을 나타낸다.

$$\frac{x}{d} = 2G^{0.5} \text{ for } G \leq 1 \quad (1)$$

$$\frac{x}{d} = G + 1 \text{ for } G > 1 \quad (2)$$

$$G = 3.8 \times 10^{-5} \frac{NM}{d_p \sqrt{f_c}} \left( \frac{V_0}{d_p} \right)^{1.8} \quad (3)$$

여기서,  $N$ 은 비상체 형상계수(flat :0.72, hemispherical : 0.84, blunt : 1.0, sharp : 1.14),  $M$ 은 비상체 질량,  $f_c$ 는 복합재료의 압축 강도,  $V_0$ 는 비상체 속도,  $d_p$ 는 비상체 직경,  $x$ 는 관입 깊이를 의미한다.

관통 한계 두께에 대한 제안식은 식 (4)와 식 (5)와 같다.

$$\frac{h_e}{d} = 3.19 \left( \frac{x}{d} \right) - 0.718 \left( \frac{x}{d} \right)^2 \text{ for } \frac{x}{d} \leq 1.35 \quad (4)$$

$$\frac{h_e}{d} = 1.32 + 1.24 \left( \frac{x}{d} \right) \text{ for } 1.35 < \frac{x}{d} \leq 13.5 \quad (5)$$

여기서,  $h_e$ 는 관통 한계 두께를 의미한다.

또한, 배면 박락 한계 두께에 대한 제안식은 식(6)과 식(7)과 같다.

$$\frac{h_s}{d} = 7.91\left(\frac{x}{d}\right) - 5.06\left(\frac{x}{d}\right)^2 \text{ for } \frac{x}{d} \leq 0.65 \quad (6)$$

$$\frac{h_s}{d} = 2.12 + 1.36\left(\frac{x}{d}\right) \text{ for } 0.65 < \frac{x}{d} \leq 11.75 \quad (7)$$

여기서,  $h_s$ 는 배면 박락 한계 두께를 의미한다.

실험을 통해 측정된 관입 깊이와 NDRC 식으로 예측한 관입 깊이, 관통 한계 두께, 그리고 배면 박락 한계 두께는 Table 4와 같다. 모든 배합에서 관입 깊이는 예측된 관입 깊이에 비하여 작게 나타났다. 이는 NDRC 식의 경우 재료 물성으로 압축강도만을 고려하고 있기 때문에 섬유가 보강된 효과가 반영되지 않았기 때문이다. 이론적 관통 한계 두께는 실제 실험체 두께보다 큰 값으로 예측되었지만 M-S1.5와 M-H1.5 배합 실험체에서는 비상체가 관통되지는 않았다. 이는 두 배합 실험체의 경우 이론적으로 예측한 것보다 충돌 저항성이 크다는 것을 의미한다. 배면 박락이 발생하지 않기 위한 이론적 두께는 약 73mm로 예상되었고, 실제 배면 박락이 전혀 발생하지 않기 위한 실제 실험체 두께는 40mm에서 73mm 사이임을 의미한다. 전술한바와 같이 이 연구에서 조사한 고강도 섬유보강 복합재료로 제조한 배합들의 충격 저항성은 NDRC 식으로 예측한 것과 비교하여 우수한 것으로 나타났다.

Table 4. Comparison between experiment and prediction

Name	Penetration depth(mm)	Prediction by modified NDRC formula		
		Penetration depth(mm)	Perforation limit thickness (mm)	Scabbing limit thickness (mm)
M-S0.3	Perforation	14.85	41.0	72.8
M-S1.5	9.61	14.68	40.6	72.5
M-H1.5	9.60	14.69	40.7	72.5

#### 4. 결론

이 연구에서는 강섬유의 혼입량과 강섬유와 폴리에틸렌 섬유를 하이브리드 사용에 따른 고강도 섬유보강 복합재료의 고속 비상체 충격 저항성을 실험적으로 조사하였다. 이를 위하여 사용한 고강도 섬유보강 복합재료의 압축강도 및 인장실험과 200mm x 200mm x 40mm 크기의 배합 실험체에 대한 고속 비상체 충격 실험을 수행하였다. 실험결과 도출한 결론은 다음과 같다.

- 1) 고강도 섬유보강 복합재료는 강섬유의 혼입량이 증가할수록 압축강도가 크게 나타났으며, 크지는 않지만 하이브리드 섬유

사용으로 압축강도가 감소하는 것으로 나타났다. 강섬유 혼입량이 1.5%인 M-S1.5 배합의 인장강도는 M-S0.3 배합에 비하여 약 2배이며, 인장변형성은 약 47배인 0.47%로 나타났다. 강섬유를 폴리에틸렌 섬유로 33.3% 대체한 M-H1.5 배합의 경우 인장강도는 M-S1.5 배합에 비하여 2.8% 낮게 나타났지만, 인장변형성은 0.87%로 나타나 M-S1.5 배합에 비하여 85% 높은 것으로 나타났다.

- 2) 고속 비상체 충돌 하중에 의한 파괴 형태, 관입 깊이, 손상 면적, 그리고 질량 손실을 분석을 통하여 강섬유의 혼입량은 충격 저항성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 섬유 혼입량이 증가할수록 충격 저항성은 증가하는 것으로 나타났다. 강섬유를 폴리에틸렌 섬유로 33.3% 대체하면 배면 박락이 발생하지 않은 경우 충격 저항성은 더 우수한 것으로 나타났다. 다만, 상대적으로 실험체별 충격 저항성 차이가 크게 발생하는 것으로 나타났다.
- 3) 고강도 섬유보강 복합재료로 제조한 배합들의 충격 저항성은 NDRC 식으로 예측한 것과 비교하여 높은 것으로 나타났으며, 이는 섬유 혼입에 따른 에너지 흡수 능력이 증가하였기 때문이다.

#### Conflict of interest

None.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(19CTAP-C151882-01)과 건설기술연구사업의 연구비지원(20SCIP-C159060-01)에 의해 수행되었습니다.

#### References

Bindiganavile, V., Banthia, N., Aarup, B. (2002). Impact response of ultra-high-strength fiber-reinforced cement composite, *Materials Journal*, **99(6)**, 543-548.

Habel, K., Gauvreau, P. (2008). Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete(UHPFRC) to impact and static loading, *Cement and Concrete Composites*, **30(10)**, 938-946.

JSCE. (2008). Recommendations for Design and Construction of

- High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), Japan: Japan Society of Civil Engineers.
- Kang, S.T., Choi, J.I., Koh, K.T., Lee, K.S., Lee, B.Y. (2016). Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete, *Composite Structures*, **145**, 37–42.
- Kennedy, R.P. (1976). A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, *Nuclear Engineering and Design*, **37(2)**, 183–203.
- Kim, G.Y., Choi, J.I., Park, S.E., Kim, H., Lee, Y., Lee, B.Y. (2018). Response of UHPFRC and HDFRC under static and high-velocity projectile impact loads, *Construction and Building Materials*, **188**, 399–408.
- Máca, P., Sovják, R., Konvalinka, P. (2014). Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact, *International Journal of Impact Engineering*, **63**, 158–163.
- Rahman, I.A., Zaidi, A.M.A., Bux, Q., Latif, I. (2010). Review on empirical studies of local impact effects of hard missile on concrete structures, *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, **1(1)**, 73–98.
- Sovják, R., Vavříník, T., Zatloukal, J., Maca, P., Mičunek, T., Frydrýn, M. (2015). Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets, *International Journal of Impact Engineering*, **76**, 166–177.
- Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H. (2014). Static properties and impact resistance of a green ultra-high performance hybrid fibre reinforced concrete (UHPHFRC): experiments and modeling, *Construction and Building Materials*, **68**, 158–171.
- Yu, R., Van Beers, L., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H. (2016). Impact resistance of a sustainable ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) under pendulum impact loadings, *Construction and Building Materials*, **107**, 203–215.

### 섬유 종류 및 혼입량에 따른 고강도 섬유보강 복합재료의 충돌 저항 성능

이 연구의 목적은 섬유의 혼입량과 종류에 따른 고강도 섬유보강 복합재료의 정적하중에서의 압축강도 및 인장거동과 비상체 하중 하에서의 충격 저항성을 조사하고자 한다. 이를 위하여 3가지 배합을 설계하였고, 압축강도, 직접인장, 그리고 고속 비상체 충돌 실험을 수행하였다. 실험결과 섬유의 혼입량은 압축강도에 비하여 인장강도에 큰 영향을 미치며, 하이브리드 섬유 사용으로 인장변형성능이 향상되는 것으로 나타났다. 강섬유의 혼입량은 충격 저항성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 하이브리드 섬유를 사용하면 충격 저항성이 더욱 향상되는 것으로 나타났다. 다만, 단일 섬유 사용에 비하여 실험체별 성능 차이가 크게 발생하는 것으로 나타났다.