



## 섬유 종류에 따른 시멘트복합체의 고속 비상체 충격에 대한 배면파괴저감 및 균열특성 평가

한상휴<sup>1)</sup> · 김규용<sup>1)\*</sup> · 김홍섭<sup>1)</sup> · 김정현<sup>1)</sup> · 남정수<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>충남대학교 건축공학과 <sup>2)</sup>일본동경공업대학 응용세라믹연구소

## Evaluation on Rear Fracture Reduction and Crack Properties of Cement Composites with High-Velocity Projectile Impact by Fiber Types

Sang-Hyu Han,<sup>1)</sup> Gyu-Yong Kim,<sup>1)\*</sup> Hong-Seop Kim,<sup>1)</sup> Jung-Hyun Kim,<sup>1)</sup> and Jeong-Soo Nam<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architecture Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-742, Korea

<sup>2)</sup>Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, 226-8503, Japan

**ABSTRACT** Cement composites subjected to high-velocity projectile shows local failure and it can be suppressed by improvement of flexural toughness with reinforcement of fiber. Therefore, researches on impact resistance performance of cement composites are in progress and a number of types of fiber reinforcement are being developed. Since bonding properties of fiber with matrix, specific surface area and numbers of fiber are different by fiber reinforcement type, mechanical properties of fiber reinforced cement composites and improvement of impact resistance performance need to be considered. In this study, improvement of flexural toughness and failure reduction effect by impact of high-velocity projectile have been evaluated according to fiber type by mixing steel fiber, polyamide, nylon and polyethylene which are have different shape and mechanical properties. As results, flexural toughness was improved by redistribution of stress and crack prevention with bridge effect of reinforced fibers, and scabbing by high-velocity impact was suppressed. Since it is possible to decrease scabbing limit thickness from impact energy, thickness can be thinner when it is applied to protection. Scabbing of steel fiber reinforced cement composites was occurred and it was observed that desquamation of partial fragment was suppressed by adhesion between fiber and matrix. Scabbing by high-velocity impact of synthetic fiber reinforced cement composites was decreased by microcrack, impact wave neutralization and energy dispersion with a large number of fibers.

**Keywords** : cement composites, fiber reinforced, flexural toughness, scabbing, number of fibers, micro-crack

### 1. 서 론

시멘트계 재료는 우수한 압축강도 특성을 가지고 있어 많은 건축 및 토목 구조물에 사용되고 있다. 그러나 이러한 시멘트계 재료의 휨·인장성능은 압축강도에 비해 낮고, 취성적인 파괴특성을 가지고 있다.<sup>1)</sup>

콘크리트 구조물이 비산물의 충돌 또는 폭발 등의 극단 하중을 받으면 정하중에서의 파괴거동과 다른 국부적인 파괴거동을 보인다. 이러한 국부파괴거동은 Fig. 1과 같이 비상체의 고속충돌에 의해 표면관입이 발생하고 충격으로 인한 충격파가 배면으로 전달되어 배면의 인장변

형(휨변형) 및 박리가 발생하게 된다. 또한, 비상체 구조물을 관통하거나 표면관입깊이와 배면박리두께의 합이 구조물 두께 이상이 되는 관통파괴가 발생한다.

이러한 콘크리트의 파괴거동은 비상체의 재료특성 및 충돌속도 등의 하중요인뿐만 아니라 콘크리트의 재료특성, 두께 및 보강재료 등 다양한 요인에 의해 영향을 받는다. 콘크리트의 재료특성 중 압축강도의 증가는 표면관입깊이를 억제하고, 휨·인장강도 및 파괴에너지 등 인성의 향상은 배면박리의 억제에 영향을 미친다.<sup>2-5)</sup>

시멘트계 재료는 우수한 압축강도 특성을 가지고 있어 많은 건축 및 토목 구조물에 사용되고 있다. 그러나 이러한 시멘트계 재료의 휨·인장성능은 압축강도에 비해 낮고, 취성적인 파괴특성을 가지고 있기 때문에 국내·외 다수의 연구자들에 의해 단섬유를 혼입함으로써 높은 인성을 발휘할 수 있는 고인성 시멘트 복합체가 개발되어 왔다. 이러한 고인성 시멘트 복합체는 보강재, 보수재, 충격

\*Corresponding author E-mail : gyuyongkim@cnu.ac.kr  
 Received September 11, 2014, Revised November 19, 2014,  
 Accepted November 27, 2014  
 ©2015 by Korea Concrete Institute

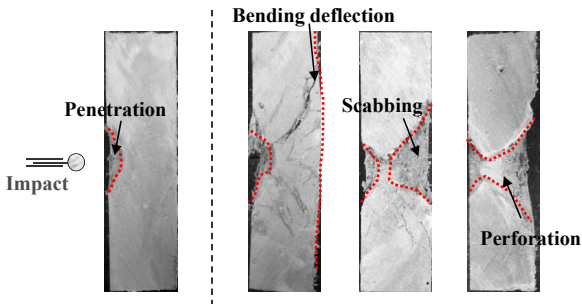


Fig. 1 Performance of failure pattern by impact

완충재 및 에너지 흡수 재료 등 다양한 용도로 활용되고 있다.<sup>6-7)</sup>

Maalej 등은 섬유보강 시멘트 복합체는 혼입섬유 자체의 인장강도 및 탄성계수 등의 향상과 섬유 혼입율에 따라 균열분산능력 및 변형특성이 향상된다고 보고하고 있다.<sup>8)</sup> 또한, Kesner 등은 철골 구조물의 내진보강을 위해 프리캐스트 HPRCC (High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite) 벽판을 활용하였으며, Fisher는 PVA 섬유로 보강된 ECC (Engineered Cementitious Composite)를 골조에 적용하였다. Fukuyama 등은 HPRCC를 이용하여 제작된 내진부재를 피로타 건축물의 내진보강에 적용하는 등<sup>9-11)</sup> 국외에서는 주로 섬유보강 시멘트 복합체의 적용공법에 대한 연구가 진행되고 있다.

국내의 경우 윤현도 등은 매크로섬유가 보강된 시멘트 복합체의 직접 인장강도는 섬유의 혼입율에 따라 시멘트 모재 인장강도의 3.5배까지 향상되며, 유사변형경화 특성을 보였으나, 다수 균열특성의 효과는 적은 것을 관찰하였다. 그러나, 매크로 섬유에 마이크로 섬유를 하이브리드 보강한 시멘트 복합체에서는 다수 균열 및 유사변형경화 특성이 나타났으며, 이 특성은 마이크로 섬유의 강도 및 탄성계수가 커짐에 따라 증가하는 것을 관찰하였다.<sup>12)</sup>

신경준 등은 강섬유의 혼입에 의해 최대휨강도와 휨인성이 증가하였고, 합성섬유를 사용한 시험체보다 최대 2.7배의 휨강도가 나타나는 것을 확인하였으며, 섬유의 탄성계수와 인장강도가 균열가교응력(Crack Bridging Stress)이 직접적인 영향을 주는 것을 관찰하였다.<sup>13)</sup>

남정수 등은 섬유 혼입에 따른 휨인성의 증가로 고속비상체에 대한 섬유보강 시멘트복합체의 내충격성능이 향상되는 것을 관찰하였으며, 섬유종류에 따라 흡수하는 충격에너지도 다른 것을 확인하였다.<sup>14)</sup>

이와 같이 기존의 연구에서는 섬유혼입효과에 의해 변형능력이 증가되고 충격저항성이 확인되었으나, 섬유보강 효과에 의한 파괴저감을 산정 등 정량적인 재료적 특성값의 필요성을 제시하고 있다.

이에 본 연구에서는 섬유보강 시멘트 복합체의 섬유종류에 따른 휨·인장성능의 향상과 균열의 분산특성이 고속비상체의 충돌에 의한 국부파괴저감에 미치는 효과를 검토

하기 위해, 물성 및 형상이 다른 강섬유(Steel fiber), 폴리아미드(Polyamide), 나일론(Nylon) 및 폴리에틸렌(Polyethylene) 단섬유를 보강한 시멘트 복합체에 대하여 휨인성과 고속비상체 충돌에 의한 파괴 및 균열특성을 평가하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 사용재료 및 모르타르 배합

혼입섬유의 물리적 성질 및 성상은 Table 1 및 Fig. 2에 나타내었다. 보강섬유의 경우 강섬유와 합성섬유인 PA, NY 및 PE섬유를 사용하였다. 매크로 섬유인 강섬유와 PA 섬유는 길이, 직경, 형상비가 각각 30 mm, 0.5 mm, 60으로 동일하지만, 인장강도와 섬유의 화학적 조성이 상이하다. PA, NY섬유는 길이, 직경, 형상비가 다르지만 PA 섬유는 직경 0.019 mm의 미세 NY섬유 가닥 544개를 공기분사 성형하여 매크로 섬유로 만들어 부착 비표면적을 크게 한 것이다. 마이크로 섬유인 NY섬유와 PE섬유는 길이, 직경, 형상비가 12 mm, 0.012 mm, 1000으로 동일하며, 인장강도는 각각 896 MPa, 2700 MPa이다.

Table 1 Mechanical properties of the used fiber

Reinforcement	ID. <sup>1)</sup>	Length (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	
Steel fiber	SF	30	0.5	7.85	60	1,140	
Synthetic fiber	Macro twist	PA	30	0.5	1.14	60	594
	Micro round	NY	12	0.012	1.14	1000	896
		PE	12	0.012	0.95	1000	2,700

<sup>1)</sup>SF : Steel fiber, PA : Polyamide, NY : Nylon, PE : Polyethylene

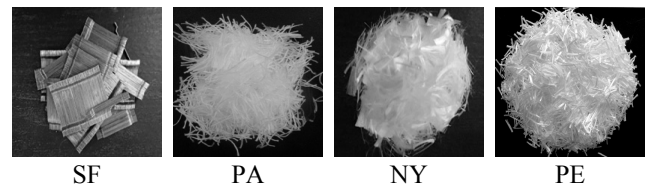


Fig. 2 Configuration of fiber

Table 2 Mix properties of mortar

ID.	F <sub>ck</sub> (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	V <sub>f</sub> (vol.%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	FA	S	Fiber
Plain									0
SF	40	40	100	2.0	400	850	150	350	156.0
PA									22.8
NY									22.8
PE									19.0

**Table 3** Properties of material

Material	Properties
Cement	Portland cement, Density : 3.15g/cm <sup>3</sup> Fineness : 3,200cm <sup>2</sup> /g
Fly ash	Density : 2.20g/cm <sup>3</sup> , Fineness : 3,228cm <sup>2</sup> /g
Silica sand (Type 7)	Density : 2.64g/cm <sup>3</sup> , Absorptance : 0.38%
Super plasticizer	Polycarboxylic acid type

Table 2는 본 실험의 배합을 나타낸 것으로 설계압축 강도 40 MPa를 만족하기 위하여 W/B를 40%로 설정하였다. 섬유의 혼입은 체적비를 적용하여 2.0vol.% 혼입하였으며, 각 섬유의 비중을 고려하여 혼입량을 결정하였다.

본 연구에서 사용한 재료의 물리적 성질은 Table 3과 같이 시멘트는 보통 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 혼화제로 플라이애시를 사용하였다. 잔골재의 경우 섬유의 분산성 및 균열분배를 목적으로 7호 규사를 사용하였으며, 혼화제는 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용하였다.

**2.2 실험방법**

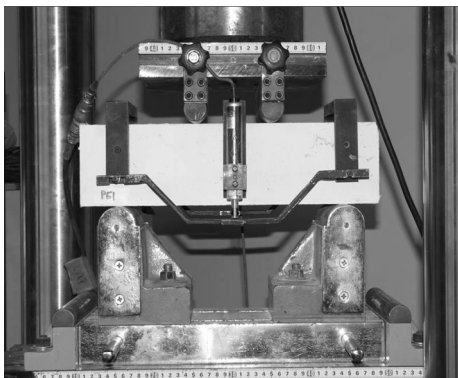
**2.2.1 휨강도 시험**

휨강도는 KS F 2408 『콘크리트 휨강도 시험 방법』에 준하여 Fig. 3에 나타난 바와 같이 □100×100×400 mm의 각형 시험체에 4점 재하 실험을 실시하였으며, 식 (1)에 의하여 구하였다.

$$f_b = P/bh^2 \tag{1}$$

여기서,  $f_b$  : 휨강도(MPa)

- $P$  : 시험기가 나타내는 최대 하중(N)
- $l$  : 지간(mm)
- $b$  : 파괴 단면의 나비(mm)
- $h$  : 파괴 단면의 높이(mm)



**Fig. 3** Flexural stress test

등가 휨강도는 주어진 변위인 지간의 ‘1/150’에서의 평균 휨강도를 말하는 것으로 최대휨강도 이후의 변형경화 또는 변형연화 현상에 의한 하중유지능력인 휨인성을 평가하는 지표로 활용된다. 식 (2)에 의하여 등가휨강도를 계산하였다.

$$f'_r = \frac{A_b}{\delta_{tb}} \times \frac{l}{bh^2} \tag{2}$$

여기서,  $f'_r$  : 등가휨강도(MPa)

- $\delta_{tb}$  : 지간의 1/150의 처짐(mm)
- $A_b$  :  $\delta_{tb}$ 까지 하중-처짐 곡선의 면적
- $l$  : 지간(mm)
- $b$  : 파괴 단면의 폭(mm)
- $h$  : 파괴 단면의 높이(mm)

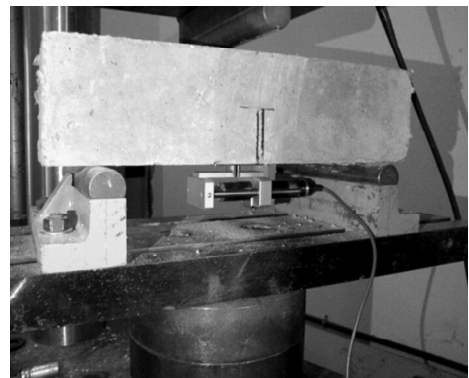
**2.2.2 파괴에너지 시험**

파괴에너지는 KS에 명시된 시험방법이 없기 때문에, RILEM 50-FMC Draft Recommendation에서 제안한 규정에 준하여 측정하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 □100×100×400 mm의 각형 시험체의 중앙부분에 50mm의 노치를 제작하여, 3점 재하를 실시하였으며, CMOD하중-변위 곡선을 활용하여 식 (3)에 의하여 산정하였다. 파괴에너지의 경우 하중-변위 곡선의 면적 및 변형 등의 휨인성 특성을 모두 고려하여 산정함으로써 섬유보강 시멘트복합체의 휨인성 특성을 가장 효과적으로 평가할 수 있을 것이라 판단된다.

$$G_F = (W_0 + mg\delta_0)/A_{lig} [N \cdot m/m^2 (J/m^2)] \tag{3}$$

여기서,  $G_F$  : 파괴에너지(N·m/m<sup>2</sup>)

- $W_0$  : CMOD하중-변위 곡선의 면적(N·m)
- $m$  :  $m_1 + 2m_2$ (kg)



**Fig. 4** Loading apparatus

- $m_1$  : 지지대 사이의 보의 무게(kg)
- $m_2$  : 시험체에 부착된 지그의 무게(kg)
- $g$  : 중력 가속도(9.81m/s<sup>2</sup>)
- $\delta$  : 보의 최종 파괴시의 변형(m)
- $A_{ig}$ : 파괴 단면적(m<sup>2</sup>)

### 2.2.3 내충격 성능 평가

내충격 성능평가를 위한 시험체의 크기는 200×200 mm (가로×세로)이며, 배면박리한계두께를 평가하기 위해 두께는 30, 40, 50 및 70 mm로 설정하였다. 가스압력식 내충격 성능평가장치는 Fig. 5에 나타내었다. 고압가스를 사용하여 비상체를 고속으로 발사시켜 시험체에 충돌하도록 제작되었으며, 시험체의 4면을 볼트로 체결하여 고정하였다. 비상체의 발사는 캐리어와 강구를 접착 결합하여 발사하고, 챔버에 캐리어 분리대를 설치하여 캐리어가 분리된 후 시험체에 강구만 충돌되도록 하였다. 충격속도로는 비상체의 직경 10 mm (4.07 g)강구에서는 속

도 300 m/s, 충격에너지 198J, 20 mm (31.90 g)의 강구에서는 속도 170 m/s, 충격에너지 514J로 시험체에 충격을 가하였다.

한편, 콘크리트의 내충격 성능 평가에 대한 연구는 사용장비, 시험체, 비상체의 형상 및 충격속도 등 실험조건에 따라 상이한 결과가 나오는 경우가 많기 때문에 명확한 표준 규정이 제시되고 있지 않다. 따라서 기존의 연구자들의 연구결과를 참고로 하여 고속 비상체에 의한 파괴성상을 3가지로 구분하여 Table 4에 나타내었다. 시험체의 파괴성상은 표면파괴(Penetration), 배면파괴(Scabbing), 관통파괴(Perforation)로 구분하였으며, 표면관입의 경우 비상체 충돌에 의한 표면에 관입이 발생하고, 배면의 박리가 나타나지 않거나 미세한 균열이 나타난 정도로 하였으며, 배면박리의 경우 비상체의 충돌에 의해 표면의 관입과 배면에서 박리현상이 나타나거나, 배면에 큰 균열이 발생한 경우로 산정하였다. 관통파괴의 경우 비상체가 시험체를 완전히 관통하거나, 표면관입깊이와 배면박리두께의 합이 시험체 두께와 같은 경우로 산정하였다.

또한, 비상체 충돌에 의한 충격파의 발생으로 인해 단면균열의 패턴을 알아보고자, 시험체의 충격 부분 중심을 지나도록 컷팅하여 단면의 균열성상을 관찰하였으며, 표면관입깊이 및 배면파괴두께, 배면파괴직경 등을 평가하여 정량적인 파괴저감성능을 평가하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 역학적 특성 평가 결과

28일 재령에서 역학적 특성에 대하여 평가한 결과는 Table 5에 나타내었다. 압축강도는 모든 시험체가 목표강도를 상회하는 결과로 나타났으며 섬유유 보강이 압축강도에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

4점 재하에 의한 응력-처짐 곡선 및 휨강도 평가 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 시험체 3개에 대하여 4점 휨재하 시험을 실시하여 얻어진 최대 휨강도의 평균치를 휨강도로 하였으며, 응력-처짐 곡선의 경우 대표적인 값에 대해서 나타내었다. 혼입 섬유유 가교작용으로 인한 응력의 재분배와 균열발생의 억제 등으로 인하여 휨강도가 크게

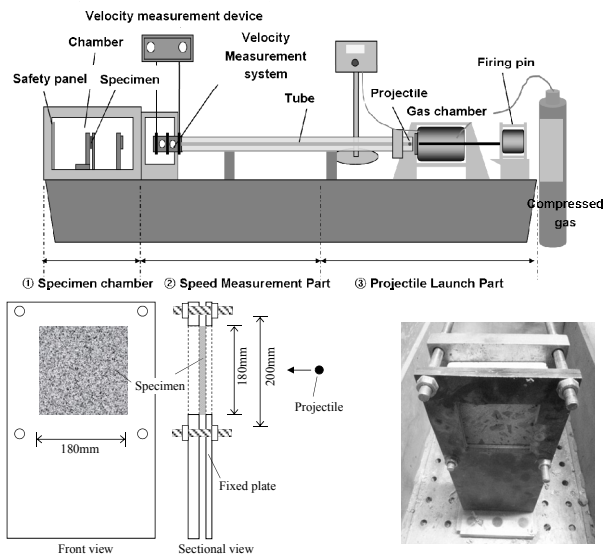


Fig. 5 High velocity impact test machine

Table 4 Failure grade and depth

(i) Penetration	(ii) Scabbing	(iii) Perforation

- T : Specimen thickness (mm)
- P<sub>d</sub> : Penetration depth (mm)
- S<sub>d</sub> : Scabbing thickness (mm)

Table 5 Results of mechanical properties

ID.	$f_{ck}$ (MPa)	$f_b$ (MPa)	$f'_r$ (MPa)	$G_F$ (N · m/m <sup>2</sup> )
Plain	45.36	4.58	-	142.41
SF	44.32	16.47	13.59	23640.91
PA	42.38	11.57	7.35	6822.25
NY	41.35	7.39	6.27	7163.23
PE	47.34	19.88	16.85	25857.16

- $f_{ck}$  : Compressive strength,  $f_b$  : Flexural strength,
- $f'_r$  : Equivalent flexural strength,  $G_F$  : Fracture energy

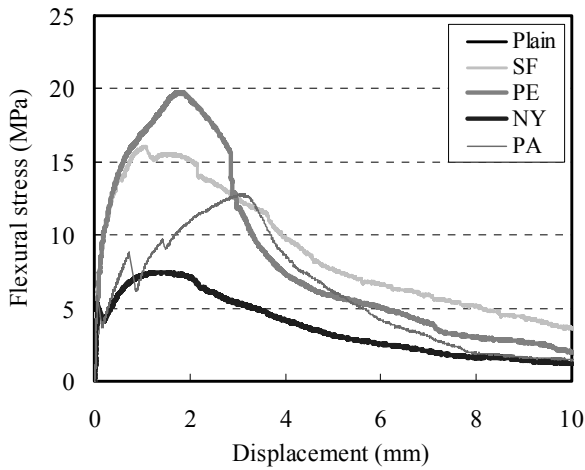


Fig. 6 Flexural stress-displacement curve

증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 휨강도의 증가량은 PE>강섬유>PA>NY순으로 PE섬유를 혼입한 경우 휨강도가 가장 크게 증가하는 것으로 나타났다.

### 3.2 내충격 성능 평가 결과

#### 3.2.1 파괴성상 및 등급

비상체 직경 10 mm, 충돌속도 300 m/s 및 비상체 직경 20 mm, 충돌속도 170 m/s에서의 고속충격시험 후 섬유보강에 따른 파괴성상 및 등급은 Table 6에 나타내었다.

비상체 직경 10 mm의 조건에서는 섬유무보강 시험체의 경우 두께 30 mm에서 관통파괴, 40 mm에서는 배면파괴가 발생하였으며, 두께 50 mm에서는 배면파괴가 억제되었다.

섬유보강 시험체의 경우 PA, NY 및 PE 등 합성섬유보강 시험체는 시험체 두께 30 mm에서 배면파괴가 발생하지 않았으며, 미세한 균열이 발생하는 정도로 내충격 성능이 향상되었다. 반면 강섬유보강 시험체의 경우 합성섬유보강 시험체와 달리 두께 30 mm에서 배면박리 현상이 나타나 내충격 성능 향상 정도가 가장 떨어지는 것으로 나타났다.

비상체 직경 20 mm의 조건에서는 섬유무보강 시험체

Table 6 Failure type

Impact condition		Plain	SF	PA	NY	PE
Projectile 10mm	30mm					
		Perforation	Scabbing	Crack of rear	Crack of rear	Crack of rear
	40mm					
		Scabbing	Penetration	Penetration	Penetration	Penetration
50mm						
	Penetration	Penetration	Penetration	Penetration	Penetration	
Projectile 20mm	30mm					
		Perforation	Perforation	Perforation	Perforation	Perforation
	40mm					
		Perforation	Perforation	Perforation	Perforation	Perforation
	50mm					
		Perforation	Scabbing	Crack of rear	Crack of rear	Crack of rear
	70mm					
		Perforation	Crack of rear	Crack of rear	Crack of rear	Crack of rear

의 경우 두께 50 mm까지 관통 파괴, 70 mm에서는 비상체가 관통은 하지 않았으나 표면관입깊이와 배면박리두께의 합이 시험체 두께와 동일한 정도의 파괴가 발생하였다.

섬유보강 시험체의 경우 두께 30 mm에서는 모두 비상체가 관통하였으며, 40 mm에서는 표면관입깊이와 배면박리두께가 시험체 두께와 거의 동일하게 나타났다. 시험체 두께 50 mm에서는 합성섬유보강 시험체는 배면에 미세균열만 발생하였으나, 강섬유보강 시험체의 경우 배면파괴가 일어났다. 한편 70 mm에서는 섬유보강 시험체는 모두 배면파괴가 억제되는 것으로 확인되었다.

시험체 내부에 섬유의 가교작용으로 인하여 균열발생의 억제 및 충격파의 완화작용의 효과에 의한 것으로 판단되며, 혼입 섬유의 종류에 따라 배면파괴 억제에 작용하는 영향이 다르기 때문에 배면파괴억제효과 및 파괴성상의 차이를 보였다.

### 3.2.2 섬유보강에 의한 표면 및 배면파괴 억제효과

Fig. 7은 압축강도에 따른 표면 관입깊이를 비상체 충돌 조건에 의한 실측값과 수정NDRC 식에서 제안한 값과 비교한 것으로 관입깊이는 섬유 혼입 및 시험체의 두께 등에는 큰 영향을 받지 않으며, 압축강도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구의 실측값의 경우 굵은 골재가 혼입되지 않은 모르타르 배합이므로 콘크리트를 기반으로 하는 수정 NDRC식보다 더 큰 표면관입깊이를 보였다.

비상체 조건에 따른 충격에너지에서 섬유의 종류에 따른 표면파괴직경 및 배면파괴직경의 정량적 감소율은 Fig. 8 및 9에 나타내었다. 섬유무보강 시험체의 파괴직경  $C_f$  (Crater of front) 및  $C_r$  (Crater of rear)를 기준으로 하여 섬유보강 시험체의 파괴직경 감소율( $\alpha_f$  및  $\alpha_r$ )을 산정하였는데, 섬유 혼입으로 인한 파괴직경의 감소효과를 볼 수 있었으며, 혼입섬유의 종류에 따라 그 감소율의 차이를 확인할 수 있었다.

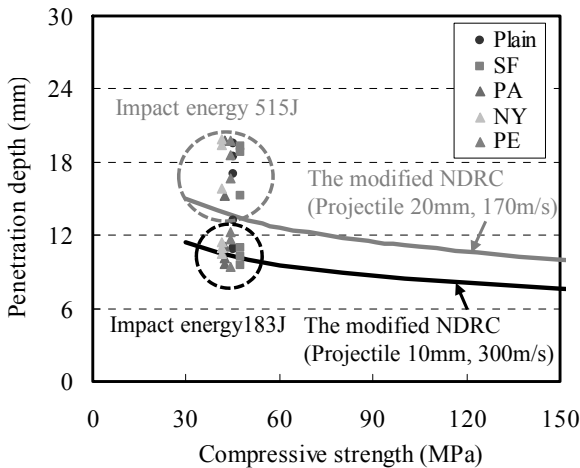


Fig. 7 Penetration depth by compressive strength

표면의 파괴직경에 대해서는 10 mm비상체 조건의 충격에너지 183J의 경우 강섬유보강 시험체는 0.84, 합성섬유보강 시험체는 0.78~0.55의 감소비율을 나타냈다. 20 mm비상체 조건의 충격에너지 515J에서는 강섬유보강 시험체는 0.69, 합성섬유보강 시험체는 0.61~0.48의 표면파괴직경 감소율 나타내었다.

한편, 표면의 파괴직경저감율 산정방법과 동일하게 배면의 파괴직경저감율을 산정하였으며, 충격에너지 183J에 대해서는 섬유보강 시험체의 배면파괴가 발생하지 않아 파괴직경저감율을 산정할 수 없었으며, 충격에너지 515J의 경우 강섬유보강 시험체는 0.82, 합성섬유보강 시험체는 0.57~0.54의 감소율을 나타냈다.

관입깊이와 파괴직경의 관계를 통해 표면과 배면의 파괴각을 유추한 개념도를 Table 7에 나타내었다. 표면의 표면관입깊이( $P_d$ , Penetration depth)와 표면파괴직경의 관계를  $C_s \times \gamma_s = P_d$ , 배면의 배면박리깊이( $S_d$ , Scabbing depth)와 배면파괴직경의 관계를  $C_r \times \gamma_r = S_d$ 로 나타내었을 경우 관계계수  $\gamma$ 은 관입깊이가 커질수록 파괴직경도 증가하는 정비례 관계를 볼 수 있었다. 표면과 배면의 파괴깊이-직경의 관계계수( $\gamma$ )의 비례관계를 통해 표면과 배면의 파괴각( $\delta$ )이 유사한 것으로 판단된다. 관입깊이에 대한 파

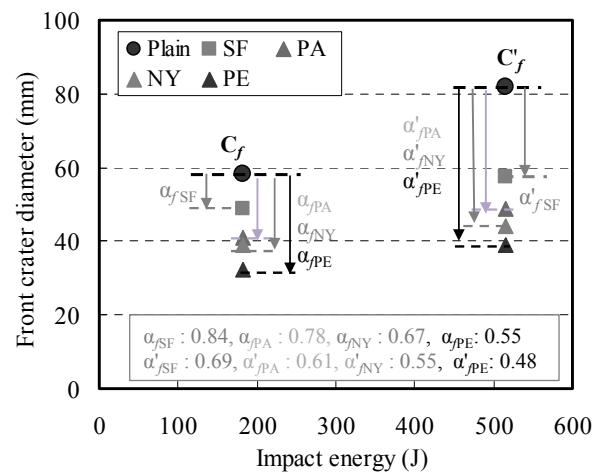


Fig. 8 Front crater diameter by impact energy

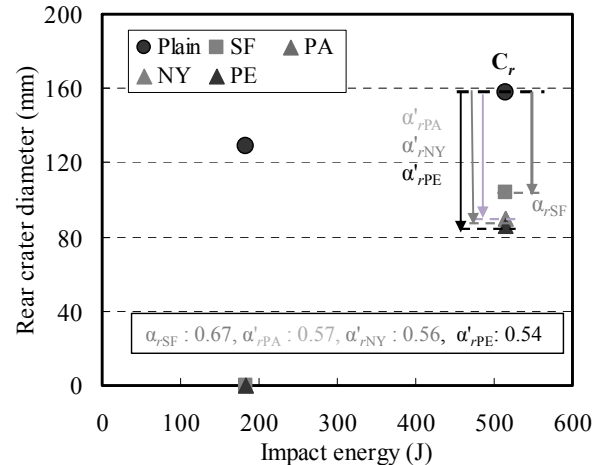
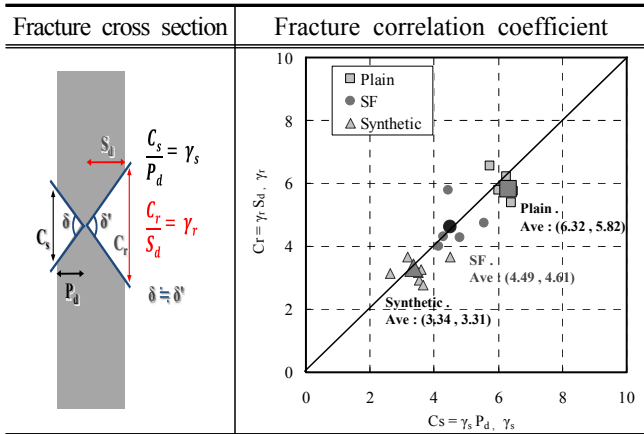


Fig. 9 Rear crater diameter by impact energy

**Table 7** Fracture correlation coefficient and fracture angle diagram



과직경은 섬유 혼입으로 인하여 감소하는 경향이 나타났으며, 강섬유보다 합성섬유에서 더욱 효과적으로 나타났다. 섬유보강에 의한 휨인성의 향상은 표면관입의 억제효과는 나타나지 않았지만, 표면 및 배면의 파괴직경은 억제하는 것으로 나타났다. 이는, 표면의 경우 비상체의 충돌에 의해 충격파가 배면으로 전달되고 전달된 충격파는 배면에서 반사되어 인장응력에 의하여 표면의 파괴가 발생하게 되는데 섬유보강에 의한 휨인성의 향상은 표면의 파괴를 억제하는 것으로 판단된다.

배면파괴의 경우 표면에서 전달된 충격파가 전달되어 배면에 인장변형이 발생하여 파괴가 일어나며, 섬유보강에 의한 휨인성의 향상으로 깊이 및 직경이 감소하는 것으로 사료된다.

**3.2.3 배면파괴한계두께 산정**

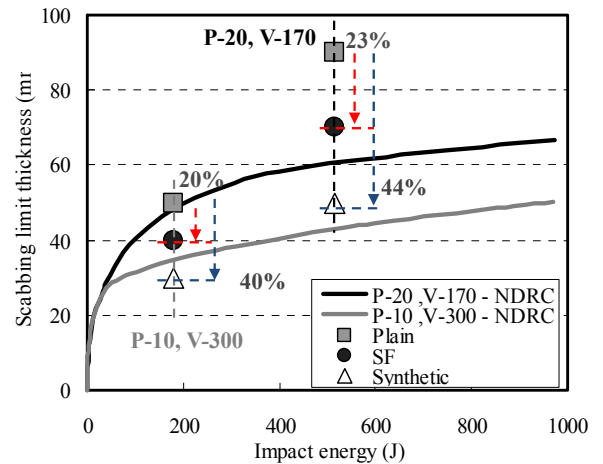
비상체의 시험조건에 따라 표면관입깊이의 평균값을 배면파괴가 발생하지 않는 시험체의 두께로 나누어 산정한 표면관입깊이비를 Table 8에 나타내었다. 비상체 직경 10 mm의 경우 섬유무보강 시험체는 0.22, 강섬유보강 시험체는 0.28, PA섬유보강 시험체는 0.32, NY섬유보강 시험체는 0.36, PE섬유보강 시험체는 0.39의 표면관입깊이비에서 배면파괴가 억제되었으며, 배면파괴한계두께는 섬유무보강 시험체 50 mm, 강섬유보강 시험체 40 mm, 합성섬유보강 시험체는 30 mm로 나타났다. 이를 통해 합성섬유보강 시험체의 경우 강섬유보강 시험체에 비해 표면관입깊이가 진전되어도 배면파괴가 발생하지 않는 것을 확인 할 수 있었다.

비상체 직경 20 mm의 조건에서 섬유무보강 시험체는 본 연구의 시험체 두께에서 모두 배면파괴가 일어났으며, 강섬유보강 시험체는 0.28, PA섬유보강 시험체는 0.32, NY섬유보강 시험체는 0.32, PE섬유보강 시험체는 0.34의 표면관입깊이비에서 배면파괴가 억제되었다. 각 비상체 조건의 배면파괴억제 표면관입깊이비를 비교한 결과, 동일 섬유 혼입에서는 표면관입깊이비가 매우 근사한 것으로

**Table 8** Experiment data by impact condition

Impact condition	ID.	Experiment data			
		P <sub>d</sub> ave. (mm) <sup>1)</sup>	P <sub>d</sub> / T <sup>2)</sup>	T <sub>s</sub> (mm) <sup>3)</sup>	T <sub>b</sub> <sup>4)</sup>
Projectile 10mm	Plain	12.0	0.22	50	1
	SF	10.4	0.28	40	0.8
	PA	10.29	0.32	30	0.6
	NY	10.92	0.36	30	0.6
	PE	11.14	0.39	30	0.6
Projectile 20mm	Plain	18.0	0.22	90	1
	SF	16.8	0.28	70	0.78
	PA	13.87	0.32	50	0.56
	NY	14.30	0.32	50	0.56
	PE	14.07	0.34	50	0.56

<sup>1)</sup>P<sub>d</sub> ave. : Penetration depth average  
<sup>2)</sup>P<sub>d</sub> / T : Penetration depth/specimen thickness,  
<sup>3)</sup>T<sub>s</sub> : Scabbing limit thickness  
<sup>4)</sup>T<sub>b</sub> : Scabbing limit thickness ratio



**Fig. 10** Impact energy by scabbing limit thickness

로 나타났다. 이를 통해 비상체 직경 20 mm의 섬유무보강 시험체의 배면파괴억제 표면관입깊이비도 비상체 직경 10 mm와 동일한 0.22로 예측하였다. 이를 배면파괴한계두께로 환산할 경우 90 mm로 산정되었으며, 강섬유보강 시험체는 70 mm, 합성섬유보강 시험체는 50 mm로 나타났다. 섬유무보강시험체의 배면파괴한계두께를 기준으로 배면파괴한계두께비(T<sub>b</sub>, Scabbing limit thickness ratio)를 산정한 결과 비상체 10 mm에 대해서는 강섬유보강 시험체는 0.8, 합성섬유보강 시험체는 0.6을 나타냈으며, 비상체 20 mm에 대해서는 강섬유보강 시험체는 0.78, 합성섬유보강 시험체는 0.56을 나타냈다.

수정 NDRC식에서 제안하는 충격에너지에 따른 배면파괴한계두께와 본 실험의 섬유보강시험체의 배면파괴한계두께를 Fig. 10에 나타냈으며, 강섬유보강 시험체는 섬유무보강 시험체에 비해 약 20%, 합성섬유보강 시험체는 약 40%의 두께 저감이 가능하였다.

수정 NDRC식에서는 혼입 섬유 영향 고려하지 않고, 압축강도를 통해 표면관입깊이를 예측하고 표면관입 깊이를 통해 배면파괴한계두께를 산정한다. 섬유혼입에 의한 휨·인장성능의 향상효과는 고려되지 않기 때문에 제안하는 값보다 저감되었으며, 수정 NDRC식에서는 섬유혼입에 대한 고려가 필요하다고 판단된다.

### 3.2.4 섬유종류에 따른 파괴상과 파괴계수 분석





배면파괴직경감소율과 배면파괴한계두께비를 통하여 혼입섬유 종류에 따른 파괴계수를 산정한 것을 Fig. 11에 나타내었다. 섬유무보강 시험체를 기준값으로 정하여 섬유혼입에 따른 배면파괴직경감소율과 배면파괴한계두께비의 평균을 통해 파괴계수를 구했으며, 10 mm비상체 조건에서는 강섬유 0.80, PA, NY 및 PE는 0.60으로 산정되었으며, 20 mm비상체 조건에서는 강섬유 0.73, PA 0.57, NY 0.56 및 PE 0.55으로 산정되었다. 합성섬유 3종류에 대해서는 큰 차이가 발생하지 않았지만 PE섬유가 가장 작은 파괴계수를 나타내었다.

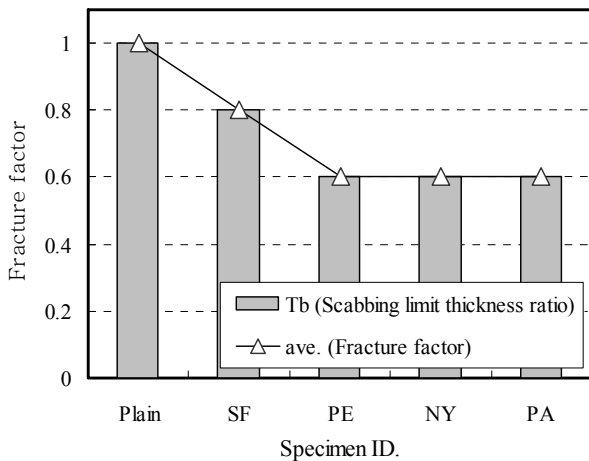
Table 9에 각 혼입섬유의 상세사진, 파괴에너지, 혼입개체수 및 파괴계수를 정리하여 나타내었으며, 섬유의 혼입개체수의 경우 체적의 외할로 계산된다. 강섬유는 밀도가

7,800 kg/m<sup>3</sup>으로 혼입율 2.0Vol.%의 경우 156 kg이지만, 합성섬유의 경우 밀도가 낮으며 섬유자체가 경량이기 때문에 동일 혼입율에서 많은 개체수가 혼입되는 것으로 나타났다.

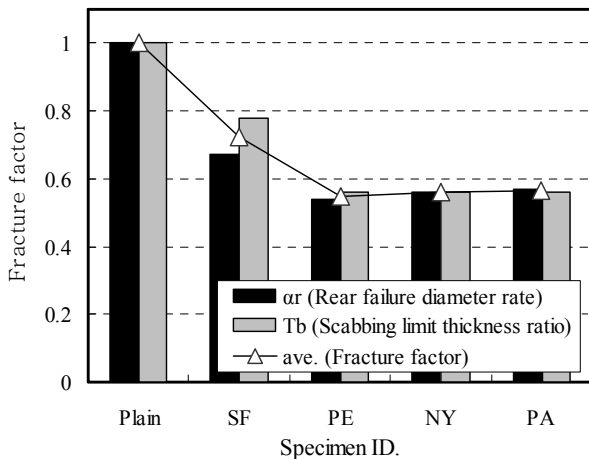
섬유 개체수에 따른 파괴계수 값은 Fig. 12에 나타내었다. PA섬유가 강섬유보다 휨인성은 낮지만, 충격파의 흡수 및 균열억제에 관여하는 섬유의 개체수가 약 2.4배 많기 때문에 파괴계수가 더 낮은 것으로 판단되며, PE섬유의 경우 페이스트와의 부착성능도 우수하지만 개체수 또한 많기 때문에 가장 우수한 배면파괴저감 효과를 나타내는 것으로 사료된다. 이와 같이 섬유의 혼입개체수는 배면파괴억제에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. Fig. 13는 합성섬유 시험체의 파괴에너지에 따른 파괴계수 값을 나타낸 것으로 PA와 NY섬유는 같은 유사한 파괴에너지 값을 가지지만, PE섬유의 경우 약 2.5배 높기 때문에

**Table 9** Experiment data by reinforced fiber

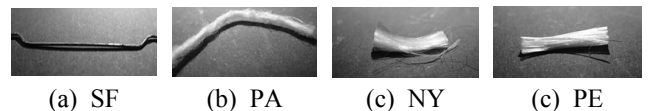
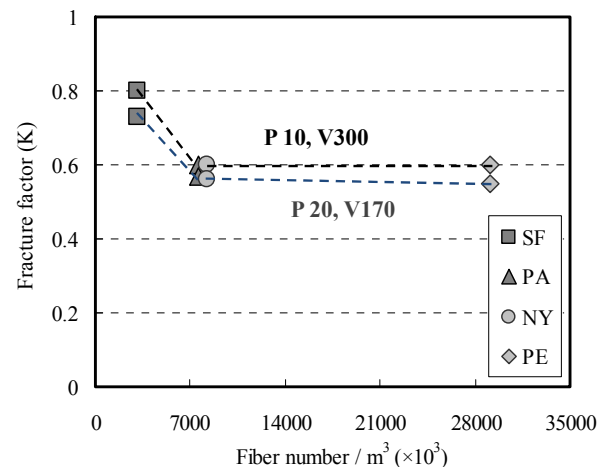
ID.	Fiber image	Projectile diameter (mm)	Fracture energy (N·m/m <sup>2</sup> )	Fiber number/m <sup>3</sup>	Fracture factor (K)
Plain	-	10	142.41	-	1
		20			1
SF		10	23640.91	3,120,000	0.80
		20			0.73
PA		10	6822.25	7,599,992	0.60
		20			0.57
NY		10	7163.23	8,208,772	0.60
		20			0.56
PE		10	25857.16	29,133,000	0.60
		20			0.55



(a) Projectile 10mm



(b) Projectile 20mm



**Fig. 12** Fracture factor by Fiber number

**Fig. 11** Fracture factor by specimen



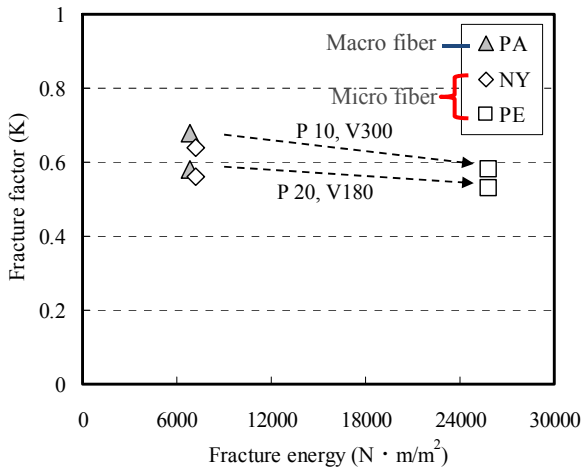


Fig. 13 Fracture factor by Fracture energy

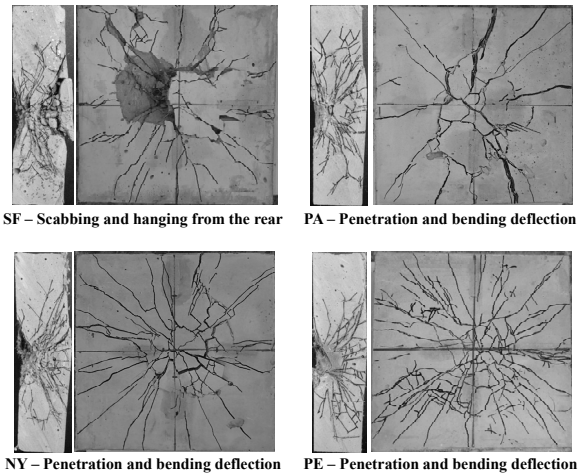


Fig. 15 Cross section failure and rear micro crack

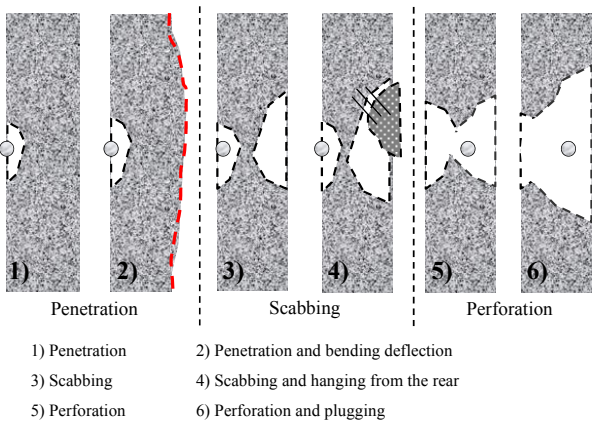


Fig. 14 Cross section failure grade

섬유와 매트릭스간의 부착성능이 PA 및 NY보다 우수한 것으로 판단되며, 이로 인해 PE섬유가 고속 충격에 대한 배면파괴 억제효과가 가장 큰 것으로 사료된다.

강섬유는 섬유와 매트릭스간의 부착성능이 뛰어나 휨인성은 높으나 밀도가 높아 섬유의 혼입개체수가 합성섬유에 비해 상대적으로 적지만, 합성섬유인 PA, NY섬유의 경우 강섬유에 비해 휨인성은 낮으나 섬유의 밀도가 낮기 때문에 동일 혼입율에서의 혼입 개체수가 많아 배면파괴의 억제효과가 큰 것으로 판단된다. 한편, PE섬유의 경우 섬유의 혼입개체수가 많고, 섬유와 매트릭스간의 부착성능도 뛰어나 휨인성 및 고속충격에 의한 배면파괴의 억제효과가 가장 큰 것으로 판단된다.

### 3.2.5 비상체 충격을 받는 시험체의 단면 파괴 패턴

고속 비상체의 충격을 받는 섬유보강 시멘트복합체의 파괴패턴은 크게 표면관입, 배면박리, 관통파괴로 구분되며 Fig. 14에 나타내었다. 표면관입의 경우 단순 표면관입과 배면의 변형이 발생한 경우로 구분할 수 있다. 배면박리 등급은 배면의 박리현상이 일어난 경우, 섬유의 영향으로 인한 들뜸현상으로 구분할 수 있다. 관통파괴는 비상체가 시험체를 관통하는 관통파괴와 Plugging파괴

등 총 6가지로 구분하였다.

섬유보강 시험체의 단면과 배면의 파괴성상은 Fig. 15에 나타내었으며, 강섬유보강 시험체의 경우 배면박리가 발생하였으나, 섬유와 매트릭스간의 부착성능에 의하여 일부 파편이 박리가 억제되어 들뜸현상이 발생하였으며, 배면의 미세균열특성은 나타나지 않았다.

반면, 합성섬유를 보강한 시험체의 경우 합성섬유의 충격과 분산작용으로 인하여 배면에 많은 미세균열이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 미세균열특성은 섬유의 형상비에 큰 영향을 받으며 형상비가 높은 NY와 PE섬유보강 시험체에서 더 많은 미세균열이 나타났다.<sup>15-16)</sup>

## 4. 결 론

본 연구에서는 혼입섬유의 종류에 따른 시멘트복합체의 휨인성 및 고속비상체 충돌에 의한 내충격 성능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 섬유보강 시멘트복합체는 혼입섬유의 가교작용에 의한 응력의 재분배와 균열발생의 억제로 휨인성이 향상되어 표면파괴직경, 배면파괴직경 및 배면박리 깊이 등 파괴저감 효과가 확인되었다. 섬유의 종류에 따라 파괴저감효과가 차이가 발생하였으며, 섬유보강 재료구성에 있어 섬유 종류에 의한 영향도 고려해야 할 것으로 사료된다.
- 2) 섬유보강에 의한 배면파괴 억제로 인하여 강섬유보강 시험체는 약 20%, 합성섬유보강 시험체는 약 40% 배면파괴한계두께의 저감효과가 인정되었다. 섬유보강 시멘트복합체에 의한 방호시설물의 방호두께 저감 또는 동일 방호두께에서는 높은 안전성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 고속비상체 충격을 받는 섬유보강 시멘트복합체의 배면파괴직경 및 배면파괴한계두께의 값을 섬유무보강 시험체를 기준으로 하여 충격파괴한계두께를 경험적으로 비교하는 파괴계수를 도출하였으며, 기

존의 콘크리트재료를 기준으로 섬유보강재료의 설계계수로서 적용가능성을 제시하였다.

- 4) 보강섬유의 종류에 있어서 충격에 대한 파괴저항성은 동일 섬유혼입 용적율에 대하여 섬유개체의 분산밀도가 영향이 있는 것으로 사료된다. 즉, 폴리아미드 및 나일론섬유보강 시멘트복합체의 경우 강섬유보강 시멘트복합체에 비해 휨강도 및 파괴에너지가 낮았으나, 동일 혼입율에서 섬유의 혼입개체수가 많은 유기섬유의 경우 파괴저감효과가 강섬유보다 효과적인 것으로 평가되었다.
- 5) 섬유 종류에 의한 섬유직경의 크기, 단일 및 다발형 등의 요인은 배면파괴두께에 큰 영향은 없으나, 섬유와 페이스트간의 부착관계에 있어서 직경이 큰 것보다 직경이 작은 섬유가, 단섬유보다 다발형의 형태가 매트릭스에 분산밀도를 크게 하여 미세균열이 상대적으로 균등하고 넓게 분포하게 하는 요인으로 사료되었다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구사업 방호·방폭 연구단 (과제번호 : 13건설연구S02)의 연구지원에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Zhang, J, Leung, C. K. Y., and Cheung, Y. N., “Flexural Performance of Layered ECC-Concrete Composite Beam”, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, Issue 11-12, 2001, pp. 483-492.
2. Zhong, L. and Victor C. Li., “Crack Bridging in Fiber Reinforced Cementitious Composites with Slip-Hardening Interfaces”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 45, Issue 5, 1997, pp. 763-787.
3. Yoon, H. D., Choi, W. C., Cho, C. G., and Feo, L., “Attempts to Apply High Performance Fiber-Reinforced Cement Composite(HPFRCC) to Infrastructures in South Korea”, *Composite Structures*, Vol. 109, 2014, pp. 211-233.
4. Victor C, Li. and Mustafa, S., “Durability Properties of Micro-Cracked ECC Containing High Volumes Fly Ash”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, 2009, pp. 1033-1043.
5. Beppu, M., Miwa, K., Ohno, T., and Shiomi, M., “An Experimental Study on the Local Damage of Concrete Plate due to High Velocity Impact of Steel Projectile”, *Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 63, No. 1, 2007, pp. 178-191.
6. Lee, J. Y., Jang, D. S., Kwon, K. Y., and Yoon, Y. S.,

- “Evaluation of Local Damages and Residual Performance of Blast Damaged RC Beams Strengthened with Steel Fiber and FRP Sheet”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 26, No. 5, pp. 627-634.
7. Yoo, D. Y., Min, K. H., Lee, J. Y., and Yoon, Y. S., “Enhancement of Impact Resistance of Layered Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete Beam”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 4, pp. 369-379.
8. Maalej, M., Zhang, S., and LEE, S. C., “High Velocity Impact Resistance of Hybrid-Fiber ECC”, *FraMCO-5*, Vol. 2, pp. 1051-1058.
9. Kesner, K. E., Billington, S., and Douglas, K., “Cyclic Response of Highly Ductile Fiber-Reinforced Cement-Based Composites”, *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 2, pp. 182-190.
10. Fisher, G. and Victoe C, Li, International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) in Structural Applications, E&Fn Spon.
11. Fukuyama, H., Matsuzaki, Y., Sato, Y., Iso, M., and Suwada, H., “Structural Performance of Engineered Cementitious Composite Elements and Hybrid Structures”, *Proceedings of 6<sup>th</sup> ASCCS Conference*, ASCCS-6 Secretarist, pp. 969-976.
12. Yoon, H. D., Kim, S. W., and Jeon, E., “Effects of Fiber Hybrid Conditions on the Tensile Response Characteristics of High Performance Fiber-Reinforced Cement Composites (HPFRCCs)”, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 22, No. 12, pp. 79-86.
13. Shin, K. J. and Jang, K. H., “Flexural Behavior and Cracking Characteristics of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites according to Fine Aggregate Contents”, *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 5, pp. 735-743.
14. Nam, J. S., Kim, H. S., Lee, I. C., Miyauchi, H., and Kim, G. Y., “Evaluation on the Impact Resistant Performance of Fiber Reinforced Concrete by High-Velocity Projectile and Contacted Explosion”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 1, pp. 107-114.
15. Taher, A., Sameer, H., and Toney, C., “Deflection Behavior of Concrete Beams Reinforced with PVA Micro-Fibers”, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, 2010, pp. 2285-2293.
16. Kim, M. H., Kim, J. H., Kim, Y. R., and Kim, Y. D., “An Experimental Study on the Mechanical Properties of HPFRCCs Reinforced with the Micro and Macro Fibers”, *Journal of the Korea Concrete*, Vol. 26, No. 5, pp. 627-634.

---

**요약** 고속 비상체에 의한 충격을 받는 시멘트 복합체는 표면관입, 배면박리 및 관통 등 국부적인 파괴거동을 보이며, 섬유 혼입에 의한 휨인성의 향상으로 인해 배면파괴를 억제할 수 있다. 이에 섬유보강 시멘트 복합체의 내충격 성능에 관한 연구가 진행되고 있으며, 다양한 종류의 섬유보강재가 개발되고 있다. 섬유보강재의 종류에 따라 섬유와 매트릭스의 부착성능, 비표면적, 혼입개체수 등이 다르기 때문에 섬유보강 시멘트 복합체의 역학특성 및 고속 충격에 의한 내충격 성능의 향상에 미치는 효과에 대하여 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 성상 및 물성이 다른 강섬유(Steel fiber), 폴리아미드(Polyamide), 나일론(Nylon) 및 폴리에틸렌(Polyethylene)섬유를 혼입하여 섬유 종류에 따른 휨인성의 향상과 고속 비상체 충돌에 대한 파괴저감효과에 대하여 평가하였다. 그 결과, 혼입섬유의 가교작용에 의한 응력의 재분배 및 균열발생의 억제로 인해 휨인성이 향상되었으며, 고속 충격에 의한 배면파괴를 억제할 수 있었다. 또한, 동일 충격에너지에서의 배면파괴한계두께를 감소시킬 수 있어 방호시설물에 적용할 경우 부재두께의 저감이 가능할 것으로 판단된다. 한편, 강섬유보강 시멘트복합체의 경우 배면박리가 발생하였으나, 섬유와 매트릭스의 부착에 의한 일부 파편의 박리가 억제되었으며, 합성섬유보강 시멘트복합체는 섬유의 혼입개체수가 많아, 고속 충격에 의한 충격파의 상쇄작용 및 에너지 분산에 의한 미세균열이 발생해 배면파괴억제효과가 큰 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 시멘트 복합체, 섬유보강, 휨인성, 배면박리, 섬유개체수, 미세균열