

후크형 강섬유와 폴리비닐알코올 섬유의 혼합 비율과 변형속도에 따른 하이브리드 섬유보강 시멘트복합체의 인장거동

손민재¹, 김규용^{2*}, 이상규³, 김홍섭⁴, 남정수⁵

Tensile Behavior of Hybrid Fiber Reinforced Cement Composite According to the Hooked Steel Fiber and Polyvinyl Alcohol Fiber Blending Ratio and Strain Rate

Min-Jae Son¹, Gyu-Yong Kim^{2*}, Sang-Kyu Lee³, Hong-Seop Kim⁴, Jeong-Soo Nam⁵

Abstract: In this study, the fiber blending ratio and strain rate effect on the tensile behavior of hybrid fiber reinforced cement composite was evaluated. Hooked steel fiber and polyvinyl alcohol fiber were used for reinforcing fiber. The fiber blending ratio of HSF+PVA were 1.5+0.5, 1.0+1.0 and 0.5+1.5vol.%. As a results, the tensile strength, strain capacity and fracture toughness of the hooked steel fiber reinforced cement composites were improved by the increase of the bond strength of the fiber and the matrix according to increase of strain rate. However, the tensile stress sharply decreased after the peak stress because of the decrease in the number of straightened pull-out fibers by micro cracks in the matrix around hooked steel fiber. On the other hand, PVA fiber showed cut-off fracture at strain rate 10^{-6} /s with multiple cracks. However, at the strain rate 10^1 /s, the multiple cracks and strain capacity were decreased because of the pull-out fracture of PVA fiber. The HSF1.5PVA0.5 shown the highest tensile strength because the PVA fiber suppressed the micro cracks in the matrix around the hooked steel fiber and improved the pull-out resistance of hooked steel fiber. Thus, DIF of strain capacity and fracture toughness of HSF1.5PVA were greatly improved. In addition, the synergistic response of fracture toughness was positive because the tensile stress was slowly decreased after the peak stress by improvement of the pull-out resistance of hooked steel fiber at strain rate 10^1 /s

Keywords: Strain rate, Fiber blending ratio, Tensile behavior, Dynamic increase factor, Synergistic response

1. 서 론

콘크리트는 지진, 폭발, 충격 등과 같은 고변형 속도(High strain rate)의 하중에 대하여 취성적으로 파괴되는 특성이 있다 (Islam and Yazdani, 2008). 이러한 콘크리트의 취성적인 파괴 특성을 개선하기 위하여 시멘트계 재료에 단섬유를 혼입한 섬유보강 시멘트계 복합체(Fiber Reinforced Cement Composites, 이하 FRCC)가 개발되었으며, 고성능 섬유보강 시멘트 복합체(High Performance Fiber Reinforced Cement Composite, 이하 HPFRCC)는 준정적 인장하중 하에서 다중 균열과 변형 경화 거

동에 의해 에너지 흡수 능력이 크게 향상된 재료이다.

한편, 섬유의 형태 및 길이, 물리적 특성이 다른 두 종류 이상의 섬유를 혼합한 고성능 하이브리드 섬유보강 시멘트복합체(High Performance-Hybrid Fiber Reinforced Cement Composite, 이하 HP-HFRCC)는 마이크로 균열(micro crack)과 매크로 균열(macro crack)에 대하여 각각의 섬유가 효과적으로 작용하기 때문에 2.0vol.% 이하의 혼입률에서도 우수한 휨 인장강도 및 내구성이 확보된다고 보고되고 있다(Lawler et al., 2003; Kim et al., 2005; Ahmed and Maalej, 2009; Yi and Ha, 2014; Choi et al., 2015).

따라서, 최근에는 HP-HFRCC의 역학 특성을 평가하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. Kim et al.(2011)은 길이가 다른 강섬유를 보강한 시멘트 복합체의 휨시험을 수행하였으며, 장섬유와 단섬유를 혼합하여 보강한 경우 단섬유만 보강한 경우보다 동일 혼입률에서 휨성능이 증가하는 것을 확인하였다. Park et al.(2012)은 강섬유보강 시멘트 복합체의 직접인장시험을 통해 장섬유와 단섬유를 혼합하여 보강할 경우, 장섬유는 초기균열강도, 단섬유는 인장강도 및 변형능력에 큰 영향을 미친다고 보고

¹학생회원, 충남대학교 건축공학과 석사과정

²정회원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사, 교신저자

³정회원, 충남대학교 건축공학과 박사과정

⁴정회원, 충남대학교 건축공학과 BK21 플러스 사업팀, 박사 후 연구원

⁵정회원, 충남대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

*Corresponding author: gyuyongkim@cnu.ac.kr

Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34430, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

하였다. Kim et al.(2009)은 길이가 다른 두 종류의 PVA 섬유를 혼합하여 보강한 시멘트 복합체가 길이가 짧은 PVA 섬유를 단일로 보강한 경우보다 충격하중에 대하여 우수한 에너지 흡수 능력을 나타내었다고 보고하였다. Nam et al.(2017)은 후크형 강섬유와 PVA 섬유를 혼합하여 보강한 시멘트 복합체가 후크형 강섬유 또는 PVA 섬유를 단일로 보강한 시멘트 복합체보다 접촉폭발에 대한 파괴저항능이 더 우수한 것으로 보고하였다.

이와 같이 HP-HFRCC의 역학 특성에 관한 연구는 준정적 하중 조건에서 수행되고 있거나, 충격 및 폭발하중에 대한 파괴저항능에 관한 연구가 대부분이며, 고변형속도 조건에서의 역학 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다. 또한, 고변형속도 조건에서 HPFRCC의 인장거동은 보강 섬유의 종류에 따라 달라지고, HP-HFRCC는 두 종류 이상의 섬유가 혼합되어 보강되기 때문에 보강 섬유의 종류에 따른 인장거동 및 파괴메커니즘에 대한 충분한 검토와 이해가 필요하다.

이에 본 연구에서는 길이가 다른 섬유의 혼합비에 따른 HP-HFRCC의 인장거동에 미치는 변형속도의 효과를 분석하기 위하여, 장섬유로 후크형 강섬유(hooked steel fiber, 이하 HSF), 단섬유로 폴리비닐알코올 섬유(polyvinyl alcohol fiber, 이하 PVA)를 사용하여, 각각 섬유의 혼합비를 조절하여 HP-HFRCC를 제작하였다. 변형속도 $10^{-6}/s$ 와 $10^1/s$ 의 범위에서 제작된 HP-HFRCC의 직접인장시험을 수행하고, 응력-변형 곡선, 인장

강도, 변형능력 및 파괴인성에 대하여 평가하였으며, 변형속도, 섬유종류 및 혼합비에 따른 다중균열 거동과 섬유의 파괴성상 관찰을 통하여 변형속도에 따른 HP-HFRCC의 인장거동 및 파괴 메커니즘에 대하여 분석하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험 계획

Table 1에 시험체의 수준을 나타내었다. 본 연구에서는 장섬유와 단섬유의 하이브리드 보강에 의한 HP-HFRCC의 인장거동에 미치는 변형속도의 영향을 평가하기 위하여 HSF와 PVA를 각각 1.5+0.5, 1.0+1.0, 0.5+1.5vol.%의 비율로 보강하여 HP-HFRCC를 제작하였으며, HSF를 2.0vol.% 단일 보강한 섬유보강 시멘트복합체(High Performance-Mono Fiber Reinforced Cement Composite, 이하 HP-MFRCC)를 추가로 제작하였다.

2.2 사용재료 및 배합

Table 2에 사용재료의 물리적 성질을 나타내었다. 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 섬유의 분산성 향상 효과 및 매트릭스의 유동성을 고려하여 플라이 애쉬를 사용하였다. 잔골재의 경우 매트릭스의 균질성과 섬유의 분산성을 확보

Table 1 Details of specimen

Type ¹⁾	ID. ²⁾	Fiber type	Volume fraction(vol.%)
HP-MFRCC	HSF2.0	Hooked steel fiber	2.0
	HSF1.5PVA0.5	Hooked steel fiber	1.5+0.5
HP-HFRCC	HSF1.0PVA1.0	+	1.0+1.0
	HSF0.5PVA1.5	Polyvinyl alcohol fiber	0.5+1.5

¹⁾HP-MFRCC : High performance mono fiber reinforced cement composite

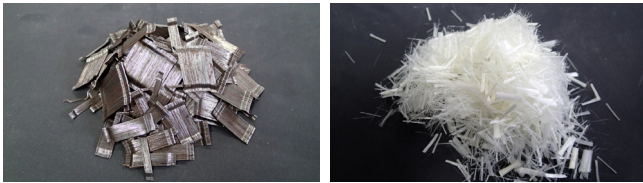
HP-HFRCC : High performance hybrid fiber reinforced cement composite

²⁾HSF : Hooked steel fiber reinforced cement composite

HSFPVA : Hooked steel and polyvinyl alcohol fiber hybrid reinforced cement composite

Table 2 Mechanical properties of the used materials

Materials	Mechanical properties
Cement	Ordinary portland cement, Density : 3.15 g/cm ³ Fineness : 3,200 cm ² /g
Fly-ash	Density : 2.20 g/cm ³ , Fineness : 3,000 cm ² /g
Silica sand	Type 7, Density : 2.64 g/cm ³ , Absorptance : 0.38%
Super plasticizer	Polycarboxylic acid type
Hooked steel fiber(HSF)	Length : 30 mm, Diameter : 0.5 mm Density : 7.85 g/cm ³ , Tensile strength : 1,140 MPa
Polyvinyl alcohol fiber(PVA)	Length : 12 mm, Diameter : 0.0426 mm Density : 1.30 g/cm ³ , Tensile strength : 1,300 MPa



(a) Hooked steel fiber(HSF) (b) Polyvinyl alcohol fiber(PVA)

Fig. 1 Picture of used fiber

Table 3 Mix proportions of HPFRCC

ID.	f_{ck} (MPa)	W/B (%)	Unit weight(kg/m ³)				Fiber (kg)	
			C	FA	W	S		
HSF2.0							157.00	
HSF1.5PVA0.5	60	40	850	150	400	350	117.75	6.50
HSF1.0PVA1.0							78.50	13.00
HSF0.5PVA1.5							39.25	19.50

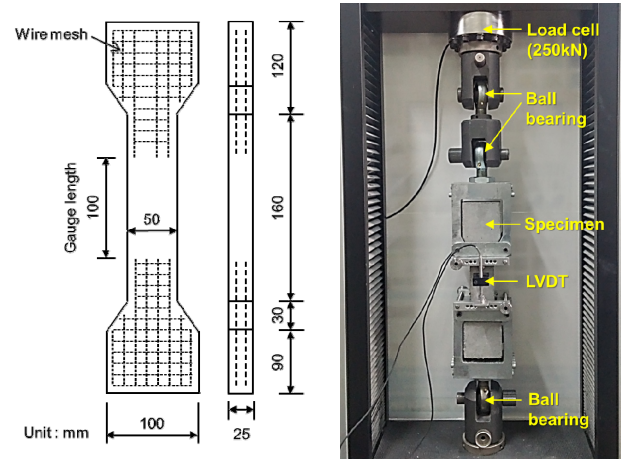
하기 위하여 밀도 2.64 g/cm³, 흡수율 0.38%의 7호 규사를 사용하였다. 또한, 섬유보강에 의한 유동성 저하를 고려하여 폴리카보산계 고성능 감수제를 사용하였다. 사용섬유는 길이 30 mm, 직경 0.5 mm, 밀도 7.85 g/cm³, 인장강도 1140 MPa의 HSF와 길이 12 mm, 직경 0.0426 mm, 밀도 1.30 g/cm³, 인장강도 1300 MPa의 PVA를 사용하였으며, 섬유의 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

Table 3에 HPFRCC의 배합을 나타내었다. W/B는 40%로 설정하였으며, 섬유는 체적의 외할로 혼입하였다. HPFRCC의 비빔은 바인더와 규사를 건비빔한 후 물과 감수제를 투입하여 모르타르를 제작하였다. 그 후 섬유가 고르게 분산되도록 일정량의 섬유를 간격을 두고 투입하였으며, 소정의 유동성을 만족하기 위해 충분한 비빔을 실시하였다. 비빔된 HPFRCC는 몰드에 타설하였으며, HPFRCC로 채워진 몰드는 타설 면을 양생시트로 덮은 후, 항온-항습실에서 1일 간 양생되었으며, 1일 후 모든 시험체는 탈형되어 재령 28일까지 표준수중양생을 실시하였다.

2.3 실험 방법

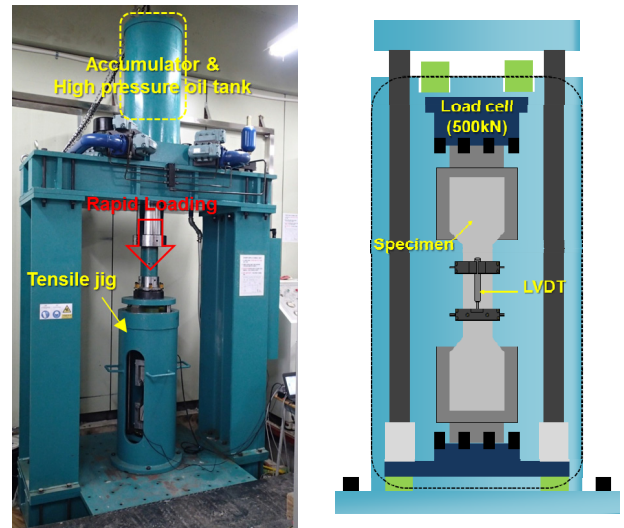
Fig. 2(a)에 본 연구에서 평가된 인장 시험체의 형상을 나타내었다. 시험체는 길이 400 mm, 너비 100 mm, 두께 25 mm이고, 중앙 단면이 25×50 mm로 좁아지는 도그-본 형태로 제작하였으며, 변형측정범위(gauge length) 외에서 시험체가 파괴되는 것을 방지하기 위하여 시험체의 양 끝에 각각 2개의 와이어 메쉬를 보강하였다. 또한 시험체 크기의 영향을 받지 않게 하기 위하여 정적인장시험과 고속인장시험 모두 동일한 크기의 시험체를 사용하였으며, 각 수준당 3~5개의 시험체에 대하여 평가하였다.

정적인장시험은 Fig. 2(b)에 나타난 250 kN급 직접인장 시험장치를 이용하여 실시하였으며, 시험체의 변위는 시험체 좌우에 LVDT 변위계를 설치하여 측정하였다. 재하속도는 1 mm/min



(a) Geometry of tensile specimen (b) Static tensile test set up

Fig. 2 Geometry of tensile specimen and test set up for static test(strain rate : 10⁻⁶/s)



(a) Rapid loading test equipment (b) Geometry of tensile jig

Fig. 3 The rapid loading test equipment(Strain rate : 10¹/s)

로 설정하였고, 평균 변형속도는 10⁻⁶/s로 측정되었다.

Fig. 3(a)에 급속재하 시험장치를 나타내었다. 급속 재하 시험장치는 고압의 유압유를 사용하여 상단에 위치한 질소튜브를 압축시킨 후 유압으로 인해 압축되어 있던 질소튜브가 순식간에 팽창함으로써 발생하는 압력을 급속으로 재하하는 방식이다. 급속으로 재하된 하중은 Fig. 3(b)에 나타난 인장지그를 통하여 시험체에 인장 하중으로 전달된다. 재하속도는 5 m/s로 설정하였고, 평균 변형속도는 10¹/s로 측정되었다. 인장응력은 인장지그의 상부에 설치되어 있는 로드셀로 측정하였으며, 인장변형(%)은 시험체에 부착되어 있는 LVDT에서 측정된 변위(ΔL)와 변형측정범위(L)를 이용하여 산출하였다. 변형속도는 각각의 시험체에서 얻어진 시간(t)과 변형(ϵ)곡선의 기울기로 산정하였다.

Fig. 4에 인장특성의 개요를 나타내었다. 인장특성은 시험에 의해 얻어진 인장응력-변형 곡선의 최대응력 점을 인장강도(σ_{ts}), 최대 인장응력(=인장강도)에서의 변형을 변형능력(δ_{ts}), 그리고 시험체가 파괴될 때까지의 인장응력-변형곡선의 아래 면적을 파괴인성(T_f)으로 설정하였다.

또한, 본 연구에서는 HSF와 PVA의 하이브리드에 의한 인장특성을 분석하기 위하여 시너지 효과(synergistic response)를 도출하였다. 시너지 효과는 HP-MFRCC의 인장특성에 대한 HP-HFRCC의 인장특성의 향상 또는 감소 효과를 정량적으로 나타내는 지표이며, 시너지 효과의 값이 양(+)일 경우, 하이브리드에 의해 인장특성이 향상되었다고 판단할 수 있다. 다음 식(1)에 시너지 효과의 산출 식을 나타내었다(Tran and Kim, 2017).

$$S = \frac{R_{hybrid, a+b}^{(V_f)} - \max(R_{mono, a}^{(V_f)}, R_{mono, b}^{(V_f)})}{\max(R_{mono, a}^{(V_f)}, R_{mono, b}^{(V_f)})} \quad (1)$$

여기서, $R_{hybrid, a+b}$ 는 a와 b 섬유를 혼합하여 보강한 HP-HFRCC의 인장특성, $R_{mono, a}$ 는 a 섬유를 보강한 HP-MFRCC의 인장특성, $R_{mono, b}$ 는 b 섬유를 보강한 HP-MFRCC의 인장특성이며, $R_{hybrid, a+b}$, $R_{mono, a}$, $R_{mono, b}$ 는 모두 동일한 혼합률(V_f)을 기준으로 한다. 본 연구에서 HP-MFRCC는 HSF를 2.0vol.%로 단일 보강한 시험체만 평가하였기 때문에, $R_{mono, a}$ 에 대해서만 고려하였다.

한편, 섬유 혼합비에 따른 HFRCC의 인장특성에 미치는 변형속도의 효과를 평가하기 위하여 각각의 인장특성에 대하여 동적증가계수(Dynamic increase factor, 이하 DIF)를 산출하였다. DIF는 변형속도 $10^1/s$ 에서 측정된 인장특성의 값을 변형속도 $10^{-6}/s$ 에서 측정된 인장특성 값으로 나누어 산출하였다.

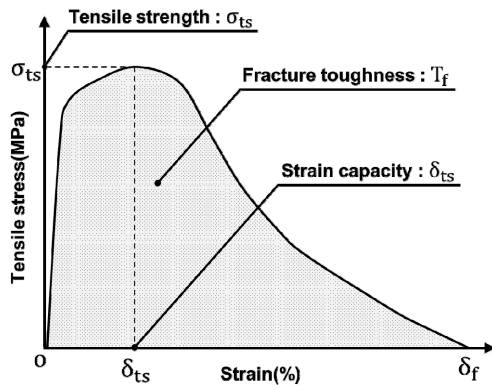


Fig. 4 Summary of tensile properties

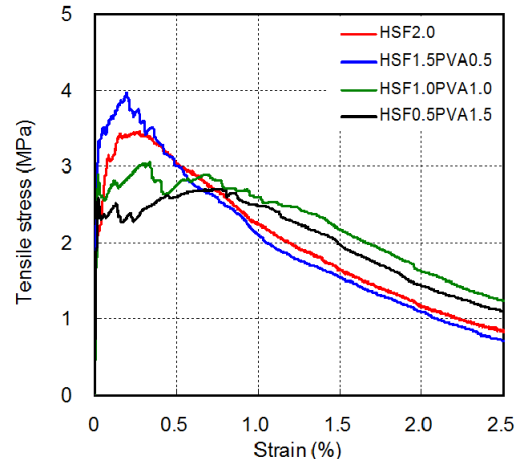
3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장응력-변형 곡선 및 파괴성상

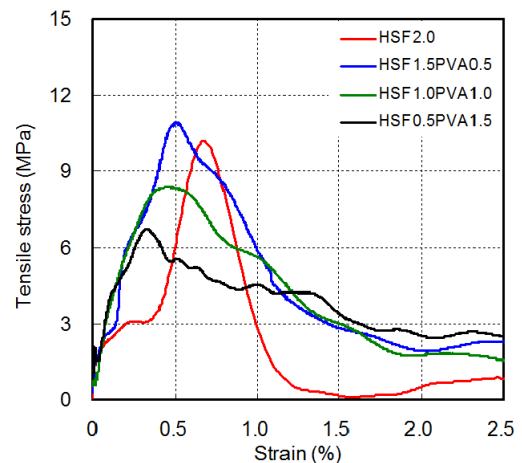
Fig. 5에 변형속도($10^{-6}/s$, $10^1/s$)에 따른 HFRCC의 인장응력-변형 곡선, Fig. 6에 인장 시험에 의한 시험체의 다중 균열 거동, Table 4에 변형속도에 따른 인장특성을 나타내었다.

HSF2.0은 변형속도 $10^{-6}/s$ 에서 초기균열이 발생한 후 HSF와 매트릭스의 가교작용(bridging effect)으로 인하여 다중균열을 동반한 변형경화거동이 나타났으며, 인장강도 점 이후 변형연화 구간에서 섬유가 매트릭스로부터 직선형으로 인발되는 파괴거동이 관찰되었다.

변형속도 $10^1/s$ 에서는 변형속도가 증가함에 따라 섬유와 매트릭스 사이의 부착력이 향상되어 인장강도 및 변형능력이 모두 증가하였으나, 다중균열의 개수가 증가하는 경향은 나타나지 않았다. 한편, 변형속도가 증가함에 따라 HSF 주변의 매트릭스에서 발생하는 마이크로 균열이 증가하여 직선형으로 인발되는 섬유



(a) Strain rate $10^{-6}/s$



(b) Strain rate $10^1/s$

Fig. 5 Tensile stress versus strain curve by strain rate

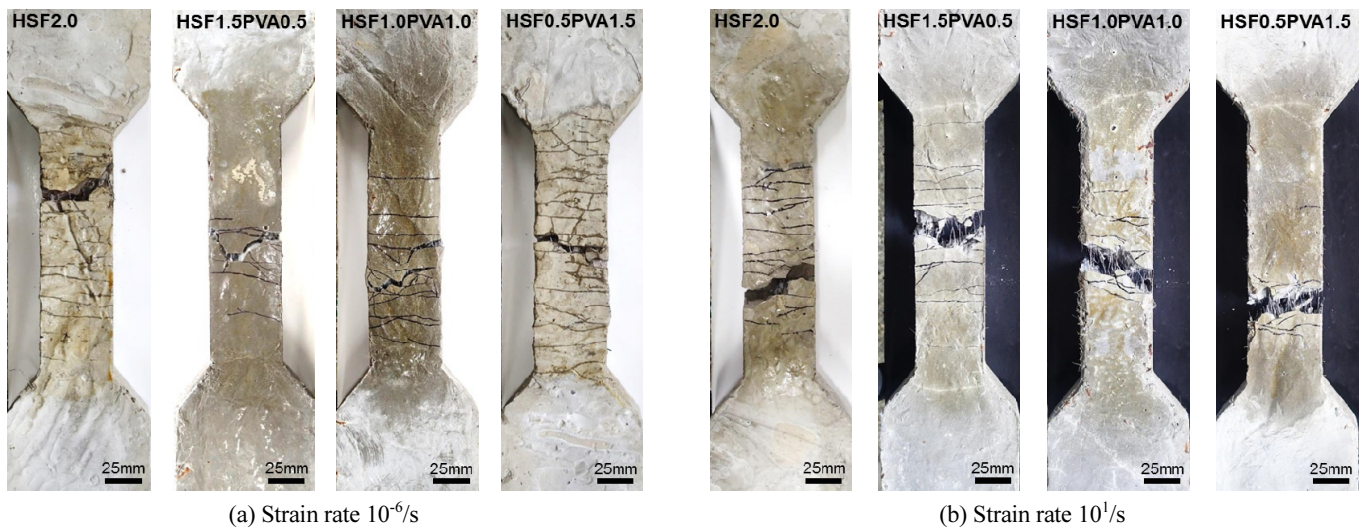


Fig. 6 Multiple micro-cracking behavior of HPFRCC

Table 4 Tensile properties of HPFRCC

ID.	Strain rate	Tensile strength		Strain capacity		Fracture toughness	
	/s	MPa	DIF	%	DIF	N·m	DIF
HSF2.0	10^{-6}	3.50	—	0.33	—	8.22	—
	10^1	10.17	2.90	0.67	1.94	12.73	1.52
HSF1.5PVA0.5	10^{-6}	3.86	—	0.27	—	9.08	—
	10^1	11.13	2.89	0.56	2.06	17.98	1.99
HSF1.0PVA1.0	10^{-6}	3.07	—	0.44	—	9.25	—
	10^1	8.65	2.82	0.40	0.90	15.88	1.73
HSF0.5PVA1.5	10^{-6}	2.71	—	0.60	—	8.41	—
	10^1	7.24	2.68	0.32	0.54	14.61	1.74

유의 수가 감소하기 때문에, 인장강도 이후의 응력저하가 급격하게 발생하는 것으로 판단된다.

HSF1.5PVA0.5는 변형속도 $10^{-6}/s$ 에서 초기균열발생 이후 변형경화거동이 발생하였으며, PVA가 HSF의 주변 매트릭스에 분포되어 있어, HSF와 매트릭스의 부착력이 향상되기 때문에 HSF2.0에 비해 인장강도가 향상되었다. 그러나 HSF의 혼입률이 감소하고, PVA의 섬유 혼입률이 0.5vol.%로 낮기 때문에 다중균열의 개수가 감소하는 거동이 나타났으며, 이로 인해 변형능력이 감소한 것으로 판단된다. 한편, 인장파괴단면에서 PVA는 매트릭스로부터 인발되지 않고 파단되는 거동이 관찰되었다.

변형속도 $10^1/s$ 에서는 섬유와 매트릭스의 부착력이 향상되어 인장강도, 변형능력 및 균열개수가 증가하였다. 또한 매트릭스에 분포되어 있는 PVA가 HSF의 주변 매트릭스에 발생하는 마이크로 균열을 억제하기 때문에 직선형으로 인발되는 HSF의 수가 HSF2.0에 비해 증가하였기 때문에 인장강도 이후의 응력저하가 감소한 것으로 판단된다.

HSF1.0PVA1.0 및 HSF0.5PVA1.5의 경우, 변형속도 $10^{-6}/s$ 에서 HSF2.0에 비해 HSF의 혼입률이 감소하기 때문에 인장강도는 감소하였으나, PVA의 섬유 혼입률이 1.0vol.% 이상으로 증가함에 따라 매트릭스 내부에 분포하고 있는 섬유의 혼입개체 수가 증가하였으며, 이로 인한 응력의 분산에 의해 다중균열의 개수와 변형능력이 증가하는 경향이 나타났다.

변형속도 $10^1/s$ 에서는 섬유와 매트릭스의 부착력이 향상되어 인장강도는 증가하였으나, 변형속도 $10^{-6}/s$ 에 비해 다중균열 개수 및 변형능력이 감소한 것으로 확인되었다. 이는 변형속도가 증가함에 따라 PVA가 파단되지 않고, 매트릭스로부터 인발되는 파괴거동을 나타내어 다중균열의 개수가 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 섬유 혼합비에 따른 인장특성 시너지 효과

Fig. 7에 섬유 혼합비에 따른 HP-HFRCC의 인장강도, 변형능력 및 파괴인성의 시너지 효과를 나타내었다. 변형속도 $10^{-6}/s$ 에서

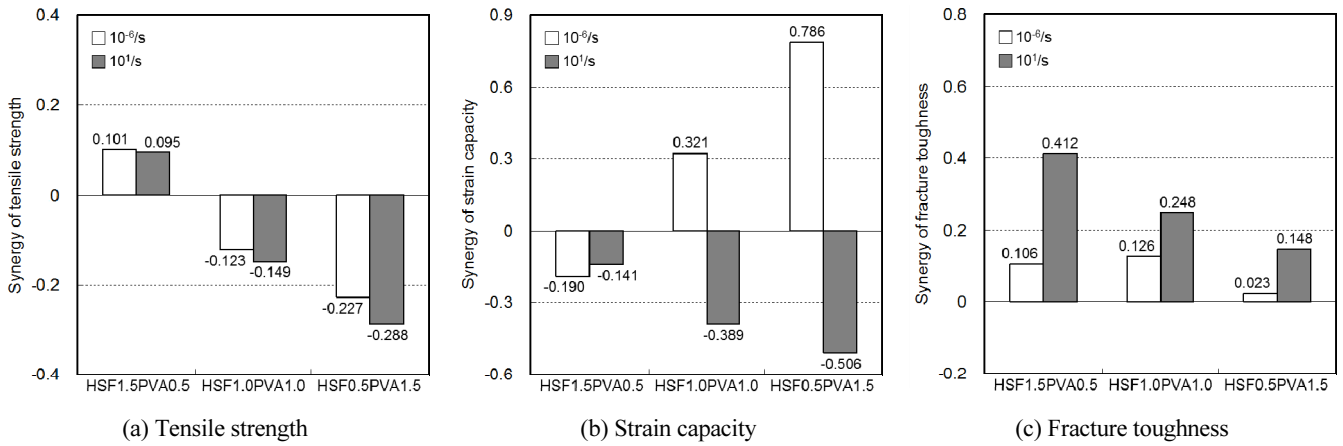


Fig. 7 Synergistic response of tensile properties by fiber blending ratio

HSF1.5PVA0.5는 초기균열발생 이후 경화초기단계에서 PVA가 HSF와 함께 가교작용을 하고, HSF의 주변 매트릭스에 발생하는 마이크로 균열을 억제하여 HSF의 인발저항능력이 향상되었기 때문에 인장강도의 시너지는 양의 값을 나타내었다. 한편, HSF1.0PVA1.0과 HSF0.5PVA1.5의 인장강도 시너지는 음의 값을 나타내었으며, HSF의 혼입률이 감소할수록 시너지가 감소하는 경향을 나타내었다.

변형속도 10¹/s에서 HSF1.5PVA0.5의 인장강도 시너지는 양의 값을, HSF1.0PVA1.0과 HSF0.5PVA1.5는 음의 값을 나타내었으며, 섬유 혼입비에 따른 인장강도 시너지의 경향은 변형속도 10⁻⁶/s와 유사한 것으로 확인되었다.

변형능력 시너지 효과의 경우, 변형속도 10⁻⁶/s에서 HSF1.5PVA0.5는 음의 값을 나타내었으며, 이는 HSF의 혼입률 감소와 PVA의 낮은 혼입률에 의해 시멘트 복합체의 다중균열 개수가 감소하였기 때문인 것으로 사료된다. 한편, HSF1.0PVA1.0과 HSF0.5PVA1.5의 변형능력 시너지는 양의 값을 나타내었으며, PVA의 혼입률이 증가할수록 매트릭스 내부의 섬유 혼입개체수가 증가하여 다중균열유도 성능이 향상되기 때문에 변형능력 시너지가 증가하였다. 그러나 변형속도 10¹/s에서 HP-HFRCC의 변형능력 시너지는 모두 음의 값을 나타내었으며, HSF의 혼입률이 감소하고, PVA의 혼입률이 증가할수록 변형능력 시너지가 감소하는 경향을 나타내었다.

이러한 원인은 변형속도 10⁻⁶/s에서 PVA는 섬유와 매트릭스의 부착력이 섬유의 인장강도 보다 높기 때문에 마이크로 균열에 대하여 가교작용을 하며 다중균열거동을 나타낸 후 섬유가 파단되었으나, 변형속도가 10¹/s로 증가함에 따라 섬유의 인장강도가 섬유와 매트릭스의 부착력보다 더 크게 향상되어 다중균열거동을 나타내지 못하고 섬유가 인발되었으며, 이로 인해 변형능력 시너지가 감소한 것으로 판단된다.

변형속도 10⁻⁶/s에서 HP-HFRCC의 파괴인성 시너지는 모두 양

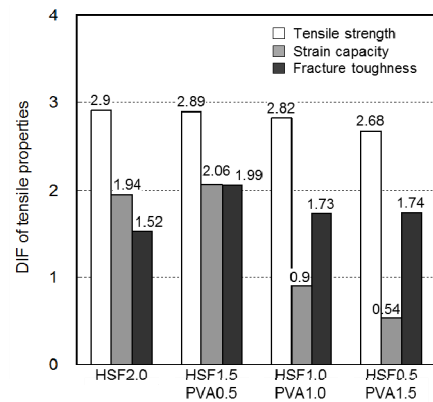


Fig. 8 Strain rate effect on tensile properties of HPFRCC

의 값을 나타내었으며, 이는 PVA가 마이크로 균열의 확장을 억제하고, HSF가 매크로 균열의 확장을 억제하는 가교작용을 하였기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 변형속도 10¹/s에서 HSF1.5PVA0.5는 가장 높은 파괴인성 시너지를 나타내었으며, 이는 PVA의 혼입으로 인해 HSF 주변 매트릭스의 마이크로 균열이 억제되어 직선형으로 인발되는 HSF의 수가 증가하는 파괴거동과 변형속도의 증가에 따른 PVA의 인발거동이 복합적으로 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 한편, HSF1.0 PVA1.0 및 HSF0.5PVA1.5의 파괴인성 시너지는 HSF의 혼입률이 감소하고 PVA의 혼입률이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.

3.3 인장특성에 미치는 변형속도의 영향

Fig. 8에 섬유 혼입비에 따른 HPFRCC의 인장특성에 미치는 변형속도의 효과를 나타내었다. 인장강도 DIF의 경우 HSF2.0에서 가장 높았으며, HSF0.5PVA1.5에서 가장 낮게 산출되었다. 이는 PVA는 섬유와 매트릭스의 부착력에 의해 인장강도가 향상되지만, HSF는 섬유와 매트릭스의 부착력 및 섬유의 변형

된 단부와 매트릭스의 기계적 결합(mechanical bonding)이 복합적으로 작용하기 때문에 HSF의 혼입률이 많을수록 인장강도의 변형속도 민감도가 더 높은 것으로 판단된다.

변형능력 DIF에서, HSF와 PVA를 혼합하여 보강하는 경우, PVA가 HSF 주변의 매트릭스에서 발생하는 마이크로 균열을 억제하여 HSF의 인발저항성을 향상시키기 때문에, HSF1.5PVA0.5가 HSF2.0보다 변형능력의 변형속도 민감도가 더 높게 나타났다. 한편, HSF0.5PVA1.5는 가장 낮은 변형능력 DIF을 나타내었으며, 이는 변형속도 민감도가 높은 HSF의 혼입률이 가장 낮기 때문인 것으로 판단된다.

파괴인성 DIF은 HSF2.0이 가장 작고, HSF1.5PVA0.5는 가장 크게 나타났다. HSF1.5PVA0.5의 경우, PVA가 HSF 주변 매트릭스의 마이크로 균열을 억제하기 때문인 것으로 판단된다. 한편, HSF1.0PVA1.0과 HSF0.5PVA1.5는 HSF1.5PVA0.5보다 파괴인성의 변형속도 민감도가 크지 않은 것으로 확인되었으며, 이는 파괴인성 향상에 큰 영향을 미치는 HSF의 혼입률이 감소했기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 후크형 강섬유와 폴리비닐알코올 섬유의 혼합 비율과 변형속도에 따른 하이브리드 섬유보강 시멘트복합체의 인장거동에 대하여 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 변형속도는 섬유보강 시멘트복합체의 매트릭스와 후크형 강섬유의 부착 및 인발거동에 큰 영향을 주었으며, 변형속도가 증가할수록 섬유 주변 매트릭스의 균열에 의해 섬유의 굴곡이 유지된 상태로 인발되는 파괴거동이 확인되었다.
- 2) PVA 섬유는 변형속도 $10^{-6}/s$ 에서는 섬유가 끊어지는 파괴거동을 보였지만, 변형속도가 $10^{-1}/s$ 로 증가함에 따라 섬유의 인장강도가 섬유와 매트릭스의 부착력 보다 크게 되어 섬유가 인발되는 파괴거동을 나타내었다.
- 3) 후크형 강섬유 1.5vol.%와 PVA 섬유 0.5vol.%를 혼합하여 보강한 시험체(HSF1.5PVA0.5)는 PVA 섬유의 응력분산효과와 후크형 강섬유 주변 매트릭스의 마이크로 균열 억제에 의한 인발저항성으로 인장강도, 파괴인성이 향상되는 시너지 효과가 확인되었다.
- 4) PVA 섬유를 0.5vol.% 혼입한 경우, 후크형 강섬유 주변 매트릭스에서 발생하는 균열을 억제함으로써 후크형 강섬유의 인발저항성을 향상시키기 때문에, 후크형 강섬유를 단일 보강한 시험체보다 변형능력 및 파괴인성의 변형속도 민감도가 더 높은 것으로 판단된다.
- 5) 본 연구에서의 결과를 바탕으로, 향후 연구는 변형속도가 마

이크로 섬유의 종류에 따른 하이브리드 섬유보강 시멘트복합체의 인장거동에 미치는 영향을 포함해야 할 것으로 사료되며, 추가적으로 마이크로 섬유가 매크로 섬유의 인발거동에 미치는 영향이 분석되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2015R1A2A2A01007705).

References

Ahmed, S. F. U. and Maalej, M. (2009), Tensile strain hardening behaviour of hybrid steel-polyethylene fibre reinforced cementitious composites, *Construction and Building Materials*, 23, 96-106.

Choi, J. I., Koh, K. T., and Lee, B. Y. (2015), Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete According to Combination of Fibers, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(4), 49-56

Islam, A. K. M. A. and Yazdani, N. (2008), Performance of AASHTO girder bridges under blast loading, *Engineering Structures*, 30(7), 1922-1937.

Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S., and Koh, K. T. (2011), Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers, *Construction and Building Materials*, 25, 4144- 4155.

Kim, N. W., Choi, G. B., Kim, H. S., and Bae, J. S. (2005), A Study on the Fatigue behavior of Hybrid Fiber Reinforced High Strength Concrete, *Journal of the Korea institute for Structural Maintenance Inspection*, 9(1), 127-134.

Kim, Y. W., Min, K. H., Yang, J. M., and Yoon, Y. S. (2009), Flexural and Impact Resisting Performance of HSPFRCCs Using Hybrid PVA Fibers, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 21(6), 705-712.

Lawler, J. S., Wilhelm, T., Zampini, D., and Shah, S. P. (2003), Fracture processes of hybrid fiber-reinforced mortar, *Materials and Structures*, 36, 197-208.

Nam, J. S., Kim, H. S., and Kim, G. Y. (2017), Experimental Investigation on the Blast Resistance of Fiber-Reinforced Cementitious Composite Panels Subjected to Contact Explosions, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(1), 29-43.

Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S., and Koh, K. T. (2012), Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete, *Cement & Concrete Composites*, 34, 172-184.

Tran, T. K. and Kim, D. J. (2017), Synergistic response of blending fibers in ultra-high-performance concrete under high rate tensile loads, *Cement and Concrete Composites*, 78, 132-145.

Yi, D. R. and Ha, G. J. (2014), Improvement of Structural Performance of RC Beams retrofitted Hybrid Fiber using Recycled Coarse

요 지 : 본 연구에서는 후크형 강섬유와 PVA 섬유 혼합비에 따른 하이브리드 섬유보강 시멘트 복합체의 인장거동에 미치는 변형속도의 효과에 대하여 평가하기 위하여, 후크형 강섬유와 PVA 섬유를 각각 1.5+0.5, 1.0+1.0, 0.5+1.0vol.%의 혼합비로 보강한 하이브리드 섬유보강 시멘트 복합체를 제작하였다. 그 결과, 후크형 강섬유보강 시멘트 복합체는 변형속도가 증가함에 따라 섬유와 매트릭스의 부착력이 향상되어 인장강도, 변형능력 및 파괴인성이 크게 향상되었으며, 후크형 강섬유 주변의 매트릭스에 발생하는 마이크로 균열에 의해 직선형으로 인발되는 섬유의 수가 감소하고, 인장강도 점 이후의 응력 저하가 급격하게 발생하였다. 한편, PVA 섬유는 변형속도 10^{-6} /s에서는 끊어지는 파괴거동이 나타났으나, 변형속도 10^1 /s에서는 변형속도가 증가함에 따라 섬유가 인발되는 파괴거동에 의해 다중균열 개수 및 변형능력이 감소하였다. 후크형 강섬유 1.5vol.%, PVA 섬유 0.5vol.%를 혼입한 시험체(HSF1.5PVA0.5)는 PVA가 후크형 강섬유의 주변 매트릭스에 발생하는 마이크로 균열을 억제하여 후크형 강섬유의 인발저항성능을 향상시키기 때문에 가장 높은 인장강도를 나타내었으며, 변형능력 및 파괴인성의 DIF가 크게 향상되었다. 또한, 변형속도 10^1 /s에서는 후크형 강섬유의 인발저항성능의 증가로 인하여 직선형으로 인발되는 섬유의 수가 증가하기 때문에 인장강도 점 이후의 응력 저하가 감소하여 파괴인성의 시너지는 양의 값을 나타내었다.

핵심용어 : 변형속도, 섬유 혼합비, 인장거동, 동적증가계수, 시너지 효과
