

하이브리드 합성섬유를 이용한 고인성 섬유보강 복합체의 휨특성

Flexural Characteristics of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites used in Hybrid Synthetic Fibers

한 병 찬*	전 에스더**	박 완 신***
Han, Byung-Chan	Jeon, Esther	Park, Wan-Shin
이 영 석****	福山洋*****	윤 현 도*****
Lee, Young-Seak	Hiroshi, Fukuyama	Yun, Hyun-Do

ABSTRACT

The synthetic fibers such as polypropylene(PP) and polyvinyl-alcohol(PVA) fiber are poised as a low cost alternative for reinforcement in structural applications. It has been reported that synthetic fiber in cement composites can control restrained tensile stresses and cracks and increase toughness, resistance to impact, corrosion, fatigue and durability. High performance fiber reinforced cementitious composite(HPFRCCs) shows ultra high ductile behavior in the hardened state, because of the fiber bridging properties. Therefore, a variety of experiments have being performed to access the performance of HPFRCCs recently. The research emphasis is on the flexural behavior of HPFRCCs made in synthetic fibers, and how this affects the composite property, and ultimately its strain-hardening performance. Three-point bending tests on HPFRCCs are carried out. As the result of the bending tests, HPFRCCs showed high flexural strength and ductility. HPFRCCs made in PVA or Hybrid fiber were, also, superior to PP of singleness. On the other hand, effect of sand volume fraction on HPFRCCs made in PP was insignificant.

1. 서론

최근 강섬유, 유리섬유, 탄소섬유, 나일론, 폴리프로필렌, 폴리에틸렌 등의 유·무기계 섬유를 시멘트 매트릭스에 혼입함으로써 일반 콘크리트의 취성적 성질을 개선시킨 섬유보강 콘크리트의 개발 및 사용이 증대되고 있다. 특히 시멘트 체적비 2~3%의 섬유를 투입하여 변형경화 특성 및 3%이상의 인장 변형능력을 갖는 고인성 섬유보강 시멘트 복합체(High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, 이하 HPFRCCs)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁾. HPFRCCs는 인장응력 및 휨모멘트 작용 하에 다수의 미세균열(multiple crack)을 발생시키고, 섬유의 가교작용에 의해 균열발생 후에도 변형의 증대에 따라 응력이 증가는 변형경화특성을 가지며, 큰 인장 변형능력을 가짐으로써 구조물의 구조성능을 크게 향상시킬 수 있으며, 인장부재로의 활용 및 에너지 흡수재, 보수 및 보강재 등 다양한 분야에서의 적용이 가능하다고 판단된다. 이에 본 연구에서는 구조 성능이 우수한 HPFRCCs를 개발하기 위한 기초연구로서 합성 섬유의 종류 및 잔골재용적비에 따른 HPFRCCs의 휨 거동 특성을 실험적으로 검토하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

섬유종류 및 잔골재용적비에 따른 HPFRCCs의 압축 및 휨 등의 역학적 특성을 비교·검토하기 위한 실험계획 및 배합은 표 1과 같다. 합성섬유 종류의 영향을 검토하기 위해 단일섬유로서 폴리프로필렌(이하 PP) PP(50) 및 폴리비닐 알콜(이하 PVA) PVA(100), PVA(200)의 3수준을 설정하였고, 마이크로와

* 정회원, 충남대 건축공학과 강사, 공학박사

** 정회원, 충남대 대학원 석사과정

*** 정회원, 충남대 대학원 박사과정

**** 정회원, 순천대학교 화학공학과 교수, 공학박사

***** 정회원, 일본건축연구소 건축생산그룹 특별연구원, 공학박사

***** 정회원, 충남대 건축공학과 교수, 공학박사

본 연구는 건설교통부 2003년 건설핵심기술연구개발사업 연구비 지원(과제번호 03산학연A10-01)에 의한 연구의 일부임

매크로 섬유 혼입효과를 검토하기 위해 각각의 단일섬유에 매크로 섬유인 PVA660을 치환하였으며, 또한 PP를 사용한 경우에 있어서 잔골재용적비(이하, S/M)의 영향을 검토하기 위해 S/M을 0.20, 0.25, 0.30의 3수준으로 변화시켰다. 시멘트 매트릭스 재료의 물리적 성질은 표 2에 나타난 바와 같이 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트, 잔골재는 밀도 2.64g/cm³, 입경 0.1~0.3mm의 규사를 사용하였으며, 혼화재료로서는 분말도 3,230cm²/g의 보령산 플라이애시와 폴리카르본산계 고성능감수제를 사용하였다. 또한 본 실험에서 사용한 섬유의 물리적 성질 및 형상은 표 3과 사진 1에 나타난 바와 같다. 비빔은 용량 30ℓ의 옴니믹서를 사용하여 시멘트, 플라이애시 및 규사를 투입한 후 30초간 건비빔을 실시하고 물과 고성능감수제를 첨가하여 60초간 비빔을 실시하였으며 소정의 유동성을 확보한 후 섬유를 혼입하여 150초간 비빔하였다. 또한 비빔이 완료된 FPFRCs는 $\phi 100 \times 200$ mm의 원형 몰드와 100×50×400mm의 각형 몰드에 타설하여 온도 20℃, 습도 60%의 대기에 24시간 존치한 후 탈형하여 7일간 40±5℃에서 고온수중양생을 실시하였다. 시험방법은 FPFRCs의 압축성상을 검토하기 위하여 KS F 2405에 준하여 압축강도 실험을 실시하였으며, 그림 1과 같이 KS F 2408에 준하여 3등분점 재하시험을 실시하고 거동특성, 휨강도 및 인성(에너지 흡수능력) 등을 산출하였다.

Table 1 Experimental programs and mix proportion of FPFRCs

Specimen	W/B (wt.)	Volume fraction of fiber(vol.%)					S/M ¹⁾ (Vol.)	FA/B (wt.)	Unit weight(kg/m ³)				Note
		PP(50)	PVA(100)	PVA(200)	PVA(660)	Total			C	W	FA	S	
No-1	0.40	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.25	0.20	963	770	193	607	PP(50)
No-2		0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.25		963	770	193	607	PVA(100)
No-3		0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.25		963	770	193	607	PVA(200)
No-4		2.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.25		963	770	193	607	PP(50)+PVA(660)
No-5		0.0	2.0	0.0	1.0	1.0	0.25		963	770	193	607	PVA(100)+PVA(660)
No-6		0.0	0.0	2.0	1.0	1.0	0.25		963	770	193	607	PVA(200)+PVA(660)
No-7		3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.20		1024	819	205	486	PP(50)-S(0.20)
No-8		3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.30		901	721	180	729	PP(50)-S(0.30)

Note 1) S/M : Sand volume fraction to mortar

Table 2 Physical properties of used materials

Cement	Type I ordinary portland cement Density : 3.17g/cm ³ , Fineness : 3,230cm ² /g
Sand	Silica sand, Density : 2.64g/cm ³ , Grade : 0.1~0.3mm
Fly-ash	Density : 2.13g/cm ³ , Fineness : 2,976cm ² /g
S · P	Polycarboxylate

Table 3 Physical properties of synthetic fibers

Fiber name	Diameter (μm)	Length (mm)	Tensile strength(MPa)	Elastic modulus (Gpa)	Density (g/cm ³)
PP(50)	50	15	600	5.0	0.90
PVA(100)	100	12	1,100	120.0	1.30
PVA(200)	200	12	910	30.4	1.30
PVA(660)	660	30	880	29.4	1.30

Note PP:Polypropylene fiber, PVA:Polyvinyl Alcohol fiber

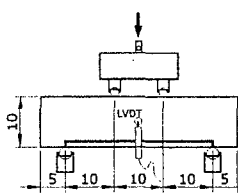
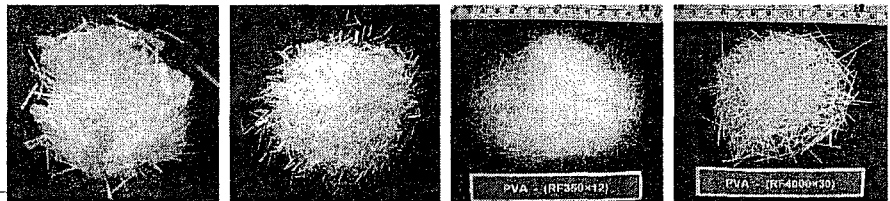


Fig. 1 Schematics of bending test



(a) PP(50)

(b) PVA(100)

Photo 1 Shape of synthetic fiber

(c) PVA(200)

(d) PVA(660)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 압축 성상

그림 2는 섬유종류 및 S/M에 따른 HPRCCs의 압축강도를 나타낸 것으로서, 단일 섬유를 사용한 경우에 있어서는 PVA를 사용한 경우가 PP보다 상대적으로 높게 나타났으며, 하이브리드섬유를 사용한 경우에 있어서도 PP보다 PVA의 경우가 다소 높은 압축강도를 나타냈는데, 이는 친수성인 PVA가 소수성인 PP에 비해 매트릭스와의 부착강도가 높아 시험체에 대한 횡적 구속력이 상대적으로 강하기 때문이라고 판단되었다. 또한 단일섬유와 하이브리드섬유 두 경우를 비교해보면, 하이브리드에 의한 압축강도상의

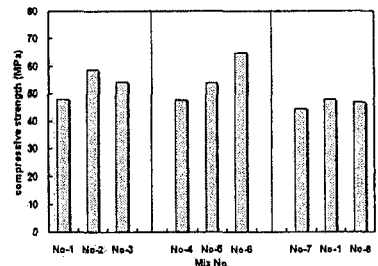


Fig. 2 Compressive strength of FPFRCs

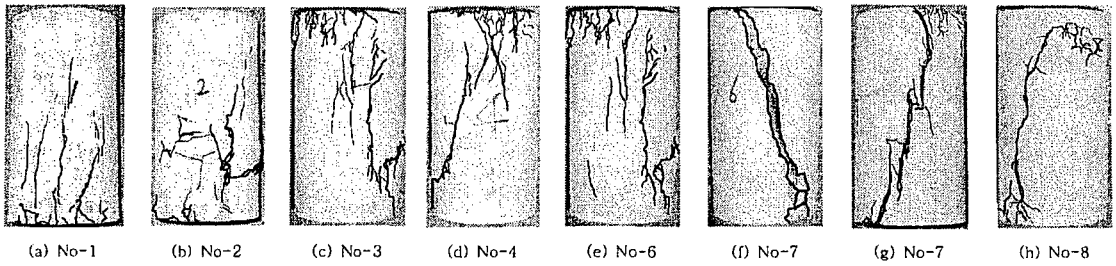


Photo 2 Crack pattern of HPRCCs under compressive load

유의할만한 경향은 확인되지 않았지만 PVA(200)+PVA(660)의 경우 하이브리드에 의해 압축강도가 현저히 증가하였으며 사진 2(f)에 나타낸 바와 같이 취성적 파괴성상을 나타냈다. S/M의 변화에 따른 압축강도는 0.20, 0.25, 0.30 세 수준 모두 유사한 경향을 나타냈다.

3.2 휨 거동 특성

그림. 3은 단일섬유 종류에 따른 휨응력 및 변위를 나타낸 것으로서 PVA를 사용한 경우가 PP에 비해 상대적으로 높게 나타났으며, PP의 경우 그림. 3, 사진 3(a) 및 4에 나타낸 바와 같이 초기균열 이후 응력의 증가 없이 PP섬유의 신장 및 인발하에서 국소적인 변형을 일으키는 반면 PVA의 경우는 사진 3(b) 및 (c)에 나타낸 바와 같이 초기균열 이후에도 응력이 증가하며 다수의 균열을 발생시키는 변형경화현상을 나타내었다. 하이브리드섬유를 사용한 경우도 단일섬유와 마찬가지로 PVA의 경우가 PP보다 높은 휨응력 및 변위를 나타내었다. 또한 단일섬유와 하이브리드섬유의 경우를 비교한 결과, 하이브리드에 의해 휨응력 및 변위 등의 휨성능이 현저하게 향상되는 것으로 나타났다. 이것은 사진 5에 나타낸 바와 같이 초기의 마이크로 균열은 마이크로 및 매크로섬유에 의해 억제되고 이후 균열이 국소화로 인해 생긴 매크로균열은 매크로섬유에 의해 억제되면서 사진 6과 같이 휨응력이 다수의 다중균열(Multiple crack)에 의해 분산되었기 때문으로 판단된다.

Table 4 Results of compression and bending test

Specimen	Compression test Results		Bending test results				Toughness (MPa · mm)	
	Ultimate strength (MPa)	Strain at ultimate strength(%)	First crack stress (MPa)	Displacement at first crack stress(mm)	Ultimate stress (MPa)	Displacement at ultimate stress(mm)	Toughness (MPa · mm)	
							Toughness at Ultimate stress	Toughness at 80% of Ultimate stress
No-1	48.13	0.42	5.21	0.229	5.48	1.571	3.60	19.37
No-2	58.86	0.48	4.25	0.222	8.94	1.798	11.67	21.46
No-3	54.27	0.55	5.30	0.223	11.11	2.256	19.03	27.63
No-4	47.90	0.53	5.28	0.232	7.67	3.483	20.85	34.75
No-5	54.05	0.52	6.47	0.307	11.97	3.394	30.60	43.51
No-6	64.97	0.56	6.11	0.210	10.31	2.742	22.13	33.60
No-7	44.66	0.48	4.51	0.221	5.68	3.935	12.54	19.16
No-8	47.01	0.43	3.47	0.210	5.64	2.882	11.71	24.51

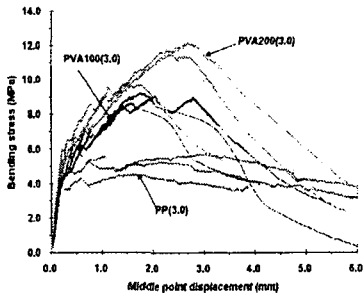


Fig. 3 Flexural response of HPRCCs with single synthetic fibers

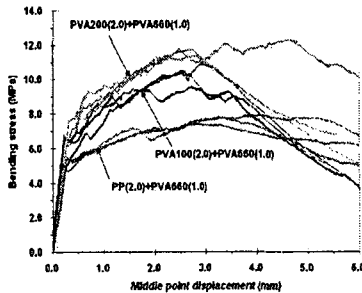


Fig. 4 Flexural response of HPRCCs with hybrid fibers

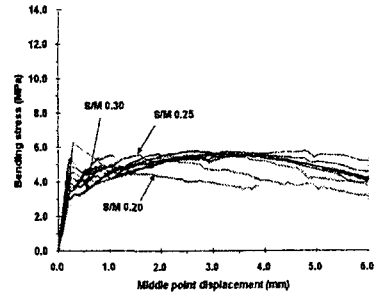


Fig. 3 Flexural response of HPRCCs by sand volume fractions

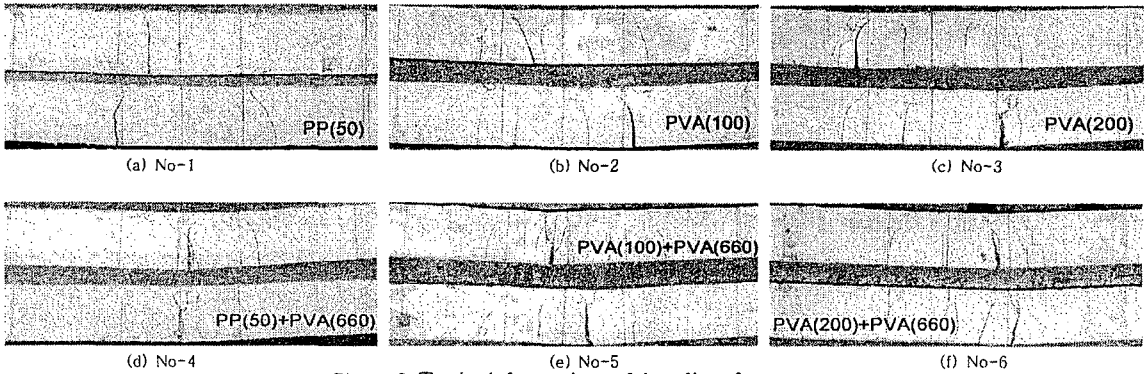


Photo 3 Typical formation of bending fracture

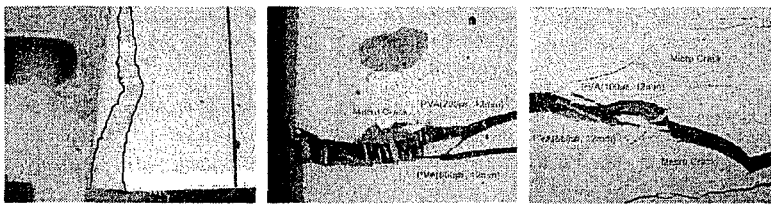


Photo 4 Extension of PP on the opened crack

Photo 5 Bridging of macro fibers

Photo 6 Typical formation of bending fracture

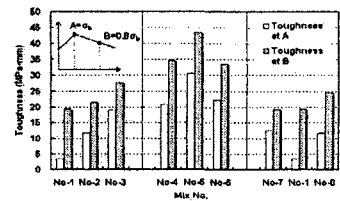


Fig. 6 Toughness of each specimen

S/M에 따른 휨 성상은 그림 5에 나타낸 바와 같이 S/M 0.20의 경우가 0.25 및 0.30에 비해 상대적으로 높은 초기균열용력을 나타내고 있으나, 이후에는 대체적으로 유사한 경향을 보이고 있다. 에너지흡수능력의 경우, 그림 6에 나타낸 바와 같이 단일섬유의 경우 PVA의 경우가 PP에 비해 다소 높은 값을 나타내고 있으며, 하이브리드의 경우도 마찬가지로 PVA가 PP보다 높은 값을 나타내고 있다. 또한 하이브리드한 경우 단일섬유를 사용한 경우에 비해 인성이 상대적으로 증가하는 것으로 나타났으며, S/M에 따른 인성은 유의할만한 경향이 나타나지 않았다.

4. 결론

섬유 종류 및 잔골재용적비에 따른 FPFRCs의 역학적 특성을 비교·검토한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다. 단일종류의 섬유로 보강된 FPFRCs에 있어서 PVA를 사용한 경우가 PP보다 압축 및 휨성능 모두 높게 발현되고 있으며, 휨파괴시 PVA를 사용한 경우 다수의 미세균열이 발생한 반면 PP의 경우 1~3개의 균열만이 발생되고 초기균열 이후 국소화가 진행되는 것으로 나타났다. 또한 PP로 보강된 FPFRCs의 경우 잔골재용적비(S/M)에 따른 압축 및 휨성상에 유의할 만한 차이는 확인되지 않았다. 또한 PP, PVA(100), PVA(200)의 단일 섬유에 매크로 섬유로서 PVA(660)을 혼합 사용한 하이브리드 FPFRCs의 경우 단일종류의 섬유만 사용한 경우보다 휨시험시 초기균열용력, 최대휨용력, 변형능력 등의 휨성능이 크게 향상되는 것으로 나타났으며, 특히 PVA(100)과 PVA(660)을 혼합 사용한 하이브리드 FPFRCs의 경우 멀티플크랙(Multiple crack) 및 뚜렷한 변형경화현상을 나타내는 것으로 나타났다. 반면, 하이브리드에 의한 압축성상에서는 유의할 만한 경향은 확인되지 않았다.

참고문헌

1. Victo C. Li, Large Volume, High-Performance Applications of Fibers in Civil Engineering, Journal of Applied Polymer Science, Vol.83, pp660~686, 2002
2. Fukuyama, H., Matsuzaki, Y., Sato, Y., Iso, M. and Suwada, H., "Structural performance of engineered cementitious composite elements, composite and hybrid structures.", Proceedings of 6th ASCCS conference, ASCCS-6 Secretariat, March 969-976, 2000