마이크로 및 매크로 섬유를 사용한 하이브리드 HPFRCC의 역학적 특성에 관한 연구

A Study on the Mechanical Properties of Hybrid HPFRCCs Using Micro and Macro Fibers

김 재 환* 이 의 배** 김 영 선** 김 영 덕** 주 지 현* 김 무 한***
Kim, Jae Hwan Lee, Eui Bae Kim, Yong Sun Kim, Yong Duk Joo, Ji Hyun Kim, Moo Han

ABSTRACT

Concrete is one of the principal materials for the structure and it is widely used all over the world, but it shows extremely brittle failure under bending and tensile load. Recently to improve such a poor property, High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) have been developed, and it are defined by an ultimate strength higher than their first cracking strength and the formation of multiple cracking during the inelastic deformation process.

This study is to develop the hybrid HPFRCC with high ductility and strain capacity in bending and tensile load, and the three-point bending test on hybrid HPRFCC reinforced with micro and macro fibers is carried out in this paper. As the results of the bending tests, hybrid HPFRCCs reinforced with PVA40+SF and PVA100+PVA660 showed the high ultimate bending stress, multiple cracks and displacement hardening under bending load.

1. 서 론

최근 시멘트페이스트 또는 모르터에 고성능 단섬유를 보강함으로서 높은 인성을 실현할 수 있는 고인성 시멘트복합재료(이하, HPFRCC (High Performance Fiber Cementitious Composite)의 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 여기서 섬유보강은 단순히 휨·인장강도의 향상뿐만 아니라 균열을 제어하고 균열발생 후 균열사이에 존재하는 섬유가 힘을 전달함으로서 파괴거동을 개선한다. 즉, 섬유는 균열사이를 가교하여 응력을 분산시킴으로서 균열의 국소화를 지연시켜 인성이나 변형성능을 향상시키지만, Fig.1과 같이 마이크로크랙과 매크로크랙에 효과적인 섬유의 형상이나 치수는 다른 것으로 판단되며, 이러한 배경에서 마이크로 섬유와 매크로 섬유를 혼합한 하이브리드 HPFRCC의 개발이 진행되고 있다.[1)]

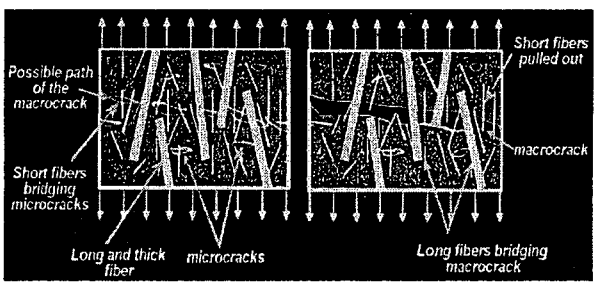


Fig.1 Action of the different fiber types in HPFRCC

이에 본 연구에서는 하이브리드 HPFRCC의 개발을 목적으로 현재 모르터 및 콘크리트 보강용 단섬유로 주로 사용되고 있는 PP 및 PVA 등의 마이크로 섬유와 PVA 및 SF 등의 매크로로 보강된 하이브리드 HPFRCC의 휨성상에 대하여 실험·실증적으로 검토하였다.

* 정회원, 충남대학교 대학원 건축공학과, 박사과정
** 정회원, 충남대학교 대학원 건축공학과, 석사과정
*** 정회원, 충남대학교 건축공학과, 교수·공박

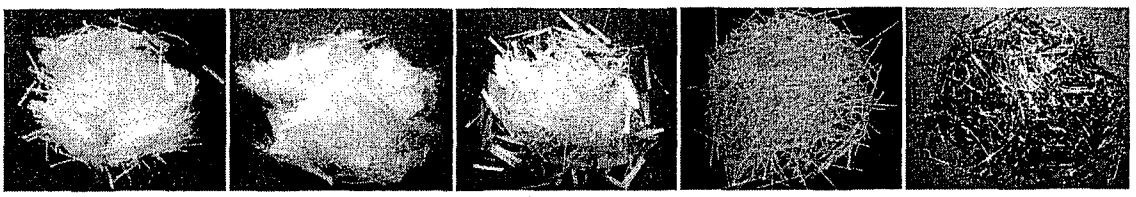
Table 1. Experimental program and mix proportion of HPFRCCs

Symbol	Fiber volume fraction, V_f (Vol.%)						W/B (wt.)	S/M[1)] (vol.)	FA/B (wt.)	Unit volume of matrix (ℓ/m^3)				Note
	Synthetic				Steel	Total								
	PP	PVA40	PVA100	PVA660	SF					W	C	FA	S	
Mix-1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.5	2.5	0.40	0.25	0.20	384	244	90	233	PP(2.0)+SF(0.5)
Mix-2	0.0	2.0	0.0	0.0	0.5	2.5	0.40	0.25	0.20	384	244	90	233	PVA40(2.0)+SF(0.5)
Mix-3	0.0	0.0	2.0	0.0	0.5	2.5	0.40	0.25	0.20	384	244	90	233	PVA100(2.0)+SF(0.5)
Mix-4	2.0	0.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.40	0.25	0.20	384	244	90	233	PP(2.0)+SF(1.0)
Mix-5	0.0	2.0	0.0	0.0	1.0	3.0	0.40	0.25	0.20	384	244	90	233	PVA40(2.0)+SF(1.0)
Mix-6	0.0	0.0	2.0	0.0	1.0	3.0	0.40	0.25	0.20	384	244	90	233	PVA100(2.0)+SF(1.0)
Mix-7	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	3.0	0.40	0.25	0.20	384	244	90	233	PP(2.0)+PVA660(1.0)
Mix-8	0.0	0.0	2.0	1.0	0.0	3.0	0.40	0.25	0.20	384	244	90	233	PVA100(2.0)+PVA660(1.0)

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

Table 2. Properties of fiber used in this study

Symbol	Types of fiber	Length (mm)	Diameter (μm)	Density (g/cm^3)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus under tensile (GPa)	Note
PP	Polypropylene fiber	15	50	0.9	300	600	5.0	Micro fiber
PVA40	Polyvinyl alcohol fiber	12	40	1.3	300	1100	120.0	
PVA100	Polyvinyl alcohol fiber	12	100	1.3	120	1100	120.0	
PVA660	Polyvinyl alcohol fiber	30	660	1.3	46	880	29.4	Macro fiber
SF	Hooked steel fiber	30	500	7.8	60	965	-	



(a) PP (b) PVA40 (c) PVA100 (d) PVA660 (e) SF

Fig. 2. Synthetic and steel fibers used this study

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 배합

마이크로 및 매크로 섬유로 보강된 하이브리드 HPFRCC의 휨성상을 검토하기 위한 실험계획 및 배합은 Table 1에 나타낸 바와 같이, 마이크로 섬유로서 PP, PVA40 및 PVA100의 혼입률(V_f)은 2%로 고정하였으며, 매크로 섬유로서 SF의 혼입률은 0.5와 1.0%, PVA660의 혼입률은 1.0%로 설정하였다. 또한 HPFRCC용 매트릭스의 배합은 W/B 0.40, S/M 0.25, FA/B 0.20으로 고정하였다.

2.2 사용재료 및 비빔방법

HPFRCC용 매트릭스의 제조를 위하여 시멘트는 밀도 3.15 g/cm^3의 1종 보통포틀랜드시멘트, 플라이애시는 밀도 2.13 g/cm^3의 보령산 플라이애시, 잔골재는 밀도 2.64 g/cm^3, 입경 0.1~0.3 mm의 규사를 사용하였으며, 소정의 유동성을 확보하기 위해 폴리카르본산계 고성능감수제를 소량 첨가하였다. 또한, 본 연구에 사용된 각종 합성섬유 및 강섬유의 물성과 형상은 Table 2 및 Fig.2에 나타낸 바와 같다.

한편, HPFRCC의 비빔은 용량 30ℓ의 옴니믹서를 사용하여 시멘트, 플라이애시 및 규사를 30초간 건비빔한 후 물을 첨가하여 60초간 비빔을 실시하였으며, 마이크로 및 매크로 섬유를 일괄 첨가하여 150초간 비빔을 실시하였다. 또한, HPFRCC의 휨성상을 평가하기 위해 100×50×400mm의 각형 몰드에 비빔이 완료된 HPFRCC를 타설하였다.

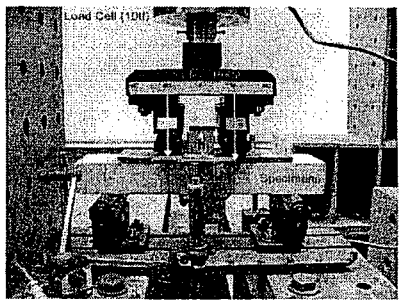


Fig. 3. Bending test set-up

2.3 양생 및 시험방법

타설된 시험체는 20±3℃, RH 60%의 실내에 24시간 존치한 후 탈형하여 40±5℃의 고온에서 재령 7일간 수중양생을 실시하였다. 또한, HPFRCC의 휨성상을 평가하기 위해 Fig.3에 나타낸 바와 같이 KS F 2408에 준하여 3등분점 재하시험을 실시하였으며, 응력-변형곡선, 최대휨강도, 터프니스 및 균열성상 등을 평가하였다.

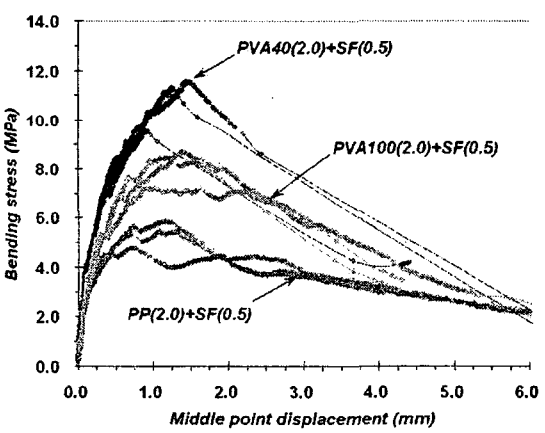
3. 결과 및 고찰

Fig.4는 마이크로 섬유로서 PP 및 PVA와 매크로 섬유로서 SF를 혼합 사용한 하이브리드 HPFRCC의 휨응력-변형곡선을 나타낸 것이다.

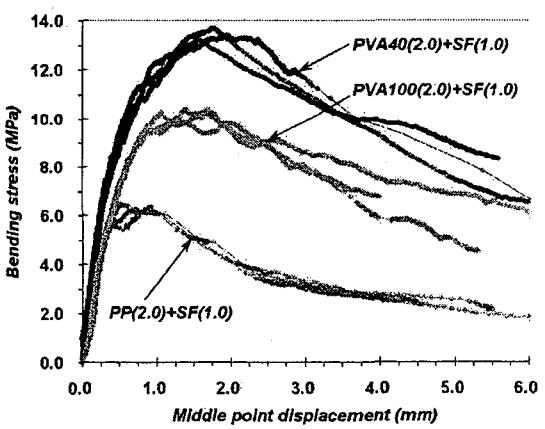
PP와 SF를 혼합 사용한 경우 PVA와 SF를 혼합 사용한 경우보다 초기균열 및 최대 휨응력은 낮게 나타났으며, 초기균열발생 후 응력의 증가와 함께 1~2개의 균열이 추가적으로 발생하였다. 이후 초기균열이 발생된 개소에서 균열개구변위가 급격히 증가되면서 국소화가 발생하였으며, 이때 Fig.5와 같이 PP섬유의 신장과 인발에 의해 최대 휨응력 이후 응력이 서서히 감소하는 것으로 나타났다.

한편, PVA40과 SF를 혼합 사용한 경우 어스팩트비가 동일한 PP를 혼합 사용한 경우보다 초기균열 및 최대 휨응력은 약 1.5~2배 정도 향상되는 것으로 나타났으며, SF 0.5% 혼입의 경우 최대 휨응력 이후 PVA40의 파단과 함께 급격한 응력저하가 발생한 반면 SF 1.0% 혼입의 경우 다소 완만하게 저하하는 것으로 나타났다.

또한, PVA100과 SF를 혼합 사용한 경우 동일 인장강도의 PVA40을 혼합 사용한 경우보다 초기균열 및 최대 휨응력은 다소 저하하는 것으로 나타났으나 Fig.6에 나타낸 것처럼 초기균열발생 이후 최대 휨응력까지 응력의 증가와 함께 다수의 미세균열, 즉 멀티플크랙(Multiple crack)이 발생하는 것으로 나타났다.



(a) Synthetic fiber(2.0) + SF(0.5)



(b) Synthetic fiber(2.0) + SF(1.0)

Fig. 4. Bending response of hybrid HPFRCCs reinforced with synthetic and steel fiber

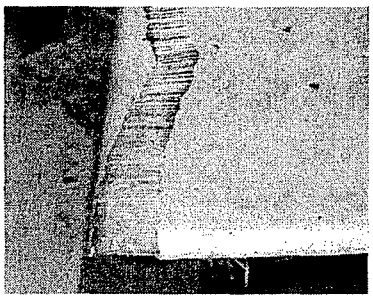


Fig. 5. Elongation of PP fiber at bending test

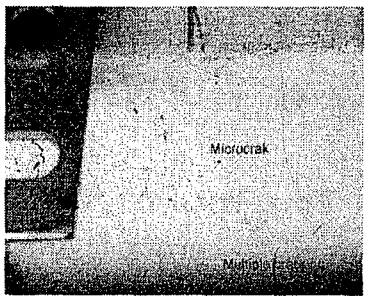


Fig. 6. Multiple crack of specimens with PVA100(2.0)+SF(1.0)

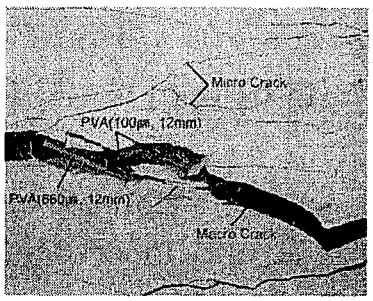


Fig. 8. Multiple crack of specimens with PVA100 and PVA660

Fig.7은 마이크로 섬유로서 PP 및 PVA100을 2.0%와 매크로 섬유로서 SF 및 PVA660을 1.0% 혼합 사용한 하이브리드 HPFRCC의 휨응력-변형곡선을 비교한 것이다. PP와 PVA660를 혼합한 경우 PP와 SF를 혼합한 경우보다 초기균열 휨응력은 다소 낮은 반면, 초기균열 이후 PVA100의 가교응력에 의해 응력이 지속적으로 증가하여 최대 휨응력은 높게 발현되고 있으나 멀티플크랙은 발생하지 않는 것으로 나타났다.

또한, PVA100과 PVA660을 혼합한 경우 PVA100과 SF를 혼합한 경우보다 초기균열 휨하중은 작게 나타났으나 초기균열 이후 변형의 증가와 함께 응력이 증가하는 변형경화(Displacement hardening) 현상으로 인해 SF를 혼합한 경우와 비교하여 최대 휨응력은 약 154% 정도 향상되는 것으로 나타났으며, Fig.8에 나타낸 바와 같이 멀티플크랙이 시험체 전반에 걸쳐 발생하여 최대 휨응력에서 최대 4.8 mm의 변형능력을 보이고 있다.

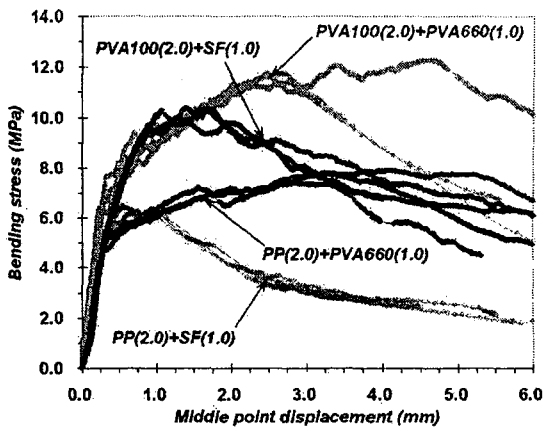


Fig. 7. Bending response of hybrid HPFRCCs

4. 결 론

마이크로 및 매크로 섬유를 혼합 사용한 하이브리드 HPFRCC의 휨성상에 대하여 검토한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 마이크로 섬유인 PP, PVA40 및 PVA100과 매크로 섬유인 SF를 혼합 사용한 시험체의 초기균열 및 최대 휨응력은 PVA40 > PVA100 > PVA40의 순으로 나타났으며, 휨파괴시 PP 및 PVA40의 경우 1~4개의 균열발생 후 국소화가 진행되는 반면 PVA100의 경우 다수의 미세균열이 발생하였다.
2) PP 및 PVA100과 매크로 섬유로서 PVA660을 혼합 사용한 경우 SF의 경우보다 초기균열 응력은 다소 낮게 나타났지만 최대 휨응력은 크게 향상되는 것으로 나타났으며, 특히 PVA100과 PVA660을 혼합 사용한 시험체의 경우 변형경화현상과 멀티플크랙이 발생하여 최대 휨응력에서의 변형량은 최대 4.8 mm로 매우 높은 변형능력을 발휘하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. I.Markovic, Development of High Performance Hybrid Fibre Concrete, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites(HPFRCC4), Proceedings of the Fouth International RILEM Workshop, pp.277~300, 2003.