

섬유의 종류, 형상 및 치환율에 따른 HPFRCC의 공학적 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Engineering Properties of HPFRCC According to Kinds, Shapes and Volume Fraction of Fibers

○ 김 영 덕* 조 봉 석* 김 재 환** 김 규 용*** 최 경 렬**** 김 무 한*****
Kim, Young-Duck Cho, Bong-Suk Kim, Jae-Hwan Kim, Gyu-Yong Choi, Kyung-Yuel Kim, Moo-Han

Abstract

Kinds, shapes and fraction ratios of fibers have influence on properties of HPFRCC(High-Performance Fiver Reinforced Cementitious Concrete) like bending strength, strain capacity and fracture toughness. For example, hydrophilic fibers have different chemical bond strength from hydrophobic fibers, fiber shapes influence on fiber pull-out and rupture, and fiber volume fraction influence on bending strength.

In this study, to estimate influences of kinds, shapes and fraction ratios of fibers, we make HFRCC with 3 kind of fiber in various volume fraction of fiber and compare cracking, bending strength and fracture toughness.

As the results, bending strength of HPFRCC was increased as fiber volume fraction was increase and fiber tensile strength was increase, and strain capacity and fracture toughness of HFRCC was higher in fiber pull-out fracture than in fiber rupture fracture. And HFRCC showing pseudo strain hardening has higher fiber reinforce efficiency than others.

키 워 드 : HPFRCC, 의사변형경화, 휨응력, 변형능력, 파괴터프니스

Keywords : HPFRCC, Pseudo-Strain Hardening, Bending Stress, Strain Capacity, Fracture Toughness

1. 서 론

건설용 구조재료로써 가장 폭넓게 사용되고 있는 콘크리트나 모르타 등의 시멘트계 재료는 높은 압축강도를 가지는 반면, 낮은 휨강도, 취성파괴, 건조수축 등의 단점을 가지고 있다. 최근 이러한 시멘트계 재료의 단점을 극복하기 위해 다량의 섬유를 혼입하여 휨강도 및 취성파괴를 극복한 시멘트계 복합재료의 개발이 미국, 일본 등 선진외국에서 적극적으로 이루어지고 있으며, 국내에서도 그 연구가 점차 증가하고 있는 실정이다.¹⁾

이러한 복합재료에 사용되는 섬유는 강섬유, 탄소섬유, 유리섬유 및 합성섬유 등으로 크게 나눌 수 있으며 각각 고유한 공학적 특성을 가지고 있다. 이중 콘크리트 재료와 함께 배합시 투입되는 것은 주로 강섬유와 합성섬유이며, 강섬유는 휨강도의 증진, 합성섬유는 건조수축 균열의 방지에 주로 사용되고 있다. 또한 최근에는 섬유를 1% 이상 대량 혼입함으로써 단순한 휨강도의 증진뿐만 아니라 높은 응력에서 넓은 범위의 변형을 일으키며 뛰어난 에너지 흡수능력을 가지는

HPFRCC(High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite)재료가 개발되고 있다.²⁾

이러한 HPFRCC의 휨강도, 변형능력, 터프니스 등 주요 성능은 PVA, PP, PE 등 사용되는 섬유의 종류, 길이, 단면적 등 형상 및 혼입량에 따라 휨강도, 변형능력, 터프니스 등 공학적 성질이 큰 차이를 나타낸다. 특히 섬유 종류에 따른 친·소수성의 차이에 의해, PVA 등 친수성 섬유는 혼입시 유동성이 다소 저하하는 반면 높은 부착강도를 나타내고, PP 등 소수성 섬유는 혼입시 유동성 저하가 작은 반면 높은 공기량과 낮은 부착강도를 나타내는 등 서로 상반된 특성을 가지게 되며, 섬유의 형상에 따라 동일 혼입율에서도 상대적인 부착강도 차이가 발생하여 파괴거동에 영향을 미치게 된다.³⁾⁴⁾

따라서 본 연구에서는 대표적인 시멘트계 복합재료용 합성 섬유인 PVA섬유와 PP섬유를 다량으로 혼입한 시멘트계 복합재료의 섬유형상 및 혼입율에 따른 휨강도, 변형 및 파단특성을 비교함으로써 합성섬유를 사용한 HPFRCC의 개발에 관한 기초자료를 제시하고자 한다.

* 정희원, 충남대학교 건축공학과, 석사과정

** 정희원, 충남대학교 건축공학과, 박사과정

*** 정희원, 삼성건설연구소, 선임연구원,

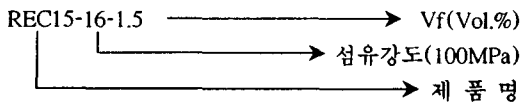
**** 정희원, 삼성물산 건설부문, 전무이사

***** 정희원, 충남대학교 건축공학과, 교수

표 1. 실험계획 및 배합

W/B (wt.%)	기 호 ¹⁾	섬유 종류	V _f ²⁾ (Vol.%)	상대 섬유강도 ³⁾ (MPa)	BFS ⁴⁾ /B (wt.%)	단위중량 (kg/m ³)			
						시멘트	물	BFS ⁴⁾	섬유
40	REC15-16-1.5	PVA	1.5	2400	40	826	551	551	20
	REC15-16-2.0		2.0	3200		822	548	548	26
	REC15-16-2.5		2.5	4000		818	545	545	33
	RF350-9-2.5		2.5	2250		818	545	545	33
	SSCF-6-2.5	PP	2.5	1500		818	545	545	23
	SSCF-6-3.5		3.5	2100		809	540	540	32

1) 기 호



2) Vf : 섬유혼입율 (Vol.%)

3) 상대섬유강도 : Vf×섬유인장강도(MPa)

4) BFS : 고로슬래그미분말

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 배합

섬유 종류, 형상 및 혼입율에 따른 HPRC의 공학적 특성을 비교·검토하기 위한 본 연구의 실험요인 및 배합은 표 1에 나타난 바와 같다.

본 연구에서는 섬유종류 및 형상을 비교하기 위하여 PVA 섬유 2종과 PP섬유 1종을 사용하였으며, 섬유의 강도 및 혼입율은 섬유종류에 따른 강도 차이를 줄이기 위해 유동성이 비슷한 수준에서 PP섬유를 PVA섬유보다 다량으로 혼입하여 비교하였다. 이때 섬유의 강도와 혼입율을 고려하여 HPRC의 효율을 비교하기 위해 혼입율과 섬유의 인장강도의 곱을 상대강도(Relative Strength)로 나타내고, 시험결과와 상대강도의 관계를 상대강도발현율로 나타내었으며, REC15-16-2.0를 기준으로 강도발현비를 산출함으로써 상대적인 섬유보강효과를 수치화하여 비교·검토 하였다.

2.2 사용재료

본 실험에서는 일본 K사의 PVA섬유 2종(모델명:REC15,RF350)과 국내 S사의 PP섬유 1종(모델명:Super Strong Con-Fiber)을 사용하였으며, 사용된 섬유의 외관 및 물리적 성질은 각각 사진 1 및 표 2에 나타난 바와 같다. 또한 매트릭스의 구성재료 및 물리적 성질은 표 3에 나타난 바와 같다.

표 2. 섬유의 물리적 성질

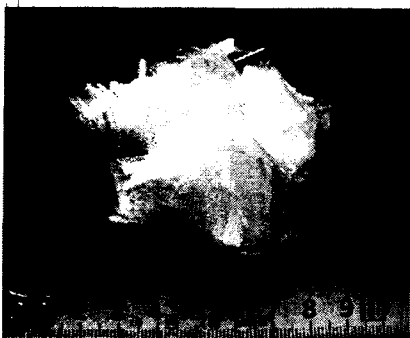
제품명	종류	길이 (mm)	직경 (μ m)	인장강도 (MPa)	영계수 (GPa)	비중 (g/cm ³)
REC15	PVA	12	40	1600	40	1.3
RF350	PVA	12	200	910	29	1.3
SSCF	PP	19	40	600	4	0.9

표 3. 매트릭스 사용재료의 물리적 성질

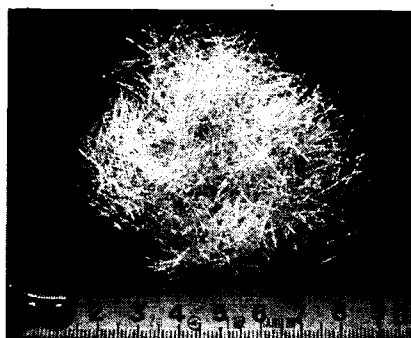
시멘트	1종 보통포틀랜드시멘트 비중 : 3.17, 분말도 : 3230cm ² /g
혼화재	고로슬래그 미분말 비중 : 2.91, 분말도 : 4200cm ² /g
혼화제	고성능AE감수제, 폴리카르본산제

2.3 비빔방법, 시험체 제작 및 시험방법

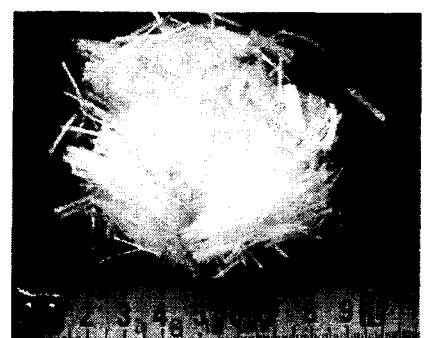
HPRC의 비빔은 모르타 믹서를 사용하여 시멘트, 고로슬래그 및 물을 투입하여 30초간 비빔 후, 섬유를 첨가하여 90초간 비빔하였으며, 소정의 유동성을 확보하기 위하여 섬유 첨가 후 비빔 중 고성능감수제를 적당량 첨가 하였다.



(a) REC15



(b) RF350



(c) SSCF

사진 1. 섬유의 형상

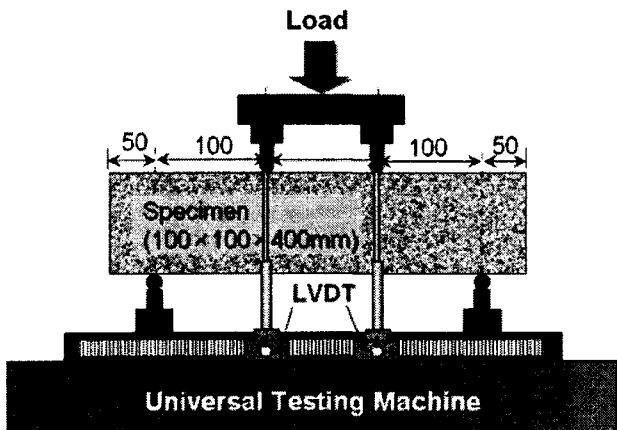


그림 1. 시험체 치수 및 휨시험 방법

비빔완료 후 100×100×400mm의 각주형 공시체를 제작하였으며, 온도 20±3℃, 습도 60%의 실내에서 24시간 습포양생을 실시하였고, 탈형 후 재령 7일까지 온도 60±3℃의 수중에서 고온양생을 실시하였다.

한편, 측정은 섬유에 미치는 온도의 영향을 줄이기 위해, 고온양생 후 12시간 상온에 방치하여 내부 온도를 낮춘 후 실시하였으며, 휨시험은 그림 1에 나타난 바와 같이 KS F 2408에 준하여 3등분점 재하시험을 실시하였고, 휨시험시의 변형은 하중재하점 2점의 변위를 측정하여 그 평균값으로 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 파괴형상에 미치는 영향 검토

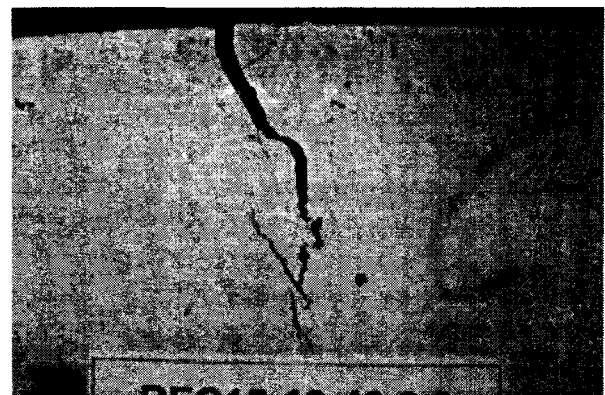
사진 2는 각 HPRCC의 파괴형상을 나타낸 것으로서, REC15의 경우 섬유 혼입율에 관계없이 초기 균열 발생 후 주변으로 소수의 미세크랙이 발생하였으나 섬유 파단에 의해 작은 변형에서 균열이 진전되어 파괴에 이르렀으며, RF350과 SSCF의 경우 균열면에서 섬유의 인발에 의해 파괴되는 것으로 나타났다. 이는 REC15의 경우 높은 인장강도를 가짐에도 불구하고 섬유의 친수성에 의한 높은 부착강도와 상대적으로 표면적이 큰 섬유 형상의 영향으로 파단이 일어난 것으로 사료된다. 반면 SSCF의 경우 낮은 인장강도를 가짐에도 불구하고 섬유의 소수성에 의해 낮은 부착강도를 가지게 되며, RF350의 경우 친수성으로 부착강도는 높지만 REC15에 비해 표면적이 작은 형상을 가져 섬유의 인발이 일어난 것으로 사료된다.

한편 모든 시험체에서 섬유의 응력전달효과로 인한 2개 이상의 균열이 관찰되었고, 특히 RF350-9-2.5와 SSCF-6-3.5에서는 다수의 균열이 발생하며 다른 시험체보다 높은 변형능력을 나타냈다.

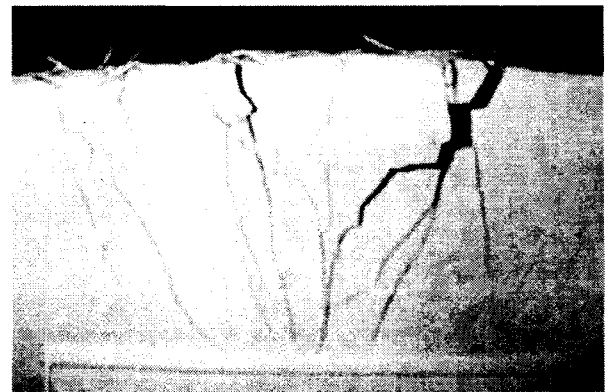
3.2 휨강도에 미치는 영향 검토

표 4는 각 HPRCC의 휨강도를 나타낸 것으로서, HPRCC의 휨강도는 섬유 종류에 관계없이 섬유 혼입율이 증가할수록

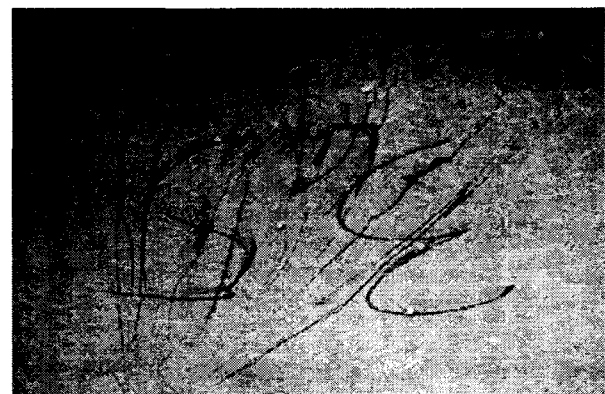
증가하는 것으로 나타났다. 또한 동일 혼입율의 경우 PVA섬유를 사용한 시험체가 PP섬유를 사용한 시험체에 비해 높은 휨강도를 나타내었으며, PVA섬유 중에서도 섬유 강도가 높은 REC15가 RF350에 비해 높은 휨강도를 가지는 것으로 나타나, HPRCC의 휨강도는 섬유 혼입율 및 강도가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으며, 이때 상대강도발현율이 거의 유사하게 나타나 최대 휨강도는 섬유 혼입율과 섬유 강도를 고려한 상대강도에 비례하는 것으로 나타났다. 그러나 변형경화저동을 나타낸 SSCF -6-3.5의 경우 강도발현비가 1.39로 매우 높게 나타나, 다수의 미세균열을 동반한 변형경화저동을 통해 일반적인 HPRCC보다 월등한 섬유보강효과가 얻어지는 것으로 사료된다.



(a) REC15-16-2.0



(b) RF350-9-2.5



(c) SSCF-6-3.5

사진 2. HPRCC의 균열성상 (측면)

표 4. 각 HPFRCC의 휨강도

종 류	휨강도 (MPa)	상대강도 발현율(%) ¹⁾	강도 발현비 ²⁾
REC15-16-1.5	5.51	0.230	1.13
REC15-16-2.0	6.48	0.203	1.00
REC15-16-2.5	7.93	0.198	0.98
RF350-9-2.5	4.40	0.196	0.97
SSCF-6-2.5	3.44	0.229	1.13
SSCF-6-3.5	5.91	0.281	1.39

- 1) 상대강도 발현율 : 휨강도/상대섬유강도
2) 강도 발현비 : 상대강도발현율/0.203

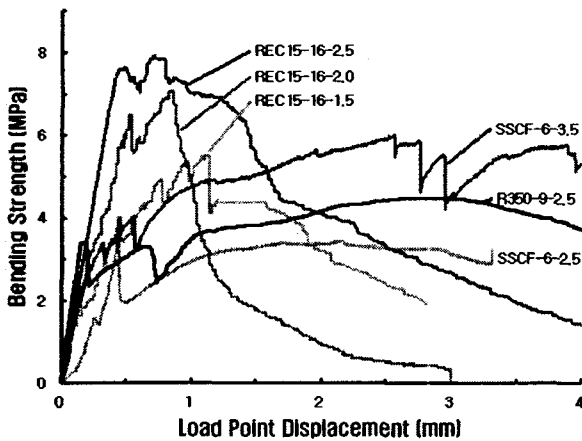


그림 3. 각 HPFRCC의 휨응력-변형곡선

3.3 변형성능 및 에너지 흡수능력에 미치는 영향 검토

그림 3은 각 HPFRCC의 휨응력-변형곡선을 나타낸 것으로, REC15의 경우 높은 휨강도에도 불구하고 작은 변형능력을 보였으며, RF350과 SSCF의 경우에는 낮은 휨강도에도 불구하고 큰 변형능력을 보였다. 이는 REC15의 경우 인장탄성 계수가 높아 초기균열 이외의 주변 미세균열폭이 매우 작았으며, 초기균열 역시 작은 변형능력에서 섬유가 급격히 파단되기 때문으로 사료된다. 반면 RF350과 SSCF의 경우 초기균열의 진전과 함께 섬유가 인발되면서 지속적으로 저항하기 때문에 파단에 비해 완만한 응력의 저하가 이루어졌으며, 특히 다수의 균열을 발생시킨 RF350-9-2.5와 SSCF-6-3.5의 경우 초기균열 이후에도 변형의 증가와 함께 응력이 증가하는 변형경화(Strain Hardening) 현상이 나타났다.

한편 HPFRCC의 에너지 흡수능력은 최대 휨강도가 높은 REC15보다 변형능력이 뛰어난 RF350과 SSCF에서 크게 나타나, 친수성 섬유를 사용하여 높은 에너지 흡수능력을 가지는 복합재료를 제조할 경우, 섬유의 파단 이전에 인발이 일어날 수 있도록 부착강도를 낮추거나 섬유 직경과 길이 등 형상을 조정할 필요가 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

섬유 종류, 형상 및 혼입율에 따른 HPFRCC의 공학적 특성을 비교·검토하기 위한 본 실험의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) HPFRCC의 재료로 친수성 섬유인 PVA섬유를 사용할 경우 주로 섬유의 파단에 파괴되는 반면, 소수성 섬유인 PP섬유를 사용할 경우에는 인발에 의해 파괴된다.
- 2) HPFRCC의 휨강도는 섬유의 강도 및 혼입율이 증가할수록 증가하며, 동일한 섬유 혼입율에서 다수의 균열과 함께 변형경화거동이 발생할 경우 단일 균열면에서 파괴가 일어나는 경우에 비해 최대 휨강도는 큰 폭으로 증가한다.
- 3) HPFRCC의 변형능력은 섬유의 인발에 의해 파괴되는 경우가 섬유의 파단에 의해 파괴되는 경우보다 우수한 것으로 나타났으며, 에너지 흡수능력은 최대 휨강도보다 변형능력에 따라 좌우되는 것으로 나타났다.

본 연구결과 HPFRCC의 파괴거동은 섬유 종류 및 형상에 의해 큰 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 특히 변형경화거동을 통해 에너지 흡수능력 뿐 아니라 최대 휨강도의 향상효과도 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 이후 HPFRCC의 성능 향상을 위해서는 섬유 자체의 강도향상 뿐만 아니라 변형경화거동을 일으킬 수 있는 적절한 섬유처리 방안 및 섬유 형상에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구를 위해 섬유를 제공해 주신 신영아이엔티(주)와 (주)에스에스산업에 진심으로 깊은 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 高靱性セメント複合材料を知る·作る·使う, 高靱性セメント複合材料の性能評價と構造利用研究委員會報告書, 2002.1
2. 김무한 외, 하이브리드형 단섬유보강 시멘트복합재료의 개발에 관한 실험적 연구, 한국건축시공학회 학술·기술논문발표회 논문집, pp.57-60, 2003. 5
3. Victor C. Li, Gregor Fischer, Reinforced ECC - An evolution from materials to structures, Proceedings of the 1st congress, pp.105-122, 2002.
4. Victor C. LI, Large Volume, High-Performance Applications of Fibers in Civil Engineering, Journal of Applied Polymer Science, Vol.183, pp.660-686, 2002