

## 마이크로 및 매크로 섬유에 의해 보강된 고인성 시멘트 복합재료의 역학적 특성에 관한 실험적 연구

김무한<sup>1)</sup> · 김재환<sup>1)\*</sup> · 김용로<sup>1)</sup> · 김영덕<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 충남대학교 건축공학과

(2004년 5월 20일 원고접수, 2005년 3월 31일 심사완료)

## An Experimental Study on the Mechanical Properties of HPFRCCs Reinforced with the Micro and Macro Fibers

Moo-Han Kim<sup>1)</sup>, Jae-Hwan Kim<sup>1)</sup>, Yong-Ro Kim<sup>1)</sup>, and Young-Duck Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Taejeon, 305-764, Korea

(Received May 20, 2004, Accepted March 31, 2005)

### ABSTRACT

HPFRCC(High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite) is a class of FRCCs(Fiber Reinforced Cementitious Composites) that exhibit multiple cracking. Multiple cracking leads to improvement in properties such as ductility, toughness, fracture energy, strain hardening, strain capacity, and deformation capacity under tension, compression, and bending. These improved properties of HPFRCCs have triggered unique and versatile structural applications, including damage reduction, damage tolerance, energy absorption, crack distribution, deformation compatibility, and delamination resistance. These mechanical properties of HPFRCCs become different from the kinds and shapes of used fiber, and it is known that the effective size of fiber in macro crack is different from that in micro crack.

This paper reports an experimental findings on the mechanical properties of HPFRCCs reinforced with the micro fiber(PP50, PVA100 and PVA200) and macro fiber(PVA660, SF500). Uniaxial compressive tests and three point bending tests are carried out in order to compare with the mechanical properties of HPFRCCs reinforced with micro fibers or hybrid fibers such as compressive strength, ultimate bending stress, toughness, deformation capacity and crack pattern under bending, etc.,

**Keywords :** HPFRCC, hybrid fiber, bending stress-displacement curve, multiple cracking, toughness

### 1. 서 론

콘크리트로 대표되는 시멘트계 재료는 우수한 압축강도에 의해 지금까지 건축 및 토목 구조물에 있어서 주요 구성재료로서 전세계적으로 광범위하게 사용되어 왔다. 그러나 이러한 콘크리트는 인장 및 휨강도가 작을 뿐만 아니라 변형능력도 작기 때문에 공용기간 중 장기내구성이나 안전성에 유해한 균열이 발생하기 쉬운 결점을 가지고 있으며, 최대응력에 도달한 이후에 변형의 증가 없이 응력이 급격히 저하하는 취성적인 성질을 가지고 있다<sup>1,3,7)</sup>.

이러한 성질을 개선하기 위해 선진외국에서는 강섬유 보강 콘크리트로 대표되는 섬유보강 시멘트 복합재료(이하, FRCC: Fiber Reinforced Cementitious Composites)가

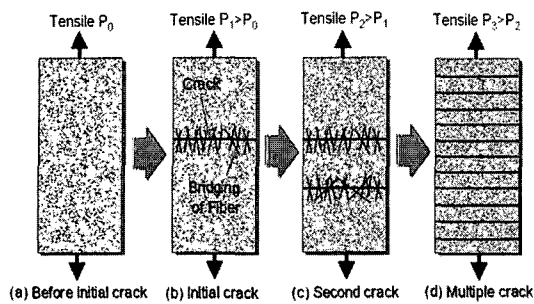
개발되었으며, 현재 건설생산분야에서 주로 활용되고 있는 FRCC는 일반적으로 휨모멘트 또는 인장력의 작용 하에 있어서 초기균열 발생 후에 응력이 저하하는 변형연화(Displacement softening) 특성 및 준취성적인 성질을 나타낸다<sup>7)</sup>. 또한, 최대응력 이후 1개소의 균열에 응력이 집중되어 균열의 국소화가 발생하는 특징을 가지고 있다.

한편, 최근 미국 및 일본을 중심으로 시멘트페이스트 또는 모르타르에 고성능 단섬유를 혼입함으로써 높은 인성을 발휘할 수 있는 고인성 시멘트 복합재료(이하, HPFRCC: High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites)가 개발되었으며, Li 및 Wu 등은 미세역학에 기초한 파괴역학을 이용하여 HPFRCC, 특히 ECC(Engineering Cementitious Composite)의 재료설계기법을 개발하여 고성능 보수·보강재, 충격완충재, 강재피복재, 지진시 에너지 흡수 디바이스 등 다양한 용도로의 활용이 기대되고 있다. 이러한 HPFRCC는 Figs. 1, 2에 나타난

\*Corresponding author

E-mail : kjh0999@empal.com

©2005 by Korea Concrete Institute



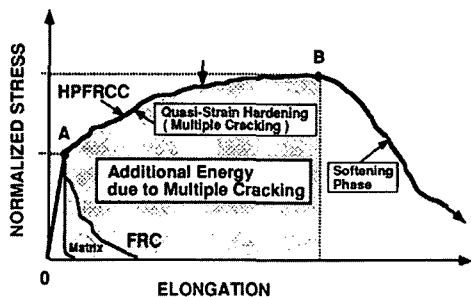
**Fig. 1** Mechanism of fiber bridging and multiple crack in HPFRCC with discontinuous short fiber

바와 같이 휨모멘트 또는 인장력 작용하에 있어서 초기균열이 발생한 이후에도 응력의 저하 없이 변형의 증가와 함께 응력이 증가하는 변형경화(Strain hardening, 휨응력하에서는 변위경화(Displacement hardening) 특성과 복수의 미세균열이 분산하는 멀티플크랙(Multiple cracking) 특성을 나타내어 높은 에너지 흡수능력 및 변형능력을 발휘한다<sup>3,10)</sup>.

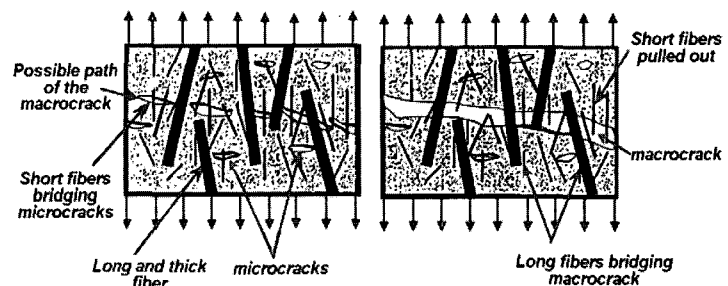
한편, 기존 HPFRCC의 경우에는 약 40 μm 이하의 마이크로 섬유만을 이용하고 있어 마이크로 크랙이 매크로 크랙으로 진전된 이후에는 마이크로 섬유가 균열을 가교하지 못하고 매크로 균열상태에서 응력이 급격히 저하하는

문제점이 지적되고 있다. 이를 해결하기 위해서는 섬유가 마이크로 크랙 및 매크로 크랙에 효과적으로 가교할 수 있는 직경 및 길이를 가져야만 하며, 결국 섬유가 마이크로 크랙에서 효과적으로 가교하기 위해서는 대량의 직경이 작은 단섬유가 필요하고, 매크로 크랙에서는 매트릭스를 충분히 가교할 수 있도록 길지 않으면 안된다<sup>1,4,8)</sup>. 즉, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 마이크로 크랙이 발생하는 단계에서는 마이크로 섬유가 가교하고, 이들 마이크로 크랙이 매크로 크랙으로 진전된 단계에서는 매크로 섬유가 균열을 가교함으로써 HPFRCC의 휨 및 인장성능이 향상될 것으로 기대된다. 이러한 특징을 이용하여 Fukuyama 등<sup>4)</sup>은 마이크로 섬유로서 직경이 작은 합성섬유(PE 섬유)와 매크로 섬유로서 길이가 긴 강섬유(스틸코드)를 혼합 사용한 하이브리드(Hybrid)형 HPFRCC의 기초물성에 대하여 검토하였다.

이에 본 연구에서는 휨모멘트 작용하에 있어서 휨성능이 보다 우수한 HPFRCC의 개발을 목적으로, 현재 모르타르 및 콘크리트 보강용 단섬유로 주로 사용되고 있는 각종 마이크로 섬유만을 사용한 HPFRCC와 이들 마이크로 섬유에 직경 및 길이가 큰 매크로 섬유를 혼합 사용한 하이브리드 HPFRCC의 압축 및 휨성상 등 역학적 특성을 실험·실증적으로 비교·검토하였다.



**Fig. 2** Typical stress-strain response of HPFRCC under tension<sup>5)</sup>



**Fig. 3** Bridging behavior of micro and macro fiber on the different size of crack in hybrid HPFRCC

**Table 1** Experimental programs and mix proportions of mortar matrix

Mix. name	Fiber volume fraction <sup>a)</sup> , Vf (vol.%)						W/B (wt.)	S/M <sup>b)</sup> (vol.)	FA/B (wt.%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				Symbol
	Micro fiber			Macro fiber						W	C	FA	S	
	PP 50	PVA 100	PVA 200	PVA 660	SF 500	Total								
No.1	3.0	-	-	-	-	3.0	0.40	0.25	20	385	770	193	607	PP50(3.0)
No.2	-	3.0	-	-	-	3.0								PVA100(3.0)
No.3	-	-	3.0	-	-	3.0								PVA200(3.0)
No.4	2.0	-	-	1.0	-	3.0								PP50(2.0)+PVA660(1.0)
No.5	-	2.0	-	1.0	-	3.0								PVA100(2.0)+PVA660(1.0)
No.6	-	-	2.0	1.0	-	3.0								PVA200(2.0)+PVA660(1.0)
No.7	2.0	-	-	-	1.0	3.0								PP50(2.0)+SF500(1.0)
No.8	-	2.0	-	-	1.0	3.0								PVA100(2.0)+SF500(1.0)
Plain	-	-	-	-	-	0.0							Plain	

a) Volume fraction of fiber to mortar

b) Volume fraction of sand to mortar

## 2. 실험개요

### 2.1 실험계획 및 배합

본 실험의 계획 및 배합은 Table 1에 나타난 바와 같으며, 마이크로 섬유로는 직경 200  $\mu\text{m}$  이하, 길이 15mm 이하의 것으로 현재 콘크리트 보강용으로 사용되는 PP50, PVA100 및 PVA200을 사용하였고, 매크로 섬유로는 길이 30mm 이상인 PVA660 및 SF500을 각각 사용하였다.

우선, 마이크로 섬유만 단독 사용한 HPFRCC의 역학적 특성을 비교·검토하기 위하여 마이크로 섬유만을 섬유용적비(V<sub>f</sub>)로 3% 혼입하였다(No.1~No.3). 또한, 이들 마이크로 섬유에 매크로 섬유로서 PVA660을 혼합 사용한 경우(No.4~No.6) 또는 SF500을 혼합 사용한 경우(No.7~No.8), 즉 하이브리드 HPFRCC의 역학적 특성을 평가하고자 하였으며, 마이크로 및 매크로 섬유의 혼합비율은 예비 실험을 통해 휨시험시 변위경화특성을 발휘하도록 마이크로 섬유 2%, 매크로 섬유 1%로 설정하였다. 한편, 이들 HPFRCC와 성능 비교를 위해 동일 모르타르에 섬유를 혼입하지 않는 시험체(Plain)를 제작하였다.

또한, 본 실험에 사용된 모르타르 매트릭스의 배합은 물 결합재비(W/B)를 0.40, 모르타르 용적에 대한 잔골재의 용적비(S/M)를 0.25, 결합재 중량에 대한 플라이애쉬 대체율(FA/B)을 20%로 설정하였으며, 비빔시 소정의 유동성을 확보하기 위해 고성능감수제(B×0.5%)를 첨가하였다.

### 2.2 사용재료

본 실험에 사용된 결합재로서 시멘트는 국내 S사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고, 플라이애쉬는 밀도 2.13 g/cm<sup>3</sup>의 충남 보령산 플라이애쉬를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 Table 2에 나타난 바와 같다. 또한, 잔골재로는 밀도 2.64 g/cm<sup>3</sup>, 입경 0.1~0.3mm의 규사, 화학혼화제로는 폴리카르본산계 고성능감수제를 사용하였으며, 각각의 물리적 성질은 Tables 3, 4에 나타난 바와 같다.

한편, 본 실험에 사용된 마이크로 및 매크로 섬유 각각의 물리적 성질은 Table 5에 나타난 바와 같으며, 섬유의 외형은 Photo 1에 나타난 바와 같다.

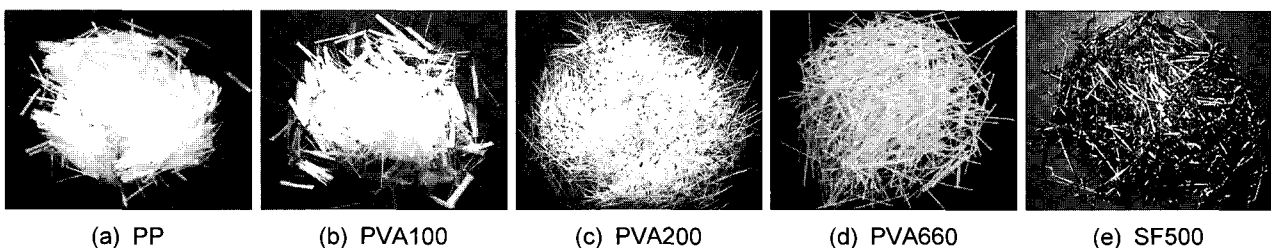


Photo 1 Exterior view of micro and macro fibers used in this study

Table 2 Properties of cementitious binders

Type of binders	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Setting time (h : m)		LOI (%)	Comp. strength(MPa)		
			Initial	Final		3D	7D	28D
Cement	3.17	3,230	3:60	6:00	1.0	21.0	28.5	37.4
Fly-ash	2.13	2,976	-	-	-	-	-	-

Table 3 Properties of sand

Type of sand	Grain size (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption ratio (%)
Silica sand	0.1~0.3	2.64	0.38

Table 4 Properties of chemical admixture

Admixtuer type	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Total sold (%)	Note
Superplasticizer	1.05±0.02	40.0	Polycarbon type

Table 5 Properties of micro and macro fibers

Type of fiber	Length (mm)	Dia-meter ( $\mu\text{m}$ )	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Nominal strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Note
PP50	15	50	0.9	600	5.0	Micro fiber
PVA100	12	100	1.3	1,100	120.0	
PVA200	12	200	1.3	880	29.4	
PVA660	30	660	1.3	880	29.4	Macro fiber
SF500	30	500	7.8	965	-	

(Note) PP(Polypropylene fiber), PVA(Polyvinil alcohol fiber), SF(Steel fiber)

### 2.3 시험체 제작

HPFRCC의 비빔은 Photo 2의 용량 30ℓ의 옴니믹서를 사용하여 시멘트, 플라이애쉬 및 규사를 30초간 건비빔한 후 물 및 고성능감수제를 첨가하여 60초간 비빔을 실시하였으며, 마이크로 섬유를 첨가하여 60초, 매크로 섬유를 첨가하여 90초간 비빔을 실시하였다. 비빔이 완료된 HPFRCC는 압축 및 휨성상을 평가하기 위해 Ø100×200mm의 원형 볼드 및 100×50×400mm의 각형 볼드에 각각 타설하였다. 또한 타설된 시험체는 20±3 °C, RH 60%의 실내에 24시간 존치한 후 탈형하여 40±5 °C의 고온에서 측정재령 7일까지 수증양생을 실시하였다.

## 2.4 시험방법

본 실험에서는 HPFRCC의 압축 및 휨성상과 파괴에너지 등의 역학적 특성을 평가하기 위해 각 시험체에 대하여 1축 압축시험 및 3등분점 휨시험을 각각 실시하였다. 우선, HPFRCC의 압축성상을 평가하기 위해 KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」에 준하여 최대압축응력을 측정하였다. 또한, HPFRCC의 휨성상을 평가하기 위해 KS F 2408 「콘크리트의 휨강도 시험방법」에 준하여 Photo 3과 같이 3등분점 재하시험을 실시하였으며, 휨시험시 초기균열발생 응력 및 변위, 최대휨응력 및 변위, 균열패턴과 휨응력-변위 곡선을 구하였다. 또한, HPFRCC의 에너지 흡수능력을 평가하기 위하여 휨응력-변위 곡선의 밑면적으로부터 각 시험체의 파괴에너지를 구하였으며, 이때 파괴에너지는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 최대휨응력(A점)인 지점과 최대휨응력에서부터 80%까지 저하된 지점(B점)에서 각각 구하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 압축성상에 대한 검토 및 분석

Table 6 및 Fig. 5는 각 시험체의 압축강도 측정결과를 나타낸 것이다.

동일 모르타르 매트릭스에 있어서도 마이크로 섬유만 단독 사용한 경우(No.1~No.3) 섬유종류에 따라 압축강도는 다르게 나타났으며, PP보다 PVA를 사용한 경우가 높은 압축강도를 나타내었다. 이는 PP의 경우 소수성이므로 매트릭스와의 부착력(약 0.4~0.8MPa<sup>9)</sup>)이 낮은 반면, PVA는 친수성이어서 매트릭스와의 부착력(1.0~5.0MPa<sup>10)</sup>)이 높고, 또한 섬유자체의 인장강도가 높아 압축응력하에서의 가교력이 증가하였기 때문인 것으로 사료된다. 반면 PVA 섬유를 사용하여 섬유직경을 100 및 200 $\mu$ m로 변화시킨 결과, 압축강도는 유사한 수준을 보이고 있다.

한편, No.4~No.6은 마이크로 섬유에 매크로 섬유로서 PVA660을 혼합 사용한 시험체의 압축강도를 나타낸 것으로, PP50+PVA660(No.4) 및 PVA100+PVA660(No.5)의 압축강도는 마이크로 섬유만 단독 사용한 경우(No.1 및 No.2)와 유사한 수준을 보이고 있어 하이브리드에 의한 압축강도의 향상효과는 나타나지 않았으나, PVA200+PVA660의 경우(No.6) 마이크로 섬유만 단독 사용한 경우(No.3)에 비해 압축강도가 크게 향상되는 것으로 나타났다. 이는 섬유의 혼합조건에 따라 섬유의 가교력이 다르기 때문으로 사료되며, 향후 이에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

또한, PP50+SF500(No.7)의 경우 PP50만을 단독 사용한 경우(No.1)에 비하여 압축강도가 크게 향상되었으며, 이는

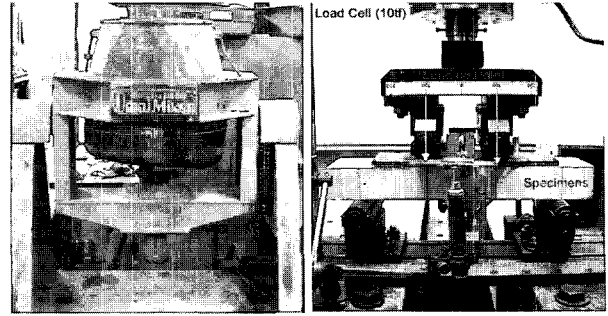


Photo 2 Omni mixer

Photo 3 Bending test

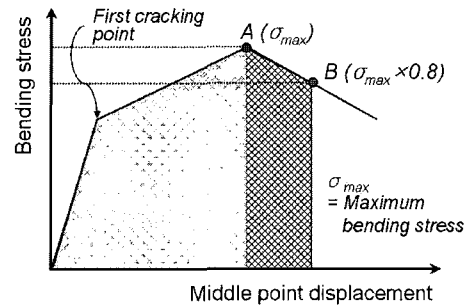


Fig. 4 Calculation method of toughness from bending stress-middle point displacement curve

Table 6 Testing results of compressive strength

Mix name	Compressive strength (MPa)				Comp. ratio to plain mix
	1	2	3	Ave.	
No.1	50.7	46.6	47.1	48.1	0.86
No.2	56.9	51.8	55.9	54.9	0.98
No.3	56.4	51.1	55.3	54.3	0.97
No.4	49.3	46.4	47.9	47.9	0.86
No.5	57.6	50.4	54.6	54.2	0.97
No.6	61.8	58.2	59.9	59.9	1.07
No.7	58.5	50.6	53.9	54.3	0.97
No.8	58.1	51.1	55.1	54.7	0.98
Plain	53.2	56.4	58.0	55.9	1.00

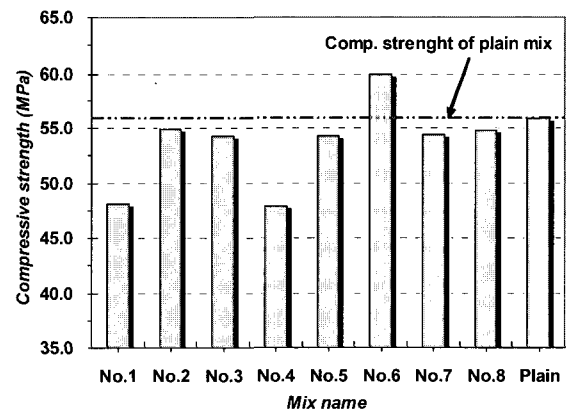


Fig. 5 Variation of compressive strength

PP50이 부착력 및 자체의 인장강도가 작고 신율이 높아 가교력이 작은 반면, SF500을 혼합 사용한 경우 후크형 강섬유의 가교력 상승에 의해 압축강도가 크게 향상된 것으로 판단된다. 한편, PVA100+SF500(No.8)의 경우 PVA100만 단독 사용한 경우(No.2)와 거의 유사한 압축강도를 발현하고 있다.

한편, 본 연구에 있어서 Plain에 비하여 섬유를 혼입함으로써 전반적으로 압축강도는 다소 저하하나 유사한 수준을 보이고 있으며, 반면 PP50을 단독 사용한 경우(No.1)와 PP50+PVA660의 경우(No.4)에는 Plain에 비하여 압축강도가 크게 저하하였고, PVA200+PVA660(No.6)의 경우 Plain에 비하여 비교적 크게 증가하였다.

### 3.2 휨성상에 대한 검토 및 분석

Table 7은 휨하중 작용하에 있어서 각 시험체의 초기균열 발생시 휨응력 및 변위, 최대 휨응력 및 변위의 측정결과를 나타낸 것이다.

#### 3.2.1 마이크로 섬유만 단독 사용한 경우

Fig. 6은 마이크로 섬유만 3% 사용한 시험체의 휨응력-변위 곡선을 나타낸 것이다.

우선 PP50을 단독 사용한 시험체는 초기균열이 발생한 이후 기존의 FRC(초기균열 발생시점의 휨응력과 최대휨응력이 동일)와 같이 응력이 일정수준까지 저하하다가 어느 지점부터 응력의 큰 증감 없이 변형만 지속적으로 증가하였다. 또한, 이 과정에서 1~2개의 추가 균열이 발생하였으며, 섬유의 파단 및 인발과 함께 최종 휨과피에 도달하였다. 이는 PP섬유 자체의 인장강도가 낮아 섬유혼입률 3%에 있어서 PP50이 부담할 수 있는 가교응력에 비해 초기균열부에 국부적으로 작용하는 외력이 상대적으로 크기 때문이며, 한편 변형만 지속적으로 증가하면서 최종과피에 도달하는 것은 PP섬유 자체의 신율이 높아(약 10% 이상) Photo 4와 같이 초기균열부의 지속적인 개구와 함께 섬유의 신장 및 인발(Photo 5(a))이 발생하였기 때문으로 사료된다.

또한, PVA100을 단독 사용한 시험체는 휨하중 작용하에 있어서 초기균열이 발생한 이후에도 응력의 저하 없이 변형의 증가와 함께 응력이 지속적으로 증가하는 변위경화(Displacement hardening)특성을 보이면서 최대휨응력에 도달하였으며, 이 과정에서 4~6개의 미세균열이 발생하였다. 이와 같이 초기균열이 발생한 이후에도 응력이 지속적으로 증가되는 이유는 초기균열면에 작용하는 힘보다 PVA100의 가교응력이 높아 주변의 매트릭스로 추가적인 균열발생을 유발하였기 때문으로 사료된다. 그러나, 기존의 PVA-HPFRCC와 같은 높은 변형능력 및 안정적인 멀티플크랙은 확인되지 않았으며, 이는 본 실험에 사용된

Table 7 Testing results of bending properties

Mix name	Specimens	At initial crack		At ultimate stress	
		Stress (MPa)	Disp. (mm)	Stress (MPa)	Disp. (mm)
No.1	1	6.20	0.299	6.26	0.295
	2	5.37	0.218	5.63	2.901
	3	4.09	0.169	4.56	1.517
	Ave.	5.22	0.229	5.48	1.571
No.2	1	4.41	0.179	9.18	1.689
	2	3.99	0.245	9.05	2.069
	3	4.34	0.241	8.58	1.635
	Ave.	4.25	0.222	8.94	1.798
No.3	1	5.74	0.282	11.45	2.398
	2	4.99	0.192	9.78	1.596
	3	5.18	0.194	12.09	2.773
	Ave.	5.30	0.223	11.11	2.256
No.4	1	5.60	0.230	7.77	3.341
	2	5.31	0.266	7.89	4.148
	3	4.93	0.201	7.36	2.959
	Ave.	5.28	0.232	7.67	3.483
No.5	1	6.46	0.283	12.26	4.678
	2	6.62	0.354	11.84	2.835
	3	6.34	0.285	11.82	2.670
	Ave.	6.47	0.307	11.97	3.394
No.6	1	6.70	0.228	10.44	2.565
	2	6.51	0.237	10.82	2.896
	3	5.12	0.166	9.66	2.764
	Ave.	6.11	0.210	10.31	2.742
No.7	1	4.89	0.177	6.38	0.563
	2	4.72	0.264	6.35	0.958
	3	5.01	0.290	6.35	0.945
	Ave.	4.87	0.244	6.36	0.822
No.8	1	9.89	0.927	10.22	1.168
	2	9.98	0.949	9.81	1.497
	3	9.61	0.967	10.27	1.499
	Ave.	9.83	0.948	10.10	1.388
Plain	Ave.	4.26	0.221	4.26	0.221

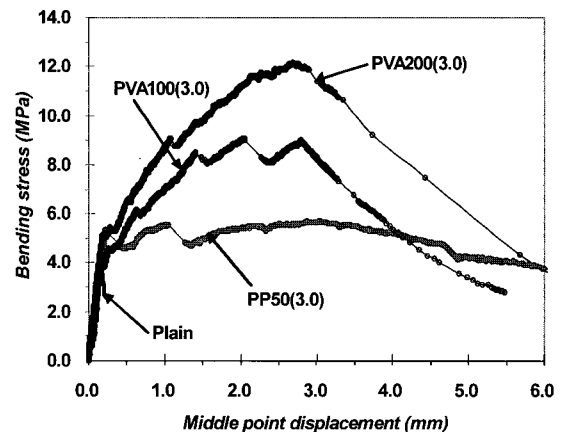


Fig. 6 Bending stress - displacement curve of specimens with only micro fiber

PVA가 오일링(Oiling) 처리를 실시하지 않아 화학적 부착력이 과도하여 섬유가 인발되지 않고 파단되었기 때문에 사료되며(Photo 5(b)), 이로 인해 최대휨응력 이후 응력의 급격한 저하와 함께 최종휨파괴에 도달하였다.

한편, PVA200을 단독 사용한 시험체는 PVA100의 경우와 유사한 휨응력-변위 곡선을 보이고 있으며, 휨하중하에서의 변형능력 및 균열성상이 PVA100의 경우보다 우수한 것으로 나타났다.

또한, 마이크로 섬유만 단독 사용한 경우 초기균열 발생 시 휨응력 및 변위는 각각 4.25~5.30 MPa 및 0.222~0.229 mm로 유사한 수준을 보이고 있으나, 최대휨응력 및 그때의 변위는 각각 5.38~11.11 MPa 및 1.571~2.256 mm로 마이크로 섬유의 종류에 따라 비교적 큰 차이를 보이고 있으며, 최대휨응력은 PVA200 > PVA100 > PP50의 순으로 나타났다.

### 3.2.2 마이크로 및 매크로 섬유를 혼합 사용한 경우

Fig. 7은 마이크로 섬유로서 PP50 2%와 매크로 섬유로서 PVA660 또는 SF500을 1% 혼합 사용한 시험체의 휨응력-변위 곡선을 나타낸 것이다.

우선, 매크로 섬유로서 PVA660을 혼합 사용한 경우 PP50을 단독 사용한 경우(No.1)와는 달리 초기균열 발생 이후 응력의 저하 없이 최대응력에 도달할 때까지 변형의 지속적인 증가와 함께 응력이 다소 증가하고 있어 PP50을 3% 단독 사용한 것보다 매크로 섬유로서 PVA660을 1% 치환한 경우가 최대휨응력 및 이때의 변형능력이 다소 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 이 경우에도 HPRCC의 특징인 안정적인 멀티플크랙은 발생하지 않았다.

또한, PP50에 매크로 섬유로서 후크(Hook)형의 강섬유인 SF500을 혼합한 경우 초기균열이 발생한 이후에 다소의 변위경화구간이 확인되었으나 최대휨응력에 도달한 후에는 다른 배합에 비하여 응력이 비교적 급격히 저하하였으며, Photo 6과 같이 초기균열 주변에 미세균열이 집중되면서 파괴에 이르는 것을 확인할 수 있었다.

이와 같이 PP50을 3% 단독 사용하는 것보다 매크로 섬유를 1% 혼합 사용하는 경우가 최대휨응력(PVA660 및 SF500의 경우 모두) 및 이때의 변형능력(PVA660의 경우만)이 향상되는 것을 확인할 수 있었으며, 매크로 섬유로서 SF500보다 PVA660을 사용한 경우가 보다 높은 휨강도 및 변형능력을 발휘하고 있다. 이는 SF500의 경우 최대휨응력 이후에 균열집중부에서 균열의 급격한 진전과 함께 강섬유의 인발이 발생하면서 파괴된 반면, PVA660의 경우 섬유 자체의 높은 부착력 및 신률(7%)로 인해 균열폭의 급격한 진전이 제어되었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 마이크로 섬유로서 PVA100 2%와 매크로 섬유로서 PVA660 또는 SF500을 1% 혼합 사용한 시험체의 휨응력-변위 곡선을 나타낸 것이다.

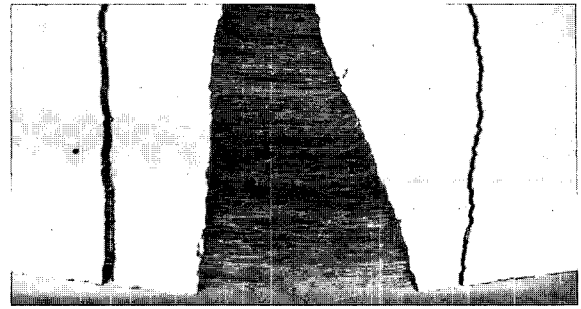
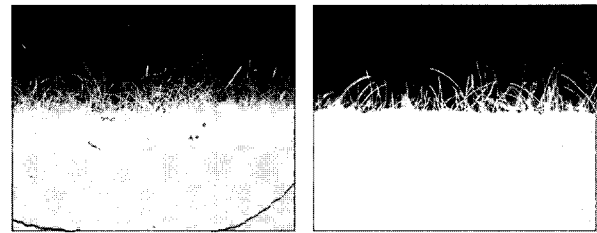


Photo 4 Bridging of PP fibers in opened crack



(a) PP50 (Pull-out & extension) (b) PVA100 (Pull-out & rupture)

Photo 5 Ruptured face of specimens reinforced with micro fibers

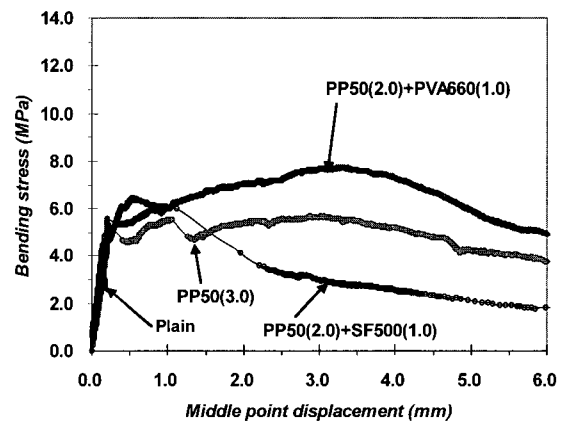


Fig. 7 Bending stress - displacement curve of each specimens (PP50+PVA660 or SF500)

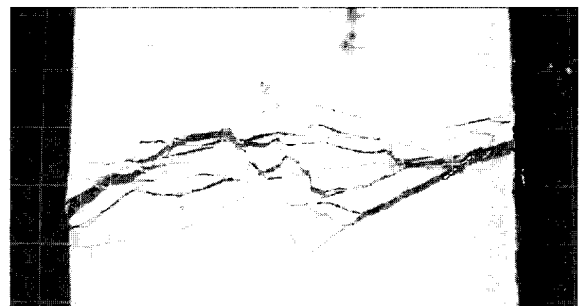


Photo 6 Crack pattern of bottom surface (No.7)

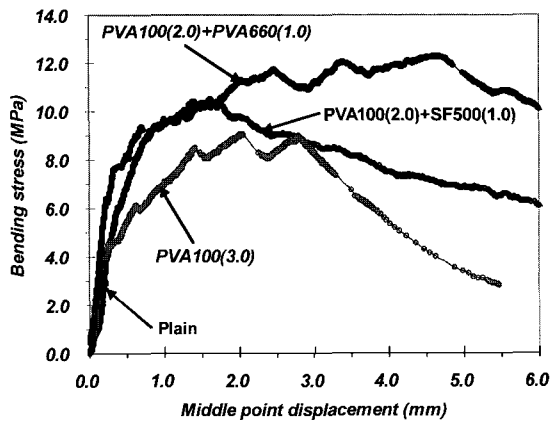


Fig. 8 Bending stress - displacement curve of each specimens (PVA100+PVA660 or SF500)

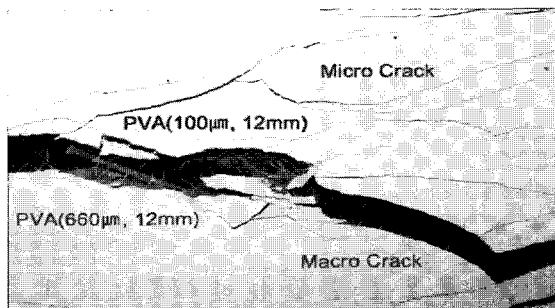


Photo 7 Multiple cracking of No.5 specimens

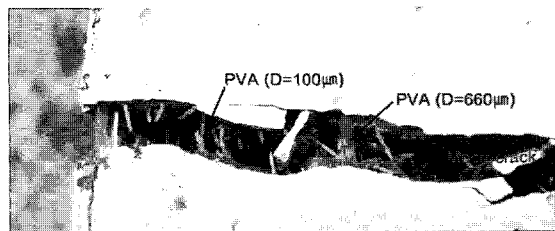


Photo 8 Bridging of macro fiber at macro crack (No.5)

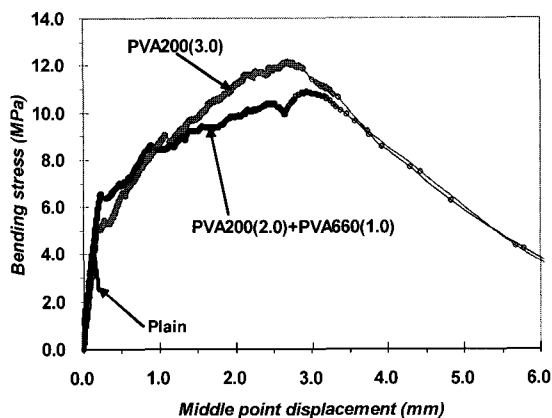


Fig. 9 Bending stress - displacement curve of specimens (PVA200+PVA660)

우선, PVA100에 매크로 섬유로서 PVA660을 혼합 사용한 경우 초기균열이 발생한 이후에도 응력 및 변형이 지속적으로 증가하는 안정적인 변위경화특성과 이 과정에서 다수의 미세균열인 멀티플크랙(Photo 7)특성을 보이고 있다. 더욱이 PVA100을 단독으로 사용한 것에 비하여 PVA660을 혼합한 경우가 초기균열강도, 최대휨응력 및 변형능력이 약 52, 34 및 93% 향상되었으며, 이는 Photo 8에 나타난 바와 같이 마이크로 크랙이 매크로 크랙으로 진전되는 단계에서 마이크로 섬유의 가교력이 상실된 후에도 매크로 섬유의 가교작용에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 마이크로 섬유 단독 사용에 비해 매크로 섬유로서 PVA660의 혼합 사용이 HPRCC의 최대휨응력 및 파괴 에너지 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.

한편, PVA100에 매크로 섬유로서 SF500을 혼합 사용한 경우 초기균열강도는 다른 배합에 비하여 상대적으로 높게 나타났고, 초기균열 발생 이후에는 미세균열이 초기균열부 주위에 집중하면서 최대휨응력에 도달하였으며, 이후에는 균열폭의 증가와 함께 강섬유인 SF500이 인발하면서 응력이 서서히 저하하는 휨거동을 보이고 있다. 이와 같이 매크로 섬유로서 SF500을 혼합 사용한 경우 HPRCC의 전형적인 특징인 변위경화 및 멀티플크랙은 확인되지 않았고 최대휨응력에서의 변위량도 다른 배합에 비하여 작게 나타났으며, 기존의 FRCC (Fiber Reinforced Cementitious Composite)와 유사한 휨거동을 보이고 있다. 더욱이, 이 경우 매크로 섬유로서 PVA660을 혼합한 경우에 비해 초기균열강도는 약 51% 향상되었으나 최대휨응력 및 변형능력은 크게 감소하였으며, 이는 SF500이 후크형이어서 초기균열 발생시까지의 매트릭스 구속효과가 상대적으로 큰 반면 초기균열이 발생한 이후에는 초기균열부 주위에만 미세균열이 집중하면서 응력집중이 발생하였고 이후 SF500의 인발과 함께 최종파괴에 도달하여 미세균열이 시험체 전반에 걸쳐 발생된 PVA660의 경우에 비하여 최대휨응력 및 변형능력이 저하된 것으로 판단된다.

따라서 본 연구의 범위에서는 마이크로 섬유로서 PVA100을 사용한 경우 매크로 섬유로서 PVA660의 혼합 사용이 SF500에 비하여 HPRCC의 최대휨응력 및 변형능력 향상에 유효할 것으로 판단된다.

Fig. 9는 마이크로 섬유로서 PVA200 2%와 매크로 섬유로서 PVA660 1%를 혼합 사용한 시험체의 휨응력-변위 곡선을 나타낸 것으로, 휨거동은 PVA200을 단독 사용한 경우(No.3)와 유사한 경향을 보이고 있다. 한편, PVA200에 PVA660을 혼합 사용한 경우 PVA200을 단독 사용한 경우에 비하여 초기균열강도 및 변형능력은 다소 향상되나 최대휨응력은 다소 저하하는 것으로 나타났으며, 본 연구에서는 유의할 만한 차이는 확인되지 않았다. 이와 같이 PVA200의 경우 PVA660과의 하이브리드에 의한 휨성능의 향상 효과는 보이지 않았으며, 따라서 마이크로 섬

유와 매크로 섬유 하이브리드에 의해 HPFRCC의 휨성능을 향상시키기 위해서는 섬유 종류 및 치수를 적절히 혼합할 필요가 있을 것으로 판단된다.

### 3.2.3 파괴에너지에 대한 검토 및 분석

Fig. 10은 각 시험체의 휨응력-변위 곡선으로부터 구한 파괴에너지의 변화를 나타낸 것으로, 마이크로 섬유만 단독 사용한 경우(No.1~No.3) 파괴에너지는 섬유의 종류에 따라 다소 큰 차이를 보이고 있으며, PP 섬유에 비하여 PVA 섬유를 사용한 경우가 A 및 B 지점에서 높은 파괴에너지를 발휘하고 있고, 이는 PVA를 사용한 경우가 최대 휨응력이 크게 향상되었기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 각 마이크로 섬유에 매크로 섬유로서 PVA660을 혼합 사용한 경우 A 및 B 지점에서의 파괴에너지는 마이크로 섬유만 단독 사용한 경우에 비해 크게 향상되었고, 특히 PVA100과 PVA660을 하이브리드 한 경우(No.5) 가장 우수한 파괴에너지를 발휘하고 있으며, 이는 PVA660을 혼합 사용함으로써 최대휨응력 및 변형능력이 크게 향상되었기 때문인 것으로 판단된다.

반면, 마이크로 섬유 PP50 또는 PVA100에 매크로 섬유로서 후크형 강섬유인 SF500을 혼합 사용한 경우(No.7~No.8)의 파괴에너지는 마이크로 섬유만 단독 사용한 경우(No.1~No.2)와 유사하거나 저하하는 것으로 나타났으며, 이는 SF500을 혼합 사용한 경우 단독 사용한 것에 비하여 휨하중 작용하에서 있어서 최대휨응력은 다소 증가하였으나 최대휨응력에서의 변위량이 저하하였기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 섬유를 혼합하지 않은 Plain 배합에 비하여 섬유를 혼합한 모든 배합이 A 및 B 지점에서의 파괴에너지는 우수한 것으로 나타났다.

### 3.2.4 휨시험시 균열패턴에 대한 검토 및 분석

Photo 8은 본 실험에 사용된 휨시험체 측면의 휨시험 종료시 균열패턴을 나타낸 것으로, PP 섬유를 사용한 경우에 비해 PVA 섬유를 사용한 경우가 시험체 전반에 걸쳐 균열이 분산되는 것으로 나타났으며, 마이크로 섬유만 단독 사용한 경우에 비해 매크로 섬유로서 PVA660을 혼합 사용한 경우가 시험체 배면에서의 균열이 분산되는 것을 확인할 수 있었다. 반면 매크로 섬유로서 SF500을 혼합 사용한 경우에는 초기균열 발생지점 부근에 집중적으로 복잡한 형상의 균열이 발생하였으며, 시험체 전반에 걸쳐 균열이 분산되지는 않았다.

## 4. 결 론

마이크로 및 매크로 섬유에 의해 보강된 HPFRCC의 역학적 특성을 실험·실증적으로 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

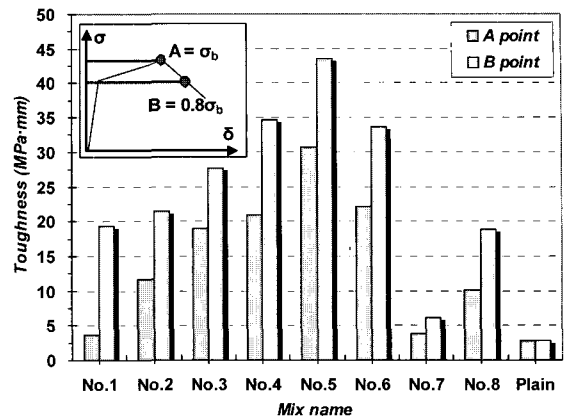


Fig. 10 Variation of toughness of each specimens

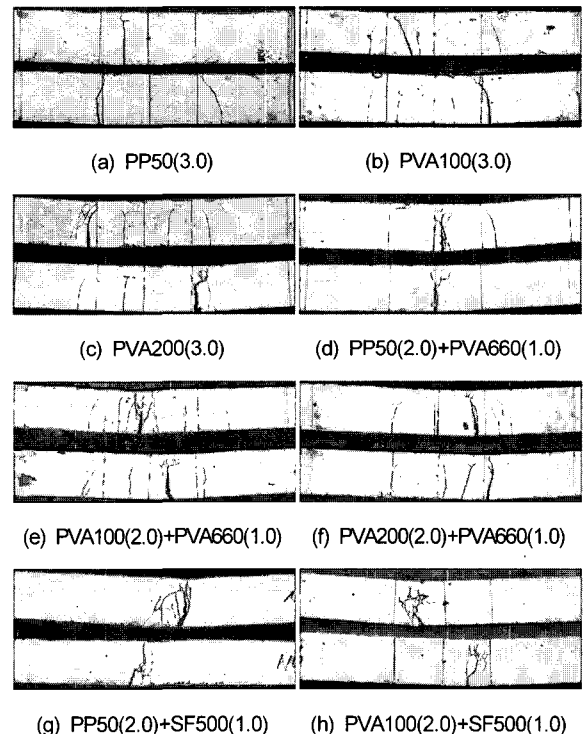


Photo 9 Crack pattern on the side face of specimens

- 1) HPFRCC의 압축강도는 Plain에 비해 전반적으로 저하하였고, 마이크로 섬유의 종류에 따라 다르게 나타났으며, PP 섬유에 비해 PVA 섬유를 사용한 경우가 높은 수준을 발휘하였다. 또한, 마이크로 섬유에 매크로 섬유를 혼합 사용한 경우 단독 사용한 경우의 압축강도와 유사한 수준을 보이고 있으나 PVA200+PVA660 및 PP50+SF500을 혼합 사용한 경우에는 마이크로 섬유만 단독 사용한 경우에 비해 압축강도가 크게 향상되는 것으로 나타났다.
- 2) 마이크로 섬유만 단독 사용한 HPFRCC의 휨성능은 섬유종류에 따라 다르게 나타났으며, PVA100 및 PVA200



- 을 사용한 경우에는 초기균열 발생 이후에도 응력과 함께 변형이 증가하는 변위경화현상이 발생하였고, 이때 다수의 미세균열이 발생하였다. 반면, PP50의 경우 초기균열 발생 이후 응력이 급격히 저하하다 일정한 수준에서 응력의 큰 증감 없이 초기균열부의 개구에 의해 변형만 지속적으로 증가하였다.
- 3) 마이크로 섬유인 PP50 및 PVA100에 매크로 섬유로서 PVA660을 혼합 사용한 경우, 단독 사용한 경우에 비해 초기균열시 휨응력, 최대 휨응력, 변형능력 및 휨터프니스 등의 휨성능이 향상되었다. 특히 PVA100과 PVA660을 혼합 사용한 경우 휨성능의 향상이 가장 우수하였고, 안정적인 변위경화특성 및 멀티플크랙이 발생하였으며, 마이크로 및 매크로 섬유의 하이브리드에 의한 휨성능 향상효과를 확인할 수 있었다.
  - 4) 반면, PVA200 및 PVA660을 혼합 사용한 경우 단독 사용한 경우에 비하여 초기균열시 휨응력, 변형능력 및 휨터프니스는 다소 증가하나 최대 휨응력은 다소 저하하는 것으로 나타났으며, 하이브리드에 의한 휨성능의 향상 효과는 확인할 수 없었다.
  - 5) 매크로 섬유로서 후크형 강섬유인 SF500을 혼합 사용한 경우의 휨응력-중앙변위 곡선은 기존의 FRCC와 유사한 경향을 보이고 있으며, 휨터프니스는 마이크로 섬유만 단독 사용한 경우에 비하여 전반적으로 저하하는 것으로 나타났다. 한편, 휨시험시 균열패턴을 살펴본 결과 초기균열 부근에 복잡한 형상의 균열이 집중되면서 파괴되었다.

### 참고문헌

1. Markovic, I., "Development of High Performance Hybrid Fibre Concrete," *HPFRCCs, Proceedings of the 4th International RILEM Workshop*, Ann USA, 2003, pp.277~300.
2. 김무한 외, "섬유의 종류, 형상 및 치환율에 따른

HPFRCC의 공학적 특성에 관한 실험적 연구", 한국건축시공학회 학술·기술논문발표회, 3권 2호, 2003. pp.59~62.

3. Victo C. Li and Large Volume, "High-Performance Applications of Fibers in Civil Engineering," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.83, 2002, pp.660~686.
4. Hiroshi Fukuyama, "Material Design of Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites," *Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites-Application and Evaluation*, Japan, 2002. 10, pp.85~94.
5. Naaman, A. E., "Strain Hardening and Deflection Hardening Fiber Reinforced Cement Composites," *Proceedings of the 4th International RILEM Workshop, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4)*, Ann USA, 2003, pp.95~113.
6. Markovic, I., "Development of High Performance Hybrid Fiber Concrete," *Proceedings of the 4th International RILEM Workshop, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites(HPFRCC4)*, Ann USA, 2003, pp.277~300.
7. 社團法人, 日本コンクリート工學協會, "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.
8. 김무한 외, "섬유종류 및 잔골재용적비에 따른 HPFRCC의 공학적 특성에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 분회 학술발표대회 논문집, Vol.24, No.1, 2004. 4, pp.315~318.
9. Baggott, R., "Fiber-Matrix Interfaces," *Proceedings of the 2nd International RILEM Workshop, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC2)*, Ann USA, 1996, pp.149~191.
10. Cynthia Wu, "Micromechanical Tailoring of PVA-ECC for Structural Applications," Doctoral Thesis in the University of Michigan, USA, 2001.

### 요 약

고인성 시멘트 복합재료(HPFRCC)는 시멘트페이스트 또는 모르타르에 고성능 단섬유를 보강하여 휨모멘트 및 인장력 작용하에서 변위(변형)경화특성 및 다수의 미세균열이 멀티플크랙 특성을 발휘함으로써 높은 인성 및 균열제어성능을 가진 재료로, 최근 이들 성능을 활용하여 고성능 보수·보강재, 충격완충재, 강재의 피복재, 지진시 에너지 흡수 디바이스 등 다양한 용도로의 활용이 시도되고 있다. 그러나 이들 HPFRCC의 역학적 성능은 사용되는 섬유의 종류 및 형상에 따라 다르며, 마이크로 크랙 및 매크로 크랙에 효과적인 섬유의 치수는 다른 것으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 마이크로 및 매크로 섬유의 종류, 각 섬유의 혼합조건을 변화시켜 HPFRCC의 압축 및 휨성상을 실험실적적으로 비교·검토함으로써 HPFRCC의 재료설계에 기초자료를 제시하고자 하였다.

그 결과, HPFRCC의 압축 및 휨성상은 사용된 마이크로 섬유의 종류에 따라 큰 차이를 보이고 있으며, PP 섬유에 비하여 PVA 섬유를 사용한 경우가 우수한 성능을 발휘하였다. 또한, 각각의 마이크로 섬유에 매크로 섬유로서 PVA660을 혼합 사용한 경우 PVA200을 제외하고는 초기균열시 휨응력, 최대 휨응력, 변형능력 및 휨터프니스 등의 휨성능이 향상되었다. 특히 PVA100과 PVA660을 혼합 사용한 경우 가장 우수한 성능을 발휘하였으며, 휨시험시 전형적인 변위경화특성 및 멀티플크랙 특성을 나타내었다. 반면, 매크로 섬유로서 SF500을 혼합 사용한 경우의 휨응력-중앙변위 곡선은 기존의 FRCC와 유사한 경향을 보이고 있으며, 휨터프니스는 마이크로 섬유만 단독 사용한 경우에 비해 전반적으로 저하하는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : HPFRCC, 하이브리드 섬유, 휨응력-중앙변위 곡선, 멀티플크랙, 터프니스