

# PVA 혼입률에 따른 HPFRCC의 역학적 특성에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on the Mechanical Properties of HPFRCC with Fiber Volume Fraction of PVA Fiber

변 장 배\*  
Byun, Jang Bae

이 원 석\*  
Lee, Won Suk

전에스더\*\*  
Jeon, Esther

윤 현 도\*\*\*  
Yun, Hyun Do

### ABSTRACT

High performance fiber-reinforced cementitious composite(HPFRCC) encompass a wide variety of cementitious composites whose behavior in tension is significantly more ductile than that of traditional fiber-reinforced concrete. Fibers in HPFRCC are increasingly being used for the reinforcement of cementitious matrix to enhance the toughness and energy absorption capacity and to reduce the cracking sensitivity of the matrix. In the past decade, HPFRCC have evolved with intensified research. HPFRCC for structural applications has been developed under the performance driven design approach. It is the aim of this study to obtain development of HPFRCC using polyvinyl-alcohol fiber(PVA). It was targeted a requirement of economic mixing and apply to structure member.

### 1. 서 론

고인성 섬유보강 시멘트 복합체(high performance reinforced cementitious composite, HPFRCC)는 시멘트 복합체에 단섬유를 1~2% 혼입하여 복합체에 변형경화성능을 부여하여 일반 콘크리트에 비해 높은 변형성능을 보이며 반복하중 하에서 내력 및 강성저하 현상을 개선시키는 것으로 보고<sup>1)</sup>되고 있다. 또한 우수한 인장변형성능을 갖는 HPFRCC는 내진구조 부재 뿐만 아니라 다양한 2차 제품 및 보수·보강용 재료 등의 활용성이 매우 높은 것으로 평가되고 있으며, 이러한 HPFRCC의 재료적 특성 및 구조부재로서의 역학적 특성에 관한 연구가 국내외에서 꾸준히 진행되고 있다. 그러나 이러한 우수한 성능을 갖는 HPFRCC를 구조부재에 적용하기 위해서는 시멘트 복합체의 성능에 관한 정량적인 평가가 선행되어야 하며, 특히 혼입되는 보강섬유의 기계적 특성 및 혼입율에 따른 성능이 규명되어야 한다. 또한 각 섬유의 물리/화학적 특성에 따라 매트릭스 자체의 물성(탄성계수, 파괴인성 및 인장강도)이 다르게 나타나며, 이는 섬유/매트릭스의 계면특성(마찰부착력 및 화학부착력)에도 영향을 미치기 때문인 것으로 보고되어지고 있다.<sup>2)</sup> 따라서 본 연구에서는 폴리비닐알콜(Polyvinyl-alcohol, PVA) 섬유의 혼입률이 HPFRCC의 경화성상에 미치는 영향을 강도 수준별로 분석함으로써, PVA 섬유로 보강된 HPFRCC의 성능을 정량적으로 평가하고, 나아가 HPFRCC를 이용한 구조부재의 설계기준을 마련하기 위한 기초 자료를 구축하고자 한다.

### 2. 실험

#### 2.1 시험체 계획

표 1은 PVA 섬유로 보강된 HPFRCC의 역학적 특성을 평가하기 위한 실험계획을 나타낸 것이다. 콘크리트설계기준 강도는 30N/mm<sup>2</sup>과 50N/mm<sup>2</sup>로 배합설계하였으며, 섬유가 혼입되지 않은 50-Mortar 시험체를 기준 시험체로 하여 PVA 섬유를 각각 1.0%, 1.5%, 2.0% 혼입하는 등 총 6배치의 시험체 제

\* 정희원, 충남대 건축공학과 석사과정

\*\* 정희원, 충남대 건축공학과 박사과정

\*\*\* 정희원, 충남대 건축공학과 교수, 공학박사

표 1 실험계획

시리즈	시험체명	PVA 섬유 혼입율 (vol.%)	W/C (wt. %)	W/B (wt. %)	W/M (wt. %)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )				
						C	SP <sup>1)</sup>	FA <sup>2)</sup>	SF <sup>3)</sup>	PVA
I	50-Mortar	-	45	33	22	626	626	564	63	-
II	30-PVA15	1.5	65			557	557	501	56	20
	30-PVA20	2.0				626	626	564	63	
III	50-PVA10	1.0	45	626	626	564	63	20		
	50-PVA15	1.5								
	50-PVA20	2.0								

\* 30-PVA15  
 ↳ 배합강도  
 ↳ 섬유혼입률

1) SP : Silica powder  
 2) FA : Fly-ash  
 3) SF : Silica fume

표 2 보강섬유의 특성

종류	길이 (mm)	직경 (μm)	인장강도 (N/mm <sup>2</sup> )	탄성계수 (kN/mm <sup>2</sup> )
PVA	15	39	1,323	25.39

표 3 혼화재의 물리적 성질

종류	비중 (g/cm <sup>3</sup> )	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	단위수량비 (%)
플라이애시	2.12	2,976	101

표 4 잔골재의 물리적 성질

종류	비중	흡수율 (%)	평균입경 (mm)
규사	2.64	0.38	0.20

표 5 시멘트의 물리적 성질

종류	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	비중 (g/cm <sup>3</sup> )	SO <sub>3</sub>	강열감량 (%)
초조강시멘트	6,469	3.15	4.36	0.6

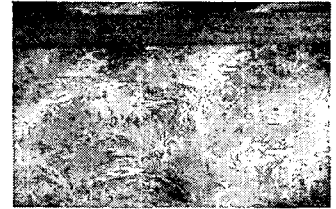


그림 1 PVA 섬유의 형상

작하였다. 또한 잔골재는 규사를 사용하였으며, KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」에 따라 압축시험체를 제작 및 시험하였고 KS F 2408 「콘크리트의 휨강도 시험방법」에 따라 휨시험체 제작 및 시험하였다.

## 2.2 사용재료

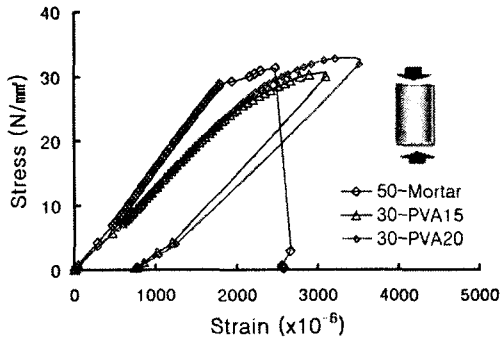
본 연구에 사용된 보강섬유는 마이크로 섬유인 PVA 섬유로써 인발과정에서 주위의 시멘트 경화물에 의해 섬유표면이 거칠게 되어 결합부착강도가 크게 되는 현상이 나타나는 것으로 보고<sup>3)</sup>되고 있으며, 표 2 및 그림 1에 섬유의 특성 및 형상을 나타내었다. 또한 모르타르 제조를 위한 결합재로서 시멘트는 비중 3.15의 초조강시멘트를 사용하였으며, 혼화재는 비중 2.12의 보령산 플라이애시(Fly-ash)를 사용하였다. 잔골재로서는 비중 2.64, 평균입경 0.2mm의 규사(Silica powder)를 사용하였으며, 표 3~5에는 혼화재, 잔골재 및 시멘트의 물리적 성질을 나타내었다.

## 3. 실험결과

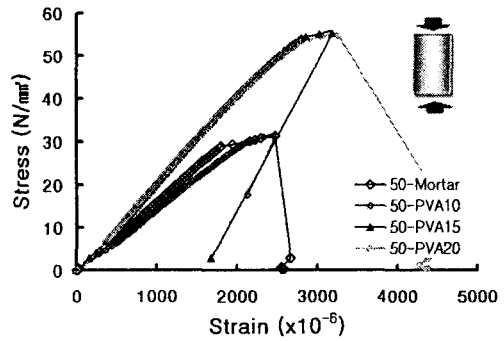
### 3.1 압축성능

그림 2는 PVA 섬유 혼입률에 따른 각 시험체의 단조 및 반복가력시 압축응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. 그림 2(a)에 나타난 바와 같이 30-PVA15와 30-PVA20 시험체에서 변형률 약 0.002까지는 유사한 강성의 증가를 보였으며, 이후 섬유혼입률이 2.0%인 30-PVA20시험체가 30-PVA15 시험체에 비해 다소 응력의 증가를 보였으며, 최대응력시 변형률도 약 10.89% 증가하였다. 또한 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 50-Mortar 시험체와 50-PVA10시험체가 유사한 최대응력 및 최대응력시 변형률을 나타내었으며, 50-PVA15 및 50-PVA20시험체에서도 유사한 최대응력 및 변형률을 나타내었다. 또한 그림 2(c)~(d)에 반복가력시의 응력-변형률 곡선에 나타난 바와 같이 최대응력은 22.92~60.31N/mm<sup>2</sup>를 보였으며, 50-PVA15시험체 및 50-PVA20시험체를 제외하고는 배합강도보다 낮은 강도를 나타내었다. 이는 섬유를 혼입함으로써 시공성의 불량으로 인해 섬유의 뭉침 현상이 나타난 것으로 판단된다.

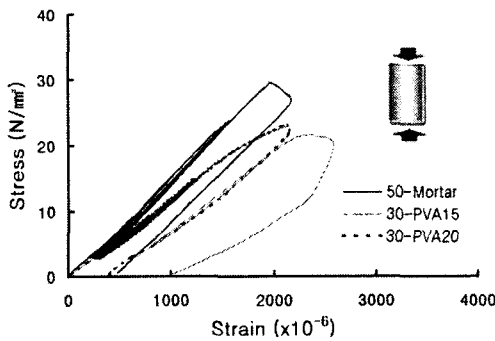
압축시험에 관한 단조 및 반복가력시 측정결과를 표 6에 정리하여 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이 단조가력시 압축응력은 30.33~55.14N/mm<sup>2</sup>으로 50-Mortar 및 50-PVA10 시험체에서 배합강도 이하의 값을 나타내었다. 또한 반복/단조가력시 압축응력비를 비교한 결과, 50-PVA20 시험체에서 1.11의 값을 보인 것을 제외하고, 배합강도가 50인 시험체에서는 0.95~0.98의 값을 보여 단조와 유사한 성능을 나타내었다. 그러나 배합강도가 30인 시험체인 30-PVA15 및 30-PVA20 시험체에서는 0.76 및 0.71의 응력비를 보여 반복가력에 따른 내력 손실이 비교적 큰 것으로 나타났다. 이는 배합강도에 따



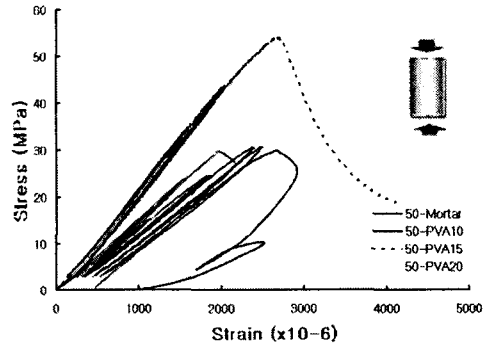
(a) 배합강도 30N/mm² 시험체의 단조가력시



(b) 배합강도 50N/mm² 시험체의 단조가력시



(c) 배합강도 30N/mm² 시험체의 반복가력시



(d) 배합강도 50N/mm² 시험체의 반복가력시

그림 2 각 시험체의 단조 및 반복가력시 응력-변형률 관계 곡선

표 6 PVA섬유를 사용한 HPRCC의 압축강도 측정결과

시험체명	단조가력			반복가력 압축강도 (N/mm²)	반복/단조 압축응력비
	압축강도 (N/mm²)	최대응력시 변형률	정탄성계수 (kN/mm²)		
50-Mortar	31.31	2,470	26.17	29.64	0.95
30-PVA15	30.33	2,895	25.87	22.92	0.76
30-PVA20	32.76	3,210	26.59	23.14	0.71
50-PVA10	31.44	2,483	26.20	30.59	0.97
50-PVA15	55.14	3,185	32.20	53.85	0.98
50-PVA20	54.56	3,253	32.07	60.31	1.11

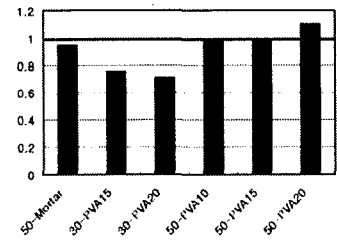
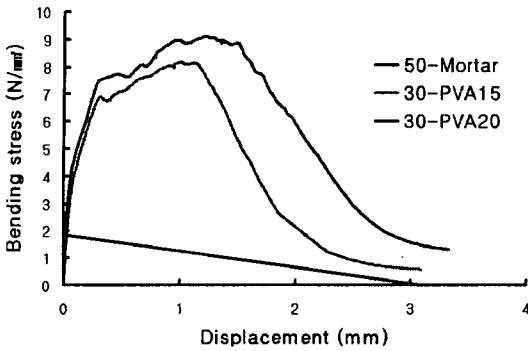


그림 3 반복/단조 압축응력비

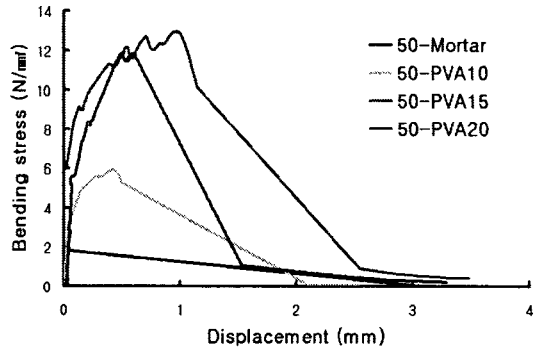
른 물시멘트비(W/C)의 영향으로 상대적으로 작은 물시멘트비를 갖는 배합강도 30인 시험체 내부의 공극률이 증가하여 섬유와 매트릭스 간의 부착력이 저하되었기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.2 휨성능

그림 3과 표 7은 PVA혼입물에 따른 HPRCC의 3등분점 재하시험에 의한 휨실험 결과 나타난 각 시험체의 하중-처짐곡선 및 강도특성을 나타낸 것이다. 표에 나타난 바와 같이 최대하중은 1.89~12.95N/mm², 최대하중시 변위량은 0.02~3.49 mm의 수준으로 배합특성에 따라 다소 차이를 보였다. 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 섬유혼입률이 증가할수록 50-Mortar 시험체에 비해 4배 정도의 최대휨응력 및 변위의 증가를 보였으며, 그림 3(b)에서는 최대휨응력이 50-PVA15>50-PVA20>50-PVA10>50-Mortar 시험체 순으로 나타났다. 또한, 50-PVA15시험체가 최대하중은 가장 크게 나타났지만 최대하중시 변형률은 PVA 섬유혼입률이 2.0%이 50-PVA20 시험체에서 다소 크게 나타났다. 그림 4는 각 시험체의 모멘트-곡률 관계를 각각 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 최대모멘트는 0.31~2.12kN·m로 다소 차이를 보였으며, 배합강도 30N/mm²인 시험체에서는 곡률 약 0.017까지는 유사한 증가를 보였으나, 섬유의 혼입률이 증가한 30-PVA20시험체에서 모멘트의 증가를 보였다.



(a) 배합강도 30N/mm² 시험체



(b) 배합강도 50N/mm² 시험체

그림 3 휨성상에서의 하중-변위 곡선

표 7 휨성상에서의 측정결과

시험체명	최대휨용력 (N/mm²)	최대휨용력시 변위량(mm)	최대 모멘트 (kN·m)	곡률 (× rad/m)
50-Mortar	1.89	0.02	0.31	0.006432
30-PVA15	8.13	3.09	1.33	0.055785
30-PVA20	9.09	3.34	1.49	0.132794
50-PVA10	5.92	2.95	0.97	0.119767
50-PVA15	12.95	3.49	2.12	0.055333
50-PVA20	11.87	3.29	1.94	0.119609

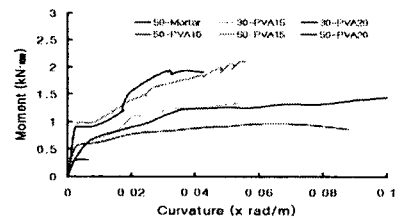


그림 4 모멘트-곡률 곡선

또한 배합강도 50N/mm²인 시험체에서는 50-PVA10 시험체를 제외한 두 시험체에서는 약 0.0063까지는 유사한 증가를 보였으며, 이 후 50-PVA15 시험체가 다소 높은 증가를 보였으나 그 이후 PVA 섬유가 2.0% 혼입된 50-PVA20 시험체에서 증가를 보이는 추세를 보였다.

#### 4. 결론

- (1) PVA 섬유의 혼입률에 따른 압축특성을 검토한 결과, 배합강도 30N/mm²인 시험체에서는 PVA 섬유의 혼입률에 증가에 따라 최대응력 및 최대응력시 변형률의 증가를 나타내었으며, 배합강도 50N/mm²인 시험체에서는 PVA 섬유의 혼입률이 1.0%인 시험체를 제외하고는 유사한 최대응력 및 최대응력시 변형률을 나타내었다. 또한 모든 시험체에 걸쳐 Mortar 시험체에 비해 높은 변형률을 나타내었으며, 혼입률이 증가할수록 압축강도의 증가를 가져오는 것으로 판단된다.
- (2) 휨성상에 대한 결과를 검토한 결과, 압축특성과 유사하게 보통강도 HPRFRC에서는 섬유의 혼입률이 증가할수록 하중이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 고강도 HPRFRC에서는 50-PVA15가 다른 시험체에 비해 높은 하중을 보였으며 50-PVA20, 50-PVA10 순으로 나타났다. 또한 PVA 섬유를 혼입한 시험체에서 50-Mortar 시험체에 비해 높은 연성을 나타내는 것으로 나타났으며, 시험체 전구간에서 보강섬유의 가교작용으로 인해 다수의 미세균열(Multiple cracking)이 발생하였다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 R01-2005-000-10546-0)의 연구비 지원으로 수행된 연구의 일부이고, 이 연구에 참여한 연구자는 「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받았으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. Victor C. Li, and Eeung, C.K.Y.(1992), " Steady-state and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 18(11), pp. 2246-2264.
2. 윤현도, 양일승, 한병찬, Hiroshi Fukuyama, 전에스터, 문연준(2004), "복합섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 특성," 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 24(1), pp.27~30.
3. Gao, Y., Mai, Y. W. and Cotterell, B.(1988), " Fracture of Fiber Reinforced Materials", Journal of Applied Mathematics and Physics(ZAMP), 39(4), pp. 550-572