

# 물-시멘트비에 따른 하이브리드 섬유보강 고인성 시멘트 복합체의 역학적 특성

## W/C Ratio Effects on Mechanical Properties of High Performance hybrid SC and PE Fibers Reinforced Cement Composites

윤 현 도\* 김 선 우\*\* 전 에스더\*\*\* 이 상 수\*\*\*  
Yun, Hyun-Do Kim, Sun-Woo Cheon, Esther Lee, Sang-Soo

### ABSTRACT

The research reported here is concerned with the effects of the fiber combination condition and water/cement ratio on the mechanical properties of high performance fiber-reinforced cementitious composites(HPFRCC). An experimental investigation of the behavior of steel cords(SC) and SC and Polyethylene(PE) hybrid fiber reinforced cementitious material under compressive and tensile loading is presented. In this experimental research, the tensile and compressive strength and strain capacity of HPFRCC were selected using the cylindrical specimens. The results show that W/C ratio is a significant effect factor on the compressive and tensile performance of HPFRCC. The envelope curve concept applies to hybrid fiber-reinforced cementitious composites in tension just as it does to compressive stress-strain curve of fiber-reinforced cement composites. For practical purposes, the tensile envelope curve may be taken to be the same as the monotonic tensile stress-strain curve.

### 1. 서론

최근 정부에서는 국가유망기술 21을 선정하여 그 핵심기술확보를 위하여 국가적 역량을 집중하여 향후 해당분야에 대하여 세계 10위권 이내에 진입할 것을 목표로 하고 있다고 발표하였다. 국가유망기술 21에는 유비쿼터스 사회기반구축·관리기술과 재난 및 재해 예측관리기술이 건설분야와 밀접한 관계를 갖고 있으며 해당 두 기술에서 요구하는 주요한 내용은 구조물의 성능평가, 모니터링, 제진구조, 내진보강 등을 주요한 내용으로 포함하고 있다.

기존 연구결과<sup>1)-4)</sup>를 근거로 판단하여 볼 때, 이와 같이 사회적으로 요구되고 있는 다양한 기술의 기반 기술 중 하나로 활용도가 높게 평가되는 것은 기존 콘크리트의 취성적인 특성을 개선한 고인성 시멘트 복합체(High performance fiber-reinforced cement composite, HPFRCC)의 제조 기술 및 성능평가라 할 수 있다. 고인성 시멘트 복합체는 시멘트 모르타르에 시멘트 체적비 2%이내의 단섬유를 혼입보강하여 직접인장하에서 시멘트 복합체에 다수의 미세균열(Multiple crack)을 유발하며 초기 인장균열 발생이후에도 응력저하 없이 높은 인장변형능력을 확보하는 시멘트 복합체로 정의 된다<sup>5)</sup>. 이와 같이 콘크리트의 취성적인 성질을 개선하고 다수 균열특성을 부여함으로써 기존 콘크리트에 비하여 우수한 에너지 흡수능력 및 고내구성을 갖는 신재료는 구조물의 보수/보강재료, 내진요소 및 주요구조부재에 활용 가능성이 높은 것으로 평가된다.

그러나 현재까지는 고인성 시멘트 복합체의 제조 방법에 중점을 두고 다소 제한된 범위내에서 섬유 종류 및 혼입량 등에 따른 고인성 시멘트 복합체의 역학적 특성에 관한 연구가 진행되어져 왔으며 각 연구자들에 따라 고유한 제조 기법을 개발하였다<sup>1)-4)</sup>. 이러한 신재료가 전술한 바와 같이 다양하게

\* 정희원, 충남대학교 건축공학과 교수

\*\* 정희원, 충남대학교 대학원 박사과정

\*\*\* 정희원, 한밭대학교 건축공학과 교수

활용되기 위해서는 다양한 배합조건에 따른 고인성 시멘트 복합체의 성능평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 이에 본 논문에서는 부착력 및 휨강성이 우수한 꼬인 5연선 강섬유(Steel cord, SC)와 고강도 폴리에틸렌(Polyethylene, PE)를 하이브리드 보강한 고성능 시멘트 복합체에서 물시멘트비에 따른 고인성 시멘트 복합체의 경화전후의 특성을 평가하고자 한다.

## 2. 고인성 시멘트 복합체의 제조 및 굳지 않은 성질

### 2.1 실험계획

시멘트 복합체에 변형경화특성을 부여하기 위하여 본 연구에서는 매크로 꼬인 5연선 강섬유(SC)와 마이크로 PE 섬유를 하이브리드 보강하였으며 섬유의 혼입조건 및 물시멘트비에 따른 시멘트 복합체의 경화전후 성상을 평가하고자 표 1과 같은 배합조건으로 실험계획 하였다. 실험체 제작시 사용된 시멘트는 T사의 조강포틀랜드 시멘트(비중 3.14), 세골재는 S사에서 생산된 접착제용 규사7호(비중 2.61, 직경 105~120 $\mu$ m)를 사용하였다. 시멘트 복합체의 보강 섬유로는 D사에서 생산된 타이어 보강용 꼬인 5연선 강섬유, 합성섬유 PE는 D사 DYN-A가 각각 사용되었으며 각 섬유 특성은 표 2와 같다.

### 2.2 비빔방법

섬유보강 시멘트 복합체의 제조시 재료의 투입 순서 및 비빔시간은 섬유의 뭉침 및 침강에 중요한 영향을 끼치는 요인이며 이는 경화전후 복합체의 특성에 주요한 영향인자가 되기도 한다. 본 연구에서는 모르타르에 비중이 낮은 합성섬유를 1/2로 나누어 투입하고 30초씩 비빔후 비중이 높은 강섬유를 1/3씩 나누어 투입한 후 각각 40초씩 비빔하였으며 모든 섬유를 투입한 후 1분 30초 동안 비빔하여 토출하였다.

### 2.3 굳지 않은 복합체의 특성

섬유의 하이브리드 조건 및 물시멘트비에 따라 시멘트 복합체의 특성을 평가하기 위하여 공기량, 단위중량, 플로우 값 등을 KS 규격에 준하여 시험을 하였다. Fig. 1은 물시멘트비 및 섬유의 하이브리드 조건에 따른 결과를 비교하여 나타낸 것으로 예상된 바와 같이 물시멘트비가 증가됨에 따라 플로우 값은 증가되고 있으나 단위중량 및 공기량은 물시멘트비가 증가됨에 따라 감소되는 경향을 보이고 있다. 섬유의 하이브리드 조건에 따른 변화를 보면 합성섬유인 PE량이 증가됨에 따라 공기량 감소되는 경향을 보이고 있는 반면 단위중량은 감소되는 경향을 보이고 있다. 플로우 값은 다소 증가되는 경향을 보이고 있으나 현재

표 1. 배합조건

기 호	W/C	섬유 혼입률 V <sub>r</sub> (Vol. %)		단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )		
		SC	PE	시멘트	물	모래
SC0.50+PE1.00	0.45	0.50	1.00	1041	470	417
SC0.75+PE0.75		0.75	0.75	1041	470	417
SC0.50+PE1.00	0.60	0.50	1.00	895	537	358
SC0.75+PE0.75		0.75	0.75	895	537	358

표 2. 섬유특성

종류	비중	길이 (mm)	직경 ( $\mu$ m)	형상비	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
Steel Cord	7.85	32	405	79	2300	206
PE	0.97	15	12	1250	2500	75

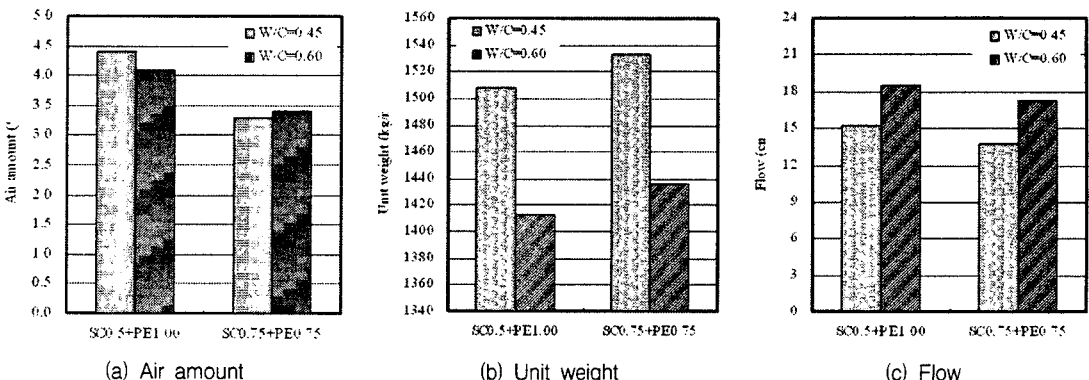


Fig. 1 Fresh characteristics of HPFRCC

한 차이는 나타나지 않았다.

### 3. 고인성 시멘트 복합체의 역학적 특성

본 연구에서는 고인성 시멘트 복합체의 섬유 하이브리드 조건 및 물시멘트비에 따른 역학적 특성을 평가하기 위하여 제조된 시멘트 복합체를 이용하여  $\phi 100 \times 200$  원주형 공시체에 대한 단조 및 반복 압축, 직접 단조 및 반복 인장, 인장/압축 반복재하를 실시하였다. 직접인장 재하를 위한 가력은 Fig. 2(a)에 나타난 바와 같고 가력방법, 속도 및 공시체의 가력부 응력집중 부위에 대한 보강방법은 참고 문헌 \*에 나타난 바와 같다.

#### 3.1 압축거동

Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 동일 물시멘트비를 갖는 HPMFRCC에서 휨강성 및 부착강도가 높은 SC의 혼입율이 증가됨에 따라 초기강성 즉 탄성계수가 증가되었으며 또한 압축강도 이후 취성적인 파괴 성향을 연성적으로 개선하는 특성을 보이고 있다. 그러나 이러한 경향은 물시멘트비가 감소됨에 따라 둔화되는 경향을 보이고 있으며 이는 압축재하시 HPMFRCC내에 보강된 SC에 의해 시멘트 매트릭스의 체적변화를 구속함에 따른 것으로 판단된다. Fig. 2(c)는 반복 압축재하시 거동 특성으로 단조재하시와 유사한 특성을 보이고 있으며 반복재하에 따른 재하곡선 특성 등은 물시멘트비에 따라 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

#### 3.2 직접 인장거동

Fig. 2(d)는 단조 직접 인장재하시 HPMFRCC의 거동 특성을 비교하여 나타낸 것으로 물시멘트비 45%에서는 섬유의 하이브리드 조건이 인장거동에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났으나 이는 Fig. 1(c)에 나타난 바와 같이 낮은 플로우 값이 낮아 섬유의 분산이 원활하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 플로우 값이 높아 비교적 섬유의 분산이 양호한 물시멘트비 60%인 HPMFRCC에서는 SC 혼입률이 증가됨에 따라 인장강도는 큰 차이를 보이지 않으나 유사변형경화성능이 크게 향상되는 것으

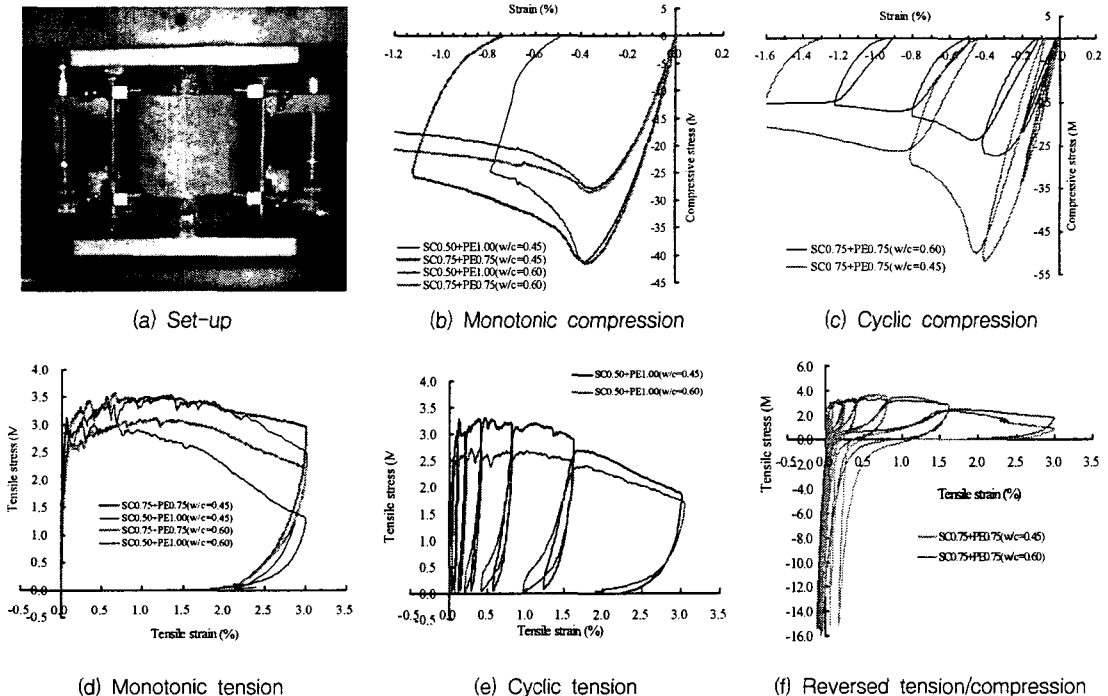


Fig. 2 Stress-strain curve of HPMFRCC

로 나타났다. 이는 HPRCC내 보강된 부착력 및 강도가 높은 매크로 SC 섬유가 균열면을 가교하여 매트릭스내 마이크로 균열이 매크로 균열로 진전되는 것을 지연함에 따른 것으로 판단된다. Fig. 2(d)로부터 섬유의 혼입조건보다는 물시멘트비가 HPRCC의 인장강도를 지배하는 것을 알 수 있으며 본 연구범위내에서 섬유의 혼입조건이 동일한 경우 물시멘트비와 무관하게 대등한 유사변형경화 특성을 보이는 것으로 판단된다. Fig. 2(e)와 같이 인장반복하에서도 단조재하시와 동일한 거동 특성을 보이고 있는 것을 알 수 있으며 PVA와 같은 합성 마이크로 섬유만으로 보강된 HPRCC에 비하여 제하시 핀칭(Pinching)현상이 강섬유 혼입에 따라 크게 감소되는 것으로 나타났다.

### 3.3 인장/압축거동

본 연구에서 개발된 HPRCC를 내진요소 및 내진보강에 적용시 그 성능을 평가하여 개발된 신재료의 해당분야에의 적용 가능성을 평가하기 위한 기초연구로써 인장/압축 반복재하 시험을 실시하였다. Fig. 2(f)는 SC와 PE 섬유를 각각 0.75%씩 하이브리드 보강한 HPRCC에서 물시멘트비(45% 및 60%)에 따른 인장/반복거동 특성을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 2(e)와 같이 물시멘트비가 증가됨에 따라 인장강도는 다소 감소되는 경향을 보이고 있으나 유사변형경화능력 및 제하시 핀칭특성은 큰 차이를 보이지 않고 있다. 또한 압축강도의 1/3 강도 범위까지의 반복 압축재하 및 제하시 강성 변화 특성도 물시멘트 및 섬유의 혼입조건에 따라 큰 차이는 보이지 않았다.

## 4. 결론

섬유 혼입율(시멘트 체적비) 총 1.5%내에서 매크로 포인 5연선 강섬유(SC)와 마이크로 합성섬유(PE)를 하이브리드 보강한 HPRCC에 있어서 경화전후 성상에 대한 평가결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 총 섬유 혼입률 1.5%에 있어서 마이크로 합성섬유인 PE의 혼입률이 증가됨에 따라 굳지 않은 HPRCC의 공기량은 증가되며 이로 인하여 단위중량이 감소되는 경향을 보였다. 그러나 플로우 값은 큰 변화를 보이지 않았다.
- 2) 보강섬유의 하이브리드시 강섬유의 섬유율이 증가됨에 따라 HPRCC의 압축강도는 큰 변화를 보이지 않으나 탄성계수는 증가되며 압축강도 이후 취성적인 파괴특성도 다소 감소되는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 물시멘트비가 증가됨에 따라 다소 경감되는 성향을 보였다.
- 3) 본 연구에서 개발된 HPRCC는 직경 100mm, 높이 200mm인 원주형 공시체를 활용한 직접 인장재하시 0.75% ~ 2.00%의 유사변형경화성능을 발휘할 수 있는 것으로 평가되며 이는 균열면에서 부착성능이 우수한 SC의 가교작용에 따른 응력재분배가 효율적으로 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. 아울러 다양한 반복 이력조건하에서 본 연구에서와 적용한 SC의 보강시 HPRCC의 다수균열특성 및 에너지 흡수능력이 기존 합성섬유만으로 보강된 HPRCC에 비하여 크게 향상되어 내진요소 및 내진보강에 활용 가능성이 높은 것으로 평가된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구사업((과제번호 R01-2005-000-10546-0)의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임

### 참고문헌

- 1) JCI(2002), "Ductile Fiber Reinforced Cement Composites (DFRCC)," Proceedings of the JCI International Workshop on DFRCC.
- 2) 윤현도, 양일승, 한병찬, 福山洋, 전에스터, 문연준(2004), "복합섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 인장거동," 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 24(1), pp. 55~58
- 3) Li, V.C., and Leung, C., Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 118(11), pp. 2246-2264, 1992
- 4) Fukuyama, H., Suwada, H, and Yang, I. S., "HPRCC Damper for Structural Control," Proc. Of JCI int'l Workshop on DFRCC, Gifu, Japan, pp.219-228
- 5) Naaman, A.E., "High Performance Fiber Reinforced Cement Composites," Concrete Structures for the Future, IABSE Symposium, Paris-Versailles, 1987, pp. 371-376