

# 고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 인장강성

## Tension Stiffening of High Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites

윤 현 도\* 양 일 승\*\* 한 병 찬\*\*\* 福山洋\*\*\*\* 전 에스더\*\*\*\* 김 선 우\*\*\*\*  
Yun, Hyun-Do Yang, Il-Seung Han, Byung-Chan Hiroshi, Fukuyama Cheon, Esther Kim, Sun-Woo

### Abstract

This paper presents the tensile behavior of 8 high performance fiber-reinforced cementitious composites (HPFRCCs) members, each reinforced with one deformed bar 16mm in diameter. The variables included HPFRCC(Ductal, steel cord and polyethylene hybrid fiber, PE fiber) versus normal concrete. Fibers used in HPFRCC significantly increased tensile strength, ductility, and tension stiffening of cementitious materials. For HPFRCC, after first cracking, tensile load continue to rise without fracture localization. Sequentially developed parallel cracks contributed to the inelastic strain at increasing stress level. After yielding of the reinforcing bars, HPFRCC showed increases in loads with increasing strains.

### 1. 서론

고인성 시멘트 복합체(High Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites, HPFRCCs)는 직접 인장응력하에서 초기 인장균열 발생이후에도 균열을 가교(Bridge)하는 섬유에 의해 균열 인접 부위 매트릭스에 인장응력을 재분배하여 시멘트 매트릭스내에서 다수의 미세균열(Multiple crack)을 폭 넓게 분산함으로써 취성적인 특성을 갖는 시멘트 복합체에 변형경화특성을 부여한 새로운 차세대 건설재료로 평가되고 있다.<sup>1)</sup> 최근 이러한 특성을 갖는 HPFRCC를 보수/보강재료, 내진요소(Seismic device) 및 주요 내진부재에 적용하기 위하여 요구되는 목표성능(인성과 미세한 다수균열 특성)을 만족시키는 HPFRCC의 제조기술 개발 및 성능 평가에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는 실정에 있다. HPFRCC는 압축성능 보다는 인장성능이 획기적으로 개선된 시멘트 복합재료로 주로 직접인장 및 휨인장력을 받는 부위에 적용 가능성이 높은 재료로 판단되며, 이러한 응력하에서 구조부재의 HPFRCC 및 철근이 일체로 외력에 저항함으로써 HPFRCC의 높은 인장강도 및 변형능력으로 인한 구조부재에서의 기여분은 인장강성(Tension stiffening)으로 나타날 수 있다.

이에 본 논문에서는 부착력 및 휨강성이 우수한 자동차 타이어 보강용 꼬인 5연선 강섬유(Steel cord)를 사용한 높은 인장변형능력을 확보한 고성능 시멘트 복합체의 제조 기술을 개발하고 이러한 새로운 개념의 인장강성 특성을 규명함으로써 향후 HPFRCC의 구조적인 활용을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

### 2. 인장강성 모델

균열발생후 균열사이의 콘크리트가 인장력에 저항함으로써 인장력하에서 철근콘크리트 부재의 강

\* 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수

\*\*\* 정회원, 충남대학교 대학원 석사과정

\*\* 정회원, 충남대학교 건축공학과 강사

\*\*\*\* 정회원, 일본건축연구소 구조그룹 상석연구원

본 연구는 건설교통부 2003년 건설핵심기술연구개발사업 연구비 지원(과제번호 03산학연A10-01)에 의한 연구의 일부임

성을 증대시키는 현상을 인장강성이라 정의된다. 초기균열 발생후 콘크리트의 평균응력은 감소되고 균열이 진전됨에 따라 평균응력은 더욱 감소되는 특성을 보인다. 철근콘크리트 부재에서 인장강성 효과는 CEB-FIP 및 Collins와 Mitchell에 의해 평가될 수 있으며 CEB에 의해 제안된 방법은 Leonhardt의 실험결과를 근거로 다음 식(1)과 같이 제안되었다.

$$\epsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[ 1 - \alpha_1 \alpha_2 \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \geq 0.4 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (1)$$

여기서  $\sigma_s$ 는 철근의 응력,  $\sigma_{sr}$ 는 계산된 철근의 응력,  $\alpha_1$ 은 철근의 부차특성값(이형철근 1.0),  $\alpha_2$ 는 하중의 특성값(단기 단조하중 1.0, 반복 및 지속하중 0.5)이다.

콘크리트의 인장강성 효과에 대한 평가방법으로 직접인장강도 시험결과를 근거로한 평균 콘크리트 인장응력-변형률 관계를 이용하여 구할 수 있다. Collins와 Mitchell에 의해 제안된 평균인장응력  $f_c$ 는 다음 식(2)와 같다.

$$f_c = \frac{\alpha_1 \alpha_2 f_{cr}}{1 + \sqrt{500 \epsilon_{cf}}} \quad \epsilon_{cf} > \epsilon_{cr} \quad (2)$$

여기서  $f_{cr}$ 는 콘크리트의 인장강도,  $\epsilon_{cr}$ 은 균열 발생시 콘크리트의 변형률,  $\epsilon_{cf}$ 는 응력에 의해 콘크리트에 유발된 변형률,  $\alpha_1$ 은 철근의 부차특성값(이형철근 1.0),  $\alpha_2$ 는 하중의 특성값(단기 단조하중 1.0, 반복 및 지속하중 0.7)이다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험계획

그림 1은 인장강성 시험체의 형상 및 단면을 나타낸 것으로 시험체의 단면은 55 × 55 × 500mm의 시멘트 복합체에 직경 16mm



그림 1. 인장강성 시험체 형상 및 치수

인 이형철근의 매립하여 인장강성 효과를 평가하고자 하였다. 실험변수는 복합체의 종류 및 재하조건으로 시험체 제작된 시멘트 복합체는 콘크리트, 덕탈(Ductal), PE 혼입율 1.5%로 보강된 HPRCC (PE1.50), SC 혼입율 0.75%와 PE 혼입율 0.75%를 하이브리드한 HPRCC (SC0.75+PE0.75) 등 4개의 복합체를 대상으로 인장강성 효과를 평가하였다. 또한, 단순 인장 및 인장반복 재하방법을 적용하였다. 시험체의 배합조건은 표 1과 같고 사용된 시멘트는 T사의 조강포틀랜드 시멘트(비중 3.14), 세골재는 S사에서 생산된 접착제용 규사7호(비중 2.61, 직경 105~120 $\mu$ m)를 각각 사용하였다. 시멘트 복합체의 보강용 섬유로는 D사에서 생산된 타이어 보강용 꼬인 5연선 강섬유, 합성섬유 PE는 D사 DYN-A가 각각 사용되었으며 각 섬유 특성은 표 2와 같다.

#### 3.2 비빔방법 및 시험방법

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.

표 1. 배합조건

기호	W/C	섬유 혼입률 V <sub>f</sub> (Vol. %)		단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )		
		SC	PE	시멘트	물	모래
PE1.50	0.45	-	1.50	1046.5	470.9	418.6
SC0.75+PE0.75		0.75	0.75	1041.0	468.7	416.6

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

### 3.3 압축 및 인장거동 특성

그림 2는 각 복합체의 압축강도 실험결과를 비교하여 나타낸 것으로 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수는 PE, SC와 PE를 하이브리드 보강한 HSPFRCC복합체에 비하여 높게 나타났다. 이는 섬유가 시멘트 매트릭스를 불균질하게 만들어 복합체의 압축강도를 저하시킨 것으로 판단된다. 콘크리트의 압축강도시 변형률 0.27%로 PE 및 SC와 PE의 하이브리드 HSPFRCC의 압축강도 변형률은 각각 0.37% 및 0.44%로 콘크리트의 최대 변형률에 비하여 높게 나타났으며 이는 시멘트 복합체 내에 포함된 골재에 의한 영향으로 판단된다.

그림 3은 HSPFRCC로 제작된 원형 공시체의 직접인장강도 단조 및 반복재하 실험결과를 비교하여 나타낸 것으로 단조재하시 합성 섬유유로 보강된 HSPFRCC (PE1.50)는 1%, 하이브리드 복합체 (SC0.75+PE0.75)는 1.2%까지 변형경화 특성을 보이고 있으며 총 섬유 혼입률이 동일한 경우 단일한 마이크로 합성섬유만을 사용한 경우에 비하여 강성 및 탄성계수가 높은 매크로 SC와 하이브리드화한 HSPFRCC는 인장강도 및 반복재하시 펀칭현상 억제에 효율적인 것으로 평가되었다.

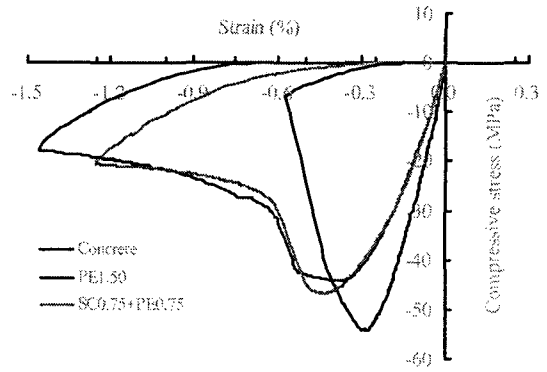
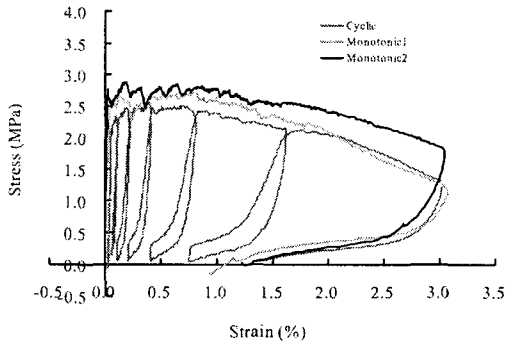
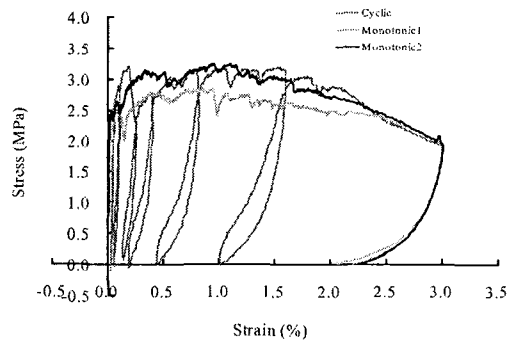


그림 2. 복합체의 압축응력-변형률 관계



(a) PE 1.50



(b) SC0.75+PE0.75

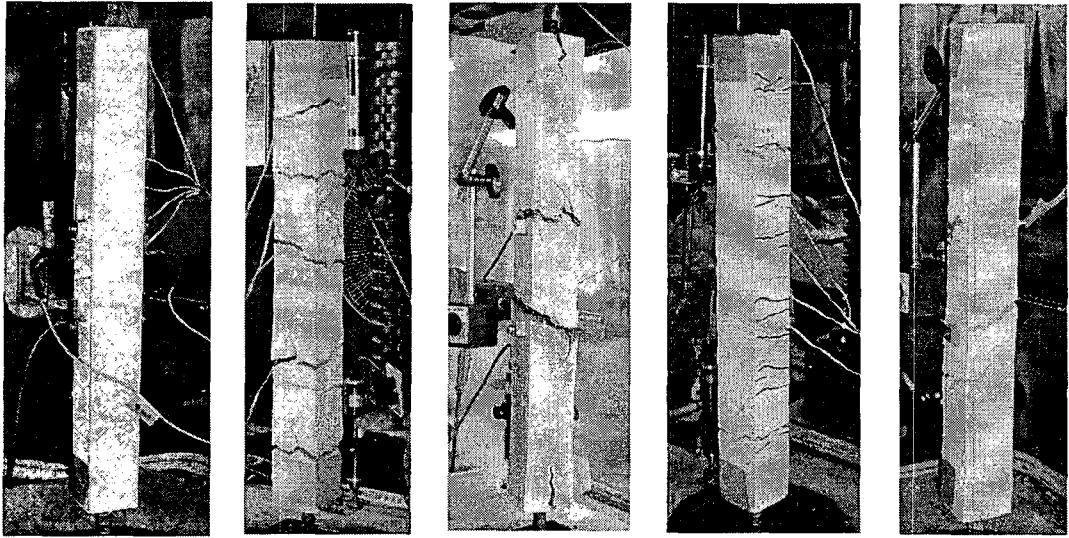
그림 3. 인장응력-변형률 관계

### 3.4 인장강성 특성

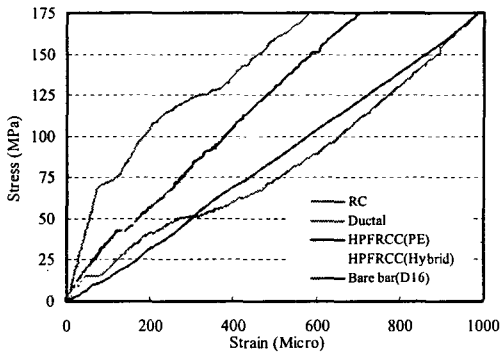
본 시험체는 개발된 고인성 시멘트 복합체가 철근콘크리트 부재내에서 미소한 다수균열 발회가능성을 검토하기 위한 것으로 피복두께를 195mm로 철근직경의 약 1.22배로 구조기준 2.5배를 만족시키지 못하고 있다. 따라서 개발된 HSPFRCC의 인장강성 효과를 정량적으로 평가하는 것은 곤란하지만 사진 1과 같이 미소한 다수 균열분포를 비교하여 볼 때 개발된 HSPFRCC의 철근콘크리트 부재에 적용시 철근항복에 이르기 전까지 국부적인 균열이 아닌 미소한 다수균열의 발회가 가능한 것으로 평가되며 콘크리트 및 Dutal에 비하여 높은 미세균열 분산 능력이 있는 것으로 판단된다.

그림 4는 각 시멘트 복합체내에 매립된 D16 철근에서 상부면으로 복합체 내부로 125mm(4등분점)에 부착된 스트레인 게이지(Wire strain gage)의 변형률과 철근에 작용된 단조 인장응력의 관계를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 Dutal에 의한 인장강성 효과가 가장 우수한 것으로 나타났으며 HSPFRCC는 콘크리트에 비하여 우수한 인장강성 특성을 보이고 있는 것으로 평가되었다.

반복재하시 복합체의 균열양상 및 인장강성 특성은 단조재하시 특성과 유사한 경향을 보였으며 다만 콘크리트 시험체의 경우 반복재하시 사이클이 진행됨에 따라 인장강성저하는 현저하게 나타났다.



(a) 설치상황 (b) 콘크리트 (c) Ductal (d) PE (e) Hybrid  
사진 1. 균열현황



(b) 항복영역

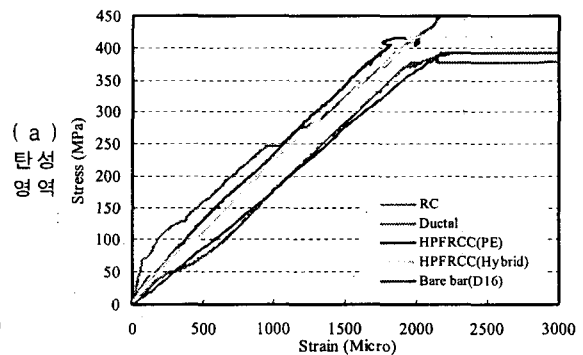


그림 4. 인장응력-철근변형률 관계

#### 4. 결론

포인 5연선의 강섬유(SC)는 시멘트 복합체의 인장특성을 개선하는데 효과적인 것으로 평가되며 특히 아미크로 합성섬유에 의한 하이브리드 보강시 단조 및 반복인장 특성에 대한 개선효과는 매우 우수한 것으로 나타났으며 인장 변형률 1.3%에 이를때까지 높은 인장 변형능력을 확보할 수 있는 것으로 평가된다. 균열발생후 철근의 항복이후 보통 콘크리트 인장부재는 인장재 단부에서 시작된 할렬 균열이 발생되며 인장강성 효과를 상실하였다. 반면 섬유로 보강된 고인성 복합체에서는 할렬균열이 억제되었으며 또한, HPFRCC의 인장력 부담 및 높은 변형능력으로 인하여 인장강성이 증대되는 특성을 보였다. Ductal은 높은 인장력에 따라 높은 인장강성 특성을 보이지만 균열분산능력이 개발된 HPFRCC에 비하여 낮으므로 최종적으로 할렬균열에 의해 파괴되는 경향을 보였다.

#### 참고문헌

1) JCI(2002), "Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC)," Proceedings of the JCI International Workshop on DFRCC.