

# Steel Cord와 PVA 혼합섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 인장강도 특성

## Tensile Strength Characteristics of Steel Cord and PVA Hybrid Fiber Reinforced Cement-Based Composites

윤현도\* 양일승\*\* 한병찬\*\*\* 福山洋\*\*\*\* 전에스더\*\*\*\*\* 문연준\*\*\*\*\*

Yun, Hyun Do Yang, Il Seung Han, Byung Chan Hiroshi, Fukuyama Cheon, Esther Moon, Youn Joon

### Abstract

This paper discusses how steel cord and PVA hybrid fibers enhance the performance of high performance fiber reinforced cementitious composites (HPRFCC) in terms of elastic limit, strain hardening response and post peak of the composites. The effect of microfiber(PVA) blending ratio is presented. For this purpose flexure, direct tension and split tension tests were conducted. It was found that HFRCC specimen shows multiple cracking in the area subjected to the greatest bending tensile stress. Uniaxial tensile test confirms the range of tensile strain capacity from 0.5 to 1.5% when hybrid fiber is used. The cyclic loading test results identified a unique unloading and reloading response for this ductile composite. Cyclic loading in tension appears not to affect the tensile response of the material if the uniaxial compressive strength during loading is not exceeded.

### 1. 서론

최근 환경에 대한 중요성이 인식됨에 따라 건설분야에서도 장수명이라는 키워드가 등장하였고 이러한 사회적 요구에 맞추어 주요한 건설재료인 콘크리트와 같은 시멘트 복합체에 고내구성을 부여하기 위한 연구가 재료 및 구조분야에서 폭 넓게 진행되고 있다. 최근 Li<sup>1)</sup> 교수는 합성섬유(PE)로 시멘트 복합체를 보강(시멘트 중량비 2%내외)하여 시멘트 복합체에 6~8%이상의 인장변형능력을 갖도록 하는 신개념의 시멘트 복합체인 ECC(Engineered cementitious composites)를 제안하였다. 이와 같이 높은 인장변형능력을 갖는 고인성 시멘트 복합체(HPRFCC)는 균열이 국부적으로 집중되지 않도록 하고 미소균열(Multiple cracks)을 폭 넓게 확산시킴으로써 복합체에 변형경화 특성을 부여함으로써 취성적인 특성을 갖는 시멘트 복합체에 고인성 특성을 부여한다. 이러한 HPRFCC는 미세균열을 폭 넓게 확산시킴으로써 인장응력하에서도 시멘트 복합체의 투수성을 저하시키지 않아 종국적으로 콘크리트 구조물의 내구성을 증진시키게 된다. 본 연구는 이러한 HPRFCC를 보다 효율적이고 용이하게 조제할 수 있는 기술을 개발하기 위한 연구<sup>2)~4)</sup>로서 HPRFCC 제조에 필수적으로 요구되는 부착력 및 휨강성이 우수한 매크로 섬유로서 자동차 타이어 보강용 5연선 꼬인 강섬유(Steel cord)의 활용하고자 한다. 이를 위하여 매크로 섬유인 5연선 강섬유 1%에 PVA 혼합(0.25~2.00%)에 따른 섬유분산, 시공

\* 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수

\*\* 정회원, 충남대학교 건축공학과 박사후 연구과정

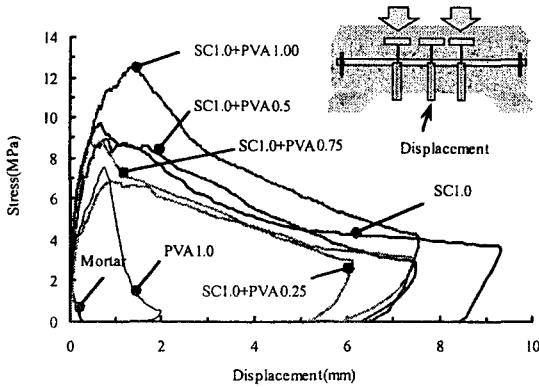
\*\*\* 정회원, 충남대학교 건축공학과 강사

\*\*\*\* 정회원, 일본건축연구소 구조그룹 수석연구원

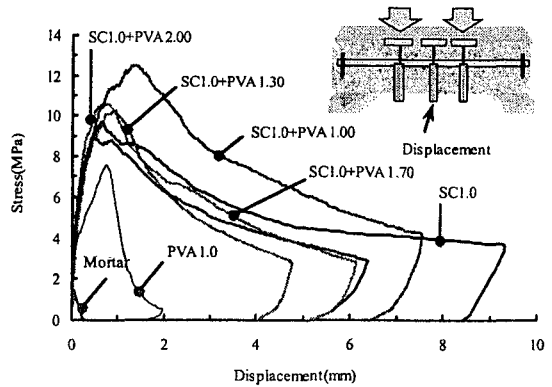
\*\*\*\*\* 정회원, 충남대학교 대학원 석사과정

\*\*\*\*\* 정회원, 동신대학교 건축공학과 교수

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



(a) PVA 혼입율 (0.25~1.00%)

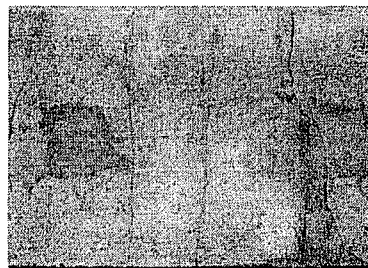


(b) PVA 혼입율 (1.00~2.00%)

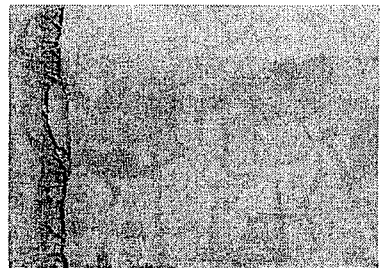
그림 1 휨응력-변위 관계 곡선



(a) SC1.0



(b) PVA1.0



(c) SC1.0+PVA0.5

그림 2 휨인장 시험체의 인장축 하부 균열 형상

성, 압축 및 조깅강도 특성에 대하여 평가하였고<sup>5)</sup> 본 논문에서는 동일 조건하에서 강섬유에 혼입된 PVA가 시멘트 복합체의 인장강도 특성에 끼치는 영향을 평가하고자 한다.

## 2. 휨인장강도 특성

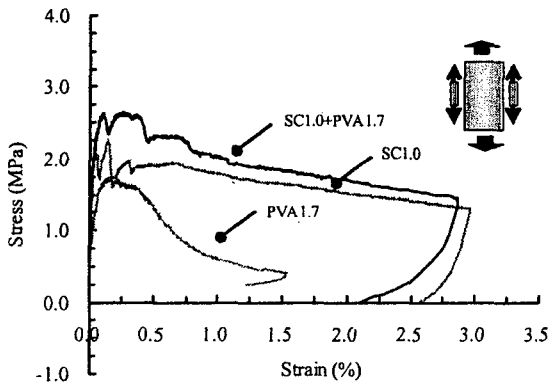
휨강도 시험체는 KS F 2403(콘크리트 강도 시험용 공시체 제작방법)에 준하여 제작하였으며 휨강도는 KS F 2408(콘크리트의 휨강도 시험방법)에 준하여 100×100×400mm 단순보형 휨시험체의 3등분점을 재하하여 휨강도를 평가하였다.

그림 1은 각 실험수준에서 휨응력-중앙부 처짐관계를 비교하여 나타낸 것으로 그림 1(a)에 나타난 바와 같이 매크로 강섬유 1%와 0.25~1.00%범위의 마이크로 PVA 섬유가 혼입된 시멘트 복합체의 경우 모르타르보다 높은 휨강도를 보이고 있으나 강섬유만으로 보강된 복합체에 비하여 낮은 휨강도를 보이고 있다. 그러나 PVA 합성섬유가 혼입됨에 따라 초기균열이후 변위경화(Displacement hardening) 특성을 보이고 있으며 이는 그림 2와 같이 휨시험체 하부에 발생된 균열 패턴에서도 마이크로 섬유인 PVA 혼입됨에 따라 미세균열이 나타났다.

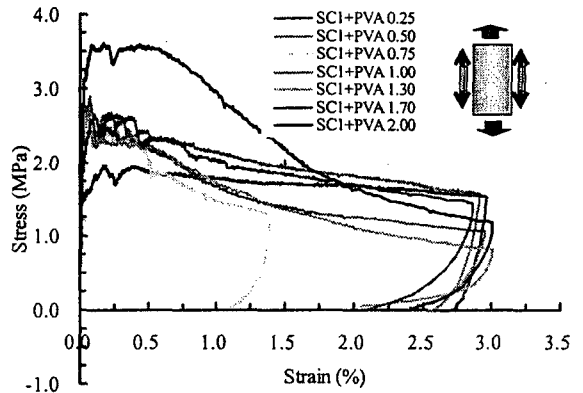
## 3. 직접인장강도 특성

직접인장강도 시험체는 KS F 2403(콘크리트 강도 시험용 공시체 제작방법)에 준하여 제작하였으며 직접인장강도 시험은 Fukuyama가 제안한 장치<sup>6)</sup>를 이용하여 직접인장강도시험을 실시하였다. 직접인장시험은 일본건축연구소(BRI)의 20tf 용량의 만능시험기(鳥宮製作所, LST-200)를 이용하여 변위 제어하였으며 재하속도는 변위량에 따라 4mm/1600sec.~4mm/400sec.범위로 하였다.

그림 3은 직접인장강도 시험결과를 비교하여 나타낸 것으로 그림 3(a)는 강섬유 1%, PVA 1.7%가

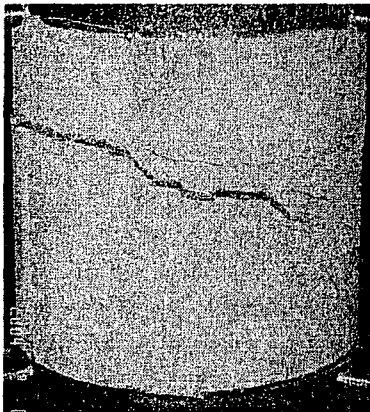


(a) 섬유 혼입 효과

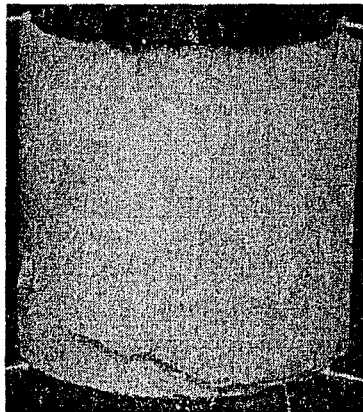


(b) PVA 혼입율 (0.25~2.00%)

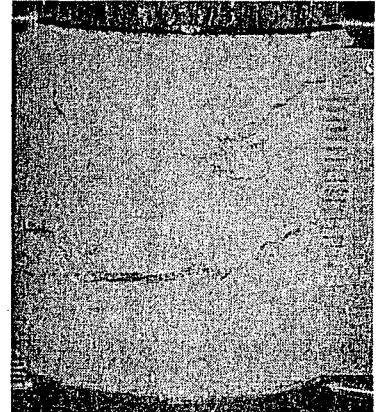
그림 3 직접 인장응력-변형률 관계 곡선



(a) SCI.0



(b) PVA1.0

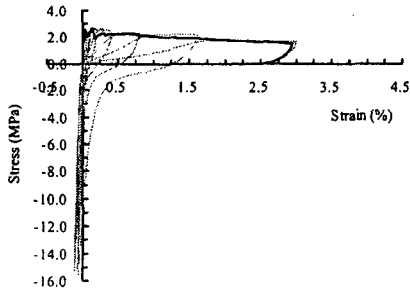


(c) SCI.0+PVA0.75

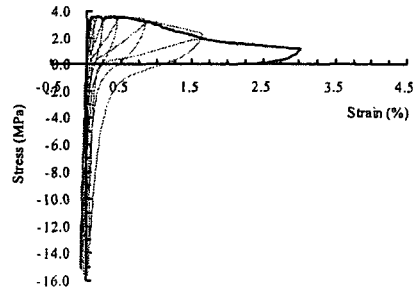
그림 4 직접인장 시험체의 균열 형상

혼입된 시멘트 복합체의 인장응력-변형률 관계와 강섬유와 PVA를 각각 1.7%씩 혼용한 복합체의 인장응력-변형률 관계를 비교하여 매크로 섬유(강섬유)와 마이크로 섬유(PVA)의 혼합(Hybrid)에 따른 효과를 평가하고자 하였다. 그림에 나타난 바와 같이 본 연구에서 적용한 5연선 꼬인 강섬유를 사용한 시멘트 복합체는 기존 PVA만으로 보강된 복합체와 대등하게 0.25%의 인장변형경화 특성을 보이고 있어 고인성 시멘트 복합체의 제조에 적용 가능성이 있는 것으로 판단된다. 아울러 마이크로 섬유인 PVA 1.7%를 혼입할 경우 강섬유만으로 보강된 시멘트 복합체에 비하여 인장강도는 증가되는 경향을 보이고 있으나 전체적인 인장응력-변형률 특성은 큰 차이를 보이고 있지 않는 것으로 나타났다. 그림 3(b)는 강섬유 1%에 PVA의 혼입율에 따른 인장응력-변형률 관계를 비교하여 나타낸 것으로 혼입률이 증가됨에 따라 복합체의 인장강도가 증가되었으며 상대적으로 변형경화(Strain hardening) 특성은 PVA 혼입률이 낮은 시멘트 복합체에서 현저하게 나타났다. 특히 강섬유 1%와 PVA 0.25%를 혼용한 경우 인장변형능력은 실험종료시점인 2.5%까지 나타났다.

그림 4는 직접인장 시험체의 실험종류후 균열양상을 비교하여 나타낸 것으로 강섬유 또는 PVA 단일 섬유만 사용한 시험체의 경우 미소균열이 발생한 초기에 나타났으나 변형률 1%이후 사진에 나타난 단일균열의 폭이 증가되며 초기에 발생된 미소균열은 더 이상 발생되지 않았다. 그러나 그림 4(c)에 나타난 바와 같이 강섬유에 마이크로 PVA 섬유가 혼입된 복합체에서는 다수의 미소균열이 발생되었으며 이러한 결과 PVA의 혼입율에 따라 다소 차이를 보이고 있으나 0.5~2.5%의 변형경화 특성을 보였다. 따라서 본 연구에서 적용한 5연선 꼬인 강섬유의 사용시 0.25%의 인장변형경화 특성을



(a) SC1.0 시험체



(b) SC1.0 + PVA2.0 시험체

그림 5 반복 인장/압축 응력-변형률 관계 곡선

기대할 수 있으며 마이크로 섬유 혼입시 인장변형능력은 증가되는 것으로 나타났다.

#### 4. 압축-인장 반복재하특성

반복재하용 공시체는 압축강도 및 일축 인장강도용 공시체와 동일한 방법으로 제작되었으며 재하 방법은 인장시 6mm/2400sec., 압축시 6mm/1200sec.의 속도로 변위제어하였다. 반복 인장·압축재하는 초기 인장균열 변형률인 0.5%(직접인장강도 실험결과에 근거)의 배율로 점증증가되는 변위제어방식을 채택하였으며 압축응력은 탄성한계인 압축강도의 1/2로 일정하게 유지하였다. 그림 5는 직접인장 단조 재하 실험결과와 단조인장재하시 시멘트 복합체의 초기균열 변형률인 0.05%의 배율로 반복 인장재하 한 응력-변형률 관계 곡선을 비교하여 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 반복재하시 포락선과 단조재하곡선은 큰 차이를 보이지 않았다. 5연선 꼬인 강섬유만으로 시멘트 복합체는 단조 인장재하시와 같이 인장 및 압축 반복재하 응력하에서도 안정된 인장변형경화특성을 보이고 있으나 마이크로 섬유가 2% 혼입된 SC1.0 + PVA2.0 시험체의 강섬유만으로 보강된 복합체에 비하여 뚜렷한 변형경화 특성을 보이고 있으나 인장변형률 1.0%에서 다소 급격한 강도저하 특성을 보이고 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서 고인성 시멘트 복합체를 제조하기 위하여 적용된 5연선 꼬인 강섬유는 시멘트 복합체의 인장특성을 개선하는데 효과적인 것으로 평가되었으며 특히 마이크로 PVA 섬유와 혼합하여 사용할 경우 휨인장, 직접인장 및 인장·압축반복재하에 대한 저항능력이 우수한 것으로 나타났다. 본 연구범위내에서 원주형 공시체에 대한 직접인장강도 시험시 PVA 혼입율에 따라 0.5%~2.5%범위의 변형경화 특성을 보이는 고인성 시멘트 복합체의 제조가 가능한 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. Li, V.C.(1998), "Engineered Cementitious Composites-Tailored Composites Through Micromechanical Modeling," Fiber Reinforced Concrete: Present and the Furthur, N. Banthia, A. Bentur, and A. Mufti, eds., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, pp.64~97
2. 윤현도, 양일승, 한병찬, 福山洋, 전에스더, 문연준(2004), "복합섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 특성," 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 24(1), pp.27~30
3. 윤현도, 양일승, 한병찬, 福山洋, 전에스더, 문연준(2004), "복합섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 인장거동," 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 24(1), pp.55~58
4. 전에스더, 김재환, 한병찬, 福山洋, 김무한, 윤현도(2004), "꼬인 강섬유의 매입 인발시 기계적 부착효과," 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 24(1), pp.79~82
5. 윤현도, 양일승, 한병찬, 福山洋, 전에스더, 문연준(2004), "Steel Cord와 PVA 혼합섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 비빔 및 압축강도 특성," 한국콘크리트학회 춘계학술발표대회
6. Fukuyama, H., Sato, Y., Suwada, H.(2001), "A proposal of Tension-Compression Cyclic Loading Test Method for Ductile Cementitious Materials, Journal of AIJ (Structure and Construction), 539(7-12)