

재하속도에 따른 고성능 섬유보강 시멘트 복합체의 역학적 특성

Effect of Strain Rate on the Mechanical Properties 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

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 high performance fiber-reinforced cementitious composites(HPFRCC) were selected using the cylindrical specimens. Uniaxial compressive and tensile tests have also been carried out at varying strain rates to better understand the behavior of HPFRCC and propose the standard loading rate for compressive and tensile tests of new HPFRCC materials. The results show that there is a substantial increase in the ultimate compressive and tensile strength with increasing strain rate.

1. 서론

최근 장수명 재료에 대한 사회적 요구에 따라 시멘트 모르타르에 고성능 단섬유를 혼입하여 보강한 높은 인성(Toughness)을 갖는 시멘트 복합재료(HPFRCC)에 대한 관심이 고조되고 있으며 차세대 건설 신재료로 평가되고 있다. HPFRCC는 정적 직접인장하에서 다수의 미세균열(Multiple crack)이 발생되며 초기 인장균열 발생이후에도 응력저하 없이 높은 변형능력을 확보하는 변형경화특성을 보인다.¹⁾ 이러한 이점을 이용하여 보수/보강재료, 내진요소 및 주요구조 부재로 활용하고자 하는 연구가 국내외에서 폭넓게 진행되고 있으나 현재까지 이러한 신재료에 대한 역학적 성능을 평가할 수 있는 표준시험방법이 제시되어 있지 않으므로 각 연구자들마다 독창적인 형태의 시험편과 재하속도(Strain rate)로 역학적 특성을 평가하고 있는 실정이다. 그러나 콘크리트 구조물의 주요한 구성요인 콘크리트 및 철근은 재하속도가 상승됨에 따라 재료의 강도 및 강성이 증가되는 특성이 있으며 또한, 콘크리트의 경우 취성적인 파괴양상을 보이게 되는 것으로 보고되고 있다.²⁾ 이와 같이 재하속도에 따라 재료의 역학적 특성이 상이하게 나타나는 특성을 보이므로 재하속도에 따른 HPFRCC의 역학적 특성을 정량적으로 평가할 필요가 있으며 이러한 결과를 근거로 향후 합리적인 시험방법(적정 재하속도)에 대한 제시가 요구된다고 할 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 건설재료에 대한 압축 및 인장거동 특성을 합리적으로 평가하기 위한 기법을 제시하기

* 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수

** 정회원, 충남대학교 건축공학과 강사

*** 정회원, 충남대학교 대학원 석사과정

**** 정회원, 일본건축연구소 구조그룹 상석연구원

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

위에 1축 압축 및 인장재하시 재하속도에 따른 거동 특성을 평가하고자 한다.

2. 재하속도에 따른 HPFRCC의 특성 연구 현황

현재 HPFRCC에 대한 다양한 분야의 연구가 진행되고 있으나 재하속도에 따른 영향에 대해서는 상대적으로 연구가 충분히 이루어지지 않고 있는 실정이다. Maalej 등은 강섬유 및 PE를 하이브리드하여 보강한 HPFRCC 플레이트형 인장시험편을 0.02mm/min~2000mm/min범위에서 6단계 재하속도로 재하하여 충격하중에 대한 인장특성을 평가하였다. 재하속도가 증가됨에 따라 인장강도는 3.1MPa~6.0MPa 범위로 증가되었으나 변형능력은 다소 분산된 특성을 보였으며 높은 재하속도하에서 미세한 다수균열 특성은 정적재하 조건과 유사하게 나타났다고 보고하고 있다.³⁾ 또한, 金久保利之 등은 PVA 섬유 2%를 혼입한 HPFRCC를 이용하여 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 원주형 시험체를 도그본(Dogbone)형상으로 중앙부가 $\phi 70\text{mm} \times 70\text{mm}$ 이 되도록 가공하여 인장시험을 실시하였으며 이때 재하속도는 0.5mm/min~250mm/min까지 6단계로 나누어 실시하였으며 실험결과로부터 재하속도에 따른 HPFRCC의 인장강도는 로그함수($y = 1.024 + 0.067\ln v$, y : 인장강도, v : 재하속도)형태로 표현된다고 제안하고 있다.⁴⁾ 이상과 같이 현재까지 수행된 연구는 지진 또는 충격하중에 HPFRCC의 동적거동을 규명하기 위한 것으로 HPFRCC의 정적 압축 및 인장특성 평가시 재하속도 규정을 위한 자료로 활용되는 데 다소 제한된 것으로 평가된다.

3. HPFRCC의 개발

3.1 실험계획

시멘트 복합체에 변형경화특성을 부여하기 위하여 본 연구에서는 매크로 꼬인 5연선 강섬유(SC)로 시멘트 복합체를 보강하고자 하였으며 또한, 마이크로 합성섬유의 효과를 평가하기 위하여 매크로 SC와 마이크로 PE를 하이브리드화 하여 고인성 특성을 개선하고자 하였다. 이를 위하여 물시멘트비 45%인 시멘트 모르타르에 시멘트 체적비 0.75%인 꼬인 5연선 강섬유를 보강한 복합체(SC0.75)와 SC의 침강 및 시멘트 매트릭스의 보강을 위하여 0.75% SC와 마이크로 합성섬유 PE 0.75%를 혼입하여 하이브리드화한 복합체(SC0.75+PE0.75)를 각각 제작하여 평가하였다. 배합조건은 표 1과 같고 실험변수는 복합체의 보강용 섬유종류 및 재하속도로 재하속도는 압축(0.0025, 0.0250, 0.0500mm/sec) 및 인장(0.0025, 0.0125, 0.0250mm/sec)에 대하여 각각 3단계로 나누어 재하하였다.

실험체 제작시 사용된 시멘트는 T사의 조강포틀랜드 시멘트(비중 3.14), 세골재는 S사에서 생산된 접촉계용 규사7호(비중 2.61, 직경 105~120 μm)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.

3.3 굳지 않은 복합체의 특성

굳지 않은 복합체의 특성을 평가하기 위하여 공기량, 단위중량, 플로우 값 등을 측정하였다. 공기량은 SC0.75 및 SC0.75+PE0.75에서 각각 7.6% 및 4.3%로 합성섬유가 혼입됨에 따라 공기량은 감소되었으며, 단위중량은 각각 1.48t/m³ 및 1.53t/m³로 하이브리드 섬유보강 복합체에서 PE 합성섬유는 중량의 SC 침강을 억제하여 시멘트 매트릭스내에 SC가 균등하게 분포되도록 하여 단위중량이 높게 나타난 것으로 판단된다. 플로우 값은 각각 164mm 및 138mm로 하이브리드 섬유 보강 복합체에서 다소 시공성이 저하되는 것으로 나타났으며 이는 합성섬유 PE의 표면에서 수분이 흡수됨에 따른 것으로 판단된다.

표 1. 배합조건

기호	W/C	섬유 혼입물		단위중량 (kg/m ³)		
		SC	PE	시멘트	물	모래
SC0.75	0.45	0.75	-	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 (μm)	형상비	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
Steel Cord	7.85	32	405	79	2300	206
PE	0.97	15	12	1250	2500	75

3.4 경화된 복합체의 특성

그림 1은 쪼갬인장강도 시험결과로 SC만을 사용한 복합체에 비하여 SC와 PE를 하이브리드한 복합체에서 높은 인장강도를 보이고 있으며 인장강도시 변형률도 하이브리드 복합체에서 높게 나타나고 있다. 이는 그림 2와 같은 파괴양상에 나타난 바와 같이 SC만으로 보강된 복합체는 시멘트 매트릭스와 SC의 부착면에서 부착파괴되는 경향을 보이고 있으며 이로 인하여 인장강도이후 다소 급격한 강도저하를 보이고 있다. 반면 마이크로 PE 섬유에 의해 매트릭스를 보강한 SC0.75+PE0.75 복합체에서는 SC0.75 복합체와는 다르게 매트릭스의 부착파괴 특성은 보이지 않았으며 응력재분배에 따라 미세 균열이 폭 넓게 분산되었다. 이상과 같은 결과로부터 마이크로 PE 함성섬유가 매트릭스를 보강하여 SC와 매트릭스의 부착면을 보강하여 인장강도 및 연성을 증진시킨 것으로 판단된다.

그림 3은 압축응력-변형률 관계를 비교하여 나타낸 것으로 마이크로 함성섬유를 혼입함에 따라 SC가 균등하게 분포됨에 따라 압축강도가 증가되는 경향을 보였으며 이러한 압축강도 증가는 공기량의 감소에 의한 영향도 있는 것으로 판단된다. 또한 압축강도후 완만한 강도저하를 보이고 있으며 이는 마이크로 섬유가 매트릭스와 매크로 섬유의 부착면을 토강함에 따라 매크로 섬유가 효율적으로 균열폭의 증대를 억제함에 따른 것으로 판단된다.

그림 4는 직접 인장시험결과를 비교하여 나타낸 것으로 그림에 나타난 바와 같이 SC0.75 복합체는 인장변형률 0.25%에서 인장강도를 보였으나 마이크로 섬유의 혼입에 따라 1.6%에 이르러 인장강

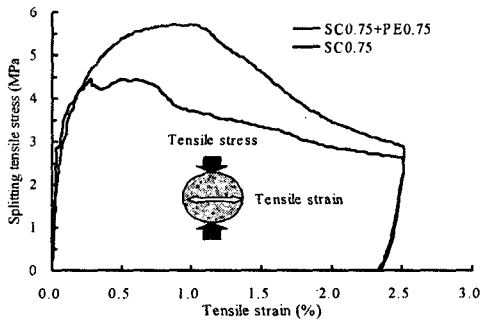


그림 4. 쪼갬인장응력-변형률 관계

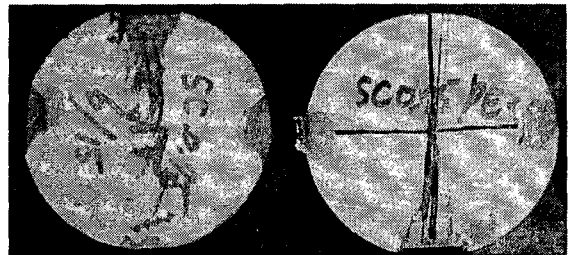


그림 1. 쪼갬인장 시험편의 최종파괴상황

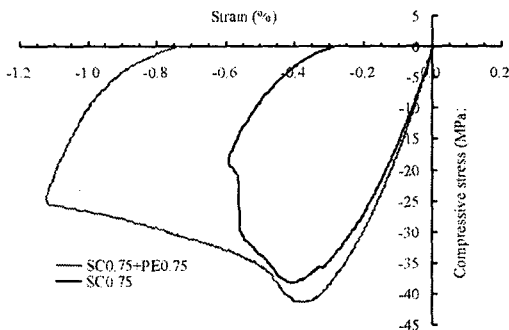


그림 3. 압축응력-변형률 관계

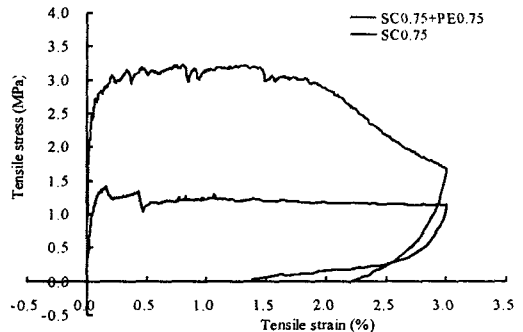


그림 4. 직접인장응력-변형률 관계

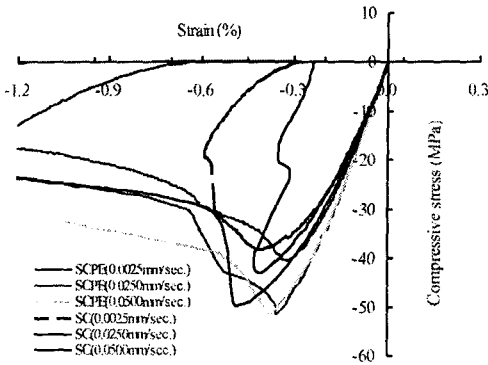


그림 5. 재하속도에 따른 HPFRCC의 압축특성

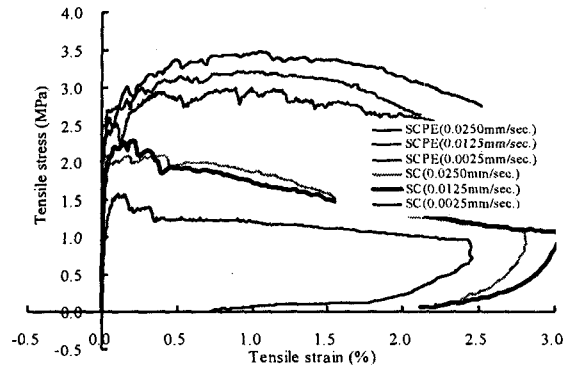


그림 6. 재하속도에 따른 HPFRCC의 인장특성

도 도달되는 높은 변형능력을 보이고 있다. 또한, 인장강도도 2배이상 증가되었다. 이는 마이크로 섬유가 균열발생후 응력재분배 및 매트릭스의 보강에 따라 스너빙(Snubbing)효과를 강화에 따른 것이다.

4. 재하속도에 따른 HPFRCC의 역학적 특성

많은 연구자들이 HPFRCC에 대한 직접인장 시험시 적용하는 재하속도 0.0025mm/sec.의 비율로 재하하여 HPFRCC의 압축 및 인장특성을 비교하여 나타내면 각각 그림 5 및 6과 같다. HPFRCC의 압축시 재하속도가 증가됨에 따라 압축강도 및 탄성계수가 상승되는 반면 압축강도 이후 급격한 취성적인 파괴특성을 보이고 있다(그림 5). 그림 6은 $\phi 100 \times 200$ 원주형 공시체를 직접인장재하할 수 있도록 단부를 연속섬유로 보강하여 인장시험한 결과이며 인장시험편 및 실험방법은 참고문헌 5에 제시되었다. 그림 6에 나타난 바와 같이 재하속도가 증가됨에 따라 인장강도 및 인장변형능력은 향상되는 경향을 보이고 있으나 전반적인 거동 특성은 큰 차이를 보이고 있지 않다. 그러나 SC만으로 보강된 HPFRCC의 경우 재하속도가 증가됨에 따라 현저하게 인장강도가 증가되는 특성을 보이고 있으며 HPFRCC에 대한 주요 연구자 Li, Fukuyama, Billington 등이 적용한 인장 재하속도 0.0025mm/sec.의 5배 이상의 속도로 재하시 인장강도는 약 25% 증가되는 것으로 나타났다.

5. 결론

표인 5연선의 강섬유(SC)는 시멘트 복합체의 인장특성을 개선하는데 효과적인 것으로 평가되며 특히 아미크로 합성섬유에 의한 하이브리드 보강시 복합체의 쪼갬 및 직접인장거동 특성에 대한 개선 효과는 매우 우수한 것으로 나타났으며 인장 변형률 1.3%이 이를때까지 높은 인장 변형능력을 확보할 수 있는 것으로 평가된다. HPFRCC의 재하속도가 증가됨에 따라 압축 및 인장강도, 강성이 증가되는 경향을 보이며 특히 압축강도이후 취성적인 경향을 보였다. 반면 인장응력하에서 전반적 거동 특성은 큰 차이를 보이지 않고 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 1) JCI(2002), "Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC)," Proceedings of the JCI International Workshop on DFRCC.
- 2) 岩井 哲(1988), "構造部材の舉動に及ぼす載荷速度の影響に関する實驗的研究," 日本建築學會論文報告集, 314, pp. 102~111
- 3) M. Maalej, J. Zhang, S.T. Quek, and S.C. Lee(2004), "High-Velocity Impact Resistance of Hybrid-Fiber Engineered Cementitious Composites," Fracture Mechanics of Concrete Structure, pp.1051~1058
- 4) 金久保利之 外 3人(2002), "HPFRCC의 動的引張特性," 콘크리트工學年次論文集, 24(1), pp. 225~230
- 5) 윤현도, 양일승, 한병찬, 福山洋, 전에스더, 문연준(2004), "복합섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 인장거동," 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 24(1), pp. 55~58