

합성섬유를 사용한 변형경화형 시멘트 복합체의 휨 및 인장성능

Flexural and Tensile Performance of Strain-Hardening Cement Composite with Synthetic Fibers

김 선 우* 이 민 정** 장 용 현** 장 광 수** 송 선 화** 윤 현 도***

Kim, Sun Woo Lee, Min Jung Jang, Yong Heon Jang, Gwang Soo Song, Seon Hwa Yun, Hyun Do

ABSTRACT

Fiber is an important ingredient in strain-hardening cementitious composite (SHCC), which can control fracture of cementitious composite by bridging action. The properties of reinforcing fiber, as tensile strength, aspect ratio and elastic modulus, have great effect on the fracture behavior of SHCC. To apply SHCC to structural member, SHCC must have economical efficiency and workability as well as own excellent tensile performance. For these purposes, four-point bending and direct tensile tests on SHCC with only hybrid synthetic fibers, total fiber volume fraction, V_f , is 1.5%, are carried out. The research emphasis is on the mechanical properties of SHCC made in Polyvinyl alcohol (PVA) and Polyethylene (PE) fibers, and how this affects the composite property, and ultimately its strain-hardening performance. Also, effect of hybrid type and water-cement ratio on the behavior of SHCC was evaluated in this paper.

요 약

최근 내진부재 및 기존 구조물의 내진보강요소의 손상제어(Damage tolerance)성능을 충족할 수 있는 변형경화형 시멘트 복합체(Strain-hardening cement composites, SHCC)의 개발 및 활용 연구가 진행 중이며, 하이브리드화에 따른 경제성 및 성능향상 가능성도 보고되고 있다. 그러나 이러한 우수한 성능을 갖는 SHCC 재료가 실구조물의 보수/보강재 및 내진보강부재에 적용되기 위해서는 우수한 인장성능 발현뿐만 아니라, 보강섬유의 단가를 고려한 경제적 효과(Economical efficiency) 및 시공성(Workability)이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 SHCC를 내진부재 및 보강재료로써 적용하기 위한 연구의 일환으로 합성섬유를 하이브리드하여 혼입시 휨 및 인장강도, 변형능력 등 거동특성을 분석함으로써 각 보강섬유의 인장강도·탄성계수 등 기계적 특성과 혼입율에 따른 재료성능과의 상관관계를 비교·분석하여 평가하고자 한다. 또한 물시멘트비를 변수로 하여 시멘트 복합체의 강도특성과 보강섬유의 부착특성 및 균열제어성능을 규명하고자 한다. 이러한 결과를 근거로 향후 SHCC 재료의 실구조물 적용시 요구성능 및 경제성을 고려한 재료배합에 관한 기초자료를 제시하고자 한다.

* 정회원, 충남대학교, 고지능 콘크리트 구조연구실, 박사과정

** 정회원, 충남대학교, 고지능 콘크리트 구조연구실, 석사과정

*** 정회원, 충남대학교, 건축공학과, 교수

1. 서 론

섬유보강 시멘트 복합체(Fiber-Reinforced Cementitious Composites, FRCC)는 시멘트 복합체 내 체적비 2% 이내의 보강섬유(Reinforcing fiber)를 혼입함으로써 다수의 미세균열(Micro cracks)을 형성하여 응력집중으로 인한 취성적 파괴를 방지하고 높은 인장강도 및 연성능력을 발휘할 수 있는 것으로 잘 알려져 있다.¹⁾ 이 때 FRCC는 혼입되는 섬유 자체의 인장강도 및 탄성계수 등 재료특성과 섬유 혼입율에 따라 직접인장응력 작용시 그림 1에 나타난 바와 같이 상이

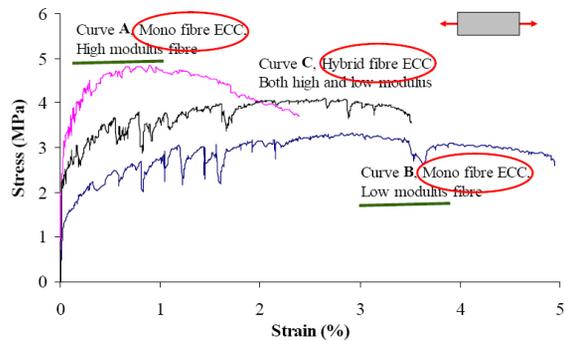


그림 1. FRCC의 인장거동특성 (Maalej, M., J. et al. 2004)²⁾

한 균열분산능력 및 변형특성을 가지게 되며²⁾, 이러한 재료적 특성은 구조부재에 적용시 내진성능 및 내구성 등에 영향을 미치게 된다. 이러한 FRCC에 관한 연구는 미국, 일본 등 국외 뿐만 아니라 국내에서도 내진요소 및 구조부재 등에 활용하고자 하는 연구³⁾가 진행되고 있다. 그러나 FRCC가 상기와 같이 실구조물의 내진부재 및 보강에 사용되기 위해서는 높은 응력 하에서 요구되는 인장강도 및 연성능력 뿐만 아니라 초기균열 이후 높은 인장응력에 저항하기 위한 변형경화성능(Strain-hardening performance) 발현이 필연적이라 할 수 있으며, 이러한 성능이 부재에 적용시 발현되는 강도 및 연성능력과 같은 내진성능에 미치는 영향을 정량화하기 위한 역학적 특성 분석이 선행되어야 한다. 이에 최근 국내에서도 내진부재 및 기존 구조물의 내진보강요소의 손상제어(Damage tolerance)성능을 충족할 수 있는 변형경화형 시멘트 복합체(Strain-hardening cement composites, SHCC)의 개발 및 활용 연구가 진행 중이며, 하이브리드화에 따른 경제성 및 성능향상 가능성도 보고되고 있다.⁴⁾ 그러나 이러한 우수한 성능을 갖는 SHCC 재료가 실구조물의 보수/보강재 및 내진보강부재에 적용되기 위해서는 우수한 인장성능 발현뿐만 아니라, 보강섬유의 단가를 고려한 경제적 효과(Economical efficiency) 및 시공성(Workability)이 요구되며, SC와 같은 매크로섬유 혼입시 시공성 불량요인이 될 수 있으므로 배합시 각별한 주의가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 SHCC를 내진부재 및 보강재료로써 적용하기 위한 연구의 일환으로 합성섬유를 하이브리드하여 혼입시 휨 및 인장강도, 변형능력 등 거동특성을 분석함으로써 각 보강섬유의 인장강도·탄성계수 등 기계적 특성과 혼입율에 따른 재료성능과의 상관관계를 비교·분석하여 평가하고자 한다. 또한 물시멘트비를 변수로 하여 시멘트 복합체의 강도특성과 보강섬유의 부착특성 및 균열 제어성능을 규명하고자 한다. 이러한 결과를 근거로 향후 SHCC 재료의 실구조물 적용시 요구성능 및 경제성을 고려한 재료배합에 관한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험계획

본 연구에서는 시멘트 복합체에 마이크로 섬유만을 전체 체적비 1.5%로 하이브리드하여 혼입시 각 보강섬유의 기계적 특성 및 하이브리드 조건이 SHCC의 휨 및 인장거동 및 균열발생 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 표 1과 같이 물시멘트비 0.45로 배합계획하였다. 이 때 PVA1.3+PE0.2 시험체에 대해서는 물시멘트비 0.40인 경우를 고려함으로써 시멘트 복합체의 강도 증가 및 공기량 감소가 보강섬유의 부착성능 및 SHCC의 휨 및 인장성능과의 상관관계를 평가하고자 하였다.

표1. 배합조건

Specimen	W/C	Fiber volume fraction, V_f (Vol. %)		Unit weight (kg/m ³)			
		PE	PVA	Cement	Water	MC	SP
PVA1.3+PE0.2	0.40	0.2	1.3	714	285	38	892
PVA1.3+PE0.2	0.45			700	315		
PVA0.75+PE0.75			0.75	0.75			

2.2 사용재료

본 연구에서는 시멘트 복합체에 변형경화특성을 부여하기 위한 보강섬유 중 마이크로 합성섬유 중 인장강도 및 탄성계수 등 기계적 특성이 매우 우수한 PE 섬유를 사용하였다. 또한 PE 섬유에 비해 기계적 특성은 다소 저하되나 시공성능 및 섬유의 단가를 고려한 경제성이 우수한 PVA 섬유를 사용함으로써 보강섬유 사용시 소요성능 및 경제성을 모두 고려하고자 하였다. 사용된 보강섬유의 형상 및 기계적 특성은 그림 2 및 표 2와 같다. 표에 나타난 바와 같이 PE 섬유의 인장강도와 탄성계수는 PVA에 비해 1.56 및 1.87배 높은 물리적 특성치를 갖는다. 시멘트는 T사의 조강포틀랜드 시멘트(비중 3.14)를 사용하였고, S사에서 생산된 접착제용 규사 7호(비중 2.61, 직경 105~120 μ m)를 잔골재로 사용하였다.



(a) PE (c) PVA
그림2. 보강섬유의 형상

표2. 섬유의 기계적 특성

종류	비중 (g/cm ³)	길이 (mm)	직경 (μ m)	형상비	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
PE	0.97	15	12	1250	2500	75
PVA	1.30	12	39	307	1600	40

2.3 실험방법

본 연구에서는 물시멘트비 및 보강섬유의 종류 및 혼입율이 SHCC 재료특성에 미치는 영향을 실험적으로 평가하고자 하며, 이를 휨 및 직접인장성능을 실시하였다. 휨성능 평가를 위하여 KS F 2408에 준한 100mm×100mm×400mm의 휨몰드, 직접인장성능 평가를 위한 덤벨형(Dumbbell shape) 시험체를 제작하였다. 제작된 각각의 SHCC 시험편은 타설 2일 경과후 탈형하여 28일 수중양생(20±2℃) 및 7일 고온수중양생(40±5℃)하였으며 다시 1일 동안 기건양생 후 재료시험을 실시하였다.

3. SHCC의 재료시험결과 및 고찰

그림 3은 SHCC에 도입된 휨하중으로 산정한 파괴계수(Modulus of rupture)-처짐 관계를 각각 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 PVA1.3+PE0.2-0.40 시험체에서 가장 높은 파괴계수 및 2.72mm 이상의 처짐량을 보여 휨성능이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 물시멘트비 0.45인 경우 6.51MPa 및 1.11mm를 보여 휨능력 저항시 상부 압축영역에서의 강도가 휨성능에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편 PVA0.75+PE0.75-0.45 시험체에서는 8.41MPa 및 2.18mm의 휨성능을 보여 동일 물시멘트비인 PVA1.3+PE0.2-0.45 시험체에 비해 강도 및 변형능력이 각각 29.19% 및 96.40% 증가되었다. 그림 4는 SHCC 인장 시험체에 도입된 인장응력과 변형률 관계를 나타낸 것이다. 직접인장강도는 휨성능결과와 유사하게 PVA1.3+PE0.2-0.40 > PVA0.75+PE0.75-0.45 > PVA1.3+PE0.2-0.40 순으로 크게 나타났다. 또한 PVA1.3+PE0.2 시리즈에서는 물시멘트비가 0.40에서 0.45로 증가됨에 따라 최대직접인장강도시 변형율이 2배 이상 증가됨을 알 수 있었다. 그러나 PVA1.3+PE0.2 시리즈에서는 최대 직접인장강도시 변형률이 2% 이내로 다소 작은 값을 보인 반면,

표3. SHCC 재료시험 결과

측정항목 시험체	휨		직접인장	
	f_r (MPa)	δ (mm)	f_t (MPa)	ϵ_t (%)
PVA1.3+PE0.2	10.53	2.72	4.16	0.87
PVA1.3+PE0.2	6.51	1.11	2.57	1.80
PVA0.75+PE0.75	8.41	2.18	3.66	3.83

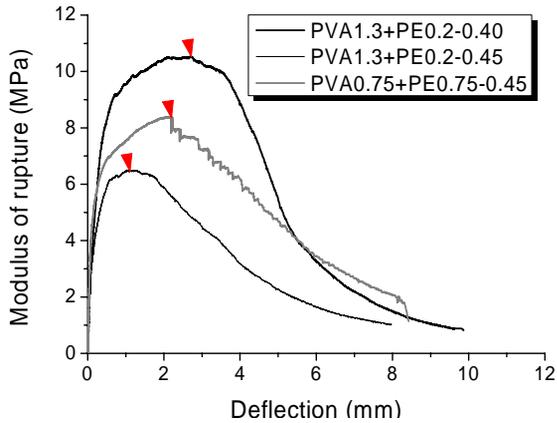


그림3. SHCC의 휨성능

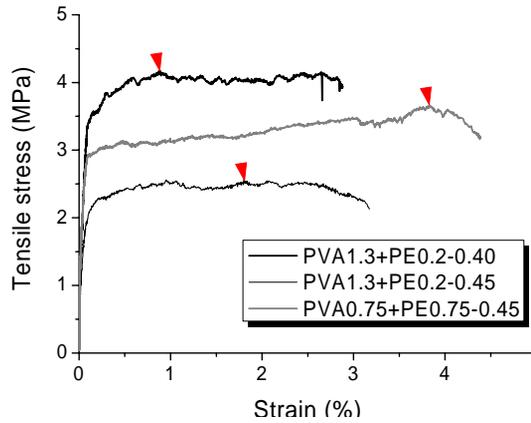


그림4. SHCC의 직접인장성능

PVA0.75+PE0.75-0.45 시험체에서는 3.83%의 최대강도시 변형률을 나타내는 등 2% 이후에도 지속적인 변형경화성능을 나타내었다.

4. 결론

마이크로 합성섬유만을 하이브리드하여 혼입시 SHCC의 재료특성에 섬유 종류 및 물시멘트비가 미치는 영향에 관해 실험적으로 평가한 결과, 휨성능과 같이 상부압축/하부인장을 받는 경우에는 물시멘트비 감소에 따른 압축강도 증가로 휨강도 증가를 보였으나, 최대강도 이후 급격한 파괴양상을 보이는 등 파괴지연 효과는 저하되는 것으로 나타났다. 또한 직접인장거동시에도 물시멘트비 0.40에서 가장 높은 강도를 보이는 등 물시멘트비만으로도 최대인장강도를 조절할 수 있을 것으로 판단되었으며, PE와 같은 고장력 섬유를 혼입시 2% 이상에서도 변형경화특성을 보이며 균열을 제어할 수 있는 것으로 나타나 실구조부재에 적용시 필요한 적절한 보강섬유의 선정 및 물시멘트비 조정 등 본 연구에서와 같이 성능과 경제성 모두를 고려할 수 있는 다양한 연구자료가 확보되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2007년도 첨단도시개발사업07도시재생B04 「성능·환경복원기술 개발」, 학술진흥재단 기초과학연구(KRF-2006-311-D00916) 지원 사업으로 이루어진 것이고, 이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 2단계 BK21사업의 지원비를 받았으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. P. Soroushian, A. Tlili, A. Alhozaimy, and A. Khan, Development and Characterization of Hybrid Polyethylene Fiber Reinforced Cement Composites, *ACI Material Journal*, 1993, 90(2), pp. 182-190.
2. Maalej, M., J. Zhang, S.T. Quek, and S.C. Lee, High-Velocity Impact Resistance of Hybrid-Fiber ECC, in *Proceedings, FraMCoS-5, 2004, Vol.2*, pp.1051-1058
3. 윤현도, 김선우, 전에스더, 박완신, 고인성 섬유보강 시멘트 복합체를 사용한 대각보강된 커플링 보의 내진성능, *대한건축학회 논문집(구조계)*, 2006, 22(4), pp.57-64
4. 윤현도, 양일승, 한병찬, 전에스더, 김선우, 고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 인장강성 특성에 관한 실험적 연구, *대한건축학회 논문집(구조계)*, 2006, 21(10), pp.27-36