물시멘트비에 따른 변형경화형 시멘트 복합체의 역학적 특성

Mechanical Properties of Strain-Hardening Cement Composites(SHCCs) according to the Water-Cement Ratio

김 윤 수* 장 용 헌* 장 광 수* 전 에스더** 윤 현 도*** 김 긍 환****
Kim, Yun-Su Jang, Yong-Heon Jang, Gwang-Su Jeon, Esther Yun, Hyun-Do Kim, Keung-Hwan

ABSTRACT

SHCCs (Strain Hardening Cement Composites) show the high energy tolerance capacity due to the interfacial bonding of the fibers to the cement matrix. For effective material design and application of SHCCs, it is needed to investigate the compression, four-point bending, direct tensile response of SHCCs with different types of fibers and water-cement ratio. For these purposes, three kinds of fibers were used: PP(polypropylene, 2.0%), PVA(Polyvinyl alcohol, 2.0%), PE (Polyethylene, 1.0%). Also, effects of water-cement ratio(0.45, 0.60) on the SHCCs were evaluated in this paper. As the result of test, SHCCs with PVA and PE fiber were showed better overall behavior than specimens with PP fibers on bending and direct tensile test. Also, for the same type of fiber, SHCCs with water-cement ratio of 0.45 exhibited higher ultimate strength than specimen with water-cement ratio of 0.60 on compression strength, and showed the multiple cracking on bending and direct tensile test. Therefore, to improve of workability and dispersibility of SHCCs on water-cement ratio of 0.60, continual studies were needed.

요 약

SHCCs는 섬유와 시멘트 메트릭스 계면의 부착작용으로 인해 높은 에너지 흡수능력을 보여준다. 서로 다른 종류의 섬유로 보강된 SHCCs는 혼입되는 섬유자체가 가지는 재료적 특성 및 물시멘트비에 따라 서로 다른 특성을 나타내기 때문에 SHCCs의 압축, 휨, 직접인장 등의 역학적 특성에 관한 평가가 필요할 것으로 판단된다. 이러한 목적으로 본 연구에서는 PP2.0%, PVA2.0%, PE2.0%의 세종류의 단독섬유를 혼입하여 물시멘트비 0.45, 0.60으로 실험을 실시하였다. 실험결과, PP섬유를 혼입한 시험체에 비해 PVA 및 PE섬유를 혼입한 시험체에서 휨 및 직접인장특성에서 전반적으로 뛰어난 성능을 나타내었다. 또한 동일한 섬유 및 혼입율에서 물시멘트비 0.45인 시험체에서 물시멘트비 0.60인 시험체에 비해 약 2배정도의 높은 압축강도를 나타내었으며, 휨 및 직접인장거동시 시험체 전반에 걸쳐 미세균열이 진전되는 특성을 나타내었다. 따라서 물시멘트비 0.60에서 SHCCs의 시공성능 및 분산성능 향상을 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

* 정회원, 충남대학교 고지능 콘크리트 구조연구실, 석사과정
** 정회원, 충남대학교 고지능 콘크리트 구조연구실, 박사과정
*** 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사
**** 정회원, 한국건설기술연구원 책임연구원, 공학박사

1. 서 론

최근 시멘트 복합체에 체적비 2% 이내의 보강섬유를 혼입하여 다수의 미세균열(Micro cracks)을 형성함으로써 응력집중으로 인한 취성적 파괴를 방지하고 높은 인장강도 및 연성능력을 획기적으로 개선한 변형경화형 시멘트 복합체(Strain Hardening Cement Composites, 이하 SHCC)의 구조부재 활용에 관한 연구[1)]가 활발히 진행되고 있다. 기존의 연구결과, SHCC는 혼입된 섬유의 가교작용에 의해 미세균열을 다수 형성시키고 재료의 인성 및 에너지흡수 능력을 증가[2)]증가시킬 수 있으며, 다양한 기존 철근콘크리트 부재에 SHCC의 적용시 파괴기구, 변형능력, 이력특성 및 손상 등을 적절하게 제어할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 현재까지 이루어진 SHCC에 관한 연구는 혼입되는 섬유의 종류와 혼입율에 따라 나타나는 파괴형상, 미세균열 확산 및 변형능력에 관한 연구가 주를 이루고 있으며, 혼입되는 섬유의 자체의 인장강도 및 탄성계수 등 재료특성과 SHCC의 변형능력 및 보강효과에 관한 정량적 평가가 부족한 실정이다. 한편, SHCC의 경우 배합단계에서의 물시멘트비에 따른 시공성 및 분산성능에 따라 경화후 역학적 특성에서 큰 차이를 보일 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 SHCC의 구조부재 및 내진요소 적용의 선행 연구로써 단일섬유 혼입시 나타나는 섬유의 기계적 특성과 SHCC의 변형능력과 물시멘트비에 따른 강도특성 및 균열제어성능을 평가하고자 하였다. 이러한 결과를 근거로 하여 향후 SHCC 구조부재 및 내진요소의 적용 및 거동특성을 예측하기 위한 기초적 자료를 제시하고자 한다.

2. 실 험

2.1 시험체 계획

본 연구에서는 단일섬유 혼입시 혼입되는 섬유의 종류에 따른 시멘트 복합체의 거동 및 파괴특성을 평가하기 위하여 물시멘트 45%인 시멘트복합체에 PVA(Polyvinyl alcohol, 2.0%), PP(Polypropylene, 2.0%) 및 PE(Polyethylene, 1.0%)를 각각 혼입한 시험체를 계획하였으며, PE섬유는 자체의 친수성으로 인한 시공성 저하 및 경제성을 고려하여 혼입율을 다른 섬유와는 달리 1.0%로 계획하였다. 또한 물시멘트비(W/C) 증가에 따른 혼입되는 섬유의 부착성능 저하에 따른 강도특성 및 변형성능을 평가하고자 물시멘트비 60%인 시험체를 계획하여 총 2시리즈로 계획하였다. 각 시험체의 배합표는 표 1에 나타내었으며, 실험에 사용된 각 섬유의 형상비, 인장강도 및 탄성계수 등과 같은 기계적 특성과 섬유의 형상은 표 2 및 그림 1에 각각 나타내었다.

표 1. 배합조건

시리즈	시험체명	W/C	압축강도 (MPa)	파괴계수 (MPa)	단위중량 (kg/m^3)		MC[1)]	SP
					W	C		
I	45-PP2.0	0.45	27.92	4.75	315	1,514	0.52	12.35
	45-PVA2.0		20.30	8.89				
	45-PE1.0		23.31	10.24				
II	60-PP2.0	0.60	16.05	4.74	397	1,432	0.52	-
	60-PVA2.0		11.19	9.17				
	60-PE1.0		11.64	8.27				

1) MC : Methyl Cellulose 계 증점제

표 2. 섬유의 기계적 특성

섬유 종류	비중 (t/㎤)	길이 (㎜)	직경 (㎛)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	형상비 (ℓ/d)
PP	0.90	15	40	600	5	375
PVA	1.35	15	40	1,600	40	300
PE	0.97	15	12	2,500	75	1,250

(a) PP (b) PVA (c) PE

그림1. 섬유의 형상

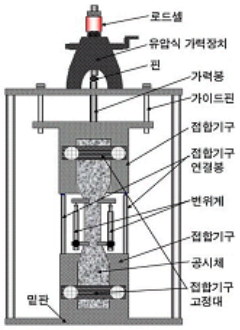


그림2. 직접인장실험장치

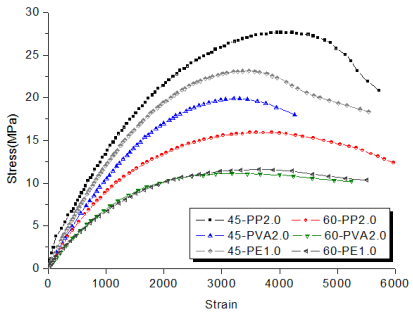


그림3. 압축거동특성

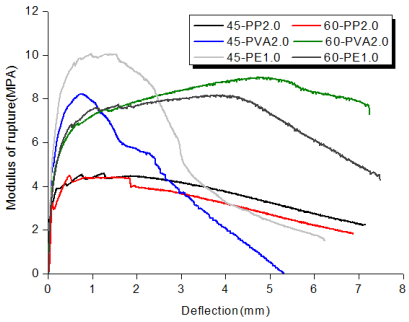


그림4. 휨거동특성

2.3 시험체 제작 및 측정상황

압축강도 공시체는 일반 콘크리트와 동일하게 KS F 2403(콘크리트 강도 시험용 공시체 제작방법)에 준하여 제작하였고 공시체 제작 후 1일 동안 기건양생한 후 20±3℃의 수조에서 28일 동안 수중양생을 하였으며, 각 시험체당 3개의 공시체를 제작하여 실험을 실시하였다. 직접인장공시체는 그림 2에 나타낸 바와 같이 덤벨형의 형태를 갖으며, 중앙부 100mm구간에 균열을 유도하였으며, 시험체의 양 측면에 LVDT 2개를 설치하여 변위값을 측정하였다. 또한 본 연구에서는 각 시험체당 5개의 인장공시체를 제작하여 타설 및 섬유분산으로 인한 실험오차를 줄이고자 하였다.

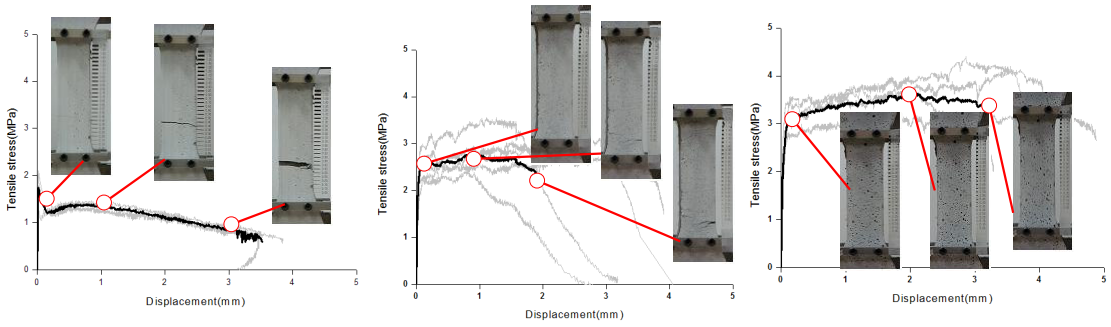
3. 실험결과

3.1 압축 및 휨거동특성

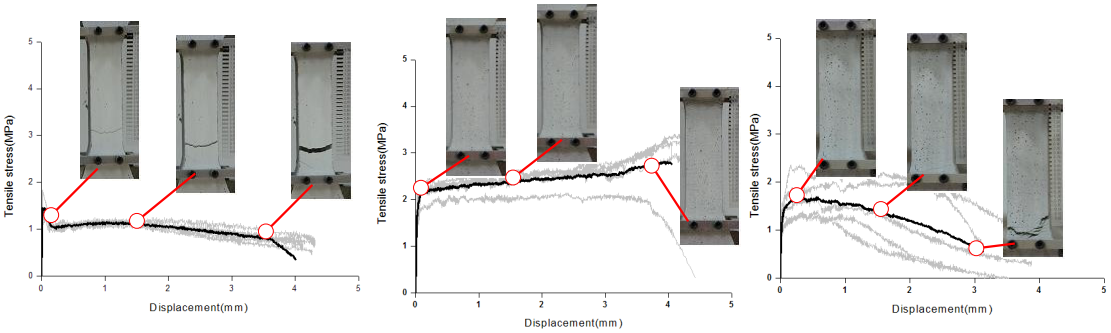
그림 3에서는 각 시험체의 압축거동시 나타난 응력-변형율 관계곡선을 나타낸 것으로, 시리즈 I에서는 45-PP2.0시험체에서 27.92MPa을 보이며 가장 높은 강도를 나타내었으며, 45-PE1.0>45-PVA2.0순으로 나타났다. 또한 시리즈 II에서도 60-PP2.0시험체에서 16.05MPa을 가장 높은 강도를 나타나 시리즈 I과 유사한 경향을 나타내었으나, 시리즈 I에 모든 시험체에서 약 50%정도의 낮은 압축강도를 나타내었다. 이는 PVA 및 PE섬유를 혼입한 시험체에서 슬럼프 및 공기량이 높게 측정되었으며, 이로 인해 발생된 미세공극으로 인해 PP섬유를 혼입한 시험체에 비해 낮은 압축강도를 나타낸 것으로 혼입된 섬유의 보강효과에 대한 영향은 적은 것으로 사료된다. 한편 그림 4에서 나타난 휨거동 특성에서는 압축거동시와는 상이한 양상을 보이며 45-PE1.0시험체에서 10.24MPa을 나타내며 가장 높은 파괴계수를 보였으며, 45-PP2.0>45-PVA2.0순으로 나타났다. 또한 시리즈 II에서는 60-PE1.0시험체와 60-PVA2.0시험체에서 각각 8.27MPa 및 9.17MPa을 보이며, 유사한 거동특성이 나타났다. 이는 PP섬유에 비해 높은 인장강도 및 탄성계수를 갖는 PVA 및 PE섬유를 혼입함으로써 탁월한 강도증진성능 및 미세균열 확산을 보이는 것으로 판단되며, 특히 PE섬유는 총 혼입율 1.0%에서도 다른 섬유와 유사한 보강성능을 나타내는 것으로 사료된다.

3.2 직접인장거동특성

그림 5에서는 직접인장거동특성 및 각 변위에서의 파괴진전양상을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 인장강도특성에서는 휨거동시 나타난 강도특성과 유사한 경향을 보이며, 시리즈 I에서는 45-PE1.0시험체에서 가장 높은 인장강도를 나타내었으며, 시리즈 II에서는 60-PVA2.0시험체에서 가장 높은 인장강도를 나타내었다. 파괴진전양상에서도 PVA 및 PE를 혼입한 시험체에서 효과적인 응력재분배로 실험구간 전반에 걸쳐 미세균열이 진전되면서 탁월한 성능을 보였으나, 다른 섬유에 비해 성능이 낮은 PP섬유를 혼입한 시험체는 미세균열의 진전없이 균열폭만이 커지며 최종파괴에 이르는 것으로 나타났다. 반면 PE섬유를 혼입하였을 경우 물시멘트비 60%로 배합시 섬유의 뭉침현상이 나타나 차후 시공성능 및 섬유의 분산성능 향상을 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.



(a) 45-PP2.0 (b) 45-PVA2.0 (c) 45-PE1.0



(d) 60-PP2.0 (e) 60-PVA2.0 (f) 60-PE1.0

그림5. 직접인장 거동특성

4. 결 론

1) 단독섬유를 혼입한 SHCC의 역학적 특성을 비교한 결과, PVA 및 PE섬유를 혼입한 시험체에서 효과적인 응력 재분배로 인한 미세균열이 진전되면서 탁월한 성능향상을 나타내는 것으로 판단되며, 향후 SHCC 구조부재 및 내진요소의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

2) 각 시험체의 물시멘트비에 따른 거동특성을 비교한 결과, 모든 시험체에서 섬유의 부착력 저하로 인해 물시멘트비 60%에서 다소 낮은 강도특성을 보이는 것으로 사료되며, 특히 PE섬유를 혼입한 시험체에서 섬유의 부착력 저하 및 뭉침현상으로 인해 물시멘트비에 따른 영향이 가장 큰 것으로 사료되며, 차후 구조부재 및 내진요소의 적용을 위해 SHCC의 시공성능 및 섬유분산성능 향상을 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2007년도 첨단도시개발사업 07도시재생B04「성능. 환경복원기술 개발」 지원 사업의 연구비 지원으로 수행된 연구의 일부이고, 이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 『2단계 BK21 사업』의 지원비를 받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 윤현도, 변장배, 전수만, 황선경(2006), “중심축력을 받는 HPFRCC 기둥의 압축거동”, 대한건축학회 논문집 구조계, 22(10) pp.29～36
2. 윤현도, 김용철, 김선우(2008), “보강섬유 종류에 따른 변형경화형 시멘트 복합체의 거동특성”, 대한건축학회논문집 구조계, 24(5) pp.141～148