

양생조건에 따른 변형경화형 시멘트 복합체의 역학적 특성

Effect of Curing Conditions on the Mechanical Properties of Strain-Hardening Cement Composite (SHCC)

윤 현 도* 김 선 우** 김 용 철*** 전에스더** 김 윤 수**** 지 상 규****
Yun, Hyun Do Kim, Sun Woo Kim, Yong-Cheol Jeon, Esther Kim, Yun Su Ji, Sang Kyu

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. But SHCC has serious problem as drying shrinkage because silica powder is used to make SHCC in order to improve bond strength between reinforcing fibers and cement matrix. Therefore, curing method (period and temperature) is very important for SHCC to show high tensile performance. a variety of experiments have being performed to access the performance of SHCC recently. This research emphasis is on the mechanical properties of SHCC made in Polyvinyl alcohol (PVA), Polyethylene (PE) fibers and steel cord (SC), and how curing method affects the composite property, and ultimately its strain-hardening performance.

요 약

최근 섬유보강 시멘트 복합체에 관한 연구 중 초기균열 이후 2% 이상의 변형률 이상에까지 인장응력을 증가시킬 수 있는 변형경화형 시멘트 복합체(Strain-Hardening Cement Composite, SHCC)에 관한 연구가 이루어지고 있으며, 이러한 SHCC는 혼입되는 보강섬유의 물리적 형상, 기계적 특성 및 혼입율을 조정함으로써 소요인장성능을 발현시킬 수 있다. 그러나 SHCC 제조시, 혼입되는 보강섬유와의 부착성능을 증진시키기 위하여 규사(Silica powder)와 같이 미세한 직경(105~120 μ m)의 잔골재를 사용함으로써 타설 후 양생기간 동안 건조수축량이 일반 콘크리트에 비해 심각하여 SHCC 제조시 양생조건에 특별한 주의를 기울여야 한다. 따라서 본 연구에서는 SHCC 양생방법 중 양생온도가 경화후 SHCC의 인장성능에 미치는 영향을 실험적으로 평가하고자 하였으며, 실험결과를 바탕으로 SHCC가 소정의 성능을 발현할 수 있는 양생조건을 실험적으로 규명함으로써 향후 SHCC 프리캐스트 구조부재 제작시 적절한 양생방법을 실시하기 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

* 정회원, 충남대학교, 건축공학과, 교수
** 정회원, 충남대학교, 고지능 콘크리트 구조연구실, 박사과정
*** 정회원, (주)동양구조엔지니어링 대표
**** 정회원, 충남대학교, 고지능 콘크리트 구조연구실, 석사과정

1. 서 론

건설산업에서 널리 사용되고 있는 콘크리트 등 시멘트 복합체(Cement composites)는 취성적인 파괴특성을 보인다. 이에 시멘트 복합체 체적비 2% 이내의 보강섬유(Reinforcing fiber)를 혼입하여 다수의 미세균열(Micro cracks)을 형성함으로써 재료적 인장강도 및 변형특성을 증진¹⁾시킬 뿐만 아니라, 구조부재에 적용하기 위하여 초기균열 이후 2% 이상의 변형률 이상에까지 인장응력을 증가시킬 수 있는 변형경화형 시멘트 복합체(Strain-Hardening Cement Composite, SHCC)에 관한 연구²⁾가 이루어지고 있으며, 이러한 SHCC는 혼입되는 보강섬유의 물리적 형상, 기계적 특성 및 혼입율을 조정함으로써 소요인장성능을 발현시킬 수 있다. 그러나 SHCC 제조시, 혼입되는 보강섬유와의 부착성능을 증진시키기 위하여 규사(Silica powder)와 같이 미세한 직경(105~120 μ m)의 잔골재를 사용하고 있어 타설 후 SHCC가 소요인장성능을 발현하기까지 양생기간 동안 건조수축량이 일반 콘크리트에 비해 심각하여 SHCC를 구조물에 적용하기 위해서는 양생조건에 특별한 주의를 기울여야 한다. SHCC는 구조물의 보수/보강재료의 적용성이 높으며, 내진부재 적용시 프리캐스트(Precast)를 통한 품질관리가 이루어지고 있으나 현재 이러한 프리캐스트 부재 생산단계에서 시멘트의 경화를 촉진시키기 위하여 상온보다 훨씬 높은 65 $^{\circ}$ C 정도의 증기를 이용하는 일반적 증기양생, 기계적 압력을 가하면서 온도를 100 $^{\circ}$ C까지 올린 양생과, 밀폐공간 속에서 발생시킨 10atm, 180 $^{\circ}$ C 정도의 포화증기를 이용한 오토클레이브 양생 등이 사용되고 있다. 그러나 이러한 고온의 양생방법 사용시 시멘트 복합체 내 재료들의 온도 팽창계수가 상이함으로 인해 다수의 공극이 발생될 수 있으며, 일부 보강섬유의 경우 70 $^{\circ}$ C 이상에서는 혼입된 보강섬유의 용융 등이 발생함으로써 인장응력 저항성능이 저하될 가능성도 배제할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 SHCC 타설 후의 양생방법 중 양생온도가 경화후 SHCC의 인장성능에 미치는 영향을 실험적으로 평가하고자 하였다. 이를 위해 SHCC 재료시험시 일반적으로 행해지는 28일 수중양생(20 \pm 2 $^{\circ}$ C) 조건을 기준으로 하였으며, 초기양생에 일반적으로 사용되는 40 \pm 5 $^{\circ}$ C의 고온수중양생을 7일간 실시하였다. 이러한 실험결과를 바탕으로 SHCC가 소정의 성능을 발현할 수 있는 양생조건을 실험적으로 규명함으로써 향후 SHCC 프리캐스트 구조부재 제작시 적절한 양생방법을 실시하기 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 실험 방법 및 사용재료

2.1 사용재료

본 연구에서는 시멘트 복합체에 변형경화특성을 부여하고자 각 섬유의 형상, 인장강도 및 탄성계수 등이 상이한 PE, PVA, SC를 각각 적용하였으며, 각 섬유의 형상 및 기계적 특성은 그림 1 및 표 1과 같다. 표에 나타난 바와 같이 마이크로 합성섬유 중 PE의 강도와 탄성계수는 PVA에 비해 1.56 및 1.87배 높은 물리적 특성치를 갖는다. 또한 사용된 시멘트는 T사의 조강포틀랜드 시멘트(비중 3.14)이고 잔골재는 S사에서 생산된 접착제용 규사 7호(비중 2.61, 직경 105~120 μ m)를 사용하였다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 양생방법이 SHCC 재료특성에 미치는 영향을 실험적으로 평가하고자 하며, 이를 위해 압축, 휨 및 직접인장성능을 실시하였다. 압축 공시체는 KS F 2403에 준하여 ϕ 100mm \times 200mm의 원주형 공시체, 휨성능 평가를 위한 KS F 2408에 준하여 100mm \times 100mm \times 400mm의 휨몰드, 직접인장



(a) PE (c) PVA (d) Steel cord
그림 1. 보강섬유의 형상

표 1. 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
SC	7.85	32	405	79	2300	206

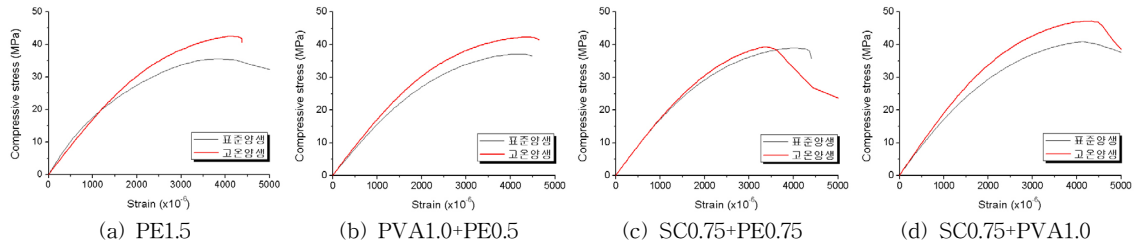


그림2. 압축강도-변형률 관계

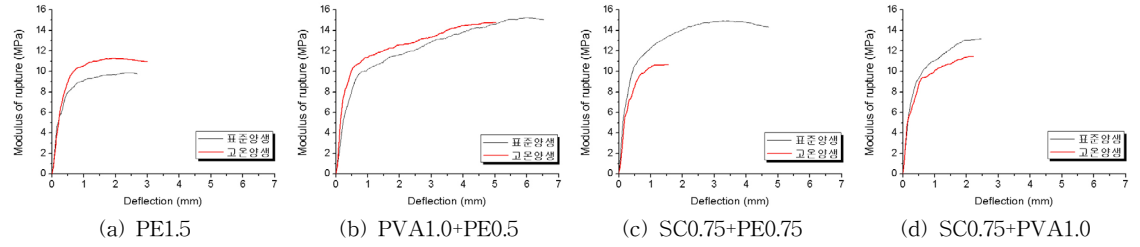


그림3. 파괴계수-처짐 관계

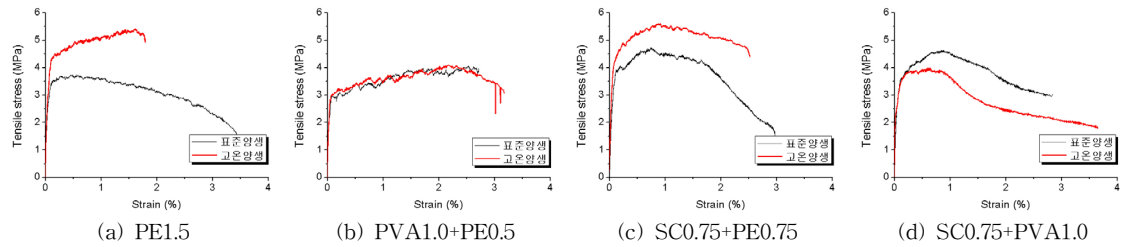


그림4. 직접인장강도-변형률 관계

성능 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

3.1 압축강도

그림 2는 양생방법에 따른 SHCC의 압축응력-변형도 관계곡선을 시험체별로 각각 비교하여 나타난 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 표준양생시 35.60~40.91MPa, 고온양생시 39.22~47.24MPa를 나타내어 시험체별로 압축강도의 증가를 보였다. 표준양생에 대한 고온양생 조건에서의 강도변화를 비교한 결과, SC0.75+PE0.75 시험체에서 약 1%의 증가만을 보여 양생조건의 영향이 가장 적은 것으로 나타났으나, PE1.5 시험체에서 19%를 나타내는 등 다른 시험체에서도 14% 이상의 강도 증가를 보여 양생 온도 증가가 보강섬유 종류에 큰 관계없이 시멘트복합체의 압축강도를 증진시키는 것으로 나타났다.

3.2 휨강도

그림 3은 SHCC에 도입된 휨하중으로 산정한 파괴계수(Modulus of rupture)-처짐 관계를 각각 비교하여 나타난 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 PVA1.0+PE0.5 시험체에서 가장 높은 파괴계수 및 5mm 이상의 처짐량을 보여 휨성능이 가장 높은 것으로 나타났으며, 표준 및 고온양생시 모두 유사한 파괴계수값을 보였다. 그러나 PE1.5 시험체에서는 표준양생시 9.87MPa, 고온양생시 11.26MPa의 파괴

표2. SHCC 재료시험 결과

측정항목 시험체	압축				휨				직접인장			
	표준양생		고온양생		표준양생		고온양생		표준양생		고온양생	
	f_{cu} (MPa)	ϵ_{cu} (μ)	f_{cu} (MPa)	ϵ_{cu} (μ)	f_r (MPa)	δ (mm)	f_r (MPa)	δ (mm)	f_t (MPa)	ϵ_t (%)	f_t (MPa)	ϵ_t (%)
PE1.5	35.60	3857	42.43	4043	9.87	2.35	11.26	1.92	3.75	0.56	5.43	1.61
PVA1.0+PE0.5	37.11	4075	42.26	4295	15.25	6.01	14.82	5.03	4.06	2.53	4.11	2.17
SC0.75+PE0.75	38.97	3948	39.22	3315	14.93	3.29	10.71	1.56	4.74	0.74	5.62	0.92
SC0.75+PVA1.0	40.91	4140	47.24	4325	13.16	2.48	11.45	2.10	4.65	0.88	4.00	0.62

계수를 보여 양생온도 증가에 따라 압축강도와 마찬가지로 휨강도가 증가되는 양상을 보였으나, 최대 휨강도시 처짐량은 다소 감소되는 특성을 보였다. 그림 3(c) 및 (d)와 같이 SC를 하이브리드한 경우에는 고온양생시 표준양생에 비해 휨강도 및 처짐량이 감소하는 경향을 보였으며, 특히 SC0.75+PE0.75 시험체의 경우에는 고온양생시 처짐량이 85% 감소한 1.56mm를 나타내며 파괴되었다.

3.3 인장강도

그림 4는 SHCC 인장 시험체에 도입된 인장응력과 변형률 관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 표준양생의 경우에는 SC를 하이브리드하여 혼입한 SC0.75+PE0.75 및 SC0.75+PVA1.0 시험체에서 4.74 및 4.65MPa의 높은 인장강도를 보였으나, 0.74 및 0.88%의 낮은 인장변형률을 보였다. 한편 PE1.5 시험체에서는 고온양생시 표준양생에 비해 44.8% 증가된 5.43MPa의 인장강도를 보여 SC0.75+PE0.75 시험체의 고온양생시 인장강도와 유사한 것으로 나타났다. 그러나 PVA가 혼입된 PVA1.0+PE0.5 시험체에서는 강도면에서는 유사한 것으로 나타났으나 최대강도시 변형률이 다소 저하되는 특성을 보였으며, SC와 하이브리드한 경우에는 그림 4(d)와 같이 더욱 취약한 특성을 보였다.

SHCC에 관한 압축, 휨 및 인장 등 재료시험 결과 측정된 값을 정리하여 표 2에 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 양생방법에 따른 SHCC의 재료특성에 관한 실험을 실시하였으며, 실험결과 고온양생시 표준양생에 비해 압축강도가 증가하는 것으로 나타났으나, SHCC의 응력분배효과 및 균열제어에 따른 휨 및 인장거동시 PVA 섬유를 혼입한 경우 성능저하 현상이 나타났다. 따라서 SHCC를 구조부재에 적용시 요구 성능을 심분 발휘하기 위해서는 보강섬유의 형상 및 기계적 특성, 혼입율, 물시멘트비와 같은 물리적 특성뿐만 아니라 양생온도 및 경화시 발생하는 수화열에 의한 온도이력에 관한 연구가 선행되어야 하며, 이를 근거로 한 배합계획 및 양생방법이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2007년도 첨단도시개발사업07도시재생B04 「성능·환경복원기술 개발」, 한국과학기술재단 특정기초연구(R01-2005-000-10546-0) 지원 사업으로 이루어진 것이고, 이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 2단계 BK21사업의 지원비를 받았으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 윤현도, 양일승, 한병찬, 전에스터, 김선우, 고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 인장강성 특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집(구조계), 2006, 21(10), 27-36
2. 김선우, 이민정, 장용현, 장광수, 송선화, 윤현도, 합성섬유를 사용한 변형경화형 시멘트 복합체의 휨 및 인장성능, 한국콘크리트학회 학술발표대회 논문집, 2008, 20(1)