



강섬유와 폴리에틸렌 섬유를 함께 혼입한 SHCC의 물결합재비와 팽창재 치환유무에 따른 역학적 특성

김성호¹⁾ · 이영오²⁾ · 김희종³⁾ · 윤현도^{1)*}

¹⁾충남대학교 건축공학과 ²⁾(주)코네스 코퍼레이션 ³⁾건축사무소 예림

Influence of Water-Binder Ratio and Expansion Admixture on Mechanical Properties of Strain-Hardening Cement-Based Composite with Hybrid Steel and Polyethylene Fibers

Sung-Ho Kim,¹⁾ Young-Oh Lee,²⁾ Hee-Jong Kim,³⁾ and Hyun-Do Yun^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²⁾Kones Corporation, Daejeon 305-308, Korea

³⁾Yerim Architects & Planners, Daejeon 300-830, Korea

ABSTRACT Hybrid SHCC is being researched actively for its excellent performance in controlling macro and micro cracks using macro and micro fibers, respectively. However, a significant autogenous shrinkage of SHCC is expected since it possesses high unit cement volume in its mix proportion, resulting in autogenous shrinkage cracks. Therefore, this study was performed to evaluate mechanical property of shrinkage-reducing type hybrid SHCC mixed together with steel fiber and PE fiber with excellent micro/macro crack controlling performance. In order to evaluate mechanical property of shrinkage-reducing type hybrid SHCC, replacement ratios of 0% and 10% of expansive admixture and water to binder ratios of 0.45, 0.3, and 0.2 were considered as variables. Then, shrinkage, compressive, flexural, and direct tensile tests were performed. The test results showed that mix proportion with W/B 0.3 significantly improved mechanical performance by using 10% replacement of expansive admixture.

Keywords : expansion admixture, strain-hardening cement-based composite (SHCC), mechanical properties, direct tension, compression

1. 서 론

콘크리트 및 모르타르와 같은 시멘트 복합체의 취성적인 성질을 보완하고 균열을 제어하기 위해, 시멘트 복합체에 섬유의 종류나 길이가 상이한 섬유를 함께 혼입한 변형 경화형 시멘트 복합체(strain-hardening cement-based composite, SHCC)의 연구가 국·내외적으로 활발하게 진행되고 있다.^{1,2)} 특히 강섬유와 합성섬유를 하이브리드하여 혼입한 SHCC는 매크로 강섬유(steel fiber, SF)에 의한 매크로 균열(macrocrack) 제어 및 마이크로 합성섬유에 의한 마이크로 균열(microcrack) 제어성능이 뛰어나 다양한 분야에 적용가능성이 높은 재료로 평가되고 있다.³⁾ SF는 적정량을 투입할 경우 강도, 강성 및 연성능력 향상을 기대할 수 있으나 다량을 혼입한 경우엔 시공성 저하

및 재료분리의 위험성이 있다.⁴⁾ 폴리에틸렌(polyethylene, PE) 섬유는 우수한 시멘트 매트릭스와의 부착강도 및 높은 인장강도로 인하여 시멘트 매트릭스 내 발생된 균열면을 적절하게 가교함으로써 미세균열을 분산시켜 우수한 변형경화성능을 발휘하는 장점이 있다. 그러나 통상적으로 1.5% 이상의 섬유가 혼입될 때 섬유 뭉침(fiber ball)현상이 발생하는 단점이 있다. 이와 같은 SF와 PE섬유를 하이브리드하여 SHCC에 혼입했을 경우 단일 섬유를 혼입한 SHCC에 비하여, 섬유분산이 향상되어 SHCC의 강도 및 연성의 개선을 기대할 수 있다.⁵⁾

그러나 SHCC의 경우 콘크리트에 비해 낮은 물-결합재비(W/B)와 높은 단위 시멘트량으로 인하여 많은 양의 자기수축 발생이 예상되므로 수축균열에 의한 손상을 고려하여야 한다.²⁾ 최근 자기수축에 의한 성능저하를 제어하기 위하여 PE섬유 보강 시멘트 복합체나 SF 보강 시멘트 복합체에 팽창재(expansion admixture, EXA)를 혼입하여 수축량을 제어하는 연구가 수행되었다.^{6,7)} PE섬유로

*Corresponding author E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr

Received September 22, 2011, Revised March 6, 2012,

Accepted May 2, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

보강된 SHCC의 시멘트 일부를 팽창재로 대체한 연구에서는 시멘트양의 10%를 대체하여 팽창재로 혼입한 경우 역학적 성능이 효과적으로 향상되는 경향을 보였으며 10%를 초과하여 팽창재를 대체할 경우 과다 팽창에 의해 오히려 역학적 성능이 저하되는 경향을 나타냈다.⁶⁾ SF 보강 시멘트 복합체에 팽창재를 치환한 연구에서는 팽창재를 10% 치환하였을 경우 압축, 휨강도 및 탄성계수가 증가하는 경향을 보인 반면 인장강도는 약 20%가 감소하는 경향을 보이는 것으로 보고되었다.⁷⁾ 이와 같이 팽창재를 대체한 SHCC는 섬유 종류에 따라 상이한 역학적 특성을 나타내며 2가지 종류 이상의 섬유를 함께 혼입한 SHCC에 팽창재를 대체할 경우 기존 단일 섬유와는 또다른 역학적 특성을 나타낼 것으로 판단된다. 그러나 2가지 종류 이상의 섬유를 함께 혼입한 SHCC에 팽창재를 대체한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 2가지 이상의 섬유를 함께 혼입한 SHCC의 자기수축에 의한 손상을 고려하기 위해 팽창재를 대체한 팽창형 SHCC의 역학적 특성에 대한 폭넓은 연구가 요구된다.

이에 이 연구에서는 W/B와 팽창재 대체 유무를 변수로 하여 SF와 PE섬유를 함께 혼입한 SHCC의 역학적 특성을 평가하고자 하였다.

2. 시험 계획 및 방법

SF와 PE섬유를 함께 사용한 SHCC의 팽창재 치환에 따른 역학적 특성을 평가하고자 팽창재 유무(0 및 10%)와 W/B(45%, 30% 및 20%)를 변수로 하여 수축, 압축, 직접인장 및 휨 시험을 계획하였다(Fig. 1). 팽창재는 국내산 CSA(calcium sulfoaluminate)계 K형을 사용하였다. SHCC에서 팽창재 대체율에 따른 역학적 특성은 W/B와 밀접한 관계가 있을 것으로 판단되나 W/B 30%의 PE섬유 보강 SHCC의 팽창재 치환률에 따른 역학적 특성에 관한 선행연구⁶⁾에서 시멘트의 10%를 CSA계 팽창재로 대체하여 치환했을 경우 우수한 역학적 특성을 보이는 것으로 보고되었다. 이에 근거하여 이 실험연구에서는 모든 W/B에 대하여 팽창재 대체율을 10%로 계획하였다.



Fig. 1 Shapes of fibers

보강 섬유로 길이 32 mm의 후크형 SF와 12 mm PE섬유를 하이브리드하여 사용하였고 섬유의 혼입량은 선행연구⁸⁾에서 SF와 PE섬유를 하이브리드하여 혼입하였을 때 성능이 우수하고 섬유 분산 효과가 양호한 것으로 평가된 SF 0.75%와 PE섬유 0.75% 총 1.5%로 계획하였다. 섬유와 팽창재의 물리적 성질은 Tables 1 및 2에 각각 나타내었고 W/B에 따른 SHCC의 배합조건은 Table 3과 같다. 배합 중 100 MPa급의 SHCC인 PESF20은 다수의 시험배합을 통하여 강도발현을 위해 실리카폼과 소포제를 혼입하는 것으로 결정하였다.

수축시험은 타설 직후부터 수축시험 종료시점(90일)까

Table 1 Mechanical properties of fibers

Fiber	Specific gravity (kg/m ³)	Length (l, mm)	Diameter (d, μm)	Aspect ratio (l/d)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
PE	0.97	12	12	1,000	2,500	75
SF	7.85	32	405	79	2,300	206

Table 2 Mechanical properties of EXA

Mechanical properties						Chemical properties	
Specific gravity (kg/m ³)	Finess (cm ² /g)	Setting time		Expansion (%)		Oxide of magnesium (%)	Ignition loss (%)
		Initial set (min)	Final set (h)	7 days	28 days		
2.8~3.0	3,350	184	5.5	0.072	0.010	1.43	2.1

Table 3 Mix proportions of SHCC materials

SHCC's mixture	W/B (%)	EXA replacement level (%)	Fiber volume fraction (%)		Water (kg/m ³)	Unit weight (kg/m ³)										
			PE	SF		Cement	EXA ⁽¹⁾	Silica fume	Silica sand	PE ⁽²⁾	SF ⁽³⁾	VA ⁽⁴⁾	SP ⁽⁵⁾	AE ⁽⁶⁾	A ⁽⁷⁾	
PESF45-0	45	0	0.75	0.75	484	1075	0	0	430	7	58	0.52	0	0	0	
PESF45-10	45	10			489	967	107	0	430	7	58	0.52	0	0	0	0
PESF30-0	30	0			384	1281	0	0	511	7	58	0.52	16	0	0	0
PESF30-10	30	10			384	1149	128	0	511	7	58	0.52	16	0	0	0
PESF20-0	20	0			319	1409	0	245	163	7	58	0	0	33	7	7
PESF20-10	20	10			319	1268	140	247	165	7	58	0	0	33	7	7

*PESF45-10 : PESF(fiber type), 45(W/B), 10(EXA replacement level)

⁽¹⁾Expansion additive, ⁽²⁾Polyethylene, ⁽³⁾Steel fiber, ⁽⁴⁾Viscosity agent, ⁽⁵⁾Superplasticizer, ⁽⁶⁾Air-entraining agent, ⁽⁷⁾Antifoaming agent

지 온도 $20\pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $50\pm 1\%$ 의 항온항습실에서 수축량을 정하였으며 압축시험은 KS F 2405에 준하여 1,000 kN 용량의 UTM으로 가력하였다. 직접인장시험은 일본 JSCE-E-531⁶⁾의 직접인장시험방법에 준하여 시험체 양측면에 설치된 변위계로 변형률을 측정하였으며 0.5 mm/min의 속도로 하중을 가력하였다. 휨시험은 KS F 2408에 준하여 200 kN의 만능재료 시험기로 4점 가력하였다.

3. 시험 결과 및 분석

3.1 수축 특성

Fig. 2(a)는 90일 동안 각 배합조건의 SHCC에 대한 시간에 따른 수축변형률을 비교하여 나타낸 것이고 Fig. 2(b)는 경화 중 팽창이 발생하는 2일간의 시간에 따른 변형률의 차이를 명확히 비교하고자 나타내었다. Fig. 3은 각 배합조건 SHCC의 최대 팽창량 및 90일 후 최종 수축량을 비교하여 나타낸 것이다. Table 4는 수축시험 결과를 요약하여 나타낸 것이다. Table 4의 최종 수축감소율은 팽창재 치환에 따른 최종 수축량의 차이를 팽창재가 치환되지 않은 배합의 최종 수축량으로 나눠 백분율화하여 표현한 것이다.

팽창재를 치환하지 않은 SHCC 배합의 최종 수축량은 PESF45-0 배합에서 가장 크게 발생하였으며, PESF30-0와 PESF20-0 배합에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 PESF45-0 배합에서 높은 단위수량에 의해 Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 건조수축이 크게 발생되었기 때문이며 그에 따라 최종 수축량이 증가된 것으로 판단된다. PESF20-0 배합의 W/B가 이 연구에서 고려된 SHCC 배합 중 가장 낮으므로 W/B에 의한 건조수축의 영향은 연구대상 SHCC 중 가장 적을 것으로 예상되나 자기수축량은 실리카폼을 치환하거나 W/B가 낮을수록 증가하므로⁹⁾ Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 자기수축량의 증가로 인하여 PESF30-0 및 PESF20-0 배합의 최종 수축량이 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다. 팽창재 치환한 경우는 기존 연구⁷⁾에서와 같이 모든 배합조건의 SHCC에서 최종 수축량이 감소하는 경향이 나타났다. PESF45-10 배합에서 최대 팽창량이 $471\ \mu\text{m}$ 로 가장 높게 나타났다. 이

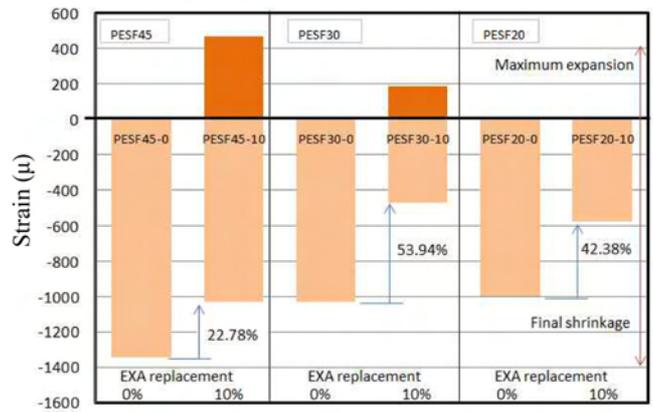


Fig. 3 Quantity of maximum expansion and final shrinkage

Table 4 Summaries of shrinkage test results

SHCC type	Maximum expansion (μ)	Quantity of final shrinkage (μ)	Ratio of final shrinkage decrease (%)
PESF45-0	0	-1343	22.78
PESF45-10	471	-1037	
PESF30-0	0	-1029	53.94
PESF30-10	188	-474	
PESF20-0	0	-998	42.38
PESF20-10	0	-575	

는 팽창재가 SHCC 매트릭스 내부 수분과의 수화반응으로 인해 에트린자이트(ettringite)가 생성되어 팽창됨으로, W/B가 높은 PESF45-10 배합에서 에트린자이트 생성이 다른 배합에 비해 활발하여 최대 팽창량이 크게 나타나는 것으로 판단된다. 최대 팽창량은 모든 배합 중 가장 높은 반면 최종 수축감소율은 약 22%로 SHCC 배합 중 가장 낮은 경향을 보였다. 이는 다른 배합에 비해 높은 W/B에 의해 최대 팽창 이후 건조수축의 양이 많아 수축량이 증가한 것으로 판단된다. 또한 시멘트 모르타르가 수화반응 중인 타설 직후부터 시멘트의 유동성이 큰 상태인 10시간 이전에 $200\ \mu$ 이상의 팽창이 이루어져 팽창량은 크지만 팽창력이 모르타르에 응력으로서 축적되지 못해 최종 수축량이 증가한 것으로 사료된다.⁹⁾ PESF30-

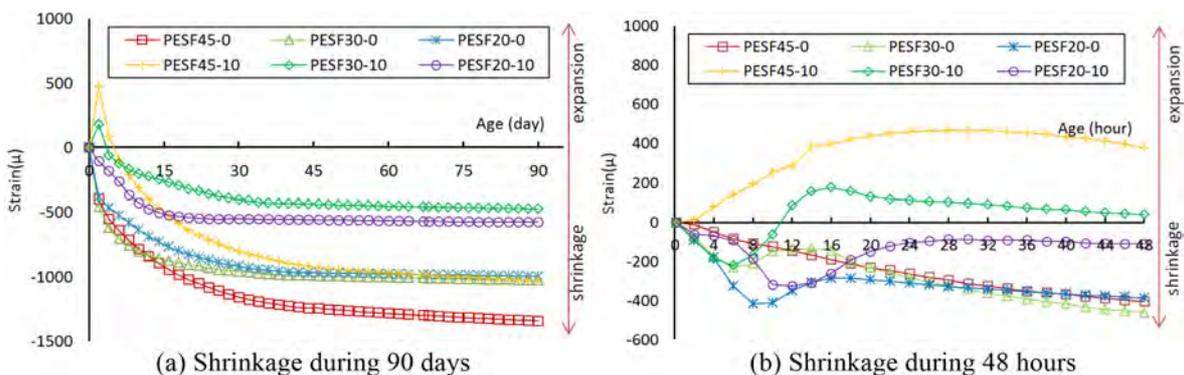


Fig. 2 Comparison of shrinkage strain according to age

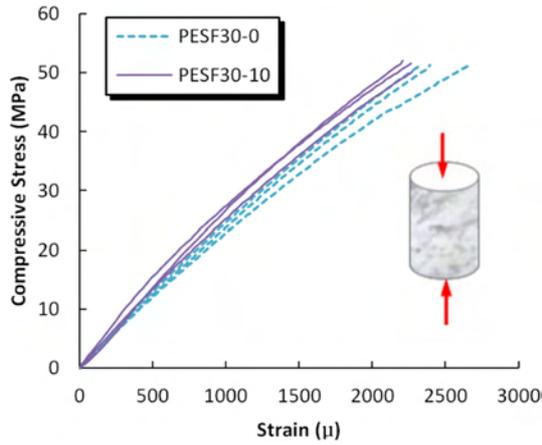


Fig. 4 Compressive stress-strain curve of PESF30

10 배합에서 최대 팽창량은 118 μ 로 PESF45-10 배합에 비해 최대 팽창량은 적었으나, 최종 수축감소율은 약 54%로 배합 중 팽창재 치환에 따른 수축감소능력이 가장 우수한 경향을 보였다. 이는 W/B가 30%이었던 선행연구⁶⁾에서 성능이 우수하였던 팽창재 대체량 10%를 기준으로 치환하였기 때문에 PESF30-10 배합에서도 팽창재 10% 치환에 따른 최종 수축감소율이 다른 배합조건에 비해 높았던 것으로 판단된다. 따라서 W/B와 같은 배합조건에 따른 역학적 성능 면에서 적정 팽창재 대체량에 관한 평가가 필요한 것으로 판단된다.

PESF20-10 배합의 경우 팽창재를 대체함에 따라 팽창량은 이 시험에서 고려된 배합 중 가장 낮은 경향을 보였으나 최종 수축 감소율은 약 42%로 수축 감소효과가 다소 높은 경향을 보였다. 이는 실리카폼에 의해 초기경화가 빠르게 진행되어 팽창량이 낮은 경향을 보이는 것으로 판단되며,⁹⁾ 낮은 W/B에 의해 건조수축이 비교적 적게 발생하여 최종 감소율이 높은 것으로 사료된다.

3.2 압축 특성

Fig. 4는 PESF30 시험체의 팽창재 유무에 따른 압축응력-변형을 관계곡선을 나타낸 것이다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 상이한 W/B를 갖는 SHCC 배합에서 팽창재 치환에 따른 압축 특성은 큰 차이를 보이지 않았다. Fig. 5는 SHCC 배합 조건에 대하여 제작된 3개 원주형 공시체의 압축강도 및 탄성계수를 배합조건에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 각 SHCC 배합에 대한 압축시험 결과를 Table 5에 나타내었다. PESF30 배합의 응력변형곡선을 나타낸 Figs. 4 및 5에 나타난 바와 같이 각 SHCC 배합에 있어서 압축강도는 팽창재를 치환함에 따라 팽창재 치환전의 시험체와 약 1%의 차이를 보이고 있는 바, 팽창재 치환에 따라 SHCC의 압축강도는 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 이는 섬유가 보강되지 않은 모르타르에 팽창재를 치환한 기존연구¹¹⁾에서 팽창재 치환에 따른 압축강도의 차이가 크지 않았던 것과 같은 경향으로 에트린자이트에 의한 매트릭스 내의 공극 충전과 체

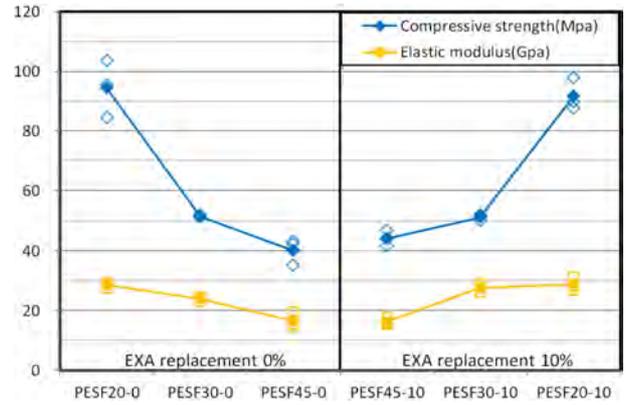


Fig. 5 Compressive strength and elastic modulus of SHCC materials

Table 5 Results of compressive tests

SHCC Type	Stress (MPa)				Elastic modulus (GPa)			
	No.1	No.2	No.3	Average	No.1	No.2	No.3	Average
PESF45-0	42	37	43	42	15	19	14	17
PESF45-10	47	44	42	44	15	15	18	16
PESF30-0	51	51	52	51	22	24	25	24
PESF30-10	50	52	52	51	26	29	28	28
PESF20-0	95	84	104	94	29	29	27	29
PESF20-10	88	98	90	92	31	28	27	29

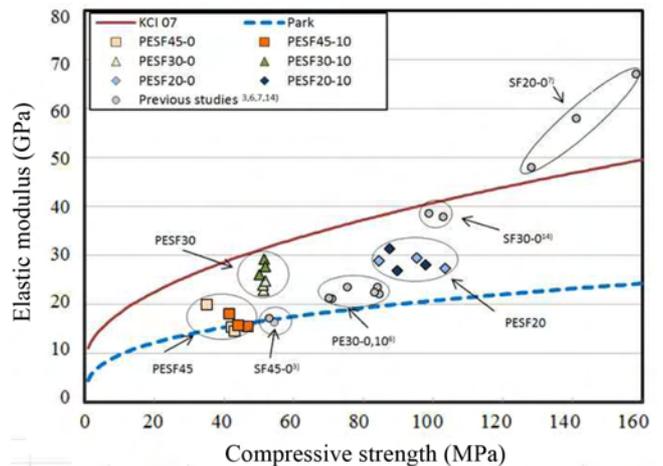


Fig. 6 Relationship of elastic modulus and compressive strength

적팽창의 상쇄로 인하여 PE섬유와 SF를 혼합사용한 변형경화형 시멘트 복합체에서도 팽창재 치환에 따른 압축강도의 변화량은 크지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 6은 압축강도와 탄성계수의 관계를 보통 콘크리트를 대상으로 규정된 KCI-07 기준식¹¹⁾ 및 박완신에 의해 제안된 섬유보강 시멘트 복합체의 탄성계수 추정식¹²⁾과 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 각 시험체의 압축강도에 따른 탄성계수값은 섬유보강 시멘트 복합체를 대상으로 한 박완신 제안식의 계산값을 만족하는 경향을 보였으나 배합 중 PESF30 및 PESF20

시험체들은 박완신 제안식에 의한 계산값에 비해 약 45% 이상 높은 경향을 보였다. 이는 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 단일 SF를 치환한 시멘트 복합체^{7,13)}의 경우 W/B가 30% 이하일 때 박완신 제안식의 계산값보다 보통 콘크리트의 기준식인 KCI-07에 근접하는 경향을 보이는데, 80 MPa 이상의 시험체는 높은 탄성계수를 가지는 SF가 치환됨에 따라 시멘트 복합체의 탄성계수 또한 높아지는 것으로 판단된다. 추후 단일 PE섬유를 혼입한 SHCC에 비해 높은 탄성계수를 갖는 PE섬유와 SF가 함께 혼입된 SHCC의 압축강도-탄성계수의 관계에 관한 제안식의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.3 인장 특성

Fig. 7은 W/B가 상이한 SHCC에 대하여 제작된 3개의 덤벨형(dumbbell-shaped) 인장시험체에 대한 직접인장응력-변형률 관계곡선을 비교하여 나타냈으며, 굵은 선은 이러한 3개의 시험체의 평균값을 나타낸다. 또한 각 시험체의 인장시험 결과를 Table 6에 정리하여 나타내었다.

팽창재를 대체하지 않은 배합에서 PESF45-0과 PESF30-0 배합에서는 인장응력의 차이가 2.22 MPa로 확인한 차이를 보였으나 PESF30-0과 PESF20-0 배합에서는 0.51 MPa의 차이로 W/B에 따른 인장강도의 차이가 크지 않은 경향이 나타났다. 또한 다른 배합에 비하여 PESF20-0 배합에서 변형경화구간이 크지 않은 경향이 나타났다. 이는 단위 바인더양이 증가함에 따라 시멘트 매트릭스를 보강할 섬유의 양이 많아야 적절히 인장성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단되나 전 배합에 대하여 동일한 양의 섬유를 보강하였기 때문에 PESF20배합에서 인장강도 및 변형경화 구간이 다른 배합에 비하여 낮은 것으로 판단된다.¹⁴⁾

팽창재를 치환함에 따라 PESF45-10 배합은 평균인장응력이 약 25%가 증가하였고, 평균 인장변형률은 약 0.37%가 감소하였다. PESF30-10의 경우 약 8%가 감소하였으며 변형 능력은 PESF30-0에 비해 약 81%가 증가하여, 이 연구에서 검토된 배합 중 인장강도 당 변형률로 정의되는 변형능력이 가장 향상되는 경향을 보였다. PESF20 배합은 한천구 등에 의해 수행된 W/B 21%의 배합에 SF와 팽창재를 활용한 기존연구⁷⁾에서 보고된 바와 같이 팽창재를 대체함에 따라 인장응력이 감소하는 경향을 보였다. 그러나 기존 연구에서 팽창재를 10% 대체함에 따라 약 20%의 인장응력이 감소하는 경향을 나타냈던 것에 비해 PESF30-10 시험체에서는 팽창재 10% 대체에 따라 약 5%의 인장응력이 감소하는 경향을 볼 수 있었다. 이는 SF만을 혼입한 SHCC에 인장성능이 저하되는 것을 PE섬유와 하이브리드하여 혼입함에 따라 PE섬유에 의한 마이크로 균열제어 및 섬유의 가교작용 등으로 인해 SF만으로 보강된 경우에 비하여 완화된 것으로 판단된다.

Figs. 8 및 9는 각 배합별로 변형률 0.25%마다 인장시험체 3개의 평균균열수와 평균균열폭을 비교하여 나타

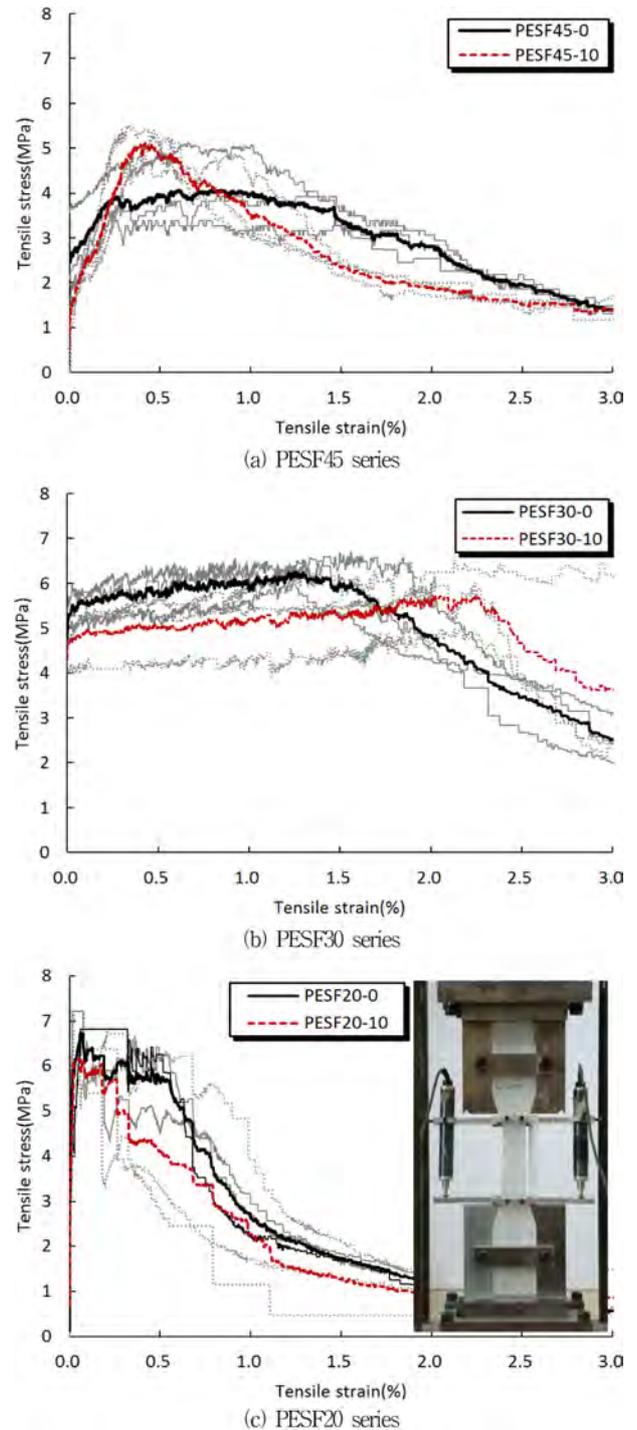


Fig. 7 Tensile stress-strain curves of SHCC materials

낸 것이다. Figs. 8 및 9에 나타난 바와 같이 W/B가 높은 배합의 SHCC에서 균열수가 많으며 평균 균열폭이 감소하는 경향을 보였다. 이는 Fig. 7의 직접인장응력 변형률 관계곡선에서 나타난 바와 같이 W/B가 낮은 배합일수록 최대하중 이후 다소 급격한 파괴 형태를 보이는 거동 형태에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 거동 형태를 보이는 것은 앞서 언급했던 바와 같이 W/B가 낮은 배합 즉, 고강도 시멘트 매트릭스의 파괴 에너지가 증가됨에 따라 시멘트 복합체에 변형경화성능을 부여하기 위하여 요구되는 임계 섬유보강량이 증가되지만,¹⁴⁾ 모든 W/B에

Table 6 Results of tensile tests

SHCC type	Maximum tensile stress (MPa)				Strain corresponding to maximum tensile stress (%)			
	No.1	No.2	No.3	Average	No.1	No.2	No.3	Average
PESF45-0	4.03	3.49	5.11	4.21	1.31	0.26	0.65	0.74
PESF45-10	5.07	5.51	5.30	5.29	0.35	0.32	0.45	0.37
PESF30-0	6.04	6.56	6.69	6.43	0.55	1.33	1.56	1.15
PESF30-10	4.97	6.24	6.50	5.91	2.13	2.02	2.13	2.09
PESF20-0	6.69	7.30	6.82	6.94	0.36	0.02	0.01	0.13
PESF20-10	7.32	6.79	5.60	6.57	0.03	0.21	0.02	0.09

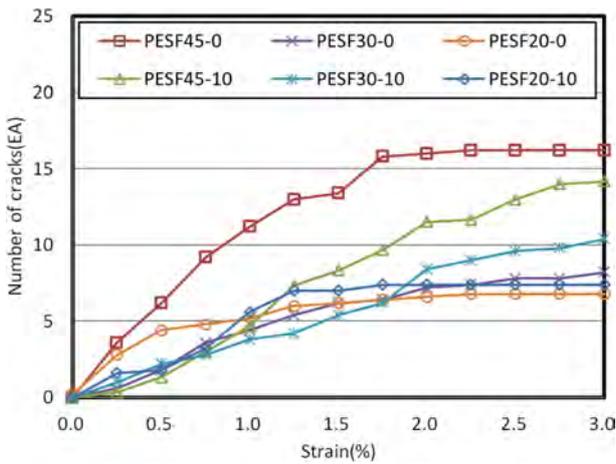


Fig. 8 Number of cracks on tensile specimens

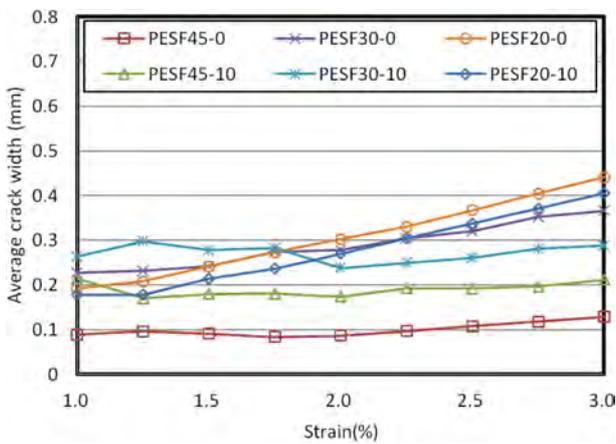


Fig. 9 Average crack width according to strain

대하여 동일한량의 섬유가 보강됨에 따라 상이한 W/B를 갖는 섬유보강 시멘트 복합체에서 변형 경화 특성이 차이를 보이고 있다. 이러한 결과로 W/B가 낮은 경우 W/B가 높은 저항도 시험체보다 취성적인 특성을 보이고 있는 것으로 판단된다. Fig. 8의 PESF45 시험체의 균열수가 다른 배합에 비해 0.25~0.5%의 변형률에서 다소 많이 발생하는 경향이 나타났다. 이는 Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이 약 2.5 MPa의 응력에서 균열이 발생한 후 응력이 증가함에 따라 균열이 분산되어 균열 수가 증가하

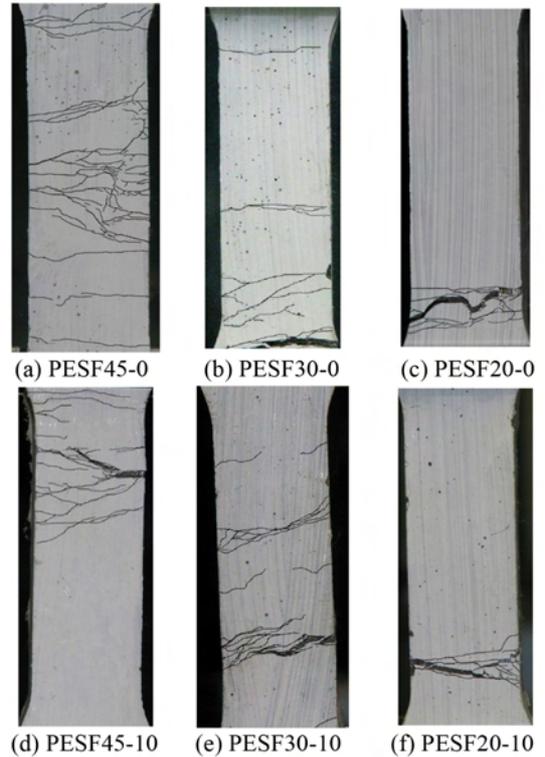


Fig. 10 Typical patterns of tensile specimens

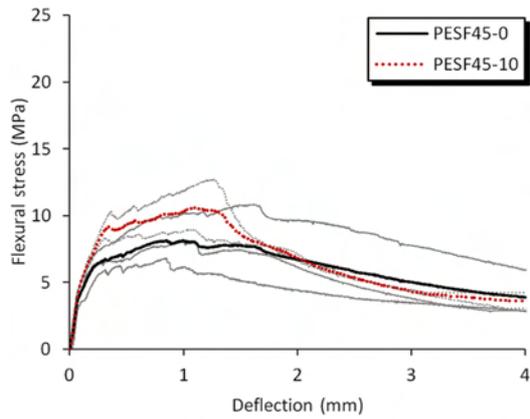
는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 각 인장시험체의 전형적인 최종 파괴양상을 나타낸 것이다. W/B가 높은 PESF45 및 PESF30 시험체에서 비교적 균열 수가 많은 경향을 보였으며 시험체 전구간에 걸쳐 균열분산이 비교적 고르게 분포된 경향을 보였다. PESF20 배합에서 임계섬유 보강량이 적어 균열 분산능력이 다소 낮은 경향을 보이는 것으로 사료된다.

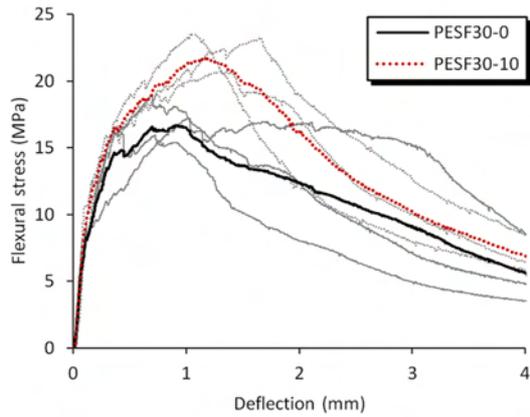
3.4 휨 특성

Fig. 11에서 가는선은 SHCC 각 배합에 대한 3개의 휨 시험체에 대한 휨응력-처짐곡선을 나타낸 것이며, 굵은 선은 이러한 3개의 시험 결과의 평균값을 나타낸 것이다. 휨 시험 결과를 Table 7에 요약하여 나타내었다.

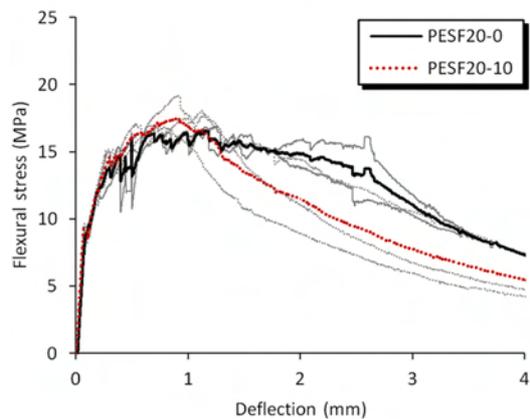
팽창재를 대체함에 따라 이 연구에서 고려된 모든 배합에서 휨강도가 증가하는 경향을 보였다. PESF45 배합의 시험체와 PESF20 배합의 시험체는 팽창재를 치환함에 따라 처짐량의 변화량은 미미하였으나 휨강도는 약 35%와 6%가 각각 증가하였다. PESF30 배합의 시험체는 팽창재를 대체함에 따라 약 28%의 휨강도가 증가하였으며 처짐량은 약 91%가 증가하여, 이 시험에서 고려된 SHCC 배합 중 팽창재 치환에 따른 휨성능의 개선량이 가장 우수한 경향을 보였다. 이는 앞서 전술한 바와 같이 이 연구에서는 모든 배합에 대하여 W/B가 30%였던 선행연구⁶⁾의 적정 팽창재 대체량으로 보고된 10%를 대체하였기 때문에 동일한 W/B인 PESF30 배합에서 팽창재 치환에 따른 휨성능이 다른 배합에 비해 높은 경향을 보이는 가능성을 배제할 수 없다고 판단된다.



(a) PESF45 series



(b) PESF30 series



(c) PESF20 series

Fig. 11 Flexural stress-deflection curve of prisms

Table 7 Results of flexural tests

SHCC type	Maximum flexural strength (MPa)				Deflection corresponding to maximum flexural strength (mm)			
	No.1	No.2	No.3	Average	No.1	No.2	No.3	Average
PESF45-0	6.8	10.9	8.1	8.6	0.9	1.6	1.1	1.2
PESF45-10	13.1	12.7	9.0	11.6	1.0	1.3	1.1	1.1
PESF30-0	19.0	16.3	17.3	17.5	0.7	0.4	1.1	0.7
PESF30-10	23.2	20.7	23.6	22.5	1.7	1.3	1.1	1.3
PESF20-0	16.6	16.9	16.9	16.8	1.1	0.6	2.1	1.3
PESF20-10	16.5	17.6	19.2	17.8	1.5	1.1	0.9	1.2

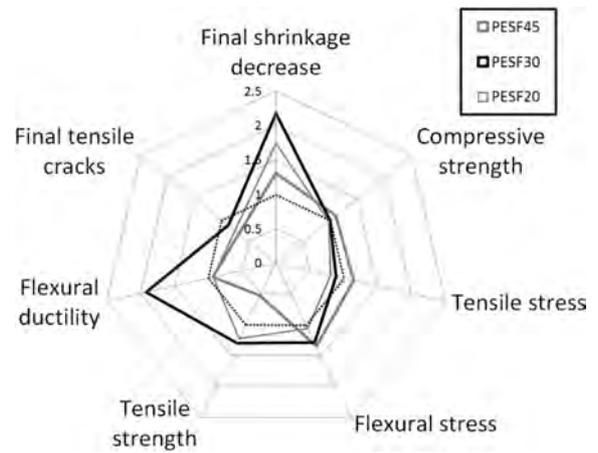


Fig. 12 Performance assessment of hybrid SHCC using expansion additive

4. 팽창재 치환에 따른 성능 평가

SHCC의 W/B 및 팽창재 혼입 유무에 따른 역학적 특성을 평가하기 위하여 이 연구에서는 최종 수축량, 압축강도, 직접인장강도 및 변형률, 휨강도 및 처짐, 최종 인장 균열 수에 대하여 각 항목의 시험값을 무차원화하였다.

무차원화는 각 항목의 팽창재 치환에 따른 평균 시험값을 팽창재를 치환하지 않은 평균 시험값으로 나눠 무차원화하였다. 항목 중 최종 수축량의 경우는 최종 수축량의 감소를 팽창재 치환에 따른 성능개선으로 보고 팽창재 치환에 따른 시험값으로 팽창재를 치환하지 않은 시험값을 나누어 무차원화하였다. Fig. 12에서 나타난 바와 같이 PESF45의 배합은 팽창재를 치환함에 따라 직접인장에 따른 변형 능력은 감소하는 경향을 보였으나 최종 수축량이 개선되었으며 압축강도와 휨강도가 증가하는 경향이 나타났다. PESF30 배합은 압축 및 인장강도는 팽창재 치환에 따른 변화가 크지 않았으나 최종 수축감소량, 휨강도 및 처짐량, 인장변형률은 개선되는 경향을 보였다. PESF20 배합은 최종 수축량, 휨강도 및 인장 변형률은 증가하였으나 압축 및 인장강도 등은 팽창재 치환에 따른 차이가 미미하였다. 이처럼 각 배합에서 큰 경향성은 나타나지 않았지만 전반적으로 PESF30의 배합에서 다른 배합에 비하여 팽창재 치환에 따른 성능 개선이 우수한 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 팽창재 치환 유무와 W/B에 따른 PE섬유와 SF를 하이브리드하여 혼입한 SHCC의 역학적 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수축시험 결과, 팽창재를 치환함에 따라 최종 수축량은 각 배합에서 약 300~550 μg 감소하는 경향을 보였다. 팽창량은 W/B가 높은 배합에서 가장 큰 경향을 보였으며, W/B가 낮아짐에 따라 선형적으로 감소되는 경향이 나타났다. 팽창재 치환에 따른 최

중 수축감소율은 PESF30 배합에서 약 54%로 이 연구에서 고려된 배합 중 가장 크게 나타났다.

- 2) 압축시험 결과, 팽창재 치환에 따른 압축강도의 변화량은 크지 않았다. 탄성계수는 PESF30 및 PESF20 배합에서 섬유보강 시멘트를 대상으로 제안된 식에 의해 추정된 값에 비하여 약 50%가 높은 경향을 보였으며, 이는 보통 콘크리트를 대상으로 규정된 KCI-07 기준식에 근접한 경향을 보였다. 이는 높은 탄성계수를 갖는 SF를 혼입한 것에 기인한 것으로 판단된다.
- 3) 직접인장시험 결과, 팽창재를 치환함에 따라 PESF45의 시험체는 인장강도가 상승하고 인장변형률은 감소하는 경향을 보였다. PESF30 시험체의 인장강도는 약 8%가 감소하였으나 변형률이 약 80%가 증가하는 경향을 보였다. PESF20 시험체의 인장강도는 약 5%가 감소하였으나 SF만으로 보강된 시멘트 복합체에 팽창재를 사용한 기존연구에서 팽창재 10% 치환에 따라 인장강도가 20%가 감소한 결과와 비교했을 때 PE를 하이브리드 함에 따라 인장성능면에서 유효한 것으로 판단된다.
- 4) 휨시험에서는 팽창재 치환에 따라 모든 시험체에서 약 6~35%의 휨응력이 증가하는 경향을 보였다. 처짐량은 PESF45 및 PESF20 시험체는 큰 차이를 보이지 않았으나 PESF30 시험체에서는 약 91% 증가하여 이 연구에서 고려된 배합 중 팽창재 치환에 따른 휨성능 개선이 가장 우수한 경향을 보였다.
- 5) 이상과 같이 상이한 W/B를 갖는 SHCC 배합에서 시멘트의 10%를 CSA계 팽창재로 대체함에 따라 상이한 역학적 특성을 보였다. W/B 30% 배합에서 팽창재 10%를 대체함에 따라 가장 효과적인 성능 개선을 보이는 것으로 사료된다. 추후 W/B 배합조건에 따른 팽창재 대체량에 따른 역학적 특성 평가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2011년 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신 인력양성 사업(2011-0429)의 일부이고 이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 BK21 사업의 지원비를 받았으며, 이에 감사드립니다.

1. Hsie, M., Tu, C., and Song, P. S., "Mechanical Properties of Polypropylene Hybrid Fiber-Reinforced Concrete," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 494, Issues 1~2, 2008, pp. 153~157.
2. 류승현, 김종필, 이영오, 윤현도, "CSA계 팽창재 종류 및 대체율에 따른 섬유보강 시멘트 복합체의 역학적 특성," 대한건축학회 논문집, 27권, 6호, 2011, pp. 39~48.
3. 윤현도, 양일승, 한병찬, 김선우, 전에스더, 최창식, "꼬인 5연선 강섬유를 사용한 고인성 시멘트 복합체의 특성," 대한건축학회 논문집, 21권, 9호, 2005, pp. 3~10.
4. 김윤일, 이양근, 김명성, "강섬유 혼입률이 강섬유보강 고강도 콘크리트의 작업성과 강도특성에 미치는 영향," 한국시공학회 논문집, 8권, 3호, 2008, pp. 75~83.
5. 양근혁, "강섬유와 PVA섬유로 하이브리드 보강된 콘크리트의 슬럼프 및 역학적 특성," 콘크리트학회 논문집, 22권, 5호, 2010, pp. 651~658.
6. 이영오, 윤현도, "팽창재 치환율에 따른 섬유보강 시멘트 복합체의 역학적 특성," 콘크리트학회 논문집, 22권, 5호, 2010, pp. 617~624.
7. 이현수, 한동엽, 한천구, 박문서, "팽창재 및 수축저감제가 강섬유보강 초고성능 시멘트 모르타르의 기초적 특성과 수축저감에 미치는 영향," 대한건축학회 논문집, 22권, 12호, 2006, pp. 97~104.
8. 윤현도, 김선우, 전에스더, "섬유 혼입조건에 따른 섬유보강 고인성 시멘트 복합체의 인장거동 특성," 대한건축학회 논문집, 22권, 12호, 2006, pp. 79~86.
9. 이선우, 김남호, "CSA 팽창재의 콘크리트에 사용," 콘크리트 학회지, 8권, 6호, 1996, pp. 59~66.
10. Toutanji, H. A., "Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Silica Fume Expansive-Cement Concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 13, Issue 4, 1999, pp. 171~177.
11. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준 해설, 기문당, 2007, 523 pp.
12. 박완신, 윤현도, 전에스더, 남상현, "섬유의 혼입이 변형경화형 시멘트 복합체에 미치는 영향," 대한건축학회 논문집, 25권, 11호, 2009, pp. 29~36.
13. 원종필, 박찬기, "하이브리드 섬유보강 콘크리트의 특성 및 적용," 콘크리트 학회지, 18권, 1호, 2006, pp. 22~27.
14. 김윤용, 김정수, 김희신, 하기주, 김진근, "마이크로역학에 의하여 설계된 ECC의 역학적 특성," 콘크리트 학회지, 17권, 5호, 2005, pp. 709~716.

요약 하이브리드 SHCC는 마이크로 섬유에 의한 마이크로 균열제어와 매크로 섬유에 의한 매크로 균열제어 성능이 뛰어나 다양한 분야에 적용가능성이 높은 재료로서 활발히 연구되고 있다. 그러나 SHCC는 부배합으로 자기수축에 의한 수축균열을 고려하여야 한다. 따라서 이 연구에서는 PE섬유와 강섬유가 함께 혼입된 팽창형 하이브리드 SHCC의 역학적 특성을 평가하고자 하였다. 하이브리드 SHCC의 역학적 특성을 평가하고자 W/B(45%, 30%, 20%)와 팽창재 대체율(0%, 10%)을 변수로하였다. 시험은 수축, 압축, 직접인장 및 휨 시험을 수행하였다. 각 실험들을 통한 성능평가 결과 10%의 팽창재를 대체한 W/B 30%의 하이브리드 SHCC에서 역학적 성능 개선이 가장 우수하였다.

핵심용어 : 팽창재, 섬유보강 시멘트 복합체(SHCC), 역학적 특성, 직접인장, 압축