



## 폴리에틸렌 단일섬유를 혼입한 SHCC로 휨 보강된 콘크리트 보의 균열손상 제어 및 휨 성능

김준수<sup>1)</sup> · 이영오<sup>1)</sup> · 심영용<sup>1)</sup> · 윤현도<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>충남대학교 건축공학과

### Flexural Performance and Crack Damage Mitigation of Plain Concrete Beams Layered with Reinforced SHCC Materials with Polyethylene Fibers

June-Su Kim,<sup>1)</sup> Young-Oh Lee,<sup>1)</sup> Young-Yong Shim,<sup>1)</sup> and Hyun-Do Yun<sup>1)\*</sup>

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

**ABSTRACT** Required performance for repair materials are strength, ductility, durability and bonding with the substrate concrete. Various kinds of fiber-reinforced cement composites (FRCCs) have been developed and used as repair materials. Strain-hardening cement based composites (SHCC) is one of the effective repair materials that can be used to improve crack-damage tolerance of reinforced concrete (RC) structures. SHCC is a superior FRCC that has multiple cracking characteristic and pseudo strain-hardening behavior. The expansive admixture, which can be used to reduce shrinkage in SHCC materials with less workability by controlling interfacial bonding performance between SHCC and substrate concrete. For the application of SHCC as a repair material to RC structures, this study investigates the flexural performance of expansive SHCC-layered concrete beam. Test variables include the replacement levels of expansive admixture (0 and 10%), repair thickness (30 and 40 mm), and compressive strength of SHCC (30, 70 and 100 MPa). Four point bending tests on concrete beams strengthened with SHCCs were carried out to evaluate the contribution of SHCC on the flexural capacity. The result suggested that expansive SHCC materials can be used for repairing and strengthening of concrete infrastructures.

**Keywords** : expansive admixture, strain-hardening cement-based composite, repair, strengthening, flexural strength

### 1. 서 론

최근 기존 건축물의 노후화 등으로 인한 보수 및 보강 재료 및 기술에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데, 주로 사용되는 보수 재료인 무수축 모르타르 계열의 경우 간편하게 시공이 가능한 반면 노후화된 구조물의 내구성과 강도 증진에 기여하지 못한다는 단점이 있다. 한편 변형경화형 시멘트 복합체(strain-hardening cement-based composite, SHCC)는 시멘트 복합체에 단일 섬유를 혼입하여 휨 또는 인장하중 하에서 초기 균열 발생 이후에도 강도의 저하 없이 변형률이 증가하는 변형 경화 특성을 가지는 신개념의 고성능 섬유보강 시멘트 복합체의 하나이다.<sup>1,2,14)</sup> 이러한 특성을 갖는 SHCC를 압축에 강하지만 인장에 취약한 콘크리트 구조물의 보수·보강 재료

로 사용하면 기존 보수재료인 무수축 모르타르보다 구조 및 내구적 관점에서 보수와 보강의 효과를 동시에 얻을 수 있을 것으로 예상된다.<sup>13)</sup>

김윤용,<sup>3)</sup> Kamada,<sup>4)</sup> Li<sup>5)</sup> 등의 콘크리트 구조물의 보수·보강을 위한 SHCC의 적용 연구에 대한 분석 결과 콘크리트 보와 같이 휨을 받는 구조부재의 하부를 SHCC와 같은 섬유 보강 시멘트복합체를 이용해 보수·보강할 경우 섬유에 의해 인장성능이 증가함에 따라 균열 제어 및 구조 성능 향상을 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 SHCC를 기존 구조물의 보수 및 보강에 적용하는 경우, 수축에 대한 고려가 추가적으로 필요하게 된다. SHCC는 섬유의 분산성 및 균질성 향상을 위해 굵은 골재를 사용하지 않고, 일반 콘크리트에 비해 다량의 결합재를 사용하기 때문에 과도한 수축으로 균열이 발생한다. 이러한 균열은 기존 콘크리트 부재와 보강된 SHCC의 경계면의 부착을 저해하는 원인<sup>6,15)</sup>이 되므로 보수 및 보강 시 외관 및 강도 발현 측면에서 초기 수축에 의한 균열을 저감시키는 것이 중요하다. 기존 연구에서 SHCC의 수축 문제

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

Received December 6, 2011, Revised March 6, 2012,

Accepted April 12, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

를 해결하기 위해 일정양의 시멘트를 팽창재로 대체하여 수축을 보상하는 방법이 제안되었으며 이 방법은 유효한 것으로 보고되었다.<sup>12)</sup> 이러한 SHCC의 수축에 대한 연구는 대부분 재료 특성에 대한 분석이 주를 이루고 있어 이를 실제 구조부재의 보수·보강에 활용할 경우의 성능에 대한 연구는 부족한 상황이다.

따라서 이 연구에서는 팽창형 SHCC로 휨 보강된 기존 철근콘크리트 구조물의 균열제어 성능 평가에 선행하여 인장축을 SHCC로 휨 보강한 무근 콘크리트 보의 휨 및 균열제어 성능을 평가하고자 한다. 이를 위하여 SHCC 배합에 있어서 팽창재 대체 유무(시멘트 중량의 0 및 10%), 휨 보강재인 SHCC 보강 두께(30, 40 mm) 및 압축강도(30, 70, 100 MPa)를 변수로 하여 무근 콘크리트 보의 휨 및 균열 특성을 평가하였다.

## 2. 실험

### 2.1 SHCC 배합 및 재료

SHCC를 제조하기 위하여 시멘트 복합체를 폴리에틸렌(polyethylene, PE) 섬유로 보강하였으며 혼입물은 시멘트 중량에 대하여 1.5%로 계획하였다. 팽창재 대체율은 기존 연구<sup>7)</sup>로부터 70 MPa급 SHCC에서 가장 높은 수축 보상 효과를 발휘하는 10%로 결정하였고 팽창재는 국내산 칼슘 설포 알루미늄(calcium sulfo aluminate, CSA)계 K형을 사용하였다. 또한 팽창재 사용에 따른 영향을 비교하기 위하여 팽창재를 대체하지 않은 동일한 조건의 보통 SHCC를 고려하였다. 잔골재는 접착재용 규사 7호(비중 2.61, 직경 105120 μm)를 사용하였으며 모

재 콘크리트는 설계압축강도 30 MPa로 계획하였다. 콘크리트 및 SHCC의 배합조건은 Table 1과 같다. 사용 재료인 섬유와 팽창재의 물리적 성질은 Tables 2 및 3에 각각 나타내었다. 압축강도, 팽창재 대체 유무에 따른 휨 보강용 SHCC의 역학적 특성을 평가하기 위하여 압축, 인장, 휨 및 수축 시험을 실시하였다. 시험은 선행 연구<sup>7)</sup>에서 적용한 방법에 따라 수행되었다.

### 2.2 보 실험체 제작 및 실험 방법

이 연구에서는 무근 콘크리트 보의 휨 인장축에 SHCC를 보강한 후 휨 및 균열제어 성능을 평가하기 위하여 100×100×400 (mm)의 휨 몰드에 1차적으로 보강 두께를 제외한 높이의 콘크리트를 타설하고 하루가 경과된 시점에서 2차로 휨 보강재료인 SHCC를 타설하는 방법으로 실험체를 제작하였다. 이 때 SHCC의 보강 두께는 각 타입별로 30 및 40 mm로 변화시켜 보강 두께에 따른 휨 및 균열제어 특성을 평가하고자 하였다. 보 실험체에서 단면 보수 및 보강되는 표면은 실제 구조물과 유사한 상태를 구현하기 위하여 거칠게 처리한 후 휨 보강재인 SHCC를 시공하였다. Table 4는 실험체 일람을 나타낸 것이다.

모든 실험체는 보강재인 SHCC의 타설 24시간 이후 탈형하여 기건 상태에서 28일 양생하였다. Fig. 1은 실험체의 설치 및 가력상황을 나타낸 것이다. 실험 방법은 콘크리트 휨 강도 시험방법인 KS F 2408<sup>8)</sup>에 준하여 3등분점 가력하였다. 또한 실험체 중앙부 양 측면에 변위계(strain displacement transducer, SDT)를 설치하여 중앙부의 처짐을 측정하였다. 모재 콘크리트와 SHCC 계면의 상대 미끄러짐 변위를 측정하기 위해 2방향 계이자를 설치하였다.

**Table 1** Mix proportions of cement-based materials

Mix type	W/B (%)	f <sub>ck</sub>	EXA replacement level (%)	Fiber volume fraction (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )										
					W	C	EXA	S	G	Si	PE	MC	SP	SF	AE
Con30	50	30	-	-	175	350	-	770	981		-	-	-	-	-
PE30-0	45	30	-	1.5	489	1,075	-	-	-	430	14.25	0.52	-	-	-
PE30-10			10			968	109								
PE70-0	30	70	-		384	1,281	-	-	-	512	14.25	0.52	16	-	-
PE70-10			10			1,149	128								
PE100-0	19	100	-		319	1,409	-	-	-	163	14.25	-	-	245	0.03
PE100-10			10			1,268	141								

Note) f<sub>ck</sub> : specific compressive strength, EXA: expansive admixture, Si: silica sand, MC: methyl cellulose  
SP: super plasticizer, SF: silica fume, AE: air entraining additive

**Table 2** Physical properties of fiber

Fiber	Specific gravity (kg/m <sup>3</sup> )	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

**Table 3** Physical properties of expansive admixture

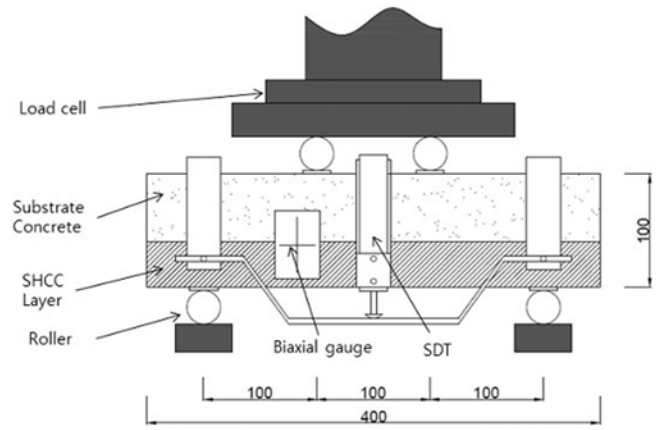
Type	Specific gravity (kg/m <sup>3</sup> )	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Setting time		Expansion ratio (%)	
			Initial (min)	Final (hour)	7(days)	28(days)
CSA	2.83.0	3,350	184	5.5	0.072	0.01

**Table 4** Summaries of beams layered with SHCC

Specimen	Compressive strength of SHCC (MPa)	EXA replacement ratio (%)	Layer thickness (mm)
PE30-0-30	30	0	30
PE30-0-40			40
PE30-10-30		10	30
PE30-10-40			40
PE70-0-30	70	0	30
PE70-0-40			40
PE70-10-30		10	30
PE70-10-40			40
PE100-0-30	100	0	30
PE100-0-40			40
PE100-10-30		10	30
PE100-10-40			40

**3. 재료 시험 결과**

Table 5는 콘크리트 및 SHCC의 재료 시험 결과를 나타낸 것이다. 압축시험 결과 PE30 시리즈에서는 팽창재를 대체한 PE30-10 배합의 압축강도가 대체하지 않은 PE30-0 배합의 압축강도보다 4.5% 낮게 나타났으나 PE70 및 PE100 배합에서는 팽창재를 대체한 경우 각각 11% 및 6%



**Fig. 1** Test setup of SHCC-layered beam (unit: mm)

의 압축강도가 증가되었다. PE30 시리즈의 SHCC 탄성계수는 동일한 설계기준강도를 갖는 콘크리트 탄성계수의 약 60%정도로 낮게 나타났다. 이 연구에서 제조된 압축강도 30 MPa에서 100 MPa 범위의 SHCC 탄성계수는 압축강도가 증가됨에 따라 증가되는 경향을 보였으나 동일한 압축강도에서 팽창재 대체에 따라 영향은 나타나지 않았다.

PE30, PE70 및 PE100 시리즈의 SHCC 배합에서 팽창재 대체에 따라 직접 인장강도는 각각 33%, 11% 및 4%증가하였다. 최대 인장 변형률은 PE30 시리즈에서 팽창재 대체에 따라 큰 차이를 보이지 않았으나 PE70 및 PE100 시

**Table 5** Mechanical properties of cement-based composites

Mix type	Compressive strength (MPa)		Elastic modulus (GPa)		Tensile strength (MPa)		Tensile strain at peak (%)		Flexural strength (MPa)		Deflection at peak (mm)	
Con30	32.8	32.8 <sup>(1)</sup>	26.3	22.6	-		-		3.9	3.7	-	
	33.3		18.7						3.4			
	32.4		22.8						-			
PE30-0	37.8	41.4	13.5	13.5	4.6	4.5	1.2	1.4	10.3	10.0	1.6	1.7
	45.4		13.6		3.9		1.7		9.4		1.8	
	40.9		13.4		5.1		1.8		10.1		1.7	
PE30-10	41.2	39.5	13.4	13.4	5.7	6.0	0.9	1.3	14.1	12.5	2.2	2.4
	39.7		13.2		6.2		1.4		9.1		2.4	
	37.6		13.6		6.2		1.5		14.1		2.5	
PE70-0	78.7	60.9	20.4	17.3	5.8	6.1	1.5	1.3	16.7	16.4	2.3	1.1
	52.5		16.4		6.7		0.7		18.1		0.7	
	51.5		15.1		5.9		1.8		14.3		0.4	
PE70-10	54.6	67.9	16.9	19.9	6.2	6.6	2.6	2.1	20.8	20.2	2.8	2.7
	75.9		23.6		6.7		2.1		21.2		3.5	
	73.2		19.2		6.8		1.7		18.7		1.8	
PE100-0	79.1	81.7	27.8	26.8	8.1	7.5	0.9	1.0	20.5	22.2	1.8	2.1
	75.0		26.2		6.5		1.0		23.7		2.3	
	91.0		26.5		8.1		1.0		22.3		2.1	
PE100-10	87.3	86.7	25.1	25.9	7.4	7.7	1.9	2.5	14.8	16.8	2.5	5.5
	79.2		26.5		7.6		2.7		18.3		6.6	
	93.5		26.0		8.2		2.9		17.4		7.4	

<sup>(1)</sup>An average of three specimen's test results

리에서는 팽창재 대체에 따라 증가하는 경향을 보였다.

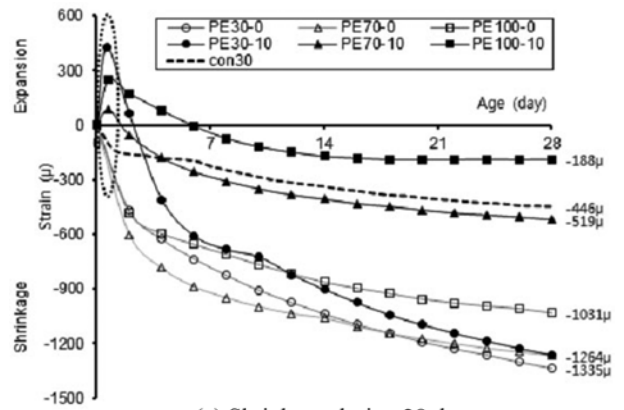
휨 시험의 결과, 팽창재를 대체한 경우 PE30 및 PE70 배합의 휨 강도가 각각 25% 및 23% 증가되었다. 그러나 PE100 시리즈에서는 팽창재를 대체한 PE100-10 배합의 휨 강도가 24% 저하되었다. 최대 강도 시 처짐은 PE 30 시리즈에서 팽창재를 대체한 배합이 대체하지 않은 배합보다 41% 처짐이 증가하였으며 PE70 및 PE100 시리즈는 팽창재를 대체한 배합의 처짐이 145% 및 161% 증가하는 경향이 나타났다.

각 배합 조건에 따른 SHCC의 재령 24시간 및 28일간의 수축 시험 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 수축량은 타설 직후부터 시험을 수행한 28일 간 온도  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ , 습도  $60 \pm 1\%$ 의 항온 항습실에서 측정하였다. 모재인 30 MPa 콘크리트의 경우 재령 28일경  $440 \mu$ 의 수축량이 발생하였다. SHCC의 경우, PE30-10 배합에서는 초기에  $500 \mu$ 의 팽창이 발생한 후  $1264 \mu$ 까지 수축이 발생하였으며 PE70-10 배합에서는 최대 팽창이  $235 \mu$  발생한 후  $519 \mu$ 의 수축이 발생되었다. PE100-0 배합은 낮은 물-결합재 (W/B) 비로 인하여 초기 수축으로  $200 \mu$ 까지 크게 발생되었지만, PE100-10 배합에서 이를 상쇄시키고 팽창량이 가장 크게 나타났다.

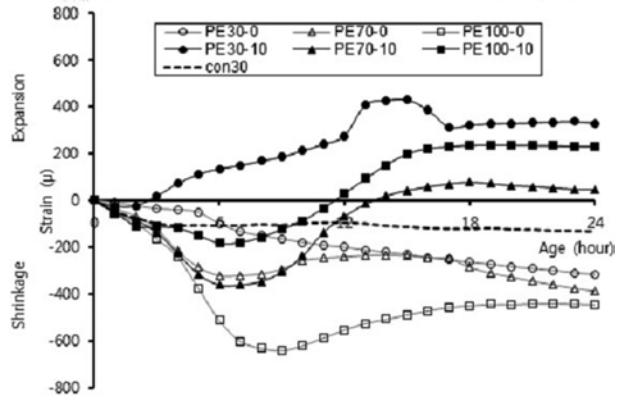
#### 4. SHCC로 휨 보강된 보의 실험 결과

##### 4.1 균열 진행 및 최종 파괴 양상

팽창재를 대체한 30 및 100 MPa급 SHCC로 휨 보강된



(a) Shrinkage during 28 days



(b) Shrinkage during 24 hours

Fig. 2 Results of shrinkage test

실험체의 중앙부 처짐에 따른 단계별 전형적인 균열 진행과 최종 파괴양상을 Fig. 3에 비교하여 나타내었다. 휨

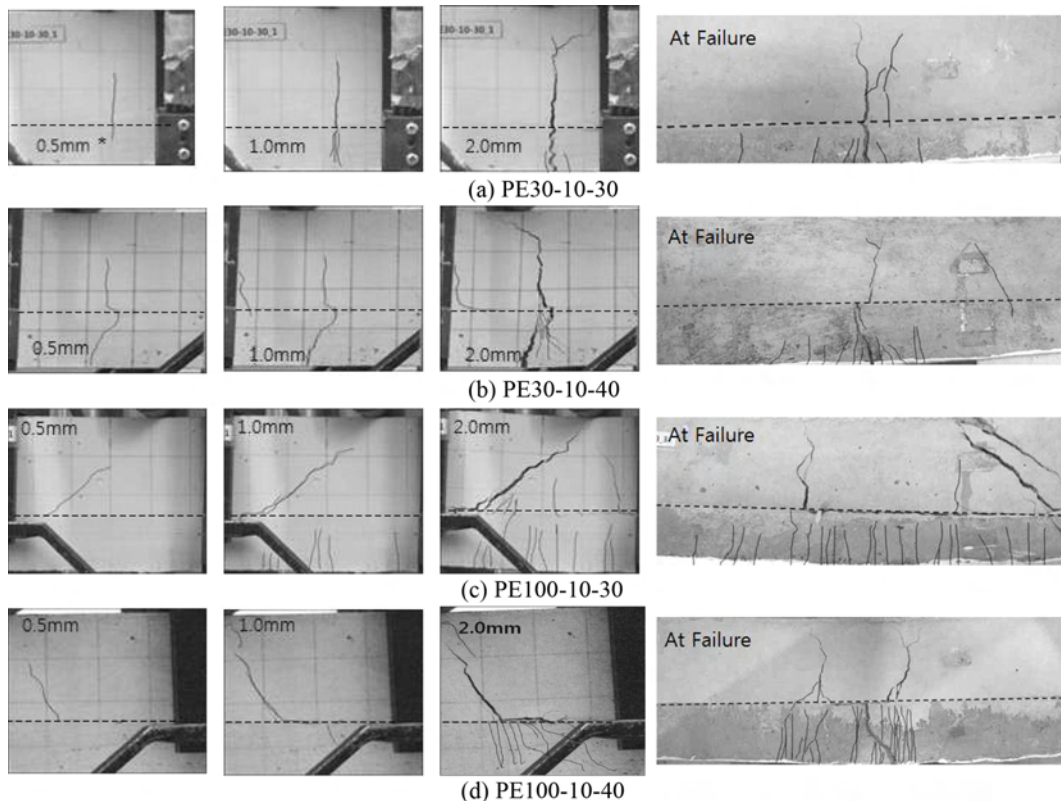


Fig. 3 Typical cracking procedure of SHCC-layered beams

보강재인 SHCC의 압축강도에 따른 균열 진전과정은 크게 두 가지 특성을 보였다. PE30-10으로 휨 보강된 보의 전형적인 균열진전 과정은 Fig. 3(a) 및 (b)에 나타난 바와 같으며 PE70-10과 유사한 균열 패턴이 나타났다. 모재 콘크리트와 보강재가 일체로 거동하며 초기 균열은 보 중앙부의 콘크리트 계면에서 발생하였다. 이러한 균열은 SHCC로 진전되며 다수의 미세균열로 분산되었다. SHCC 내 이러한 미세균열은 모재 콘크리트에서 발생된 균열과는 상이하게 균열이 구부러지는 특성(kink-crack)을 보였다. 이는 SHCC 내 보강섬유가 균열선단에서 균열면을 가로막아 균열이 앞으로 진전하는 것을 억제하기 때문으로 판단된다.

PE100-10로 휨 보강된 보에서는 Fig. 3(c) 및 (d)와 같이 상부 가력부와 하부 받침부 사이에 사인장 균열이 발생하였다. 그러나 이러한 사인장 균열은 모재와 SHCC 경계면에 이르러 계면을 따라 단부로 진전되었으며 SHCC와 모재가 최종파괴까지 일체로 거동하지 못하고 박리되어 파괴가 발생하는 양상을 보였다. 이 같은 파괴는 모재와 SHCC 계면의 미끄러짐 현상이 동반되며 발생하였다.

SHCC로 휨 보강된 콘크리트 보에서 모재와 보강재가 일체로 거동하여 Fig. 3(a) 및 (b)같은 파괴가 발생한다면 강도 측면에서 효과적이지만 미세 균열을 폭 넓게 분산시키는 연성 확보 측면에서는 Fig. 3(c) 및 (d)와 같은 계면 부착 파괴가 유리한 것으로 판단된다. 따라서 실제 보수·보강을 위해서는 두 가지 파괴형태를 적절하게 유도할 필요가 있으며 이를 위해서 보강재와 모재 콘크리트 상호간 계면상태 또는 부착력이 SHCC로 휨 보강된 보의 휨 거동 특성에 끼치는 영향에 대한 연구가 요구된다.

#### 4.2 계면 부착 특성

이 연구에서는 모재 콘크리트와 휨 보강재인 SHCC의 계면에 2방향 게이지를 부착하여 휨 재하단계별 계면의 미끄러짐 변위를 계측하였으며, 이를 Fig. 4에 각 실험체별로 비교하여 나타내었다. Fig. 4에서 미끄러짐 변위량은 총 3개 보 실험체의 최대 계면 미끄러짐 변위의 평균값이며 SHCC 두께 30 mm를 보강한 실험체보다 40 mm

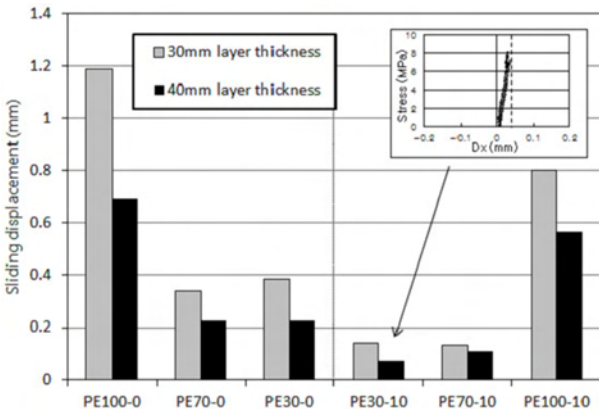


Fig. 4 Sliding between concrete and SHCC layer

보강한 실험체의 미끄러짐 변위가 전체적으로 작게 측정되었다. 이는 보강 두께가 커지면서 중립축과 계면 사이의 거리가 작아지고, 부착에 필요한 응력이 줄어들어 계면에 작용하는 미끄러짐이 줄어드는 효과를 보여주는 것으로 사료된다.

PE30 및 PE70, PE100 모든 시리즈의 보에서 팽창재를 대체한 실험체의 미끄러짐 변위가 최대 70% 감소하는 효과를 나타내었다. PE100-0 시리즈 실험체에서는 계면에서 평균 1.0 mm의 미끄러짐 변위가 생기며 콘크리트와 SHCC가 분리되는 거동을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 팽창재를 대체한 PE100-10 시리즈 실험체에서는 계면에서의 변위가 0.4 mm로 감소하였는데 이는 낮은 W/B를 갖는 PE100-0에서 초기에 상대적으로 큰 수축이 발생하여 계면에서의 변위가 크게 발생하였지만, 팽창재 대체로 수축에 대한 영향이 감소하여 모재와 SHCC 사이의 미끄러짐 변위가 감소한 것으로 판단된다.

계면의 미끄러짐 변위와 균열 발생의 상관관계를 살펴보면 모재와 SHCC 계면에서의 변위가 거의 없이(평균 0.1 mm) 파괴 시까지 일체로 거동한 PE30 시리즈보다 계면의 변위가 평균 0.8 mm 발생한 PE100 시리즈에서 미세 균열 분산 특성이 우수하게 나타났다. 이는 모재와 보수·보강재의 계면이 일체로 거동하는 거친 부착면을 갖는 실험체(rough surface)보다 계면에서의 변위가 어느 정도 발생하는 매끄러운 부착면을 갖는 실험체(smooth surface)가 미세 균열 분산 특성에서 유리한 것으로 사료되며, 계면 특성과 균열분산 특성을 평가한 Kamada의 연구 결과<sup>4)</sup>와도 일치한다.

#### 4.3 휨 거동 특성

Fig. 5는 휨 응력-처짐 관계 곡선이며 각 그래프는 3개 실험체에 대한 실험 결과의 평균을 나타낸 것이다. 실험체의 가력 하중과 휨 응력의 관계는 KS F 2408의 규준을 따라 다음과 같이 산정하였다.<sup>8)</sup>

$$f_b = \frac{Pl}{bh^2}$$

여기서,  $f_b$  : 휨강도(MPa) (= N/mm<sup>2</sup>)

$P$  : 시험기가 나타내는 최대 하중

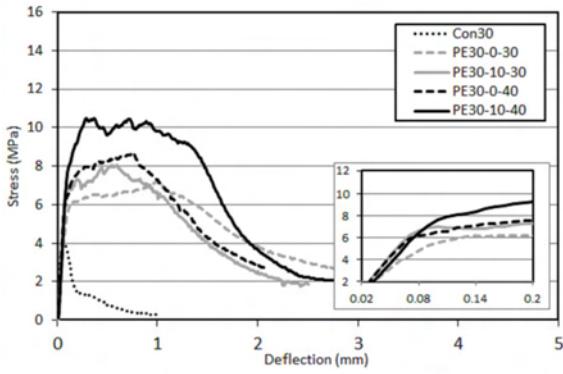
$l$  : 지간(mm)

$b$  : 파괴 단면의 너비(mm)

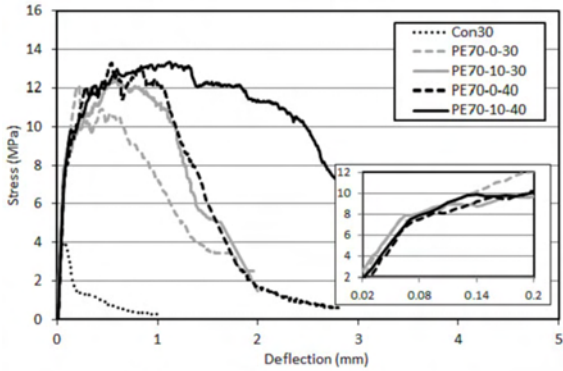
$h$  : 파괴 단면의 높이(mm)

SHCC의 휨 보강 두께에 따른 콘크리트 보의 휨강도 변화를 비교하여 보면 PE30, 70 및 100의 모든 시리즈에서 두께 30 mm보다 40 mm로 보강함에 따라 휨강도는 증가하는 경향을 보였다. 이는 하부의 SHCC 두께가 증가할수록 인장 보강량이 증대되어 휨 성능이 향상된 것으로 판단된다.

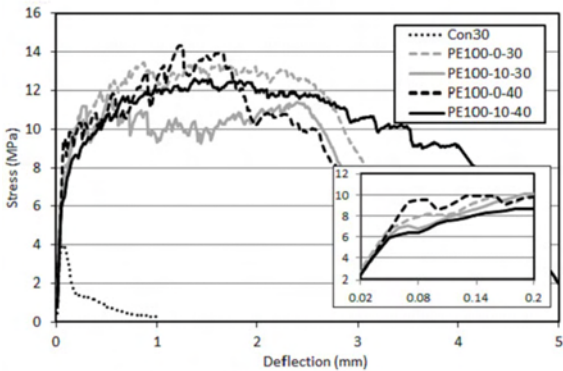
30 및 70 MPa급 SHCC로 보강한 실험체는 SHCC의 강도가 증가함에 따라 최대 휨 강도가 증진되었지만, 100



(a) Beam with 30 MPa SHCC layer



(b) Beam with 70 MPa SHCC layer



(c) Beam with 100 MPa SHCC layer

Fig. 5 Flexural behaviors of SHCC-layered concrete beams

MPa급 SHCC로 보강한 PE100 시리즈 실험체에서는 PE 70 시리즈와 큰 차이를 보이지 않았다. 100 MPa급 고강도 SHCC로 보강된 실험체의 휨 강도가 상대적으로 크지 않은 것은 SHCC와 모재 콘크리트의 계면특성에서 기술한 바와 같이, 낮은 W/B를 갖는 100 MPa급 SHCC 휨 보강재가 인장강도를 발휘하기 위하여 요구되는 계면 부착강도가 확보되지 않았기 때문인 것으로 사료된다.

팽창재를 혼입한 SHCC로 휨 보강된 실험체의 경우에도 SHCC의 압축강도가 증가됨에 따라 팽창재가 혼입되지 않은 SHCC로 휨 보강된 보 실험체와 유사한 경향을 보였으며, 또한 최대 휨내력시 처짐량도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 Table 5에 나타난 바와 같이 팽창재가 대체되지 않은 SHCC에 비하여 팽창재가 대체된 SHCC의 휨강도시 처짐량이 증가되는 결과와 연계성이 있는 것으로 판단된다.

이 연구에서는 SHCC에 의해 휨 보강된 콘크리트 보

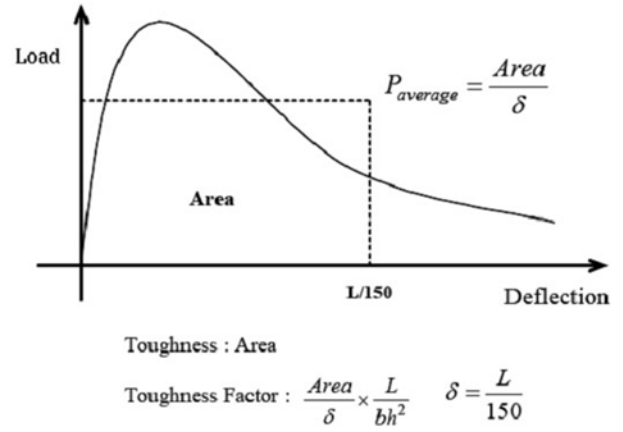


Fig. 6 Definition of toughness by JSCE-F-4<sup>8)</sup>

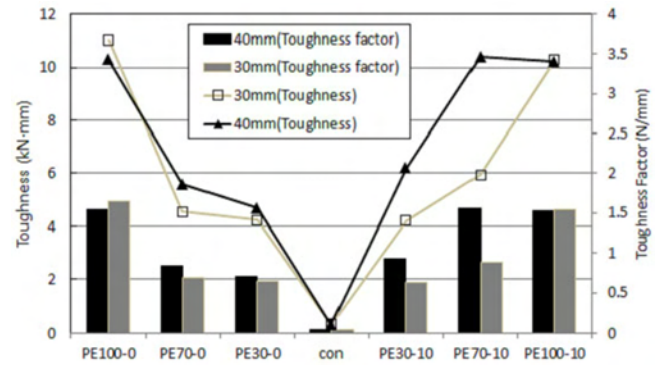


Fig. 7 Toughness of SHCC-layered beams

의 휨강도뿐만 아니라 에너지 흡수능력, 즉 인성(toughness)이 평가되었다. 인성은 하중-변위 관계 곡선에 의해 둘러싸인 면적으로 평가될 수 있으며, Fig. 6에 나타난 바와 같이 일본토목학회(Japan Society of Civil Engineering, JSCE)<sup>9)</sup>에서 제안하는 방법으로 인성을 평가하였다. JSCE에서는 인성을 중앙부 처짐이 경간의 1/150 (2.6 mm)에 이를 때까지의 하중-변위 관계 곡선으로 둘러싸인 면적으로 정의하며 인성지표는 해당 처짐에 이를 때까지 지지할 수 있는 평균 휨 응력이다. 각 실험체에 대하여 평가된 인성 및 인성지표는 Fig. 7과 같고 SHCC 보강재의 강도가 증가됨에 따라 인성이 향상되는 경향을 보였다. SHCC 강도에 따라 PE30-10-40 및 PE70-10-40 실험체에서 가장 높은 인성을 나타내었으며, PE100 시리즈에서는 팽창재를 대체하지 않은 PE100-0-40 실험체의 인성이 높게 나타났다. PE70-10-40 실험체의 경우 보강 두께가 30 mm에서 40 mm로 증가함에 따라 높은 인성의 증가를 보였다. 이는 보강 두께가 증가하면서 최대 휨 강도 및 연성이 증가하였으며, Fig. 4에 나타난 바와 같이 계면에서 미끄러짐도 크지 않아 안정적이 거동을 보였기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4.4 SHCC로 휨 보강된 보의 휨강도

이 절에서는 SHCC로 휨 보강된 콘크리트 보의 휨 강

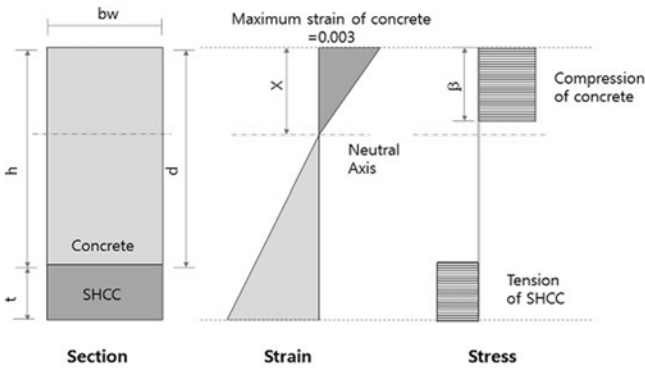


Fig. 8 Strain and stress distribution of SHCC-layered beam for calculating flexural strength

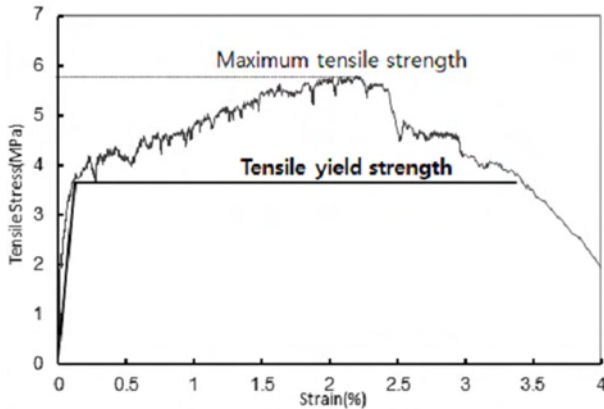


Fig. 9 Tensile strength of SHCC defined by JSCE<sup>11)</sup>

도를 평가하고자 한다. SHCC로 휨 보강된 콘크리트 보의 휨 강도를 산정하기 위하여 Fig. 8과 같이 단면 내 변형률 및 응력 분포를 가정하였다. 휨 압축 측 콘크리트의 응력분포는 Whitney<sup>10)</sup>의 등가응력분포로 가정하였으며, 인장측 응력은 JSCE<sup>11)</sup>에서 정의하고 있는 Fig. 9와 같은 섬유보강 시멘트복합체의 인장거동에 대한 이상화 모델을 적용하였다. SHCC의 이상화 모델은 SHCC에 대한 직접인장 실험 결과를 근거로 하였으며 휨 보강재인 SHCC와 모재는 완전 일체로 가정하였다. 이러한 가정과 단면 내 작용되는 휨 응력에 의한 힘의 평형조건을 적용하여 중립축과 공칭 휨 내력을 산정하였다.

Fig. 10은 이러한 과정을 통하여 계산된 SHCC로 휨 보강된 각 실험체의 휨강도에 대한 계산 결과와 실험 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 전반적으로 계산 결과는 실험 결과를 과소평가하는 경향을 보이고 있다. Table 5에 나타난 바와 같이 휨 보강재인 SHCC의 압축강도 및 팽창재 대체여부에 따라 휨강도는 직접인장강도의 2배에서 3배에 이르고 있다. 또한, 실제 콘크리트 보에서 휨 보강재인 SHCC에 작용되는 응력조건이 휨인장 하에 있으나 휨 내력 산정을 직접인장 결과를 근거로 하고 있다는 것이 계산 결과가 실험 결과를 과소평가하고 있는 주요한 이유 중의 하나로 판단된다. 따라서 이 연구에서 적용한 휨 내력 산정방법은 실험 결과를 다소 과소평가하는 경향을 보이고 있지만 안전율을 고려하면 휨 강도

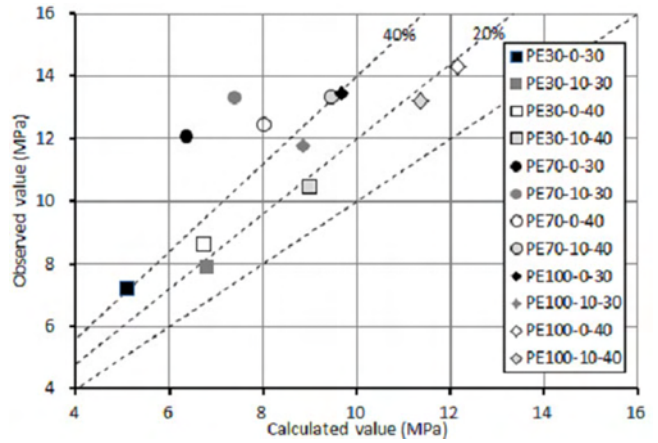


Fig. 10 Comparison of calculated and observed strengths

예측 시 적용가능성이 있는 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 변형경화형 시멘트 복합체로 휨 보강된 무근 콘크리트 보에 대하여 SHCC 설계압축강도, 보강 두께 및 팽창재 대체 여부에 따른 휨성능 및 균열거동을 평가하였다. 이러한 결과를 근거로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시멘트양의 10%를 CSA계 팽창재로 대체한 SHCC의 재료역학적 특성을 살펴보면 인장강도의 경우 팽창재를 대체한 배합이 대체하지 않은 배합보다 증가하였다. 따라서 SHCC의 인장 성능이 팽창재 사용에 따라 크게 개선되는 것으로 나타났다. 수축의 경우 PE30 시리즈 배합에서 가장 큰 수축이 발생한 반면 설계압축강도가 증가함에 따라 팽창재를 대체한 배합의 수축 감소율이 크게 나타났다.
- 2) SHCC 보강 실험체의 휨 실험 결과, 팽창재를 대체한 실험체 계면에서의 변위가 감소하는 효과가 나타났다. 따라서 팽창재를 사용한 SHCC로 보수·보강하는 경우 계면에서의 미끄러짐 변위의 감소 및 다수의 미세 균열 발생에 효과적이라고 판단된다.
- 3) 균열제어, 휨 응력-처짐 관계 곡선, 인성 등의 방법으로 SHCC 보강 실험체의 휨 성능을 평가한 결과, 팽창재를 대체한 실험체의 휨 성능이 전체적으로 향상되는 경향을 보였다. 또한 SHCC 보강 두께가 30 mm에서 40 mm로 증가함에 따라 실험체 모두 휨 강도 증진이 발생하였다. 이는 인장 측에 충분한 두께의 보수·보강이 휨 성능 증가에 영향을 미친 것으로 판단된다.
- 4) SHCC의 보수 보강에 따른 휨 강도를 예측하기 위하여 강도를 계산한 결과 계산값이 실험값을 다소 과소평가하고 있다는 것을 알 수 있었다. 이는 안전 측으로 고려해 볼 때 휨 강도 예측 시 큰 문제는 없을 것으로 판단되며, 실제 보의 단면 보강 적용을 위하여 실 규모의 철근콘크리트 보에 대한 연

구가 추가로 필요하다고 사료된다.

## 참고문헌

1. 윤현도, 김용철, 김선우, “보강섬유 종류에 따른 변형경화형 시멘트 복합체의 거동특성,” 대한건축학회논문집 구조계, 24권, 5호, 2008, pp. 141~148.
2. 박완신, 윤현도, 전에스더, “PET 합성섬유의 혼입조건에 따른 시멘트 복합체의 변형경화 특성,” 대한건축학회논문집 구조계, 24권, 10호, 2008, pp. 37~44.
3. 김운용, “습식스프레이공법으로 타설된 고인성 섬유보강 모르타르(ECC)의 역학적 특성과 보수 성능,” 콘크리트학회 논문집, 15권, 3호, 2003, pp. 462~469.
4. Kamada, T. and Li, V. C., “The Effects of Surface Preparation on the Fracture Behavior of ECC/Concrete Repair System,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, Issue 6, 2000, pp. 423~431.
5. Li, M. and Li, V. C., “Behavior of ECC/Concrete Layer Repair System under Drying Shrinkage Conditions,” *Proceedings of ConMat 05*, Vancouver, Canada, 2005, pp. 22~24.
6. Hassan, K. E., Brooks, J. J., and Al-Alawi, L., “Compatibility of Repair Mortars with Concrete in a Hot-Dry,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, Issue 1, 2001, pp. 93~101.
7. 이영오, 윤현도, “팽창재 대체율에 따른 섬유보강 시멘트 복합체의 역학적 특성,” 콘크리트학회 논문집, 22권, 5호, 2010, pp. 617~624.
8. 한국표준심의회, 콘크리트의 휨 강도 시험방법(KS F 2408), 한국표준협회, 2010.
9. JSCE Standard SF-4, Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete, 1984, pp. 58~66.
10. Whitney, C. S. and Cohen, E., “Guide for Ultimate Strength Design of Reinforced Concrete,” *ACI Journal Proceedings*, Vol. 53, Issue 11, 1956, pp. 455~490.
11. 土木學會 콘크리트委員會, “複數微細ひび割れ型 纖維補強モルタルの評価と利用,” 콘크리트技術シリーズ, No. 64, 82 pp.
12. Mohammed, Seddik meddah, Masahiro Suzuki, and Ryoichi Sato, “Influence of a Combination of Expansive and Shrinkage-Reducing Admixture on Autogenous Deformation and Self-Stress of Silica Fume High-Performance Concrete,” *Construction and Building Materials*, Vol. 25, Issue 1, 2011, pp. 239~250.
13. Minoru Kunieda and Keitetsu Rokugo, “Recent Progress on HPRFRCC in Japan - Required Performance and Applications,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4, No. 1, 2006, pp. 19~33.
14. 윤현도, 양일승, 한병찬, 김선우, 전에스더, 최창식, “꼬인 5연선 강섬유를 사용한 고인성 시멘트 복합체의 특성,” 대한건축학회 구조계, 21권, 9호, 2005, pp. 51~58.
15. Lim, Y. M., Wu, H. C., and Li, V. C., “Development of Flexural Composite Properties and Dry Shrinkage Behavior of High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites at Early Ages,” *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 1, 1999, pp. 20~26.

**요 약** 보수·보강재는 강도, 안정성, 내구성, 모재와의 부착력 등 많은 특성이 필요하며, 최근 변형경화형 시멘트 복합체(strain-hardening cement-based composite, SHCC)가 기존의 재료를 대체할 수 있는 성능으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 팽창형 SHCC는 팽창재를 이용하여 수축이 발생하는 SHCC의 단점을 보완하여 성능을 개선시킨 복합체로 이를 이용해 보강재의 성능을 만족시키면서 동시에 강도 증진 효과를 가져올 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 이 연구에서는 SHCC 보강재의 강도, 팽창재 대체 여부 및 보강 두께를 변수로 하여 휨 성능을 평가하였으며, 실제 보강에 적용 시 기초 자료로 활용하고자 한다.

**핵심용어** : 팽창재, 변형경화형 시멘트 복합체, 보수, 보강, 휨 강도