

# 수축저감제의 종류 및 혼입률에 따른 변형경화형 시멘트복합체의 역학적 특성

한승주<sup>1)</sup> · 장석준<sup>2)</sup> · 길배수<sup>3)</sup> · 최무진<sup>2)</sup> · 윤현도<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>한국수력원자력 중앙연구원 <sup>2)</sup>충남대학교 건축공학과 <sup>3)</sup>㈜트라이포드

## Effects of Shrinkage Reducing Agent (SRA) Type and Content on Mechanical Properties of Strain Hardening Cement Composite (SHCC)

Seung-Ju Han,<sup>1)</sup> Seok-Joon Jang,<sup>2)</sup> Bae-Su Khil,<sup>3)</sup> Mu-Jin Choi,<sup>2)</sup> and Hyun-Do Yun<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd Central Research Institut, Daejeon, 34101, Rep. of Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Rep. of Korea

<sup>3)</sup>Tripod Co., Inc, Daejeon, 34136, Rep. of Korea

**ABSTRACT** This research investigates the effects of shrinkage reducing agent (SRA) on the mechanical behavior of strain-hardening cement composite (SHCC). SHCC material with specified compressive strength of 50 MPa was mixed and tested in this study. All SHCC mixes reinforced with volume fraction of 2.2% polyvinyl alcohol (PVA) fiber and test variables are type and dosage of shrinkage reducing agents. The shrinkage reducing materials used in this study are phase change material as the thermal stress reducing materials that have the ability to absorb or release the heat. The effect of SRA was examined based on the change in length caused by shrinkage and hardened mechanical properties, specially compressive, tensile and flexural behaviors, of SHCC material. It was noted that SRA reduces change in length caused by shrinkage at early age. SRA can also improve the tensile and flexural strengths and toughness of SHCC material used in this study.

**Keywords** : shrinkage reducing agent, strain hardening cement composite, mechanical properties

### 1. 서 론

최근 국내 지진 위험에 대한 경각심이 높아짐에 따라 내진 설계의 필요성이 대두되고 있다. 하지만 국내 내진 설계규정에서 처음으로 지진하중 및 지진구역, 내진 설계 대상 등이 명시된 것은 1988년으로 그 이전의 건축물은 현재의 내진설계 기준이 적용되지 못한 상태이다. 따라서 1988년 이전 국내 구조물에 대한 내진성능 검토가 활발하게 이루어지고 있으며, 소요내진강도를 충족시키지 못하는 구조물의 안전성 확보를 위한 내진보강 사례가 증가하고 있다. 기존 철근콘크리트 구조물의 내진보강 공법으로는 비내진 골조에 가새, 철근콘크리트 끼움벽, 제진장치 등 내진보강 요소를 설치하여 강도 및 연성능력을 향상시키는 방법이 주로 사용되고 있다.

효율적인 보강을 위해서는 내진보강요소와 구조물의 일체성이 확보되어야 하며, 이를 위하여 Fig. 1과 같이 접

합부 시공 시 무수축 모르타르를 주입하여 시공하는 공법이 주로 사용되고 있다. 하지만 상기의 공법은 전체 거푸집에 의한 시각적 시공확인이 불가하며, 타설 과정 중 무수축 모르타르의 유실이 문제가 되고 있다. 또한 골조에 앵커볼트 및 타설을 위한 거푸집설치가 요구되어 공사비용 및 기간이 증가하는 단점이 있다.

김성호 등은<sup>1)</sup> 기존 골조와 내진보강요소 사이의 접합



Fig. 1 Seismic retrofit example of RC school building

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

Received May 29, 2015, Revised September 7, 2015,

Accepted September 14, 2015

©2016 by Korea Concrete Institute

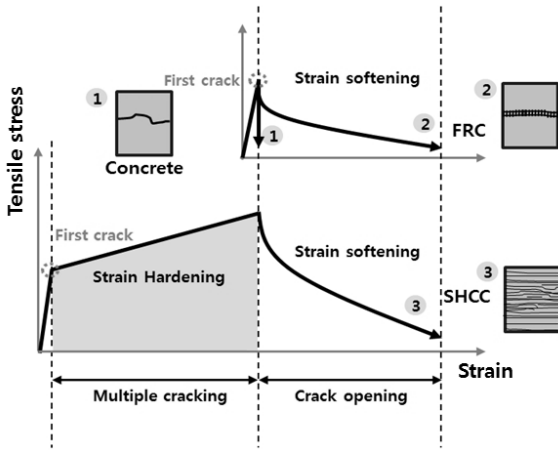


Fig. 2 Tensile properties of cement composites

부의 시공 방법으로 변형경화형 시멘트 복합체(strain-hardening cement composite, SHCC)의 뿔칠 공법에 관한 연구를 진행하였다. 연구결과 무수축 모르타르에 비하여 변형능력과 인성이 우수한 SHCC를 사용하고, 뿔칠시공 방법으로 접합부를 시공하여 기존공법에 비하여 구조적 안정성 및 시공성을 향상시키는 것으로 보고되었다.

SHCC는 굵은골재를 사용하지 않은 시멘트 복합체에 구조용 합성섬유를 혼입한 재료로 Fig. 2에 나타난 바와 같이 인장력을 받는 상태에서, 초기균열 이후 섬유가 교차작용에 기인한 미세균열분산 및 유사변형경화 특성을 나타낸다.<sup>2,3)</sup> 하지만 SHCC는 콘크리트에 비해 많은 양의 시멘트가 사용되고 잔골재 대신 분말도가 높은 규사를 사용하여, 부배합으로 인한 과도한 수축이 발생할 수 있다.<sup>4)</sup> 과도한 수축은 뿔칠형 SHCC 적용한 접합부에서 수밀성 및 내구성 문제를 야기할 수 있다.

수축저감제는 시멘트복합체에서 수화반응에 의해 발생하는 수축속도 및 최종적인 수축량을 감소시키는 혼화제이다. 일반적으로 사용되는 수축저감제는 물의 표면장력을 감소시켜 이완시키는 원리이나 본 연구에서는 수화열을 저감시켜 그로 인해 수축을 감소시키는 원리의 수축저감제를 사용하였다. 분말형 및 액상형 수축저감제를 사용하였으며, 수축저감제의 혼입 및 혼입량이 SHCC의 역학적 특성에 미치는 영향을 알아보하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 사용 재료

#### 2.1.1 분말형 수축저감제

본 연구에 사용된 분말형 수축저감제는 열흡수 및 열방출 특성이 우수한 스트론튬계 잠열재를 주성분으로 하는 수축저감제이다. 수화반응과정에서 수화열이 발생하여 상변이 온도인 88°C 이상의 온도에 도달하면 고체상 상태에서 액체상태로 전이되면서 열을 흡수한다. 상전이 온도 이하에서는 내부의 축적된 열량을 외부로 발생시키기

Table 1 Properties of powder type SRA

Latent heat (°C)	Latent heat capacity (cal/g)	Specific gravity	Refractive index (γD)	Solubility (g/100g)
88	82.0	1.9	1.449	1.74

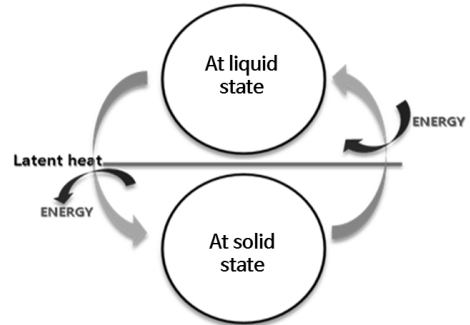


Fig. 3 Shrinkage reducing mechanism of powder type SRA

Table 2 Properties of liquid type SRA

Chemical composition of Fluosilicate Salt Based SRA				pH	S.G	Appearance
Fluosilicate salt	Soluble SiO <sub>2</sub>	Polymer	Nitrate comp.			
≤65%	≤15%	≤15%	≤3%	2.0-3.0	1.1-1.2	Light brown

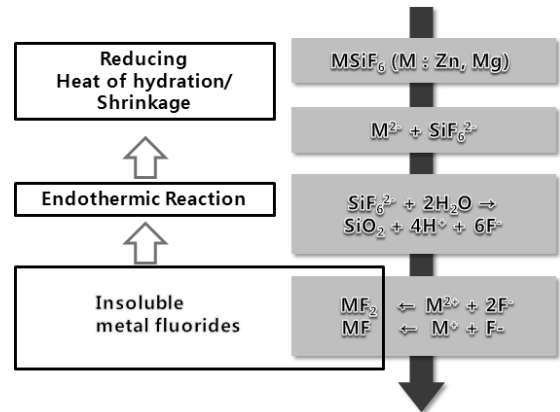


Fig. 4 Shrinkage reducing mechanism of liquid type SRA

며,<sup>5)</sup> 시멘트복합체 수화온도의 급격한 상승 및 하강을 제어한다. 이러한 특성을 통해 자기수축 저감과 관련이 깊은 것으로 보고되고 있으며,<sup>6)</sup> Table 1 및 Fig. 3은 각각 분말형 수축저감제의 제원 및 수축저감 메커니즘을 나타낸다.

#### 2.1.2 액상형 수축저감제

본 연구에서 사용된 액상형 수축저감제는 갈색의 액상형태로 상안정성 및 용해도가 높은 규불화염계 수축저감제이다. 규불화염 중 규불화이온(SiF<sub>6</sub><sup>2-</sup>)이 가수분해에 의

해 가용성 실리카와 자유불소이온( $F^-$ )으로 전이되며 자유불소이온은 알칼리 금속이온과 반응하여  $CaF_2$ ,  $MgF_2$ ,  $NaF$ ,  $KF$  등의 난용성 금속불화물을 생성한다. 생성과정에서 시멘트의 수화열을 상쇄시키는 흡열과정이 진행되어 시멘트복합체의 과도한 수화열을 완화시키고 미세한 미립상으로 콘크리트의 결합부분을 충전하여 수밀성을 증진시키는 작용 및 수축에 대한 저항성을 부여하는 수축저감제이다.<sup>7)</sup> 액상형 수축저감제의 특성과 메카니즘은 Table 2 및 Fig. 4에 각각 나타내었다.

## 2.2 실험 계획

본 연구는 내진보강요소와 기존골조 접합부 시공을 위한 뿔칠형 SHCC 개발의 한 부분으로 계획되었으며, 수축저감제 혼입에 따른 역학적 특성을 평가하기 위하여 김성호 등의<sup>1)</sup> 연구를 통해 도출된 뿔칠형 SHCC 배합을 기본 배합으로 설정하였다. SHCC의 설계기준압축강도는 50 MPa이며, PVA (polyvinyl alcohol) 섬유가 2.2% 혼입되었다. 본 연구에 사용된 배합을 Table 3에 나타내었다. PVA 섬유는 Table 4에 나타낸 바와 같이 인장강도 1,600 MPa, 형상비 307의 섬유를 사용하였다.

SHCC의 수축저감을 위해 사용된 2종의 수축저감제는 분말형 및 액상형이며, 서로 다른 수축저감 메카니즘을 갖는다. 길배수 등의<sup>8)</sup> 선행연구에 따르면 분말형 및 액상형 수축저감제는 각각 혼입률 3.4 및 5.0%에서 수축저감 성능이 가장 효율적인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 수축저감제의 혼입에 따른 SHCC의 선변형 길이변화를 평가하고, 상기의 연구결과에 근거하여 분말형 수축저감제 혼입률 1.7 및 3.4%, 액상형 수축저감제 혼입률 2.5 및 5.0%를 각각 혼입한 SHCC 배합에 대한 역학적특성 평가 실험을 계획 하였다.

## 2.3 실험 방법

### 2.3.1 선변형 길이변화 평가방법

수축저감제의 혼입에 따른 시멘트복합체의 수축저감 성능을 평가하기 위하여 선변형 길이변화를 측정하였다. 이를 위하여 Fig. 5(a)와 같이 외경 110×1,060×30 mm 내경 50×1,000×20 mm의 실리콘 몰드를 제작하였으며, 몰드의 바닥면엔 Fig. 5(b)에 나타난 강철 타공판을 덧대어 시험체가 수축할수록 굽어지는 정도를 측정하였다. 측정된 값은 식 (1)에 의해 수축에 따른 길이변화율을 산정하였으며  $t$ 는 시험편의 두께로 20 mm로 산정하였다. 강철타공판의 타공 반지름은 5 mm이며, 타공 간격은 5 mm로 설정하였다. 선변형 길이변화 측정용 몰드, 강철 타공판의 형상 및 길이변화 측정 방식은 Fig. 5(c)에 나타낸 바와 같다.

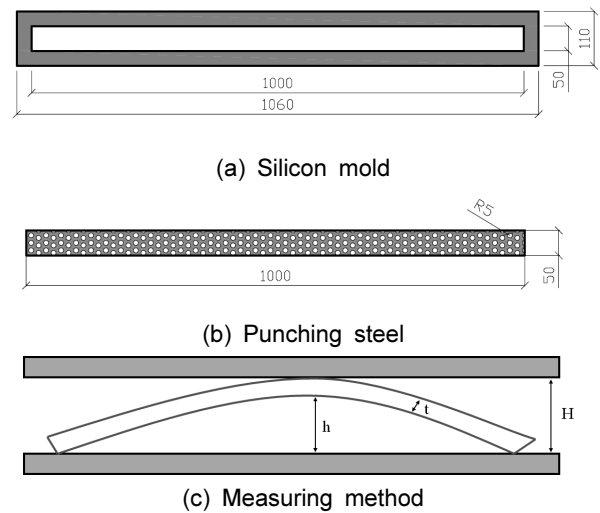


Fig. 5 Test method on length change of SHCC materials

Table 3 Mix proportion of SHCC materials

Mixture	W/B (%)	$V_f$ (%)	Unit weight ( $kg/m^3$ )							Powder type SRA (g)	Liquid type SRA (g)
			Water	Cement	Fly Ash	Calcium carbonate	Filler	Powder admixture	PVA fiber		
SHCC-N	39.2	2.2	347	498	387	603	15.1	4.98	29	-	-
SHCC-HR-17	39.2	2.2	347	498	387	603	15.1	4.98	29	3.77	-
SHCC-HR-34	39.2	2.2	347	498	387	603	15.1	4.98	29	7.54	-
SHCC-SWP-25	39.2	2.2	347	498	387	603	15.1	4.98	29	-	5.9
SHCC-SWP-50	39.2	2.2	347	498	387	603	15.1	4.98	29	-	11.8

Table 4 Mechanical properties of PVA fiber

Fiber	Unit weight ( $kg/m^3$ )	Length (mm)	Diameter ( $\mu m$ )	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
PVA	1,300	12	39	307	1,600	40

$$\Delta L(\text{mm}/m) = t \times h / 125, \quad h : H - t \quad (1)$$

### 2.3.2 역학적특성 평가방법

수축저감제가 혼입된 뿔칠형 SHCC의 압축성능을 평가하기 위하여 KS F 2043에<sup>9)</sup> 준하여  $\phi 100 \times 200$  mm 원주형 압축공시체를 제작하였으며, KS F 2045에<sup>10)</sup> 준하여 2,000 kN 용량의 만능재료시험기를 사용하여 하중제어 방식으로 가력을 실시하였다. 휨 시험을 위하여  $100 \times 100 \times 400$  mm의 각주형 공시체를 제작하였으며, KS F 2048에<sup>11)</sup> 준하여 200 kN 용량의 만능재료시험기를 사용하여 시험을 실시하였다. 수직처짐을 측정하기 위하여 중앙부에 요크(yoke)형태에 철물에 고정된 선형변위계를 설치하였다. SHCC의 직접인장성능 평가를 위하여 JSCE-E-531에<sup>12)</sup> 따라 덤벨형(dumbbell shape) 인장 시험편은 단면  $30 \times 30$  mm, 중앙부 변형구간 100 mm로 제작하였으며, 변위제어방식으로 직접인장시험을 실시하였다. 인장변형은 중앙부 변형구간에 설치된 선형변위계를 이용하여 평가하였다.

### 2.4 휨 인성 평가 방법

본 연구에서 평가하고자 하는 SHCC는 합성섬유를 보강한 시멘트 복합체로 이에 대한 휨 인성 평가 기준은 명확하게 정립되지 못한 상태이다. 따라서 SHCC의 휨 인성을 평가하기 위하여 강섬유보강 콘크리트의 휨 인성 평가에 대한 기준인 ASTM C 1018의<sup>13)</sup>에 따라 휨 인성 지수를 산정하였다. Fig. 6은 ASTM C 1018의 인성지수 산정에 대한 모식도이며, 휨 인성 지수는 식 (2)에 따라 산정된다. 휨 인성 지수의 첨자는 재료가 완전탄소성 거동을 나타낼 경우를 기준한 값으로, 인성지수가 첨자보다 높게 평가될 경우 재료가 유사 처짐경화 특성을 나타내는 것으로 판단할 수 있다.

$$\begin{cases} I_5 = \text{AreaOACD} / \text{AreaOAB} \\ I_{10} = \text{AreaOAEF} / \text{AreaOAB} \\ I_{20} = \text{AreaOAGH} / \text{AreaOAB} \end{cases} \quad (2)$$

시험결과 SHCC는 높은 연성과 변형능력을 발휘하는 재료로  $I_{20}$ 의 인성지수에 해당하는 처짐  $10.5\delta$ 는 SHCC의 우수한 인성을 평가하기 부족한 것으로 나타났다. 일반적으로 휨 인성 산정 시 고려하는 처짐 제한은 보와 같은

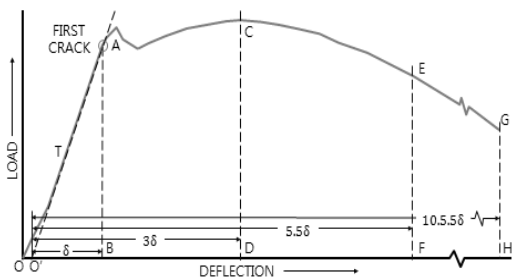


Fig. 6 Toughness indexes according to ASTM C 1018

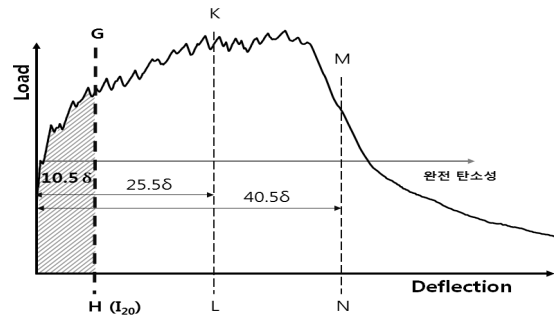


Fig. 7 Additional toughness indexes

Table 5 Test result of change in length caused by shrinkage

Curing day	Percent of change in length (mm/%)		
	4day	7day	14day
SHCC-C	7.46/1.19	13.35/2.14	15.23/2.44
SHCC-SWP-50	4.17/0.67	11.49/1.84	13.45/2.15
SHCC-HR-34	3.70/0.59	12.57/2.01	14.28/2.28

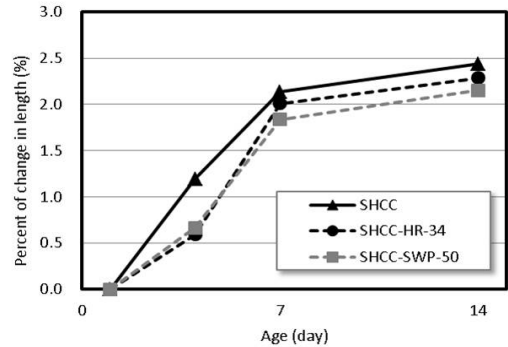


Fig. 8 Test result of length change specimens

휨 부재의 사용성 및 내구성의 한계를 반영하는 값으로, 본 연구에서 개발하는 뿔칠형 SHCC의 경우 구조재가 아닌 내진보강재의 접합부의 충전을 용도로 하므로 별도의 처짐 제한의 적용이 불필요할 것으로 판단되어 이를 반영하기 위하여 Fig. 7에 나타난 바와 같이  $I_{50}(25.5\delta)$ ,  $I_{80}(40.5\delta)$ 를 추가 산정하여 식 (3)에 나타내었다.

$$\begin{cases} I_{50} = \text{AreaOALJ} / \text{AreaOAB} \\ I_{80} = \text{AreaOAKL} / \text{AreaOAB} \end{cases} \quad (3)$$

## 3. 실험 결과

### 3.1 길이 변화 특성

본 연구에서는 분말형 및 액상형 수축저감제 혼입에 따른 길이변화 시험을 진행하였으며, 재령 4일, 7일, 14일에서 길이변화량을 측정하였다. 수축저감제의 혼입률은 분말형의 경우 3.4%, 액상형의 경우 5.0% 혼입하였다. 측정결과는 Table 5와 Fig. 8에 나타났다. 수축저감제의 혼

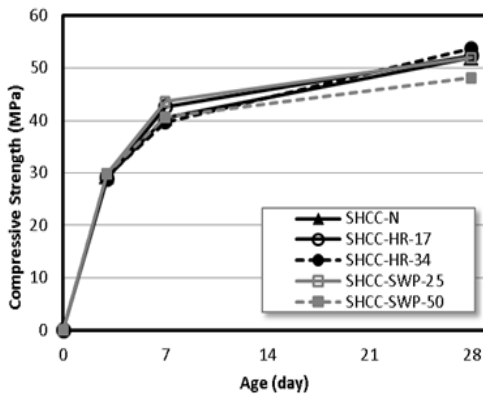
**Table 6** The results of compressive tests

Mixture	Flow (mm)	Air content (%)	Compressive strength (MPa)			Strain at the peak load ( $\mu$ )]	Elastic modulus (kPa)	Poisson's ratio
			3	7	28			
SHCC-N	220	7.5	29.2	40.5	52.0	2688	23.16	0.26
SHCC-HR-17	170	7.5	28.9	42.6	52.4	3041	22.00	0.24
SHCC-HR-34	179	7.9	29.4	39.7	53.7	3231	21.11	0.23
SHCC-SWP-25	170	7.5	29.9	43.6	52.0	3035	20.94	0.24
SHCC-SWP-50	180	8	29.9	40.6	49.9	3110	21.78	0.25

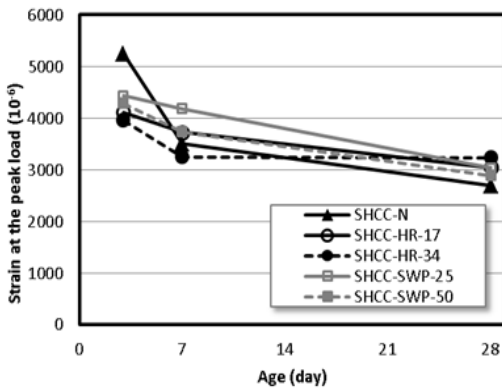
입에 따라 모든 재령에서 길이변화량이 감소하는 경향을 나타내었으며, 액상형 수축저감제를 혼입한 시험체가 분말형 수축저감제를 혼입한 시험체에 비하여 높은 수축저감 성능을 나타내었다. 특히 재령 4일에서 분말형 및 액상형 수축저감제 혼입 시 측정 길이는 각각 3.70 및 4.17 mm로 측정 길이 7.46 mm인 SHCC-N에 비해 수축량이 각각 49 및 44% 저감되었다. 수축저감제 혼입 시 초기재령에서 가장 많은 수축을 저감하는 것으로 판단되며, 장기적으로도 수축이 감소되는 것으로 나타났다.

### 3.2 압축강도 특성

공기량 측정값과 압축 시험 결과는 Table 6에 나타난 바와 같으며, Figs. 9 및 10은 재령에 따른 압축강도 및



**Fig. 9** Effects of curing age on compressive strength



**Fig. 10** Effects of curing age on stain at peak strength

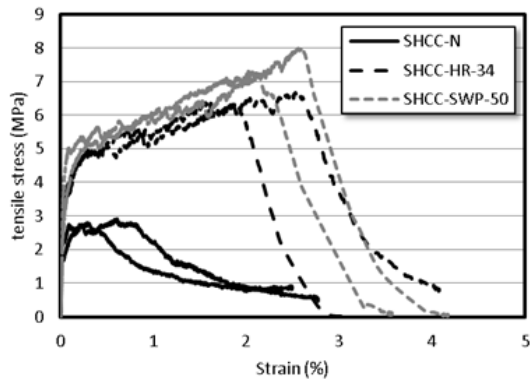
최대 압축강도 시 변형률의 변화를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 재령 28일에서 모든 시험체의 압축강도가 설계기준압축강도인 50 MPa에 근사한 값을 보였으며, 수축저감제의 종류 및 혼입률이 압축강도 변화에 미치는 영향은 미소한 것으로 나타났다. 이는 Choi et al.<sup>14)</sup> 연구에서 나타난 바와 같이 3%이내의 혼입률에서는 수축저감제가 압축강도에 큰 영향을 주지 않기 때문으로 판단된다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 재령에 따른 최대압축강도 시 변형률은 재령 28일에서 수축저감제를 혼입함에 따라 변형률이 다소 증가하는 경향을 보였다.

### 3.3 인장 특성

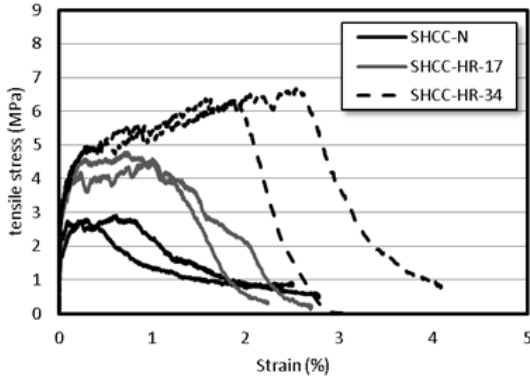
본 연구에서는 직접인장성능 평가를 위하여 각각 3개의 덤벨형 직접 인장 시험편을 제작하였으며, Fig. 11은 수축저감제의 종류 및 혼입률을 변수로 각 배합의 28일 재령에서 인장응력과 인장변형률의 관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 수축저감제의 혼입여부와 관계없이 모든 배합에서 유사변형경화 특성을 나타내었으며, SHCC-HR-34 및 SHCC-SWP-50 인장시험편의 인장강도 및 변형능력이 수축저감제가 혼입되지 않은 SHCC-N 시험편에 비하여 현저하게 높게 나타났다.

Fig. 12는 재령에 따른 인장강도를 나타낸 것으로 수축저감제가 혼입함에 따라 인장강도가 증가하는 것으로 나타났다. 특히 재령 28일에서는 분말형 수축저감제 3.4% 및 액상형 수축저감제 5%를 혼입함에 따라 인장강도가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 Table 5 및 Fig. 7에 나타난 바와 같이 수축저감제 혼입 시 인장강도가 낮은 초기재령에서 수축량이 감소됨으로써 시멘트 매트릭스의 손상이 완화되기 때문으로 판단된다. 또한 Li의<sup>15)</sup> 연구에서 보고된 바와 같이 매트릭스내의 공기량 증진으로 섬유 분산 및 섬유와 매트릭스 계면특성이 개선되었기 때문으로 판단된다.

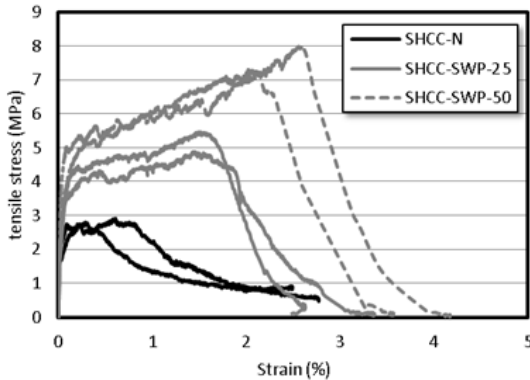
액상형 수축저감제가 혼입된 경우 분말형 수축저감제를 혼입한 경우에 비해 높은 인장강도를 나타내었으며, 이는 생성된  $CaF_2$ ,  $MgF_2$ ,  $NaF$ ,  $KF$  등의 미세한 미립상의 난용성 금속불화물이 콘크리트의 결합부분을 충전하여 섬유와 매트릭스간의 부착이 증진되었기 때문으로 판



(a) Effects of admixture type



(b) SHCC with powder type SRA



(c) SHCC with liquid type SRA

Fig. 11 Tensile responses of SHCC

단된다. Fig. 13은 재령 28일에서 인장강도와 인장강도 시 변형의 관계를 나타낸 것으로 분말형 수축저감제가 액상형 수축저감제보다 다소 높은 변형능력을 나타내었다.

Fig. 14는 각 시험편의 인장파괴 양상을 비교하 나타낸 것이다. 모든 배합에서 파괴 시까지 다수의 미세균열이 발생했으며, 분말형 및 액상형 수축저감제의 혼입률이 증가할수록 다수의 미세균열특성 또한 향상되는 것으로 나타났다. SHCC-SWP, SHCC-HR 인장시험편은 안정적으로 시험편 전 영역에 걸쳐 폭넓게 미세 균열이 분포되고 있는 반면, SHCC-N 배합은 비교적 국부적인 미세균열이 발생하였다.

Fig. 15은 대표적인 인장시험편의 균열수와 인장변형률 관계를 나타낸 것이다. 모든 시험체는 초기균열이후

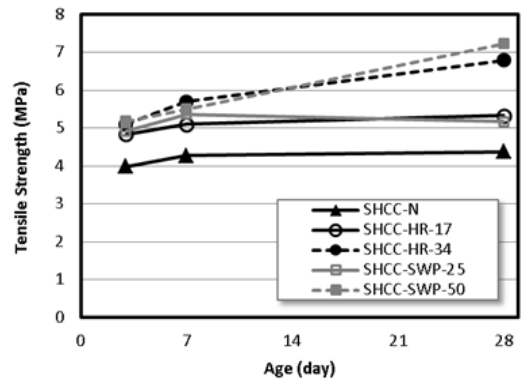


Fig. 12 Effects of curing age on tensile strength

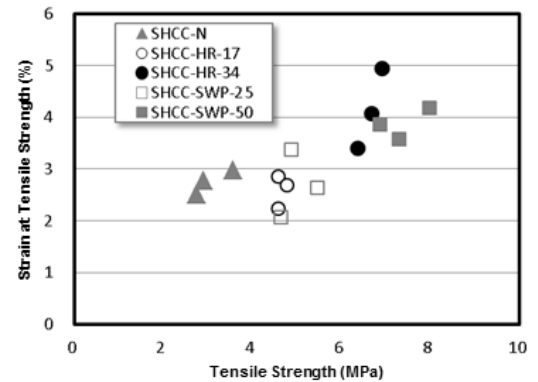


Fig. 13 Tensile strength-displacement relationship of SHCC

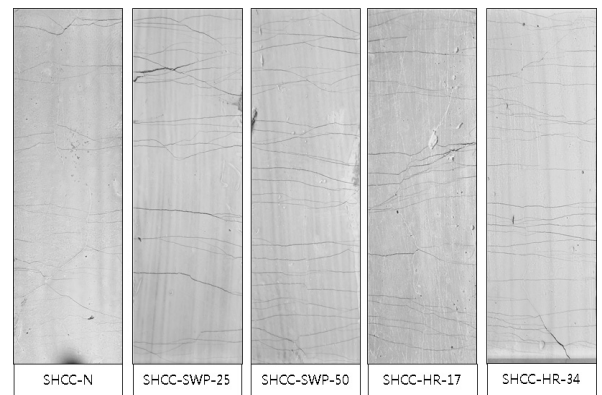


Fig. 14 Typical crack patterns of dumbbell-shaped specimens

최종파괴에 이를 때까지 지속적으로 미세균열을 분산하는 균열거동 특성을 보였다. 각 배합의 인장시험편에 발생된 평균 균열 수는 인장변형률 1.75%에 이를 때까지 큰 차이를 나타내지 않았으나, 이후 균열 수의 진전 없이 국부균열의 손상집중으로 파괴에 이른 SHCC-N 시험체와 달리 SHCC-HR-34 및 SWP-50은 꾸준히 균열 개수가 증가하며 높은 균열 분산 성능을 나타내었다. 인장변형률 2% 이상에서는 액상형 수축저감제를 혼입한 경우 분말형 수축저감제를 혼입한 경우보다 균열의 개수가 증가하는 특성을 나타내었으며, 이로 인해 높은 변형능력을 나타내었다.

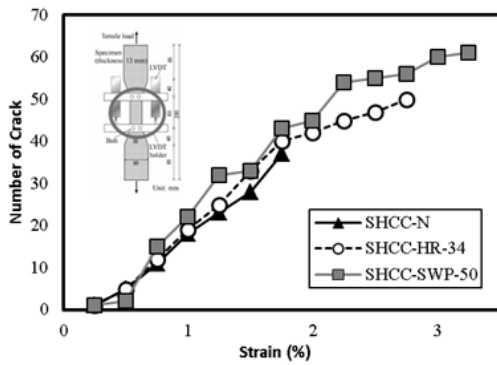


Fig. 15 Crack number-strain relationship of dumbbell-shaped specimens

### 3.4 휨 특성

각 배합에 대하여 3개의 휨 시험체를 제작하였으며, 재령 28일에서 3등분점 재하 시험을 진행하였다. Fig. 16은 수축저감제의 종류에 따른 휨응력-치짐 관계를 나타낸 것이다. 시험결과 모든 시험체에서 초기강성은 유사하게 나타났으나, 수축저감제를 혼입하지 않은 SHCC-N 시험체의 휨 강도 및 휨 강도시 치짐량이 가장 작게 나타났다. SHCC-HR-34 및 SHCC-SWP-50의 휨강도는 11.3 MPa 및 12.8 MPa로 SHCC-N 평균 휨강도와 비교하여 각각 15 및 30% 향상되는 것으로 나타났다. 이와 같은 휨 내력 증가는 3.3절에 기술한 바와 같이 매트릭스내의 공기량의 증진으로 섬유 분산 및 섬유와 매트릭스 계면특성이 개선되어 인장성능이 향상되었기 때문으로 판단된다.

SHCC 시험체의 휨 인성을 비교하기 위하여 ASTM C1018의 강섬유보강 콘크리트의 휨 인성 산정 방법을 적용하여 휨 인성을 산정하였으며, 평가결과를 Fig. 17에 나타내었다. 하중-치짐 관계를 바탕으로 산정된 휨 인성 지수의 값은 SHCC의 변형경화 특성과 높은 연성으로 인해 모든 배합에서 완전 탄소성 거동을 가정한 경우의 휨 인성 지수를 상회하는 값을 보이며 우수한 휨 성능을 나타냈다.

ASTM C1018에 의하여 휨 인성 지수  $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{20}$ 을 산정한 결과 수축저감제 혼입 시 ASTM의 휨 인성 지수가 증가하는 경향을 보였다. 하지만 시험체 간의 휨 인성 지수의 차이가 미미하여 시험체 간의 차이를 확인하기 어렵고  $I_{20}$ 의 인성지수에 해당하는 치짐은 SHCC의 우수한 변형 능력을 반영하지 못하여 추가적으로  $I_{50}(22.5\delta)$ 과  $I_{80}(40.5\delta)$ 을 산정하여 Fig. 17에 나타내었다.  $I_{50}$ 과  $I_{80}$  인성지수를 추가로 산정하여 비교한 결과 수축저감제 혼입에 의한 휨 인성의 현저한 증가를 확인할 수 있었으며 분말형 및 액상형 수축저감제를 혼입한 시험체의 휨인성지수는 수축저감제를 혼입하지 않은 시험체보다 최대 강도 이후 더 연성적인 거동을 보였다. 수축저감제 종류에 따른 휨 인성지수의 변화는 미소하였으나, 최대강도 이후 액상형 수축저감제를 혼입한 시험체가 분말형 수축저감제 혼입 시험체에 비해 높은 인성지수를 나타내었다.

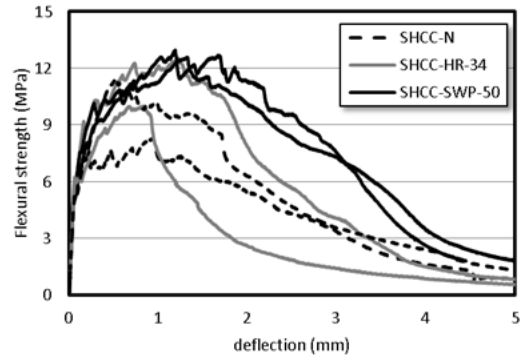


Fig. 16 Flexural responses of SHCC prisms

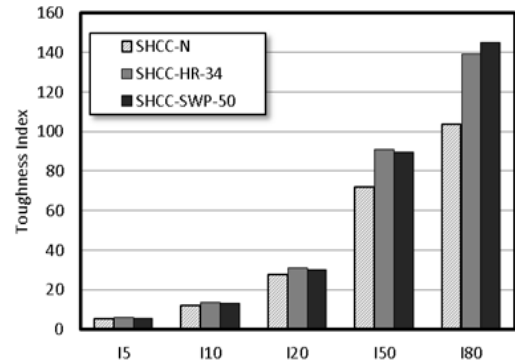


Fig. 17 Flexural toughness indexes of SHCC prisms

## 4. 결 론

본 연구에서는 뿔칠형 SHCC의 수축저감제 혼입에 따른 역학적 특성의 변화를 실험적으로 평가하였다. 이러한 시험결과를 근거로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 재령 4일에서 분말형 및 액상형 수축저감제를 혼입한 SHCC의 길이변화를 측정할 결과 수축저감제를 혼입하지 않은 SHCC에 비해 길이변화량이 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) 수축저감제의 혼입여부 및 혼입량에 따른 SHCC의 압축강도는 큰 차이를 보이지 않았으나 압축강도시 변형이 증가하는 경향을 보였다.
- 3) 액상형 및 분말형 수축저감제의 혼입률이 증가함에 따라 직접인장강도 및 변형능력이 우수하게 나타났으며, 미세균열 분산능력이 향상되는 것으로 나타났다. 따라서 상대적으로 부배합인 SHCC 배합에 있어 수축저감제의 혼입은 수축에 의한 손상을 완화하고 역학적 특성을 향상시키는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 압축강도시 변형의 증가와 매트릭스의 증가된 인장강도 및 인장변형능력의 영향으로 분말형 및 액상형 수축저감제 혼입 시 휨 강도 및 휨 인성이 향상되는 경향을 보였다.
- 5) 본 연구에서는 분말형 및 액상형 수축저감제의 변

형경화형 시멘트복합체에 대한 적용가능성을 평가하는 기초연구개념으로 압축, 인장 및 휨 등의 기초적인 역학적 특성만을 평가하였으나 향후 다양한 재료특성 및 물성에 관한 연구를 추가하여, 효과적인 내진보강요소와 기존골조의 접합부 충전기법을 제안할 예정이다.

## 감사의 글

이 논문은 2014년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신 창의인력양성사업(NRF-2014H1C1A1066970)의 지원을 받아 수행된 연구이며, 지원에 감사드립니다.

## References

- Kim, S. H., Youn, G. H., Kim, Y. C., Kim, J. H., and Yun, H. D., "Development of Sprayable Strain-Hardening Cement Composite (SHCC) for Joint between Existing R/C Building and Seismic Retrofit Elements", *Journal of the Korean Institute of Educational Facilities*, Vol.90, 2012, pp.29-36 (in Korean).
- Yun, H. D., Kim, Y. C., and Kim, S. W., "Effect of Reinforcing Fiber Types on the Behavior Characteristics of SHCCs", *Journal of the Architectural Institute of Korea: Structure & Construction*, Vol.24, No.5, 2008, pp.141-148 (in Korean).
- Kim, S. W., Cha, J. H., Kim, Y. Y., and Yun, H. D., "Mechanical Properties of Strain Hardening Cement-Based Composite (SHCC) with Recycled Materials", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.22, No.5, 2010, pp.727-736 (in Korean).
- Lee, Y. O., and Yun, H. D., "Effects of Expansive Admixture on the Mechanical Properties of Strain-Hardening Cement Composite (SHCC)", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.22, No.5, 2010, pp.617-624 (in Korean).
- Kim, Y. R., Jung, Y. H., Lee, S. H., Kim, D. S., Khil, B. S., and Kim, W. G., "The Characteristics of Hydration Heat Generation of Low Heat Concrete using Hydration Heat Reducing Admixtures", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.18, No.2, 2006, pp.709-712 (in Korean).
- Kim, G. Y., Koo, K. M., Shin, K. S., Lee, E. B., Kang, Y. W., and Tohru, T., "Reduction of Hydration Heat Velocity and Autogenous Shrinkage according to Retardation of Hydration of High Strength Mass Concrete", *Journal of the Architectural Institute of Korea: Structure&Construction*, Vol.27, No.1, 2011, pp.137-144 (in Korean).
- Yang, I. S., Yun, H. D., Kim, D. S., Khil, B. S., and Han, S. G., "Experimental Study on Engineering Properties of Concrete Using Fluosilicates Based Composite", *Korea Concrete Institute Structure Journal*, Vol.17, No.5, 2005, pp.769-774 (in Korean).
- Khil, B. S., "A Study on the Reduction of Thermal Crack of Mass Concrete by Hydration Heat Control Material", Chungnam National University, 2012.
- KS F 2403, "Standard Test Method for Making and Curing Concrete Specimens", Korea Standards Association, 2014 (in Korean).
- KS F 2405, "Standard Test Method for Compressive Strength of concrete", Korea Standards Association, 2014 (in Korean).
- KS F 2408, "Method of Test for Flexural Strength of Concrete", Korea Standards Association, 2000 (in Korean).
- JSCE-E-531, "Test method for tensile properties of continuous fiber reinforcing materials", Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 1999.
- ASTM C1018, "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)", American Society for Testing Materials (ASTM), 1997.
- Choi, W. C., Khil, B. S., Chae, Y. S., Liang, Q. B., and Yun, H. D., "Feasibility of Using Phase Change Materials to Control the Heat of Hydration in Massive Concrete Structures", *The Scientific World Journal*, Vol.2014, 2014, pp.1-6.
- Li, V. C., "Large Volume, High-Performance Applications of Fiber in Civil Engineering", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.83, 2002, pp.660-686.

**요약** 본 연구는 두 종류의 수축저감제를 혼입한 변형경화형 시멘트 복합체(SHCC)의 압축, 인장 및 휨 특성을 평가하기 위하여 계획되었으며, 재령과 수축저감제의 종류 및 혼입률을 변수로 진행되었다. SHCC는 설계기준압축강도 50 MPa이며, 섬유는 PVA 섬유를 2.2% 혼입하였다. 배합에 혼입된 수축저감제는 상변이 물질로 수화현상으로 발생하는 열을 흡수 또는 방출하여 급격한 수축 및 팽창을 제어하는 물질이다. 수축저감제의 혼입에 대한 영향은 선변형 길이변화 실험과 압축, 인장 및 휨 성능의 측면에서 평가되었으며, 수축저감제를 혼입할 경우 초기 재령에서의 수축량이 감소되었다. 또한 수축저감제를 혼입함에 따라 균열 분산 성능과 인장 및 휨 성능이 개선되었다.

**핵심용어** : 수축 저감제, 변형경화형 시멘트복합체, 역학적 특성