



## 섬유혼입조건 및 팽창재 대체에 따른 변형 경화형 시멘트 복합체 내의 철근 겹침이음 성능

류승현<sup>1)</sup> · 이영오<sup>1)</sup> · 윤현도<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>충남대학교 건축공학과

## Effects of Fiber Blending Condition and Expansive Admixture Replacement on Tensile Performance of Rebar Lap Splice in Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCCs)

Seung-Hyun Ryu,<sup>1)</sup> Young-Oh Lee,<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** This paper is a report about lap splice performance of rebar embedded in the strain-hardening cement-based composites (SHCCs) under monotonic and repeated tension loading. Ten mix proportions of cement-based composites such as SHCCs and normal concrete were investigated. The study parameters are comprised of (1) types of reinforcing fibers (polyethylene and steel fiber), (2) replacement levels of expansive admixture (EXA, 0% and 10%), and (3) compressive strength (30 and 100 MPa) of cement-based composites. Lap splice lengths ( $l_d$ ) of rebars in SHCC materials and normal concrete were 60% and 100% of splice length calculated by code requirements for structural concrete, respectively. Test results indicated that SHCCs materials can lead to enhancements in the lap splice performance of embedded rebar. All of the fiber reinforcement conditions (PE-SHCC and PESF-SHCC) considered in this study produced considerable improvements in the tensile strength, cracking behavior, and bond strength of lap-spliced rebar. Furthermore, adding EXA to SHCC matrix improved the tensile lap splice performance of rebar in SHCC materials. However, for controlling crack behavior, the performance of PE-SHCC was better than that of PESF-SHCC due to its mechanical properties. This study demonstrated an effective approach for reducing required development length of lap spliced rebar by using SHCC materials.

**Keywords :** lap splice, strain hardening cement-based composites (SHCCs), hybrid fiber, high strength, expansive admixture

### 1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 초고층 및 대형화 추세와 함께 보다 효율이 높은 건설재료 및 부재를 필요로 하게 되었다. 또한 장 스패에 의한 철근의 이음 및 고품질 콘크리트와 보강근의 부착성능은 구조물의 안전성 확보를 위하여 반드시 고려되어야 할 부분이다. 이에 따라 고강도 콘크리트 및 섬유 보강 콘크리트와 보강근의 상호관계 등에 대한 연구가 국내외에서 폭넓게 진행되고 있다.<sup>1-4)</sup> Ezeldin<sup>1)</sup> 등은 섬유보강 콘크리트 내 철근의 겹침이음부는 보통 콘크리트 내 겹침이음부와 다르게 직접인장 하에서 최대 강도 이후 취성적인 파괴가 억제된다고 보고하고 있다. 이는 콘크리트 내 섬유에 의한 콘크리트의 균열폭 제어에 따른 것으로 보고하고 있다. Hamad<sup>2)</sup> 등

은 강섬유의 혼입이 겹침이음부의 취성적 파괴양상을 연성적 파괴양상으로 변환시켰으며, 철근과 콘크리트간의 응력 분배 및 부착강도 증진 등에 대해서는 보통 콘크리트의 겹침이음부에서 횡보강근과 유사한 효과를 보이는 것으로 보고하였다. 국내에서도 윤현도<sup>3)</sup> 등이 PE 합성섬유로 보강된 시멘트 복합체내에 철근을 겹침이음 할 경우 콘크리트 구조설계기준<sup>4)</sup>에 제시되어 있는 철근의 겹침이음 길이의 60%만으로도 소요성능을 확보하는 것으로 보고한 바 있다. 이와 같이 섬유를 보강한 콘크리트와 철근과의 겹침이음 성능은 최대 인장응력 이후의 연성거동 및 인장강성 효과를 보이며 이러한 현상은 초기균열이 발생한 이후에는 점차 감소되는 경향을 보인다. Fischer<sup>6)</sup> 등은 콘크리트의 취성적 성질을 보완하기 위하여 polyvinyl alcohol(PVA) 섬유로 보강된 변형경화형 시멘트 복합체의 일종인 ECC(engineered cementitious composite) 인장 부재의 인장강성 특성에 대하여 평가하였다. 섬유 보강된 ECC 인장부재의 인장강성 특성은 보통 콘

\*Corresponding author E-mail: wiseroad@cnu.ac.kr  
 Received July 15, 2011, Revised December 2, 2011,  
 Accepted December 15, 2011

크리트 인장부재에 비하여 초기 균열 발생 이후에 우수한 인장강성 특성을 보이는 것으로 보고하고 있다. 그러나 인장 초기에 나타나는 인장강성 특성은 부배합인 ECC의 수축에 의한 경화 단계의 초기균열로 인하여 보통 콘크리트 인장재에 비하여 낮게 나타나는 문제점을 지적하였다.

한편 변형 경화형 시멘트 복합체(strain hardening cement-based composites, SHCC)는 섬유 보강으로 인한 우수한 균열제어 성능을 가지고 있으나 부배합으로 인하여 수축이 크게 발생하는 특성이 있다.<sup>7)</sup> 이와 같이 수축으로 인한 초기 균열이 발생할 경우, 겹침이음 및 인장강성 효과 저하 등 철근과 SHCC의 상호관계에 영향을 미치므로 SHCC의 수축 균열제어를 고려할 필요가 있다. 이영오<sup>8)</sup> 등은 70 MPa급 SHCC에 10%의 팽창재를 대체할 경우 초기 팽창량 증대 및 최종 수축량 저감을 통해 압축, 인장 및 휨성능이 향상됨을 보고한 바 있다. 따라서 SHCC에 팽창재를 대체할 경우 수축에 의한 초기 균열을 제어함으로써 철근 겹침이음부의 인장 성능을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 이 연구에서는 단일합성섬유 및 합성섬유와 강섬유를 하이브리드하여 보강한 SHCC에서 시멘트양의 10%를 CSA계 팽창재로 대체한 팽창형 SHCC와 기존 SHCC 내 철근의 겹침이음 성능을 평가하고자 한다. 철근의 겹침이음 길이는 선행연구<sup>3,9)</sup> 결과를 근거로 CRSC 기준값의 60%를 적용하였다. 이상과 같은 조건을 갖는 SHCC내 철근의 겹침이음부에 대한 직접 인장 실험으로

부터 팽창재 대체 및 보강 섬유 종류에 따른 SHCC 겹침이음부의 인장 특성에 대하여 실험적으로 평가하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 SHCC의 제조 및 시험 방법

Table 1은 이 연구에서 사용되는 SHCC에 대한 배합조건을 나타낸 것이다. 섬유혼입 및 팽창재 대체조건은 보통강도(30 MPa)와 고강도(100 MPa)의 SHCC에서 동일하게 계획되었다. 이 연구에서 SHCC의 수축 특성을 개선하기 위하여 배합시 시멘트의 일부를 팽창재로 대체하였고, 사용된 팽창재는 이영오<sup>8)</sup>의 연구에서 사용된 국내산 CSA계 팽창재를 사용하였으며, 대체율은 10%로 계획하였다. 또한 Table 2에 나타난 바와 같이 보강섬유로 폴리에틸렌(polyethylene, PE)과 강섬유(steel fiber, SF)를 사용하였다. 보강 섬유 종류 및 혼입률은 단일 PE 섬유를 1.5% 혼입한 경우(PE-SHCC 시리즈)와 PE 및 SF 섬유를 각각 0.75%씩 하이브리드 보강한 경우(PESF-SHCC 시리즈)의 두 경우로 계획하였다. SHCC의 비빔은 분체재료 투입 후 1차 건비빔을 하였으며, 섬유의 뭉침 현상(fiber ball)을 방지하기 위해 섬유 투입 이후 2차 건비빔을 실시하였다. 이와 같이 건비빔 종류 후 물과 혼화제를 투입하여 SHCC의 최종 비빔을 하였다.

SHCC는 수축의 영향을 많이 받으며 직접인장 시 변

**Table 1** Mixture proportions of SHCC materials

Cement-based composite type	W/B	Specific compressive strength (MPa)	Fibers (%)		Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )							
			PE	SF	Cement	Water	Silica fume	EXA	S	G	AE	T
Con_30	0.5	30	-	-	350	175	-	-	770	981	-	-
Con_100	0.18	100	-	-	800	160	89	-	546	835	-	-
PE30_00*	0.45	30	1.50	-	1,075	484	-	-	430	-	-	-
PE30_10					968	489	-	108	430	-	-	-
PE100_00	0.19	100	1.50	-	1,409	319	245	-	163	-	33	7
PE100_10					1,268	319	245	141	163	-	33	7
PESF30_00	0.45	30	0.75	0.75	1,075	484	-	-	430	-	-	-
PESF30_10					968	489	-	108	430	-	-	-
PESF100_00	0.19	100	0.75	0.75	1,409	319	245	-	163	-	33	7
PESF100_10					1,268	319	247	141	165	-	33	7

\*PE30\_00: reinforced fiber type; design strength; EXA replacement level, PE: polyethylene fiber, SF: steel fiber

Note) EXA, expansive admixture; AE, air-entraining agent; T, antifoaming agent

**Table 2** Mechanical properties of fibers

Fibers	Specific gravity (kg/m <sup>3</sup> )	Length, l (mm)	Diameter, d (μm)	Aspect ratio (l/d <sup>*</sup> )	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
PE	0.97	12	12	1,000	2,500	75
SF	7.85	32	405	79	2,300	206

Note) l, length; d, diameter

형경화 및 균열분산 특성을 가지고 있으므로 수축 및 직접인장 특성 평가는 반드시 고려되어야 할 부분이다. 따라서 수축, 압축 및 인장 성능을 평가하기 위해 각 시험체를 제작하였으며, SHCC의 재료적 특성을 평가하였다. 수축 평가의 경우 SHCC의 수축 변형률(자기수축 및 건조수축)을 측정하기 위하여 모든 종류의 SHCC에 대하여 100 × 100 × 400 (mm) 직육면체 시험체를 제작하였으며, 타설 직후 수축 게이지를 시험체 중앙에 매립한 뒤 항온항습실(온도 20 ± 1°C 및 습도 50 ± 1%)에 보관하였다. 또한 SHCC의 압축강도 특성을 평가하기 위하여 모든 종류의 SHCC에 대해 3개의 원주형 공시체를 제작하였으며 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법)에 준하여 압축강도 시험을 실시하였다.

## 2.2 겹침이음 실험 계획 및 방법

이 연구에서는 보강섬유의 기계적 특성 및 혼입조건과 팽창재 대체 여부가 단조와 반복인장하중을 받는 SHCC의 겹침이음부 인장 성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 총 20개의 시험체를 제작하였다. SHCC의 겹침이음에 사용된 철근은 SD500급의 공칭직경 16 mm를 갖는 이형철근(D16)을 사용하였다. 또한 겹침이음 길이는 콘크리트 시험체(LS\_Con30 및 LS\_Con100)의 경우 CRSC 기준에서 규정하고 있는 산정식에 준하여 산정하였다. CRSC 기준에 의하면 철근의 인장 겹침이음은 A 및 B 급으로 구분하고 있다. A급 이음은 배치된 철근량이 이음부 전체 구간에서 해석 결과 요구되는 소요 철근량의 2배 이상이고, 소요 겹침이음내 겹침이음된 철근량이 전체 철근량의 1/2 이하인 경우를 의미하며, B급 이음은 A급 이음에 해당되지 않는 모든 경우를 포함한다. 이 연구의 경우 소요 겹침이음내 겹침이음된 철근량이 전체 철근량의 1에 해당되므로 B급이음으로 규정할 수 있다.

한편 SHCC 시험체(LS\_PE 및 LS\_PESF 시리즈)의 경우에는 선행연구<sup>3,9)</sup> 결과에서 SHCC의 겹침이음 길이 감소를 통한 보강상세 단순화의 가능성이 확인됨에 따라 기준에서 제시하고 있는 철근 겹침이음 길이의 60%를 적용하였다(Table 3).

겹침이음 시험체에 직접 인장력을 도입하기 위하여 50 kN 용량의 만능시험기를 이용하였으며 단조 및 반복인장가력 하였다. 반복가력에서는 각 사이클의 최대 응력치에서 균열의 폭과 수를 측정함으로써 철근 겹침이음부에 발생한 SHCC의 균열 제어 및 미세균열 분산 특성을 평가하고자 하였다. 또한 반복 인장가력 시 재하이력은 시험체의 단부에 설치된 2개의 변위계를 통해 측정되는 평균 변형률로 제어하였으며 500, 1,000 및 2,000 μ로 점증 반복재하(repeated loading) 하였다.

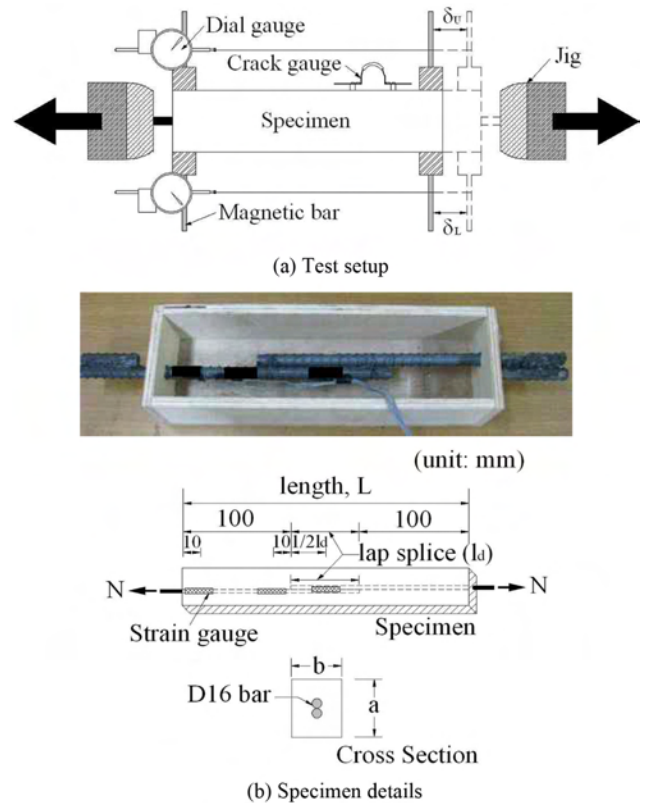
Fig. 1(b)은 시험체 상세를 나타낸 것으로 철근 변형 게이지(steel gauge)는 시험체당 총 3개를 시험체의 중앙 및 단부와 그 사이의 겹침이음 구간이 끝나는 위치에 부착하였다. 또한 Fig. 1(a)의 시험체 설치 상황에 나타난 바

**Table 3** Summaries of lap splice specimens

Specimens ID	Cross sectional dimensions; a×b <sup>(1)</sup> (mm <sup>2</sup> )	Length; L <sup>(1)</sup> (mm)	Splice length <sup>(2)</sup> (mm)	Splice length <sup>(3)</sup> (mm)
LS_Con30	100 × 80	640	440	440
LS_Con100		440	240	240
LS_PE30_00		460	440	260
LS_PE30_10		460	440	260
LS_PE100_00		340	240	140
LS_PE100_10		340	240	140
LS_PESF30_00		460	440	260
LS_PESF30_10		460	440	260
LS_PESF100_00		340	240	140
LS_PESF100_10		340	240	140

<sup>(1)</sup>See Fig. 1(b), <sup>(2)</sup>splice length calculated by CRSC

<sup>(3)</sup>60% splice length of <sup>(2)</sup>(SHCC specimens)



**Fig. 1** Test setup for direct tension of lap splice specimens

와 같이 철근이음부의 균열폭을 측정하기 위하여 시험체의 겹침이음 끝나는 구간에 크랙 게이지(crack gauge)를 설치하였으며, 시험체 상하에 다이얼 게이지(dial gauge)를 설치함으로써 SHCC 시험체의 모든 구간에 발생하는 SHCC 및 철근의 변형률을 계측하였다.

## 3. 재료 실험 결과

이 연구에 사용된 D16 이형 철근의 기계적 성질은 KS B 0802(금속재료 인장시험방법)에 준하여 평가하였으며,

**Table 4** Summaries of material properties<sup>(1)</sup>

Cement-based composite type	Shrinkage during 1 day ( $\mu$ )	Compressive strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain capacity <sup>(2)</sup> (%)
Con_30	132	32.9	22.5	-	-
Con_100	443	84.7	35.4	-	-
PE30_00	200	39.4	13.4	5.88	2.78
PE30_10	275	39.5	13.4	6.61	1.12
PE100_00	643	81.7	27.4	7.83	0.93
PE100_10	184	86.7	25.9	6.65	1.11
PESF30_00	261	40.1	16.5	4.47	1.25
PESF30_10	0	44.2	16.3	4.59	0.35
PESF100_00	414	89.9	29.1	6.54	0.09
PESF100_10	322	91.8	28.8	6.57	0.02

<sup>(1)</sup>Compressive and tensile strength results are the average of three and five specimens, respectively

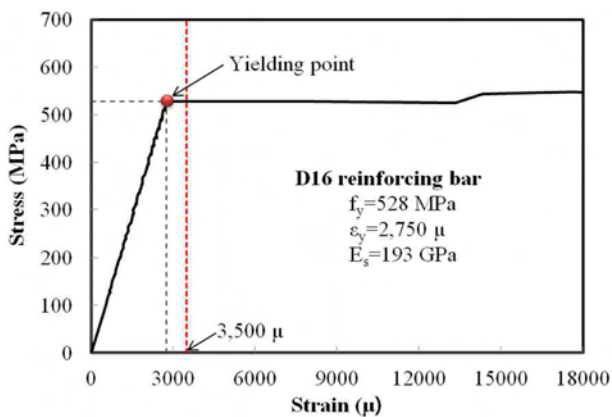
<sup>(2)</sup>Tensile strain at the peak tensile stress

Fig. 2에 나타난 바와 같이 철근의 항복강도는 528 MPa로 나타났다. 또한 Table 4에 이 연구에서 제조된 모든 배합의 시멘트 복합체에 대한 수축, 압축 및 인장 실험 결과를 비교하여 나타내었다.

수축 특성 평가 결과 타설 후 28일 및 초기 24시간 동안 측정된 각 시멘트 복합체의 시간경과에 따른 수축 변형률을 Fig. 3에 비교하여 나타내었다. 초기 24시간 동안 자기 수축량은 고강도(100 MPa) SHCC 배합에서 보통강도(30 MPa) SHCC 배합에 비해 약 40% 이상 큰 값을 보였다.

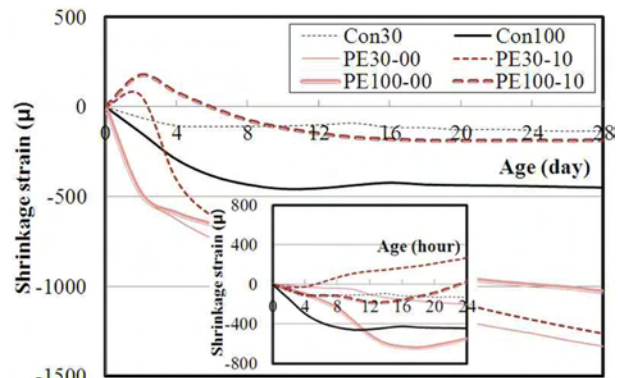
압축 특성의 경우 Fig. 4에 나타난 바와 같이 대체적으로 PESF-SHCC 배합의 압축강도 및 탄성계수가 PE-SHCC 배합에 비해 높게 나타나는 경향을 보였다. 또한 팽창재를 대체한 모든 SHCC 배합의 압축강도가 대체하지 않은 SHCC 배합에 비해 크게 나타났으며, 그 중 고강도 PE-SHCC 배합과 보통강도 PESF-SHCC 배합의 경우 팽창재를 대체함에 따른 압축강도의 상승폭이 비교적 크게 나타났다.

각 SHCC 배합에 대한 직접인장특성 평가는 일본의 JSCE-E-531<sup>(10)</sup>의 직접인장시험방법에 준하여 Fig. 5와 같

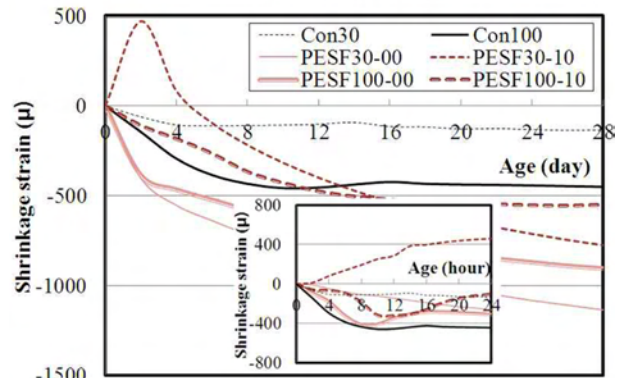


**Fig. 2** Stress-strain relationship of reinforcing bar

은 덩벨형 시편(dumbbell-shaped)을 5개씩 제작하여 평가하였으며, Fig. 6에 각 배합의 SHCC 인장 시험체의 전형적인 최종 파괴양상을 비교하여 나타내었다. 실험 결과 Chen<sup>(11)</sup>의 연구 결과에서와 유사하게 PE-SHCC 배합의 인장강도가 강섬유와 PE 합성섬유가 혼입된 PESF-SHCC 배합에 비해 높게 나타나는 경향을 보였다. 변형 능력에 대해서도 고강도 PESF-SHCC 배합은 국부적인 균열형상을 보이며 낮은 변형률을 보인 반면, PE-SHCC



(a) PE-SHCC



(b) PESF-SHCC

**Fig. 3** Shrinkage strain of SHCC materials



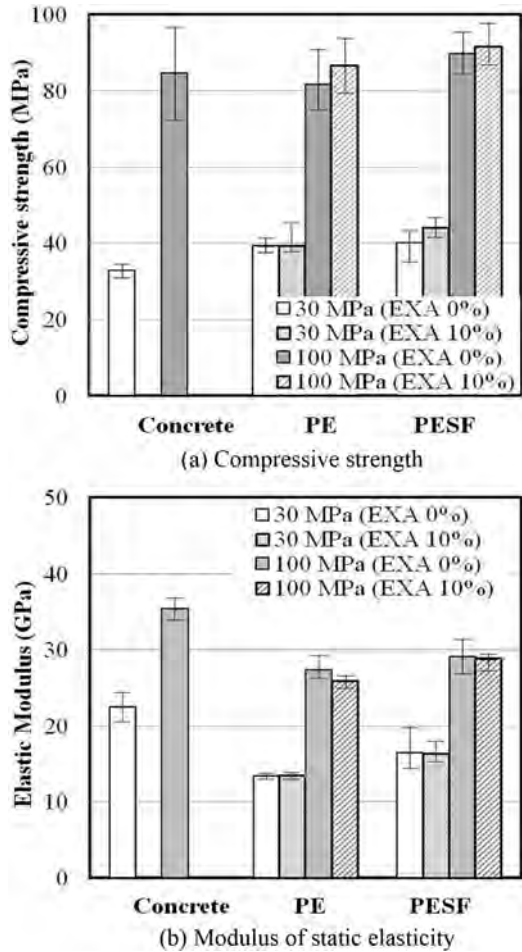


Fig. 4 Compressive test results of SHCC materials

배합의 모든 인장 시험체는 최대 하중에서 1% 이상의 변형률을 나타내었으며 시험체 전면에 미세균열이 폭넓게 분산되는 경향을 보였다. 또한 팽창재 대체에 따른 SHCC의 강도 특성에 대한 비교 결과 PE-SHCC 배합에서는 보통강도 영역의 경우 팽창재를 대체함에 따라 인장강도는 증가하였으나 최대 응력에서의 변형능력은 감소하는 경향을 보였으며, 고강도 영역에서는 팽창재 대체 후 인장강도가 감소하였으나 비교적 연성적인 거동을 보이는 것으로 나타났다. 한편 PESF-SHCC 배합의 경우, 보통강도 영역에서 팽창재를 대체함에 따라 인장강도 및 변형 능력이 감소하였으며 고강도 영역에서는 인장강도의 큰 변화 없이 PE-SHCC 배합과 유사하게 연성적인 거동이 증진되었다. 고강도 영역의 SHCC에서 팽창재 대체에 따른 인장강도가 낮게 나타난 것은 이현수<sup>12)</sup>의 연구 결과와 마찬가지로 고강도 배합에서 팽창현상은 인장강도를 저하시킴으로써 직접 인장 성능에 부정적 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

#### 4. 겹침이음 실험 결과

##### 4.1 겹침이음부의 인장거동

Fig. 7은 PE-SHCC 및 PESF-SHCC 내에 매립된 철근

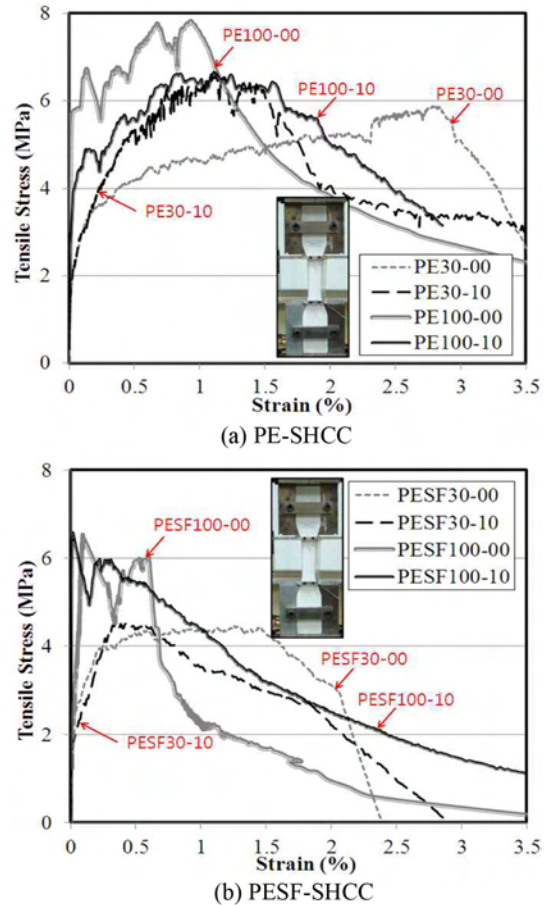


Fig. 5 Average tensile response of SHCC materials

겹침이음부의 단조 및 반복재하시 축 인장응력-변형률 관계를 나타낸 것으로, D16인 이형철근의 재료 시험 결과를 함께 나타내어 비교하였다. Fig. 7의 X축 선상의 변형률은 Fig. 1(a)와 같이 실험체 상하부에 설치된 변위계에 의해 측정된 축방향 변형량( $\delta_U$  및  $\delta_L$ )의 평균값을 근거로 산정된 변형률을 나타낸 것이다. 또한 Y축 선상의 응력은 실험체에 도입된 인장력을 겹침이음된 D16의 이형철근 면적으로 나누어 산정된 값으로, 위 실험 결과에 대해 Table 5에 정리하여 나타내었다.

Table 5 및 Fig. 7에 나타난 바와 같이 겹침이음부의 초기 균열 강도는 모든 실험체에서 유사한 값을 보였다. 또한 B급 이음한 SHCC 실험체의 인장강도는 모든 실험체가 철근 항복강도의 1/2(264 MPa)을 상회하는 결과를 보였다. 이를 통하여 이 연구에 사용된 SHCC 내에 매립된 철근의 겹침이음 길이를 CRSC 기준의 60%로 감소한 경우에도 겹침이음부의 안정성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

한편 시멘트 복합체의 압축강도에 따른 겹침이음부 성능에 대한 비교 결과, 고강도 SHCC 및 콘크리트 내에 매립된 철근 겹침이음부의 인장강도가 보통강도 SHCC에 비해 10% 이상 하회하는 것으로 나타났다. Azizinamini<sup>13)</sup>는 콘크리트 강도에 따른 철근 겹침이음 성능을 평가한 결과 70 MPa 이상의 고강도 콘크리트 내에서는 철근의 겹침이음 길이가 증가하여도 콘크리트 계면과 철근 사이

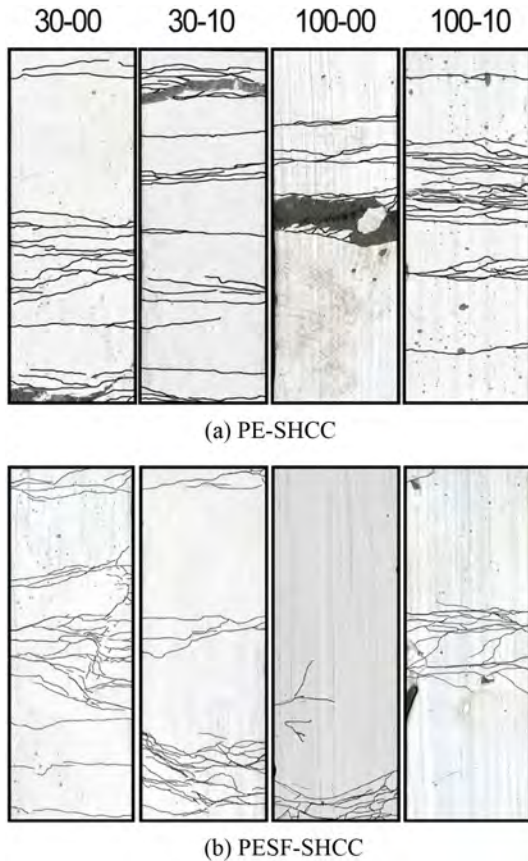


Fig. 6 Crack pattern of tensile specimens

의 부착 성능이 증진하지 못함을 보고한 바 있다. 따라서 이 연구의 고강도(100 MPa) 실험체 역시 철근과 시멘트 매트릭스 간의 상호작용이 보통강도 실험체에 비해 감소하여 겹침이음부의 인장 성능에 대한 콘크리트 및 SHCC의 기여가 적게 나타난 것으로 판단된다. 또한 Gintaris<sup>14)</sup>의 연구 결과에서 수축량의 증가는 부재의 인장 강성 및 균열저항능력을 감소시키는 것으로 보고한 바 있다. 이 연구에서는 3절 수축 실험 결과에서 고강도 SHCC가 보통강도 SHCC에 비해 초기 자기 수축량이 크게 발

생하였으며, 이와 같은 고강도 SHCC의 수축 특성 또한 시멘트 매트릭스의 수축 균열을 야기하여 철근 이음부의 인장강도에 영향을 준 것으로 판단된다.

한편, 보강섬유 종류에 따른 겹침이음부의 성능 평가 결과, 전에스터<sup>9)</sup>의 연구 결과와 마찬가지로 이 연구에서 수행된 PE- 및 PESF-SHCC내 철근 겹침이음부의 인장 강도는 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 PE- 및 PESF-SHCC 배합에서 팽창재를 대체함에 따라 단조 및 반복 하중 하에서의 인장강도 및 초기강성이 증진되는 경향을 보였으며, 고강도 SHCC가 일반강도 SHCC에 비해 강성이 크게 향상되는 특성을 보였다. 이러한 경향은 고강도 매트릭스의 강도가 상대적으로 높은 이유로, 겹침이음부의 인장 성능에서도 보통강도에 비해 높은 강성을 발휘하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 보통강도 및 고강도 매트릭스 모두 SHCC에 작용하는 팽창특성이 SHCC의 초기균열을 제어하고, 응력재분배를 유도함에 따라<sup>8)</sup> 시멘트 매트릭스와 철근과의 상호작용이 개선된 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 8은 축인장력 하에서 각 실험체의 겹침이음부가 부담하는 인장응력 중 시멘트 복합체가 기여하는 정도를 나타낸 것이다. 시멘트 복합체의 기여도는 각 실험체의 인장응력에서 단일 D16 이형철근의 인장응력을 뺀 값으로 산정하였다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 콘크리트 실험체는 철근의 인장 성능에 미비하게 기여한 반면, SHCC 실험체의 경우 겹침이음부에 작용되는 인장응력을 콘크리트 실험체에 비해 3배 이상 부담하는 것으로 나타났다. 또한 고강도 SHCC가 보통강도 SHCC에 비해 인장응력이 작게 나타난 경향과 유사하게 시멘트 복합체의 기여도에서도 고강도에 비해 보통강도 SHCC 배합의 기여도가 약 30% 이상 높게 나타났다.

한편 SHCC 실험체에 팽창재를 대체함에 따라 겹침이음부의 인장 성능에 SHCC의 기여도가 증가하는 것으로 나타났으며, 그 중 PE-SHCC에 비해 PESF-SHCC 실험체의 기여도가 약 20% 이상 크게 나타났다. 이러한 시

Table 5 Test results of the lap splice specimens

Specimens ID	Initial crack		Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)	Average crack width at 0.1% (tensile strain) ( $\mu\text{m}$ )	Average bond strength, $u$ Eq. (1) (MPa)	Tensile strength of cement matrix (MPa)
	Strength (MPa)	Strain (%)					
LS_Con30	95	0.008	316	0.06	89	31.9	0.45
LS_Con100	149	0.002	168	0.06	214	84.7	1.60
LS_PE30_00	73	0.005	491	0.18	43	41.4	2.25
LS_PE30_10	124	0.001	506	0.20	25	39.5	3.37
LS_PE100_00	89	0.003	401	0.14	34	81.7	1.60
LS_PE100_10	240	0.002	428	0.07	29	86.7	2.13
LS_PESF30_00	65	0.001	474	0.23	46	40.1	3.12
LS_PESF30_10	114	0.005	515	0.15	64	44.2	3.82
LS_PESF100_00	100	0.013	420	0.15	36	94.4	2.21
LS_PESF100_10	249	0.002	439	0.12	38	91.7	3.72

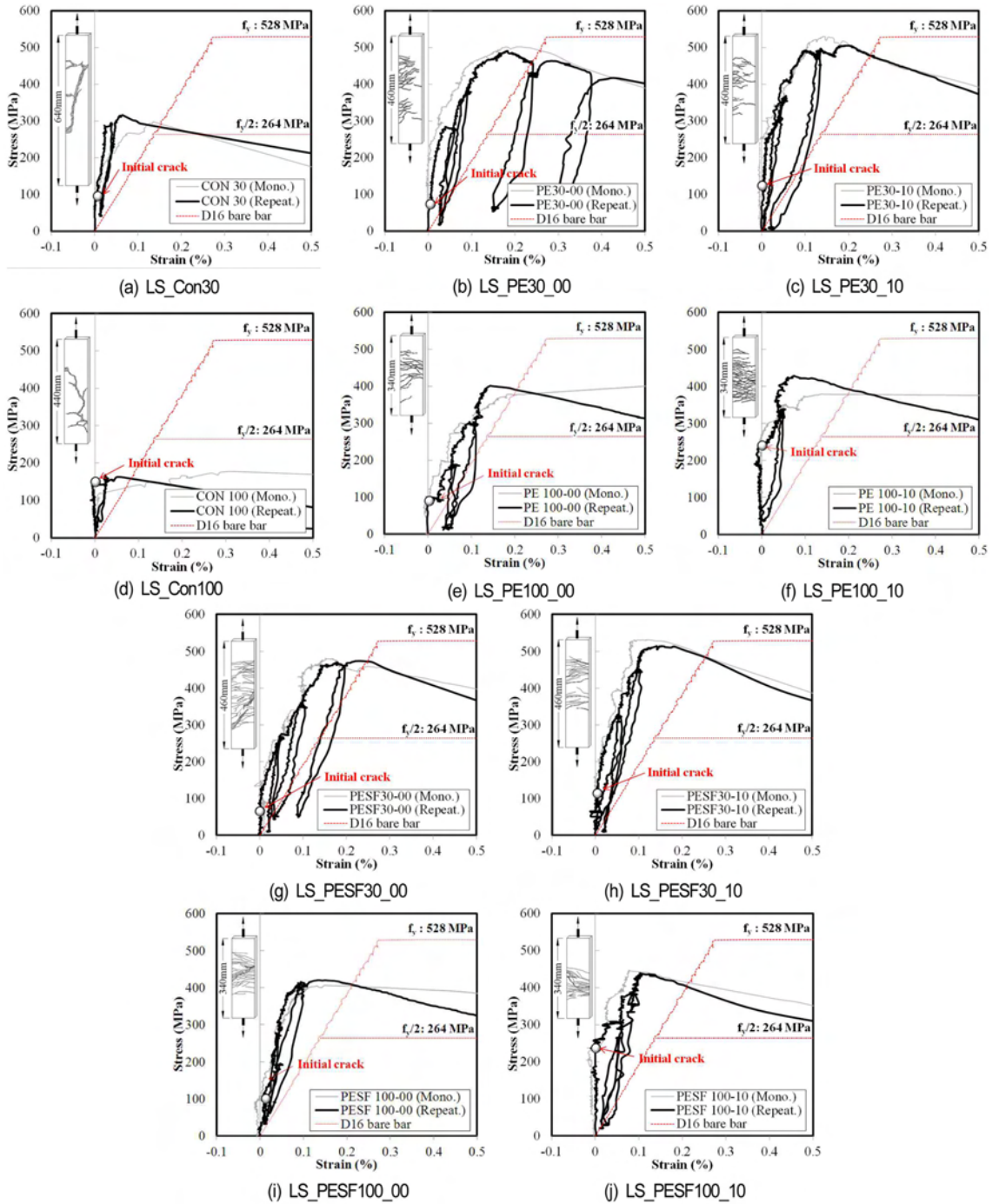


Fig. 7 Tensile responses of lap splice specimens

멘트 복합체의 인장 성능에 대한 기여는 겹침이음된 실험체의 인장강성 효과를 유도하여 강도 및 변형 능력을 증진시켰으며, 이와 같은 성능 증진을 통해 CRSC 기준에 비해 감소된 겹침이음 길이로도 소요 인장 성능을 확보한 것으로 판단된다.

#### 4.2 균열 특성

Fig. 9는 콘크리트 및 SHCC 겹침이음부의 인장변형률에 따라 발생한 균열의 평균폭을 비교하여 나타낸 것이며, Fig. 10에 겹침이음 실험체의 최종 균열 특성을 나타

내었다. 균열폭은 마이크로스코프(microscope) 60배율로 측정하였으며, 각 변형 단계에서 발생한 모든 균열에 대해 측정한 뒤 평균값을 구하여 비교하였다. 측정 결과 Fig. 10의 균열 특성에서와 같이 콘크리트 실험체에 비해 SHCC 실험체의 최종 균열폭이 최소 50% 이상 감소하는 것으로 나타났다.

강도 차이에 따른 비교 결과, 고강도 콘크리트 실험체의 균열폭은 보통강도 실험체에 비하여 증가한 반면, SHCC 실험체에서는 보통강도 실험체의 균열폭이 고강도 실험체에 비해 크게 나타났다. 이는 Table 5에 나타난 바와 같이 고강도 실험체의 인장강도 및 변형률이 보



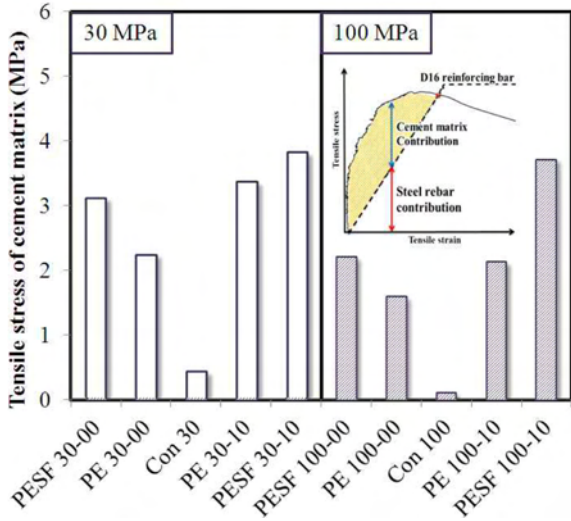


Fig. 8 Tensile strength of cement matrix in lap splice specimens

통강도 실험체에 비해 작게 나타났으며, 이러한 거동 특성으로 인하여 실험체의 균열 진전 또한 크게 발생하지 않은 것으로 판단된다. Fig. 10의 균열 특성에서도 고강도 실험체는 이음부의 부착 파괴에 따른 쪼갬 균열이 크게 발생한 반면, 보통강도 실험체에서는 다수의 수직 마이크로 균열이 발생한 뒤 쪼갬 균열로 전이되는 경향을 보였다.

한편 보강섬유 종류에 따른 균열 특성에 대한 비교 결과, Figs. 9 및 10에 나타난 바와 같이 PE-SHCC에 비해

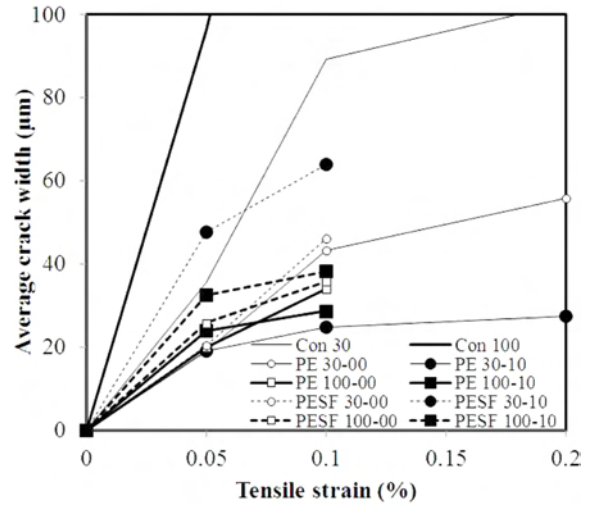


Fig. 9 Average crack width in lap splice

PESF-SHCC의 겹침이음부 표면에 발생한 최종 균열폭이 크게 나타나는 경향을 보였다. 탄성계수가 큰 강섬유(SF)는 일반적으로 매크로 균열폭을 제어하는데 유효하고, PE 섬유는 낮은 강도와 높은 변형력 및 마이크로 균열을 제어하는데 유효한 특성이 있다.<sup>15)</sup> 따라서 PESF-SHCC의 SF가 매크로 균열을 제어하는 특성이 우세하게 나타남에 따라 PE-SHCC에 비해 마이크로 균열 특성이 적게 나타난 것으로 판단된다.

또한 SHCC에 팽창재를 대체함에 따라 PE-SHCC에서는 균열폭이 감소하였으며, PESF-SHCC에서는 이와 상

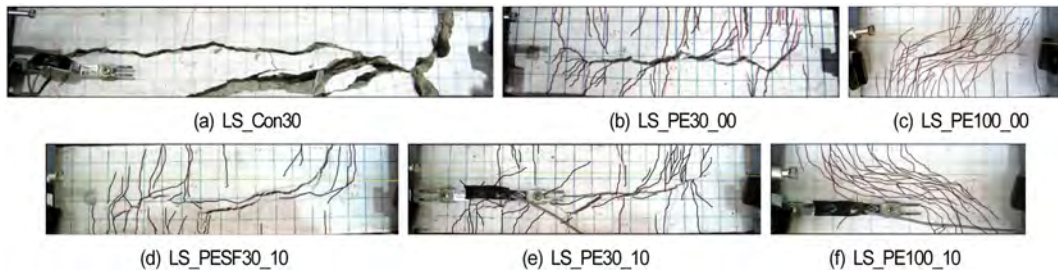


Fig. 10 Final crack patterns of lap splice specimens

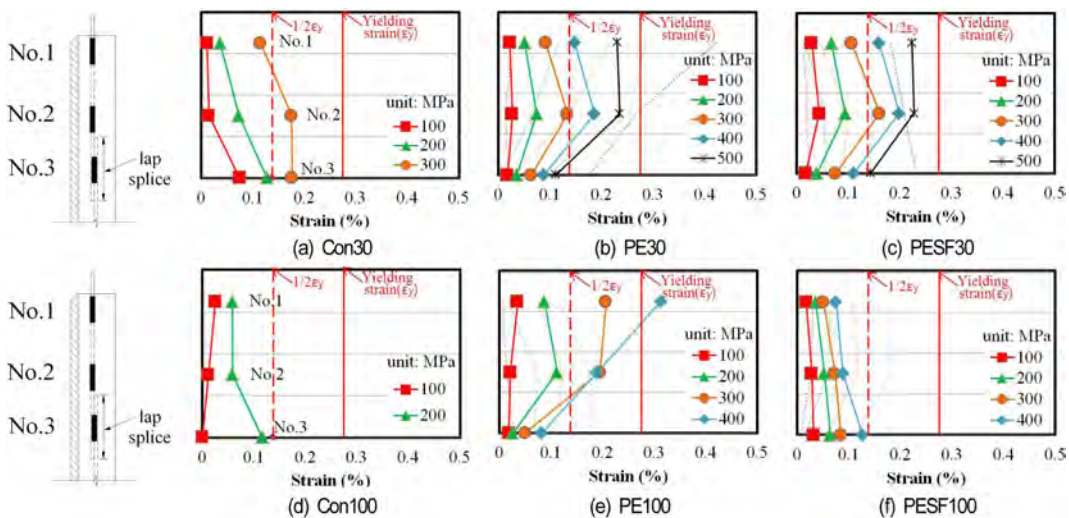


Fig. 11 Strain distribution of rebar lap-spliced in SHCC materials



이하계 균열폭이 다소 증가하는 경향을 나타내었다. PE-SHCC의 팽창재 대체에 따른 균열폭 저감은 이영오<sup>9)</sup>의 연구 결과에서와 같이 팽창재와 SHCC의 에트린자이트 생성 반응에 의해 SHCC에 도입된 응력에 의해 다수의 마이크로 균열이 생성되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 PESF-SHCC의 경우 팽창재 대체 후 동일한 변형률에서 강성이 증가하였으나, 미세한 균열 제어 능력이 우수한 PE 섬유가 상대적으로 적게 혼입됨에 따라 강성이 증가한 만큼 미세균열 제어능력이 구현되지 못한 것으로 판단된다.

### 4.3 철근 변형률

Fig. 11은 콘크리트 및 SHCC 내 철근 겹침이음부에 도입된 인장응력에 따른 각 부위의 철근 변형률을 비교하여 나타낸 것으로, 철근 변형 게이지의 부착 위치는 Figs. 1(b) 및 11과 같다. Fig. 11(a) 및 (d)의 콘크리트 실험체는 비교적 낮은 응력에서 겹침이음부가 부착 파괴를 보이며 최종 파괴되는 특성을 보였다. SHCC 실험체의 경우 팽창재를 대체하지 않은 실험체는 실선으로, 대체한 실험체는 점선으로 표현하여 함께 나타내었다. Fig. 11(b) 및 (c)에 나타난 바와 같이 팽창재를 치환하지 않은 보통강도 실험체는 PE-SHCC와 PESF-SHCC 모두 유사한 철근 변형률을 보였으나, 팽창재를 대체할 경우 PE-SHCC는 실험체 단부에서 큰 변형이 유발된 반면, PESF-SHCC는 최대 하중에 이르기까지 전 구간이 비교적 유사한 변형거동을 보였다. 고강도 실험체에서는 Fig. 11(e) 및 (f)에 나타난 바와 같이 실험체 전 구간에 마이크로 균열이 다수 발생한 PESF-SHCC 및 팽창재를 대체한 PE-SHCC의 위치에 따른 철근 변형률이 유사하게 나타났다. 따라서 SHCC의 마이크로 균열은 매트릭스 내의 인장응력을 재분배하며, 겹침이음된 철근에 응력을 고루 전달하는 역할을 하는 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

시멘트 복합체에 10%의 팽창재 대체 및 체적비 1.5%의 PE 단일섬유, 0.75%의 PE와 0.75%의 SF를 하이브리드 보강한 변형경화형 시멘트 복합체(SHCC)와 철근과의 상호작용을 평가하기 위하여 CRSC 기준의 60%로 겹침이음 길이를 감소시킨 SHCC의 겹침이음부의 직접 인장 실험을 수행하였으며 이를 분석한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) CRSC 기준에 의해 산정된 겹침이음 길이의 60%를 적용한 겹침이음한 SHCC내 철근에 대한 직접인장 실험 결과 모든 SHCC 실험체의 인장강도가 B급 이음의 허용 응력값을 상회하였으며, 최대 내력 이후에도 안정된 강도저하 및 연성적인 거동 특성을 보였다. 또한 팽창재를 대체함에 따라 초기균열응력이 크게 나타났으며, 실험체의 강성 및 최대내력도 증

가하는 경향을 보였다.

- 2) 고강도 SHCC의 경우 보통강도 SHCC에 비해 겹침이음부의 인장 성능이 낮게 평가되었다. 이는 고강도 시멘트 복합체와 철근의 상호작용이 비교적 원활하지 못함에 따른 요인과 함께, SHCC의 초기 자기수축이 크게 발생함에 따라 인장 성능에 부정적으로 작용한 것으로 판단된다. 따라서 고강도 SHCC의 경우 철근과의 상호작용 개선과 초기 자기수축 제어방안에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- 3) 실험체의 균열분산 특성을 비교한 결과 PE-SHCC가 PESF-SHCC에 비해 매크로 균열을 억제하며 응력 분산 및 마이크로 균열 생성이 크게 나타났다. 이러한 경향은 초기 균열을 제어하는 팽창재를 대체한 실험체에서 보다 뚜렷하게 나타났다.
- 4) 이 연구와 동일한 섬유조건과 55 MPa의 강도를 갖는 SHCC의 겹침이음 성능을 평가한 전에스더의 연구 결과에서 PESF-SHCC가 부착력 증대 및 균열 제어 성능이 우수한 것으로 평가되었으며, 이를 통해 대부분의 강도에서 PE-SHCC에 비해 PESF-SHCC의 겹침이음 성능이 우수한 것으로 판단할 수 있다.
- 5) 보통강도 배합을 갖는 PESF-SHCC의 경우 단일 섬유만을 사용한 PE-SHCC에 비해 철근 겹침이음부의 인장강도 및 부착강도는 다소 상회하였다. 이러한 성능은 팽창재 대체시 더욱 향상되었으나, 응력 재분배로 인한 마이크로 균열 분산 특성은 비교적 적게 나타나는 경향을 보였다. 따라서 팽창재를 대체한 보통강도의 SHCC에 강섬유를 적절하게 혼입하여 보강할 경우 철근 겹침이음부의 인장 성능을 개선할 수 있을 것으로 판단되며 보강 섬유의 혼합비를 조절할 경우 더욱 효과적인 손상 제어가 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구지원 사업(2009-0081288)의 일부이고, 이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받았으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Ezeldian, A. S. and Balaguru, P. N., "Bond Behavior of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 5, 1989, pp. 515~524.
2. Hamad, B. S., Harajli, M. H., and Jumaa, G., "Effect of Fiber Reinforcement on Bond Strength of Tension Lap Splices in High-Strength Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 5, 2001, pp. 638~647.
3. 윤현도, 전에스더, 한병찬, 양일승, "합성섬유로 보강된 고인성 시멘트 복합체내에서의 철근 겹침이음 성능," 대

- 한건축학회논문집 구조계, 21권, 12호, 2005, pp. 19~26.
4. 국토해양부 제정 콘크리트 구조설계기준, 한국콘크리트학회, 기문당, 2007, 328 pp.
  5. Mihashi, H., Otsuka, K., Akita, H., and Kikuchi, T., "Bond Cracking and Tension Stiffening Properties of a Deformed Bar Embedded in HPSHCC," *Advances in Construction Materials*, Vol. 43, No. 1, 2007, pp. 173~180.
  6. Fischer, G. and Li, V. C., "Influence of Matrix Ductility on Tension-Stiffening Behavior of Steel Reinforced Engineered Cementitious Composites (ECC)," *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 1, 2002, pp. 104~111.
  7. Li, V. C., Wang, S., and Wu, C., "Tensile Strain-Hardening Behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composites (PVAECC)," *ACI Material Journal*, Vol. 98, No. 6, 2001, pp. 483~492.
  8. 이영오, 윤현도, "팽창재 치환율에 따른 섬유보강 시멘트 복합체의 역학적 특성," 콘크리트학회 논문집, 22권, 4호, 2010, pp. 399~407.
  9. 전에스터, 윤현도, "보강 섬유 종류에 따른 고인성 시멘트 복합체내에서 철근의 겹침이음 성능," 콘크리트학회 논문집, 19권, 2호, 2007, pp. 153~161.
  10. JSCE-E-531, *Test Method for Tensile Properties of Continuous Fiber Reinforcing Materials*, 1999.
  11. Chen, P. W. and Chung, D. D. L., "A Comparative Study of Concretes Reinforced with Carbon, Polyethylene, and Steel Fibers and Their Improvement by Latex Addition," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 2, 1996, pp. 129~146.
  12. 이현수, 한동엽, 한천구, 박문서, "팽창재 및 수축 저감제가 강섬유보강 초고성능 시멘트 모르타르의 기초적 특성과 수축 저감에 미치는 영향," 대한건축학회논문집 구조계, 22권, 12호, 2006, pp. 97~104.
  13. Azizinamini, A., Pavel, R., Hatfield, E., and Ghosh, S. K., "Behavior of Lap-Spliced Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 5, 1999, pp. 826~835.
  14. Kaklauskas, G., Gribniak, V., Bacinskas, D., and Vainiunas, P., "Shrinkage Influence on Tension Stiffening in Concrete Members," *Engineering Structures*, Vol. 31, No. 1, 2009, pp. 1305~1312.
  15. Bantia, N. and Nandakumar, N., "Crack Growth Resistance of Hybrid Fiber Reinforced Cement Composites," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, No. 1, 2003, pp. 3~9.

**요 약** 이 연구는 섬유 보강 시멘트 복합체(SHCC) 내에 매립된 철근의 겹침이음 성능을 평가하고자 하였으며, 이에 따라 단조 및 반복 재하시의 겹침이음된 철근의 인장 실험을 실시하였다. 총 10개의 SHCC 및 콘크리트 배합이 계획되었으며, 실험체의 변수는 보강섬유 종류(폴리에틸렌 및 강섬유), 팽창재 대체율(0% 및 10%) 및 실험체의 설계강도(30 MPa 및 100 MPa)로 계획하였다. SHCC 및 콘크리트 배합에 매립된 철근의 겹침이음 길이는 각각 콘크리트 구조설계 기준에 의거하여 산정된 겹침이음 길이의 60% 및 100%를 적용하였다. 실험 결과 SHCC에 철근이 매립될 경우 철근의 겹침이음 성능을 향상시키는 것으로 나타났으며, SHCC 배합에서 보강 섬유 종류(PE-SHCC 및 PESF-SHCC)에 관계없이 겹침이음된 철근의 인장강도 및 부착강도 증진에 기여하는 것으로 나타났다. 또한 SHCC에 팽창재를 대체할 경우 SHCC에 매립된 철근 겹침이음부의 거동 특성을 개선하는 특징을 보였다. 한편 균열 특성에서는 배합조건 및 재료특성에 따라 PE-SHCC가 PESF-SHCC에 비해 보다 많은 미세균열 특성을 나타내었다. 전언한 바와 같이 이 연구는 SHCC의 변형경화 특성에 따라 매립된 철근과의 상호작용을 증진시킴에 따라, SHCC에 매립된 철근 겹침이음 길이를 감소할 경우에도 양호한 거동 특성을 보이는 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 겹침이음, 변형경화형 시멘트 복합체, 하이브리드 섬유, 고강도, 팽창재