



100 MPa급 수축보상 초고강도 변형경화형 시멘트 복합체를 사용한 인장부재의 인장강성 및 균열특성

송영재¹⁾ · 윤현도^{1)*}

¹⁾충남대학교 건축공학과

Tension-Stiffening and Cracking Behavior of 100 MPa Shrinkage-Compensated Ultra High-Strength Strain-Hardening Cement Composite (UHS-SHCC) Ties

Young-Jae Song¹⁾ and Hyun-Do Yun^{1)*}

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

ABSTRACT This paper investigates the cracking and tension-stiffening behavior of 100 MPa shrinkage-compensated strain-hardening cement composite (SHCC) and conventional concrete tie elements in monotonic and cyclic tension. Strain and surface crack formation of tension ties were monitored with two strain displacement transducers and a photo microscope with a lens of magnification 50 times. Three different cement composites such as conventional concrete, shrinkage-compensated SHCC, and normal SHCC were used in the tie specimens to investigate the influence of the cement composite type on the tension stiffening and cracking behavior. Test results indicated that initial shrinkage of the ultra high-strength cement composites is greatly reduced as the 10% replacement of cement by the shrinkage-compensating admixture based on calcium sulfo-aluminate (CSA). The test results on the SHCC tension ties showed that the first cracking load decreases proportionally to the initial shrinkage strain. Reinforced ultra high-strength SHCC ties with the initial shrinkage compensation exhibited improved tension stiffening and smaller crack spacings, i.e. the reduction in crack width. Cyclic loading did not have a significant effect on tension stiffening and cracking behavior of tension ties with normal concrete and SHCC materials.

Keywords : tension stiffening, shrinkage-compensating admixture, strain-hardening cement composite, shrinkage, crack behavior

1. 서 론

콘크리트와 같은 시멘트 복합체의 초기균열 발생 이후 취성적인 거동 특성을 개선하기 위하여 강섬유 등을 혼입한 섬유보강 콘크리트는 섬유를 혼입하지 않은 보통 콘크리트의 균열이후 거동을 개선하는데 효과적인 것으로 보고되고 있다.¹⁾ 이러한 섬유보강 시멘트복합체는 콘크리트의 취성적인 파괴 특성을 연성적 파괴 특성으로 전환하고 있으나 초기균열 발생이후 강도저하는 억제할 수 없는 한계점을 보였다. 따라서 ‘90년도 초반부터 기존 섬유보강 콘크리트의 초기균열 발생이후 강도저하에 따른 변형연화(strain softening)특성을 개선하기 위한 연구가 시작되었다. ‘90년대 중반, 미세역학(micro-mechanics)

에 근거하여 시멘트 복합체에 2% 내외의 유-무기 단섬유를 보강함으로써 초기균열 이후 급격한 강도저하를 억제하거나 강도를 증진시키는 변형경화(strain hardening)특성을 부여한 고성능 섬유보강 시멘트 복합체(high performance fiber reinforced cement composite, HPRFCC)가 개발 및 제안되었다. HPRFCC는 연구자들에 따라 변형 경화형 시멘트 복합체(strain-hardening cement composite, SHCC) 또는 ECC(engineering cementitious composite)라 지칭되기도 한다. 이 논문에서는 이후 고성능 섬유보강 시멘트 복합체를 SHCC라 지칭한다.

SHCC와 같이 섬유 보강된 시멘트 복합체에 변형경화 특성을 부여하기 위해서는 시멘트 복합체의 파괴에너지(fracture energy)를 제어하여야 하며 이를 위해서는 굵은 골재 대신 잔골재만이 사용된다. 또한, SHCC는 상대적으로 보통 콘크리트에 비하여 높은 단위 시멘트량이 요구되는 부배합을 갖으며 이로 인하여 높은 경화수축 특성을 보인다. 이러한 높은 초기 수축량은 SHCC에 하중의

*Corresponding author E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr
 Received October 10, 2012, Revised March 12, 2013,
 Accepted April 1, 2013
 ©2013 by Korea Concrete Institute

작용 이전에 균열을 유발하여 SHCC와 철근의 상호작용을 저해하는 요인으로 작용된다.

따라서, 최근 SHCC의 수축보상 방안으로 다양한 방법이 모색되고 있다.^{2,3)} 선행연구³⁾에 의하면 폴리에틸렌(polyethylene, PE) 및 강섬유를 혼입한 100 MPa급 고강도 SHCC에서 CSA(calcium sulfo-aluminate)계 팽창재를 시멘트 중량비 10% 대체시 보통 SHCC 및 콘크리트에 비하여 초기 수축량을 보상시키며 직접인장 및 휨성능을 향상시키는 것으로 보고되고 있다.

이에 이 논문에서는 선행연구에서 개발된 100 MPa 급 고강도 수축 보상형 SHCC를 사용한 인장재의 단조 및 반복 인장하중 하에서 인장강성 및 균열특성을 평가하고자 한다. 또한, 수축보상에 따른 고강도 SHCC 인장재의 인장강성 및 균열특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수축 보상되지 않은 고강도 SHCC 및 콘크리트 인장재의 인장거동 특성파도 비교·분석을 통해 CSA계 팽창재 대체에 따른 고강도 SHCC의 인장강성 거동특성을 파악하고자 한다.

2. 고강도 SHCC의 구성재료 및 성능

2.1 사용재료 및 시험방법

100 MPa급 고강도 SHCC 및 콘크리트를 제조하기 위하여 국내산 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 SHCC의 보강섬유로 일본산 PE 및 국내산 후크형 강섬유(steel fiber, SF)를 각각 0.75%씩 총 1.5%를 혼합하여 사용하였다. 또한 CSA계 팽창재의 경우 비중 2.9 kg/m³, 분말도 3350 cm³, PE 섬유유의 경우 비중 0.97 kg/m³, 길이 12 mm, SF섬유의 경우 비중 7.86 kg/m³, 길이 32 mm인 것을 각각 사용하였다.

Table 1 Proportions of cement composites

Cement composite type	W/B (%)	EXA replacement level (%)	Fiber volume fraction (%)		Water (kg/m ³)	Unit weight (kg/m ³)									
			SF	PE		Cement	EXA ⁽¹⁾	Silica fume	Silica sand	PE ⁽²⁾ (S)	SF ⁽³⁾	G ⁽⁴⁾	S ⁽⁵⁾	AE ⁽⁶⁾	A ⁽⁷⁾
Con100	18	0			160	888	-	088	-	-	-	835	546	22	-
PESF100-0	20	0	0.75	0.75	319	1409	-	245	163	7	58	-	-	33	7
PESF100-10	20	10			319	1268	140	247	165	7	58	-	-	33	7

* PESF100-10: PESF (fiber type), 100 (design strength), 10 (EXA replacement level)

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

Table 2 Results of compressive, direct tensile and flexural tests

Composite type	Items	Compression		Direct tension		Flexure	
		Strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Strength (MPa)	Strain (%)	Strength (MPa)	Deflection (mm)
Con100		90 ± 7.6	37 ± 2.5	-	-	-	-
PESF100-0		94 ± 10.0	29 ± 1.2	6.8 ± 0.2	0.6 ± 0.2	16.8 ± 0.2	1.3 ± 0.8
PESF100-10		92 ± 5.3	29 ± 2.1	6.7 ± 0.5	0.6 ± 0.3	17.8 ± 1.4	1.2 ± 0.3

SHCC의 휨 및 압축시험은 한국산업규격(KS)에 준하여 실시되었으며, SHCC의 공인된 직접인장시험방법은 현재 일본토목학회(JSCE)에서만 규정하고 있어 JSCE 시험법을 적용하였다.

2.2 SHCC의 역학적 특성

Table 2는 각 시멘트 복합체의 압축, 직접인장, 휨 시험 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Table 2의 시험 결과는 3개 시험체의 평균값을 나타낸다. SHCC의 압축강도는 팽창재 대체에 따라 큰 차이는 보이지 않았으며 Con100의 압축강도 역시 SHCC와 큰 차이를 보이지 않았다. 탄성계수에 있어서 굵은 골재를 포함한 콘크리트가 SHCC에 비하여 22% 높게 나타났으나 SHCC에서 수축보상여부에 따른 탄성계수 변화는 보이지 않았다.

Fig. 1은 수축보상여부에 따른 SHCC 덤벨형(Dumbbell-

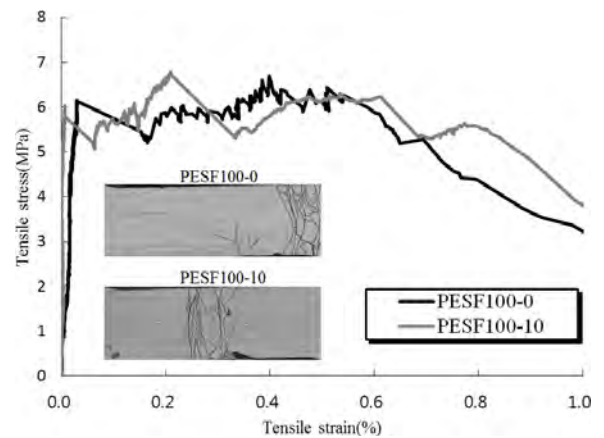


Fig. 1 Tensile response and crack pattern of SHCC

shaped) 인장시험체에 대한 전형적인 직접인장거동 및 균열특성을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 1에서 각 배합별 3개의 시험체중 배합의 평균적인 경향을 가장 잘 나타낸 시험체의 결과를 나타내었다. 두 배합의 전체적인 인장 거동 특성은 큰 차이를 보이지 않았으며 수축 보상형 SHCC(PESF100-10 배합)의 평균 직접인장강도는 6.7 ± 0.5 MPa, 보통 SHCC(PESF100-0 배합)의 평균 직접인장강도는 6.8 ± 0.2 MPa로 유사하게 나타났다. 또한, 미세 균열의 분산은 팽창제 대체 유무와 관계없이 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 이현수⁴⁾의 논문에서 나타난 팽창제 혼입 시 보고된 팽창제 및 수축저감제 사용한 강섬유 보강된 고강도 섬유보강 시멘트 복합체의 쪼갬인장강도가 낮아지는 결과와는 다소 상이하다.

수축 보상형 SHCC의 평균 휨강도는 17.8 ± 1.4 MPa, 보통 SHCC의 평균 휨강도는 16.8 ± 0.2 MPa로 수축 보상된 SHCC에서 다소 높게 나타났으나 휨강도시 중앙부 처짐량은 두 배합에서 유사하게 나타났다. 수축시험 결과에서 PESF100-10 배합의 수축변화량이 PESF100-0 배합에 비해 낮게 나타남에 따라 휨시험체 내부 매트릭스에서 수축균열이 상대적으로 적게 나타나 휨강도가 다소 높은 것으로 판단된다.

2.3 SHCC의 수축특성

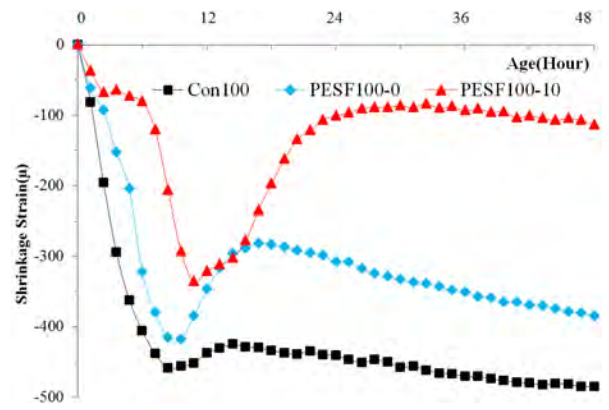
Fig. 2(a) 및 (b)는 KS F 2424에 준하여 항온 항습실 ($20\pm 2^\circ\text{C}$, RH 60%)에서 2일 및 90일 동안 두 배합의 SHCC 및 콘크리트에 대한 비 구속 수축 길이 변형량을 각각 비교하여 나타낸 것이다. 3은 수축시험 결과를 요약해서 나타낸 것이다. 특히 최대 수축량(maximum shrinkage, A)은 Fig. 2(a)에서 각 배합별 12시간 이전 최대수축이 일어난 양을 나타낸 것이다. 최대 팽창량(maximum expansion, B)은 각 배합별 A 시점 이후의 최대 팽창량을 나타낸 것이다.

Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 보통 SHCC 및 콘크리트의 타설 이후 경화에 따라 수축이 진행되어 타설후 약 10시간이 경과된 시점에서 최대 값에 이르렀다. 반면 수축 보상형 SHCC는 두 시멘트 복합체에 비하여 다소 늦은 시간에 최대 수축에 도달되었다. 콘크리트, 보통 SHCC 및 수축 보상형 SHCC의 최대 수축량은 $452\ \mu$, $414\ \mu$ 및 $327\ \mu$ 로 수축 보상형 SHCC는 보통 SHCC에 비하여 초기 경화 수축량이 21% 저감되었다. 이후 수축 보상형 SHCC의 팽창량은 보통 SHCC에 비하여 83% 증가되어 종국적으로 재령 90일 시점에서의 최종 수축량이 43% 감소되었다.

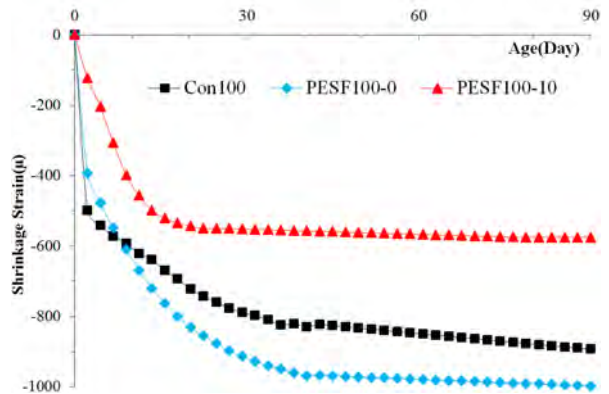
3. 고강도 SHCC 인장재의 거동 특성

3.1 실험계획

수축 보상형 고강도 SHCC 인장재의 인장 및 균열거동



(a) Free shrinkage during 48 hours



(b) Free shrinkage during 90 days

Fig. 2 Free shrinkage strain of cement composites

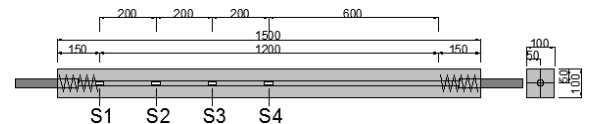


Fig. 3 Dimension and configuration of tension ties (unit: mm)

특성을 평가하기 위하여 시멘트 복합체의 종류 및 가력 방법을 주요변수로 이 연구에서는 총 6개의 실험체를 계획하였다. Fig. 3은 인장부재의 형상, 단면치수 및 철근 변형률 계측을 위하여 철근 표면에 부착된 와이어 변형률계이지(wire strain gauge, WSG)의 부착위치를 나타낸 것이다. 인장재의 단면은 $100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}$, 길이는 1500 mm이며, 균열 및 변형률 계측 구간은 1200 mm로 각 실험체의 중앙부에 직경 16 mm인 이형철근을 매립하였다. 실험체의 중앙부 1200 mm 구간에서 인장재의 변형률을 측정하기 위하여 변위계(strain displacement transducer, SDT)를 실험체 양 측면에 각각 설치하였다. 실험체 제작시 사용된 시멘트 복합체의 역학적 특성은 Table 2와 같고 공칭직경 16 mm인 이형철근의 항복강도 및 항복 변형률은 각각 513 MPa 및 $2704\ \mu$ 로 나타났다. 또한, 인장강도 및 탄성계수는 각각 646 MPa 및 192 GPa로 나타났다.

3.2 실험방법

인장재에 도입된 인장력은 인장재의 단부에서 돌출된

철근을 통하여 실험부위의 철근과 시멘트 복합체에 전달 되도록 Fig. 4와 같이 1000 kN 용량의 유압잭을 통하여 도입하였다. 재하는 0.05 mm/min 속도로 인장재의 중앙부에 설치된 2개의 SDT에 의해 계측된 변위로 제어하였으며, 단조재하 및 반복재하를 통한 각 시멘트 복합체의 인장강성 및 균열특성을 평가하였다. 인장재에 도입된 반복하중의 재하방법으로 인장재 중앙부에 부착된 2개 SDT에 의한 평균 변형률이 1000 μ , 2000 μ , 4000 μ 되었을 때 인장력을 제하 후 재하 하는 변위이력을 적용하였다.

3.3 인장재의 거동 특성

Fig. 5는 3종류의 시멘트 복합체(Con100, PESF100-0, PESF100-10)를 사용한 인장재의 중앙부에 배치된 단일 철근에 도입된 인장응력(T)과 인장재의 변형량 계측구간에서 측정된 인장재의 평균 변형률을 비교하여 나타낸 것이다. 인장재의 변형률은 도입된 인장력하에 중앙부 계측구간 1200 mm에 설치된 2개 SDT에서 계측된 변형량의 평균값을 계측구간의 길이 1200 mm로 나누어 산정하였고 인장응력은 도입된 인장력을 D16 철근의 단면적으로 나누어 산정하였다.

Fig. 5(a)는 단조재하시 인장재의 인장거동을 비교하여 나타낸 것으로 PESF100-0를 사용한 인장재의 초기균열 응력이 세 타입의 시험체중 가장 낮게 나타났으며, 수축 보상형 SHCC를 사용한 인장재의 초기 균열강도 및 강성은 보통 SHCC 및 콘크리트에 비하여 다소 높게 나타났다. 부배합을 갖는 보통 SHCC 인장재의 이러한 특성은 이전 연구에서도 보고된 바 있다.^{5,6)}

이는 Fig. 2 및 Table 3에 나타난 바와 같이 수축 보상되지 않은 부배합의 SHCC(PESF100-0)는 경화과정에서 나타난 최대 팽창이후 재령 90일에 이를 때까지의 최대 수축량이 보통 콘크리트 및 수축 보상형 SHCC에 비하여 평균 1.5배 이상 크게 나타남에 따라 인장재에 미소한 수축균열의 발생과 SHCC와 철근의 부착력이 저하되어 조기의 수축균열 발생과 폭넓은 균열분산이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 최대 팽창이후 최대 수축량이 유사하게 나타난 보통 콘크리트 및 수축 보상형 SHCC를 사용한 인장재의 인장거동은 인장재에 작용된 인장응력이 철근의 항복강도에 이르기 이전까지는 유사하게 나타났다. 도입된 인장응력이 철근 항복강도에 이르며 철근콘크리트 인장재의 중앙부에 발생된 균열 폭이 급격히 증가되며 변형이 증가되는 경향을 보였다. 반면

SHCC를 사용한 인장재에 있어서 보통 콘크리트와 상이하게 미세한 균열이 폭넓게 분산되며 철근의 항복 변형률을 초과하는 대변형 하에서도 SHCC가 인장재에 도입된 인장력의 일부를 부담하며 인장재의 항복강도 및 항복 변형률을 증진시키는 것으로 나타났다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 부배합의 SHCC에 대한 수축 보상효과는 단조 재하시 SHCC 인장재의 항복이전까지 인장거동 특성에 큰 영향을 끼치고 있으나 항복이후의 거동에서는 큰 차이를 보이지 않았다.

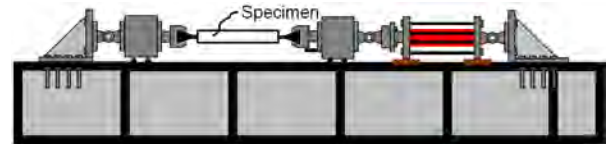
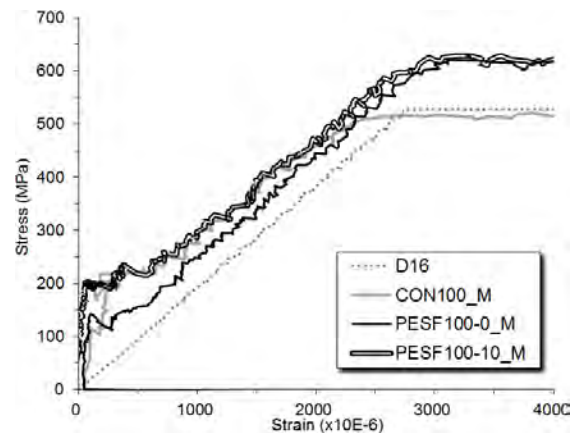
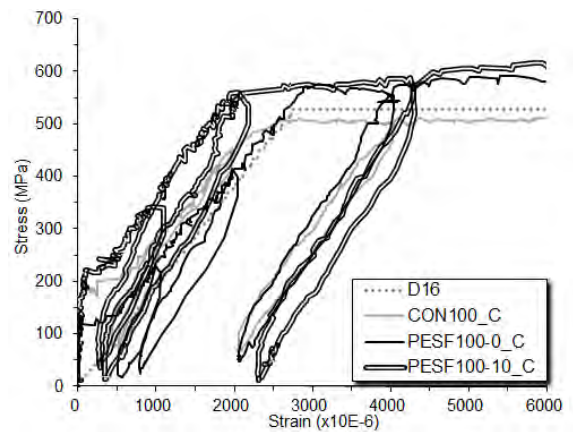


Fig. 4 Testing set-up for tension ties



(a) Tensile response under monotonic loading



(b) Tensile response under cyclic loading

Fig. 5 Tensile stress-strain curves of tension ties

Table 3 Test result of free shrinkage (unit: μ)

Type	Maximum expansion (B)	Maximum shrinkage (A)	Final shrinkage (C)	Maximum expansion after shrinking (B-A)	Shrinkage after maximum expansion (C-B)
Con100	-431	-452	-891	21	-460
PESF100-0	-285	-414	-1000	129	-715
PESF100-10	-91	-327	-574	236	-483

Fig. 5(b)는 반복하중 하에서 각 시멘트 복합체를 사용한 인장재의 응력-변형을 관계 곡선을 비교하여 나타낸 것으로 SHCC 인장재의 경우 단조 재하시와 큰 차이는 보이고 있지 않다. 이는 반복하중 하에서도 시멘트 복합체의 균열을 시멘트 복합체에 보강된 단섬유가 가교하여 균열폭의 증가를 억제함으로써 철근과 시멘트 복합체의 부착력 저하를 방지하였기 때문인 것으로 판단된다. 반면 철근콘크리트 인장재의 경우, 단조 재하시 항복 이전까지 수축 보상형 SHCC와 대등한 인장강성 효과를 나타냈으나 반복 하중하에 초기균열 발생이후 인장강성 효과가 급격하게 저하되는 경향을 보였다. 이러한 특성은 30 MPa급 보통강도 콘크리트를 사용한 반복 하중을 받는 인장재에서도 보고되었다.⁵⁾ 이와 같이 철근콘크리트 인장재에 반복 하중의 작용시 나타난 급격한 인장강성의 저하는 반복하중에 따른 콘크리트의 급격한 균열폭 증가 및 이로 인한 철근과 콘크리트의 조기 분리에 따른 것으로 판단된다. SHCC의 수축 보상효과는 단조 재하시와 같이 반복 재하시에도 인장재의 항복이전까지 인장강성 증진 및 항복이후 항복강도 증진에도 효과적인 것으로 나타났다.

3.4 최종 파괴양상

단조재하시 각 시멘트 복합체를 사용한 인장재의 최종 파괴 양상을 비교하여 Fig. 6에 나타냈다. 그림에 나타난 바와 같이 단조재하된 철근콘크리트 인장재(Con100_M)는 재하 초기단계(인장응력 104 MPa)에 중앙부에서 수직 균열이 발생되었으며 이후 도입된 인장력이 증가됨에 따라 이러한 균열은 단부로 점진적으로 진전되었다. 이후 철근의 항복 변형률에 이르며 이미 발생한 수직균열을 연결하는 쪼갬균열(splitting cracks)이 유발되며 최종 파괴되는 양상을 보였다. 반복 하중하에서 유사한 파괴양상을 보였으나 균열 및 부착력 상실에 따른 철근과 콘크리트의 분리가 단조 재하시에 비하여 빠르게 발생되었다. 수축 보상형 SHCC를 사용한 인장재는 단조 및 반복 하중 하에서 Fig. 6(c)에 나타난 바와 같이 미세한 균열이 폭 넓게 분산되어 발생되었다. 이러한 미세한 균열은 인장강성 및 철근의 항복강도 증진에 크게 기여하고 있는

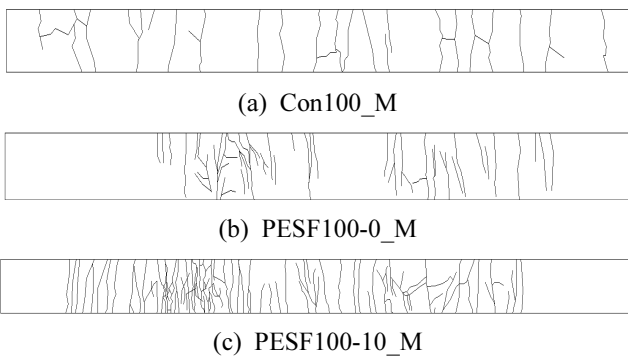


Fig. 6 Crack patterns of ties in monotonic loading

것으로 판단된다. 반면 Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 보통 SHCC를 사용한 인장재에 발생된 균열은 수축 보상형 SHCC 인장재에서 나타난 균열에 비하여 국부적으로 분산되었으나 균열 폭은 시멘트 복합체내의 단섬유에 의해 효율적으로 제어되었다. 보통 SHCC 인장재에서의 국부적인 균열분포는 시멘트 복합체의 과도한 수축에 따른 수축균열과 철근과의 부착력 상실에 따른 것으로 판단된다.

3.5 철근의 변형률

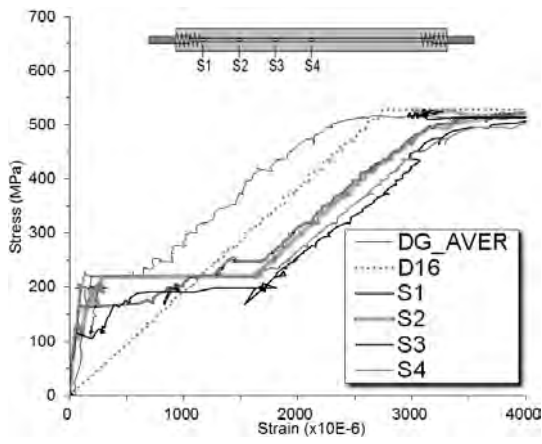
이 논문에서는 부배합인 고강도 SHCC 인장재에서 경화 수축 보상에 따른 인장강성 특성을 비교 평가 하였다. 특히 인장재의 중앙부에 배근된 철근 4개소(S1, S2, S3, S4)의 WSG 변형률 데이터 비교를 통해 매트릭스와 철근간의 응력분포 및 부착특성을 파악하고자 하였다.

Fig. 7은 수축 보상형 SHCC, 보통 SHCC 및 콘크리트를 사용한 인장재에서 단조 및 반복 재하된 인장응력과 4개소에서 측정한 철근 변형률의 관계를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 7(a)와 같이 단조 재하된 콘크리트 인장재는 104 MPa의 인장응력에 이르러 초기균열이 발생된 위치에 인접한 WSG의 변형률이 1800 μ 까지 급격하게 증가되었다. 이후 균열이 진전됨에 따라 균열 발생 부위에 인접한 WSG의 변형률도 급격하게 증가되었다. 보통 및 수축 보상형 SHCC 인장재의 인장응력-철근 변형률 관계를 나타낸 Fig. 7(b) 및 (c)에서도 초기균열 발생시점에 철근의 변형률이 증가되는 유사한 경향을 보이고 있으나 철근 변형률의 증가량이 800-900 μ 로 콘크리트 인장재에서 보다는 현저하게 감소되었다. 이는 SHCC를 구현하기 위하여 보강된 단섬유가 균열면을 가교하며 작용된 인장력을 일부를 부담하여 상대적으로 철근이 부담하는 인장력이 감소하였기 때문인 것으로 판단된다. 최대 팽창이후 수축량이 유사한 콘크리트와 수축 보상형 SHCC의 초기균열 강도는 유사한 반면 최대 팽창이후 수축량이 두 시멘트 복합체의 2배에 이른 보통 SHCC의 초기균열 강도는 콘크리트와 수축 보상형 SHCC의 초기균열 강도의 1/2로 나타났다.

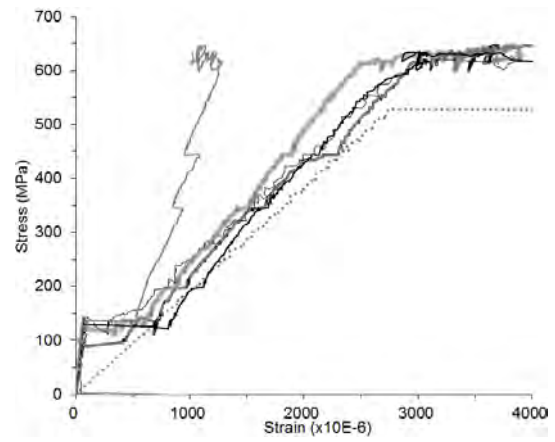
반복 재하된 각 인장재에 보강된 철근의 응력-변형률 관계곡선을 Fig. 7(d)~(f)에 각각 나타내었다. 전반적으로 단조 재하시 인장재와 유사한 거동 특성을 보였다. 그러나 Con100_C 인장재에서는 반복재하 사이클이 증가할수록 잔류 균열폭 및 철근의 잔류변형이 증가되어 급격한 인장강성 저하 특성을 보였다. SHCC 인장재에서도 유사한 경향을 보이고 있으나 섬유의 가교작용에 따른 매트릭스내 응력재분배로 인하여 보통 콘크리트를 사용한 인장재에 비해서는 현저하지 않았다.

3.6 인장강성 특성

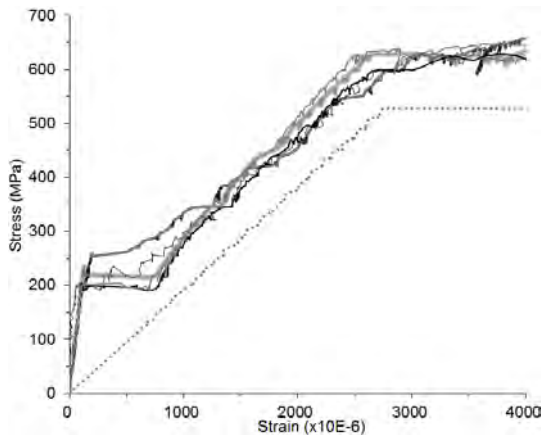
인장재에서 시멘트 복합체가 부담하는 평균 인장응력



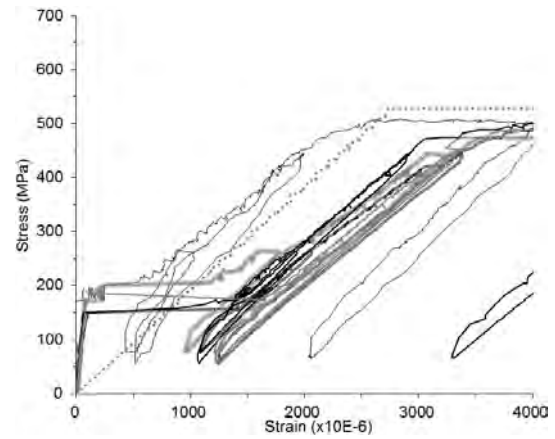
(a) Con100_M



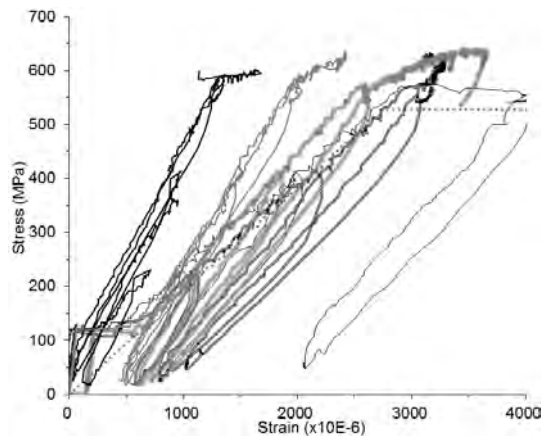
(b) PESF100-0_M



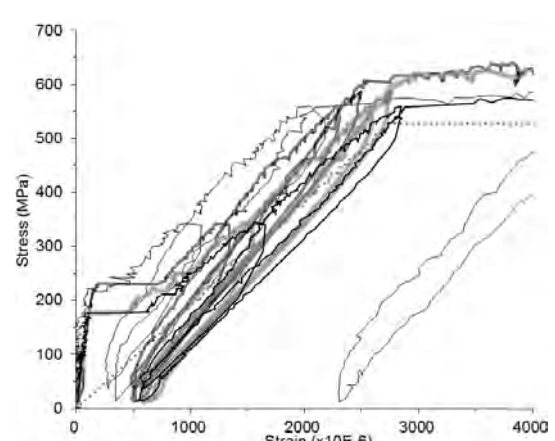
(c) PESF100-10_M



(d) Con100_C



(e) PESF100-0_C



(f) PESF100-10_C

Fig. 7 Local strain in the reinforcement of tension ties

(f.)은 식 (1)에 의해 구할 수 있으며 이를 인장강성 실험 결과를 근거로 평가된 인장재의 균열강도(f_{cr})로 나누어 식 (2)와 같이 정의되는 부착계수(β)를 구할 수 있다. 부착계수는 균열강도로 무차원화된 균열이 발생 이후 인장재를 구성하는 시멘트 복합체가 부담하는 평균 인장응력, 즉 인장강성 특성을 평가할 수 있는 자료가 된다.

$$f_c = \frac{N - E_s A_s \varepsilon}{A_c} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{f_c}{f_{cr}} \quad (2)$$

여기서, N = 각 단계별 하중(N)

- A_s = 철근 면적(mm²)
- A_c = 철근의 면적을 제외한 인장재의 면적(mm²)
- E_s = 철근의 탄성계수(MPa)
- ϵ = 인장재의 변형률
- β = 부착계수(bond factor)
- f_{cr} = 균열응력(MPa)
- f_c = 인장응력(MPa)

Fig. 8은 보통 콘크리트(β_c), 섬유보강 콘크리트(β_f) 및 SHCC(β_s)의 부착계수를 각각 비교하여 나타낸 것이다. β_c 와 β_f 는 Bischoff⁷⁾에 의해 수행된 실험 결과를 근거로 하며 아울러 이 연구에서 수행된 보통 콘크리트, 수축 보상형 및 보통 SHCC의 부착계수와 비교하여 나타내었다. 또한 Collins와 Mitchell의 제안식⁸⁾도 비교하여 나타내었다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 Con100 배합에 비해서 SHCC 인장재의 부착계수 즉 인장강성 효과가 높게 나타났다. 보통 콘크리트를 사용한 인장재의 경우 축방향 변형률이 1000 μ 에 이르러 급격하게 균열 폭이 증가되며 콘크리트와 철근사이의 응력분배가 원활히 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 수축 보상된 SHCC를 사용한 인장재에서는 PE 및 SF섬유에 의한 균열폭 제어와 팽창재의 수축보상 효과로 인한 부착 증진으로 인해 인장재내에서의 효율적인 균열분산으로 인하여 철근의 항복시점(2704 μ)까지 부착계수가 보통 SHCC에 비해서 다소 높은 양상을 나타내었다. 하지만 2000 μ 이후 보통 SHCC 및 수축보상형 SHCC의 부착계수가 비슷한 양상을 보였으며 이는 수축보상형 SHCC의 수축 저감 효과가 초기균열 발생 등 인장재의 초기 인장거동에 영향을 끼치고 있으나 철근의 항복이후 인장재의 거동에는 영향 크지 않기 때문으로 판단된다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 Collins와 Mitchell의 제안식은 고강도 콘크리트의 인장강성 특성을 과대평가하는 경향을 보이고 있으나 SHCC 특히 수축 보상형 SHCC의 인장강성 특성을 평가하는데 적정한 것으로 판단된다.

3.7 균열거동

수축 보상 여부에 따른 SHCC 인장재의 균열거동 특성을 평가하기 위하여 초기균열하중, 0.5 f_y (매립 철근 항복강도의 50%), 0.8 f_y , f_y 의 인장력 재하단계에서 인장재의 구간별로 발생한 균열 수와 각 구간의 평균 균열 폭을 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 재하 하중단계별 발생한 균열 수 및 폭은 50배 확대 가능한 현미경(micro scope)를 사용하여 인장재 중앙부 1200 mm 구간에서 측정되었다.

Fig. 9(a)에 나타난 바와 같이 보통 콘크리트 인장재는 초기 균열 발생이후 재하 하중이 증가됨에 따라 새로운 균열 발생은 크지 않은 것으로 나타났다. 반면 Fig. 9(b) 및 (c)에 나타난 바와 같이 SHCC를 사용한 인장재에 있어서 재하 단계별로 인장재에 다수의 균열이 대체로 균

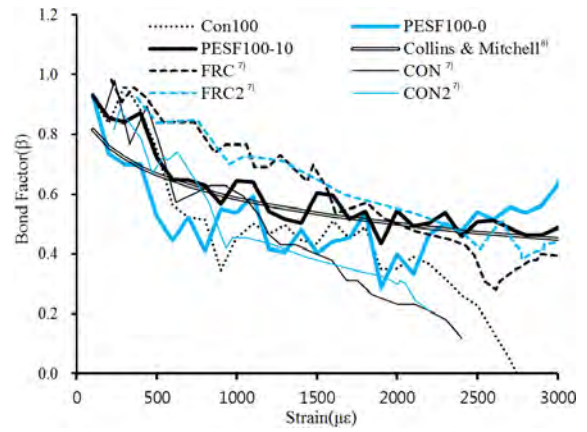
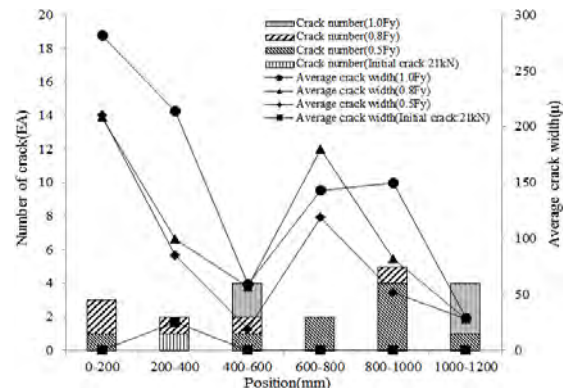
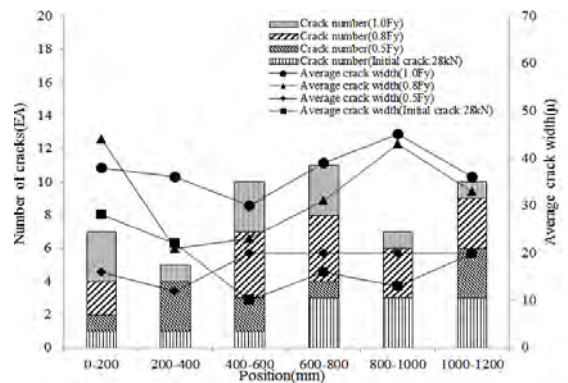


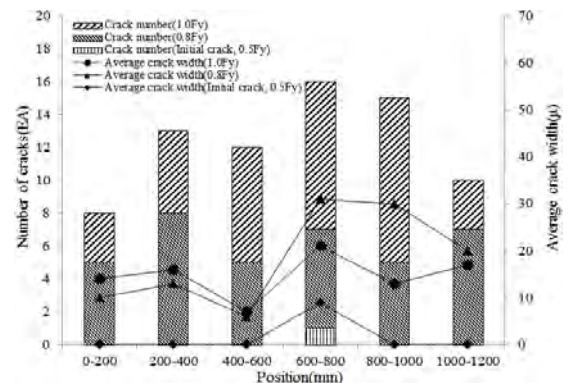
Fig. 8 Tension-stiffening bond factors (β)



(a) Con100_M



(b) PESF100-0_M



(c) PESF100-10_M

Fig. 9 Crack distribution over 1200 mm measuring length of ties under monotonic loading

등하게 증가되고 있는 것으로 나타났다. 특히 수축 보상된 SHCC 인장재의 경우 철근의 항복시점까지 재하 하중이 증가됨에 따라 보통 SHCC 인장재에 비하여 현저하게 균열 수가 증가되고 있는 것으로 나타났다. 이는 SHCC의 초기 경화 수축보상에 따라 철근과 SHCC의 부착이 수축 보상되지 않은 SHCC에 비하여 양호하게 이루어짐으로 인장재의 넓은 영역에 이르러 응력재분배가 원활하게 나타남에 따라 균열이 폭 넓게 다수 발생된 것으로 판단된다.

또한 Fig. 9에서 Con100_M의 평균 균열 폭의 경우 0.5f_y에서 크게 증가한 후 1.0f_y까지 점진적으로 증가하는 양상을 보였다. 또한 균열 폭의 경우 가장 작은 곳과 큰 곳의 차이가 최대 4배 났으며 이에 따른 인장재의 균열 계측구간에서 균열 분산이 적절하게 이루어지지 않는 것으로 평가된다. PESF100-0_M 인장재에서 초기균열 발생 시점인 28 kN에서부터 약 10 μm를 상회하는 평균 균열 폭을 보였으며 1.0f_y까지 균열 폭이 꾸준히 증가되어 최대 약 45 μm까지 증가되었다. 수축 보상된 SHCC를 사용한 PESF100-10_M 인장재의 경우 0.5f_y에서 초기균열이 발생하였고 이후 1.0f_y까지 평균 균열 폭이 점진적으로 증가되며 최대 30 μm에 이르렀다. 수축 보상된 SHCC를 사용한 인장재는 보통 SHCC를 사용한 인장재에 비해서 초기 균열 하중이 높게 나타났으며 평균 균열 폭 또한 다소 작은 양상을 나타내고 있는바 SHCC의 수축보상은 초기균열 및 균열폭 제어에 효과적인 것으로 평가된다.

Fig. 10은 반복재하시 각 인장재의 항복시점에 도달된 평균 변형률 2000 μ에서 인장재 균열 계측구간에 발생한 균열 폭과 균열수를 비교하여 나타낸 것이다. 계측 결과 단조재하된 인장재에서와 같이 보통 콘크리트를 사용한 Con100_C 인장재의 균열 분산이 가장 낮게 나타남과 동시에 평균 균열 폭이 가장 큰 것으로 나타났다. 수축 보상된 SHCC를 사용한 PESF100-10_C 인장재의 경우 균열 분산이 수축보상 되지 않은 SHCC 인장재에 비해 높게 나타났으며 평균 균열 폭도 PESF100-0_C 인장재에 비해서 다소 작게 나타났다. 이러한 특성은 전술한 단조재하

된 인장재에서 보다 현저하게 나타났다. Fig. 9 및 10에서 각 인장재의 균열수와 균열 폭의 분포가 인장재 중앙을 기준으로 다소 상이하게 나타났으며 특히 Con100, PESF100-0, PESF100-10 순으로 비대칭성이 크게 나타났다. 콘크리트 인장재의 경우 인장력 재하에 따라서 응력 분포가 균일하게 나타나지 못하여 대칭성이 낮게 나타났고, 또한 보통 SHCC를 사용한 인장재의 경우는 응력 분포가 콘크리트 시험체에 비해서 균일하게 나타났다. 수축 보상된 SHCC를 사용한 인장재인 PESF100-10의 경우 타설 후 매트릭스의 길이변화가 3종의 시멘트 복합체 중에서 가장 낮게 나타난 바, 상대적으로 초기 수축균열 발생의 가능성이 낮고 철근과의 부착이 인장재 전구간에 균일하게 이루어져 균열 수와 균열 폭이 다른 인장재에 비해서 안정적이고 균등하게 분포되었다. 이상과 같은 결과를 근거로 이 연구에서 제안된 수축 보상된 SHCC는 철근콘크리트 부재의 균열 손상제어에 효과적인 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 논문에서는 100 MPa급 초고강도 SHCC에서 시멘트 중량의 10%를 CSA계 팽창제로 대체하여 초기 수축을 보상한 SHCC를 사용한 인장재의 인장강성 및 균열거동 특성을 평가하였다. 이를 위하여 보통 콘크리트, 보통 SHCC 및 수축 보상된 SHCC를 사용한 총 6개의 인장재 제작하여 단조 및 반복재하 실험을 실시하였으며 실험 결과를 근거로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 이 연구에서 제안된 수축 보상된 SHCC의 역학적 특성은 팽창제를 대체하지 않은 보통 SHCC와 전반적으로 큰 차이는 보이지 않았다. 그러나 수축 보상된 SHCC의 직접인장시 초기균열강도 및 균열특성, 휨강도는 보통 SHCC에 비하여 다소 개선되는 경향을 보였다.
- 2) 수축 보상된 SHCC는 타설 후 12시간 시점에서 최대 수축량을 보였으며 콘크리트 및 보통 SHCC에 비하여 최대 수축시점이 다소 늦게 나타났다. 이후 수축 보상이 이루어지며 타설 후 48시간 시점에서 잔여 수축량은 보통 SHCC의 3.5배, 콘크리트의 4.5배 낮게 나타났으며 재령 90일 최종 수축량은 보통 SHCC에 비해 약 43% 감소되었다.
- 3) 단조 및 반복재하시 철근 보강된 SHCC 인장재의 인장강성 특성은 보통 콘크리트에 비하여 우수하게 나타났으며, 수축 보상된 SHCC를 사용한 인장재에서 특히 현저하였다. 특히 수축 보상형 SHCC는 인장재의 초기 인장강성특성 개선에 효과적인 것으로 나타났다. 단조 및 반복재하 조건에 따른 인장강성 특성은 콘크리트 인장재를 제외하고 SHCC 인장재에서는 큰 차이를 보이지 않았다.
- 4) 수축 보상형 SHCC를 사용한 인장재에 발생한 균열은 단조 및 반복재하시 모두 콘크리트와 보통

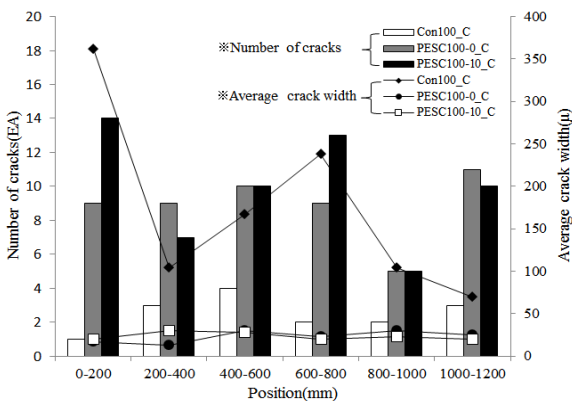


Fig. 10 Crack distribution comparison of ties under cyclic loading at strain 2000 μ

SHCC 인장재에 비하여 폭넓게 분산되는 특성을 보였다. 이로 인해 평균 균열 폭은 감소되었으나 철근의 항복이후 대변형 시점에서는 보통 SHCC 인장재와 큰 차이를 보이지 않았다.

감사의 글

이 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신 인력양성사업(2011-06-대-06-053)과 중견연구자지원사업 (2011-0015271)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. 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.
2. Cosson, D. and Hoogeveen, T., "Internal Curing of High-Performance Concrete with Pre-soked Fine Lightweight Aggregate for Prevention of Autogenous Shrinkage Cracking," *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, Issue 6, 2008, pp. 757-765. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.02.001>)
3. Kim, S. H., Lee, Y. O., Kim, H. J., and Yun, H. D., "Influence of Water-Binder Ratio and Expansion Admixture on Mechanical Properties of Strain-Hardening Cement-Based Composite with Hybrid Steel and Polyethylene Fibers," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 3, 2012, pp. 233-240. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.3.233>)
4. Lee, H. S., Han, D. Y., Han, C. G., and Park, M. S., "Effect of Expanding Admixture and Shrinkage Reducing Agent on Basic Properties and Shrinkage Reducing Properties of Ultra High Performance Cement Mortar," *AIK Structural Journal*, Vol. 22, No. 12, 2006, pp. 97-104.
5. Fischer, G. and Li, V. C., "Influence of Matrix Ductility in Tension-Stiffening Behavior of Steel Reinforced Engineered Cementitious Composite (ECC)," *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 1, 2002, pp. 104-111.
6. Yun, H. D., Yang, I. S., Han, B. C., Jeon, E., and Kim, S. W., "Experimental Study on Tension Stiffening Behavior in High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites (HPFRCCs)," *AIK Structural Journal*, Vol. 21, No. 10, 2005, pp. 27-36.
7. Bischoff, P. H., "Tension Stiffening and Cracking of Steel Fiber-Reinforced Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, No. 2, 2003, pp. 174-182.
8. Collins, M. P. and Mitchell, D., *Prestressed Concrete Structures*, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, 1991, 766 pp.

요약 이 논문에서는 100 MPa 수축보상된 초고강도 변형경화형 시멘트 복합체 및 보통 콘크리트를 사용한 인장부재의 단조 및 반복재하시 인장강성 및 균열특성을 비교·평가하였다. 재하단계별 인장부재의 전체 변형률 및 표면균열 특성은 인장부재의 양측에 설치된 두 개의 변위계와 50배율 확대 가능한 계측기에 의해 측정되었다. 시멘트 복합체의 특성에 따른 인장부재의 인장강성 및 균열특성을 평가하기 위하여 보통 콘크리트, 수축보상 변형경화형 시멘트 복합체 및 보통 변형경화형 시멘트 복합체 등 세 종류의 시멘트 복합체가 사용되었다. 실험 결과, 초고강도 변형경화형 시멘트 복합체의 시멘트 중량의 10%를 팽창재로 대체 시 초기 수축량은 현저하게 감소되었으며 인장부재의 초기균열강도도 증가되는 경향을 보였다. 수축보상된 초고강도 변형경화형 시멘트 복합체를 사용한 인장부재는 재하 단계별로 균열이 부재길이 전면에 확산되고 균열폭이 감소되어 인장강성 특성을 개선하였다. 반복재하시 인장부재의 인장거동 특성은 단조재하시와 큰 차이를 보이지 않았다.

핵심용어 : 인장강성, 수축보상 혼화재, 변형경화형 시멘트 복합체, 수축, 균열거동