압축강도와 팽창재 대체에 따른 폴리에틸렌 합성섬유로 보강된 변형 경화형 시멘트 복합체의 역학적 특성

Influence of Cement Matrix's Compressive Strength and Replacement of Expansive Admixture on the Mechanical Properties of Synthetic Polyethylene (PE) Fiber-Reinforced Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCCs)

송 영 재¹⁾
Song, Young Jae

윤 현 도^{2)*}
Yun, Hyun Do

민 병 성³⁾
Min, Byung Sung

六郷 惠哲⁴⁾
Keitetsu ROKUGO

Abstract

In order to improve the dimensional stability and mechanical performance of cement-based composites, the effect of an expansive admixture based on calcium sulphoaluminate (CSA) on the shrinkage and mechanical properties of strain-hardening cement-based composite (SHCC), which exhibits multiple cracks and pseudo strain-hardening behavior in the direct tension, is investigated. Polyethylene fibers reinforced SHCC mixtures with three levels (30, 70, and 100MPa) of compressive strength were compared through free shrinkage, compressive strength, flexural strength, and direct tensile strength measurements. The SHCC mixtures were cast with and without replacing 10% of Portland cement content with CSA admixture. According to test results, CSA admixture is effective in reducing shrinkage of SHCC material. SHCC mixture with CSA admixture exhibited a little higher strength than companion mixture without CSA admixture.

Keywords : Strain-hardening Cement-based Composite (SHCC), Expansive Admixture, CSA, Shrinkage, Cracks

1. 서 론

변형경화형 시멘트 복합체(Strain hardening cement-based composite, SHCC)는 취성적인 특성을 갖는 시멘트 복합체에 단섬유를 혼입함으로써 직접 인장 하에서 시멘트 복합체에 다수균열을 폭 넓게 분산시키며 변형경화 특성을 부여한 신 개념의 건설재료로 인식되고 있다(Naaman, 1996). 그러나 SHCC는 배합시 잔골재와 굵은 골재를 포함하지 않아 일반적인 콘크리트 배합에 비하여 3~4배 많은 단위 시멘트량이 사용되며 이로 인하여 경화 과정에서 과도한 자기 수축이 발생하는 것으로 보고되고 있다(이영오 외, 2010; 송종택 외, 2001). 따라서 이러한 초기 수축은 시멘트 복합체에 수축 균열을 유발함으로써 SHCC의 역학적 및 균열거동 특성에 영향을 미치며, 이러한 과도한 수축특성은 SHCC 재료를 실구조물에

현장 타설하거나 접합부에 국부적으로 적용시 균열 문제를 야기할 수 있다.

따라서, 최근 SHCC의 수축저감 방법에 대한 연구가 진행되고 있으며 특히, (1)수축저감제를 활용하는 방안, (2)CSA(Calcium sulpho aluminate)계 팽창재로 시멘트 일부를 대체하는 방안, (3)수축저감제와 팽창재를 혼용하여 수축을 보상하고자 하는 연구가 시도되고 있다(P.Kumar and Paulo, 2006). 본 연구에서는 SHCC의 수축보상을 위하여 CSA 팽창재를 대체하는 방안을 검토하고 있다. CSA 팽창재를 대체한 수축 보상 효과는 시멘트 복합체의 배합조건에 따라 다소 차이를 보일 수 있으나 적절한 수축 보상을 위하여 시멘트에 대하여 8~11%, 프리스트레스용으로 12~17% 대체를 권고하고 있다(CRDC 621, 1980). 또한, 팽창재가 과다하게 대체될 경우 초기 경화시 에트링자이트(Ettringite)의 과다한 생성

1) 정회원, 충남대학교 건축공학과 석사과정
2) 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수, 교신저자
3) 정회원, 충남지방경찰청 시설주사, 공학석사
4) Civil engineering, Gifu University, Japan, Professor

* Corresponding author : wiseroad@cnu.ac.kr 042-821-5622

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2012년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

으로 인하여 시멘트 복합체의 역학적 특성이 저하되는 것으로 보고되고 있다(황인동외, 2000).

선행연구(이영오 외, 2010)에서는 압축강도 70MPa SHCC에서 적정 CSA 팽창재 대체량을 제안하기 위하여 시멘트량 대비 8, 10, 12, 14%를 팽창재로 대체한 SHCC에 대한 역학적 특성을 평가하였다. 이러한 선행연구결과에 따르면 CSA 팽창재를 시멘트 중량의 10% 대체시 에트링자이트 생성 작용으로 인해 압축, 인장, 휨 특성이 다른 배합조건에 비하여 우수한 성능이 나타났다고 보고하고 있다. 이러한 팽창형 SHCC의 적용범위를 확대하기 위해서는 다양한 수준의 압축강도를 갖는 SHCC 배합조건에서 CSA 팽창재 대체에 따른 역학적 특성에 대한 평가가 요구된다. 이에 본 연구에서는 먼저 3수준 압축강도(30, 70 및 100MPa)를 갖는 SHCC 배합 조건하에서 선행 연구를 근거로 결정된 CSA 팽창재 10% 대체에 따른 SHCC 재료의 수축 및 역학적 특성을 평가하고자 한다.

2. 시험계획 및 방법

2.1 시험계획

본 연구는 선행 연구(이영오 외, 2010)와 일련된 연구로써 CSA 팽창재 10% 대체 유무 및 설계기준 압축강도를 주요변수로 계획되었다. Table 1과 같은 SHCC의 배

합조건에 따라 압축 공시체 3개, 휨 시험체 3개, 덤벨형(Dumbbell-shape) 직접인장 시험체 3개 및 수축 시험체 1개를 각각 제작하였다.

2.2 사용재료

본 연구에서 사용한 시멘트의 분말도는 3,300cm²/g 이고, 규사는 국내에서 제조된 S사 7호로 비중 2.6g/cm³, 직경 12~105μm이다. 팽창재의 기계적 특성은 Table 2와 같다. 본 연구에 사용된 폴리에틸렌(Polyethylene, PE) 섬유의 특성은 비중 0.97kg/m³, 길이 12mm, 직경 12μm, 형상비 1,000, 인장강도 2,500MPa, 탄성계수 75GPa이며 섬유의 혼입률은 선행 연구에 나타난 결과로부터 섬유 분산과 역학적 특성을 고려하여 1.5%로 결정하였다(윤현도 외, 2008).

2.3 시험방법

팽창재 대체유무에 따른 SHCC에 대한 수축 및 역학적 특성 평가 시험방법은 선행연구(이영오 외, 2010)와 같이 KS규준에 준하여 실시하였다. 제작된 시험편은 타설 1일 경과 후 탈형하였으며 28일간 15±5℃의 조건으로 기건 양생하였다. 또한 수축실험의 경우 초기 수축변형률(자기수축) 및 1일 이후의 건조수축을 측정하기 위해 타

Table 1 Mix proportion of SHCC

Mixing type of SHCC	Compressive strength (f_{ck})	W/B (%)	Replacement ratio of EXA (%)	Water (kg/m ³)	Unit Weight (kg/m ³)						
					Cement	Silica fume	EXA	Silica sand	PE Fiber	AE	T
PE30-0	30	45	0	489	1075	-	-	430	14.2	-	-
PE30-10			10		967		107				
PE70-0	70	30	0	384	1281	-	-	511		-	-
PE70-10			10		1149		128				
PE100-0	100	19	0	319	1409	245	-	163		33	7
PE100-10			10		1268		140				

*PE30-0 : PE(Polyethylene fiber) 30(Compressive strength) - 0(Replacement ratio of EXA)

NOTE: EXA, expansive admixture; AE, air-entraining agent; T, antifoaming agent

Table 2 Material properties of EXA(K-Type)

Mechanical properties						Chemical composition	
Specific gravity (kg/m ³)	Fineness (cm ² /g)	Setting time		Expansive(%)		Oxide of Magnesium (%)	Ignition loss (%)
		Initial set (min)	Final set (h)	7(Day)	28(Day)		
2.8~3.0	3,350	184	5.5	0.072	0.01	1.43	2.1

설 직후부터 수축측정종료 시점까지 온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $60 \pm 1\%$ 의 항온 항습 실에서 수축량을 측정하였으며, 타설 24시간 후 탈형 하였다. 또한, 탈형 전후의 건조조건은 동일하게 유지 하였다. 내부 수축 변형률을 측정하기 위하여 수축게이지를 시험체 중앙에 매립하였으며, 본 연구에서는 각 SHCC 배합에 대한 자기수축과 건조수축을 합산한 수축량을 비교 및 평가하였다.

3. 시험결과

3.1 수축시험결과

수축시험은 각 배합별로 타설 후 90일까지 측정하였다. Fig. 1(a)는 타설 후 재령 24시간 동안 초기 수축 변형을 배합별로 비교하여 나타낸 것이며, Fig. 1(b)는 90일 동안 각 배합에 따른 수축 변형률을 비교하여 나타낸 것이다. 각 배합에 대한 90일간의 수축 시험 결과를 근거로 단계별 변형률을 요약하여 정리하면 Table 3과 같다.

Fig. 1 Shrinkage strain of cement-based composites

Table 3 Shrinkage experimental results

Mixing type of SHCC	Quantity of maximum expansion (μ)	Quantity of expansion and Shrinkage at 1 day (μ)	Quantity of final Shrinkage at 90 day (μ)	Quantity of expansion after shrinkage (μ)	Quantity of shrinkage after expansion (μ)
PE30-0	0	-317	-1687	0	1687
PE30-10	+429	+330	-1569	454	1998
PE70-0	0	-389	-1424	88	1424
PE70-10	+86	+46	-598	408	684
PE100-0	0	-446	-1114	191	1114
PE100-10	+236	+229	-196	420	432

Fig. 1에 나타난 바와 같이 3수준의 압축강도를 갖는 SHCC 배합별 초기 수축량은 팽창재를 대체하지 않은 경우 수화반응에 따른 시멘트 페이스트내 수분상실로 수축 변형이 지배적으로 나타났다. 그러나 CSA 팽창재를 대체한 SHCC 배합의 경우 타설후 24시간 이내에 초기 수축후 팽창량은 PE30-10 454 μ , PE70-10 408 μ , PE100-10 420 μ 로 나타났다. Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 PE100-10 및 PE70-10 배합의 경우 초기 팽창 시점이 약 11시간 이후로 SHCC 경화와 함께 팽창이 진행되었지만 PE30-10의 경우 SHCC가 경화 전 약 3시간 이후부터 팽창되는 특성을 보였다.

3.2 압축 시험결과

각 배합조건별 SHCC의 압축시험 결과는 Table 4와 같다. 압축강도 30MPa인 SHCC 배합의 경우 팽창재 대체 유무와 관계없이 압축강도와 탄성계수는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 압축강도 70 및 100MPa인 SHCC

Table 4 Compressive strength experimental results

Mixing type of SHCC	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
	No.1		No.2		No.3		Average	
PE30-0	37.8	13.5	45.4	13.6	40.9	13.4	41.4	13.5
PE30-10	41.2	13.4	39.7	13.2	37.6	13.6	39.5	13.4
PE70-0	78.7	20.4	52.5	16.4	51.5	15.1	60.9	17.3
PE70-10	54.6	16.9	75.9	23.6	73.2	19.2	67.9	19.9
PE100-0	79.1	27.8	75.0	26.2	91.0	26.5	81.7	22.8
PE100-10	87.3	25.1	79.2	26.5	93.5	26.0	86.7	25.9

배합의 경우 시멘트 중량의 10%를 CSA 팽창재로 대체한 PE70-10과 PE100-10의 압축강도가 각각 11% 및 6% 다소 높게 나타났으며, 탄성계수 또한 PE70-10 배합에서 15%, PE100-10 배합에서 14% 각각 높게 나타났다.

3.3 직접 인장 시험결과

각 배합조건별 3개의 덤벨형 직접 인장 시험체에 대한 시험결과로부터 구한 평균 직접 인장응력-변형률 관계 곡선을 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 또한, 각 배합조건에 따른 시험체별 인장강도, 최대 변형률 및 그 평균값을 Table 5에 비교하여 나타내었다. Table 5 및 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 팽창재를 10% 대체한 PE30-10 배합의 직접 인장 시험체는 PE30-0 배합조건의 시험체에 비하여 약 1.5MPa 높은 인장강도를 보였으며 최대 변형률도 유사한 양상을 보였다. PE70-10과 PE100-10 배합의 인장강도는 팽창재를 대체하지 않은 PE70-0과 PE100-0 배합의 인장강도와 큰 차이를 보이지 않았으나, 최대 변형률은 팽창재를 대체한 배합에서 약 2배 높게 나타났다.

Fig. 2 Stress-strain curve of tensile test

3.4 휨강도 시험결과

SHCC의 배합조건에 따른 3개 휨 시험체에 대한 시험결과를 Table 6에 비교하여 나타내었다. 팽창재를 대체한 PE30-10 배합의 시험체는 PE30-0 배합의 시험체 보다 평균 휨강도는 약 2.5MPa, 최대 처짐량의 평균은 약 40% 높게 나타났다. 또한 PE70-10 배합은 PE70-0 배합의 시험체에 비하여 평균 휨강도는 약 4.2MPa, 평균처짐량은 약 60% 높게 나타났다. 한편 압축강도 100MPa인

Table 5 Direct tensile experimental results

Mixing type of SHCC	Tensile stress (MPa)	maximum strain (%)	Tensile stress (MPa)	maximum strain (%)	Tensile stress (MPa)	maximum strain (%)	Tensile stress (MPa)	maximum strain (%)
	No.1		No.2		No.3		Average	
PE30-0	4.6	1.2	3.9	1.7	5.1	1.5	4.5	1.4
PE30-10	5.7	0.9	6.2	1.4	6.2	1.5	6.0	1.3
PE70-0	7.0	1.5	6.7	1.3	6.0	2.6	6.6	1.8
PE70-10	6.2	3.2	6.7	3.5	5.9	2.4	6.3	3.0
PE100-0	8.1	0.9	6.5	1.0	8.0	1.0	7.5	1.0
PE100-10	7.4	1.9	7.6	2.7	8.2	2.9	7.7	2.5

Table 6 Flexural experimental results

Mixing type of SHCC	Flexural stress (MPa)	Deflection (mm)	Ductility Ratio ($\frac{\Delta_{ss}}{\Delta_y}$)	Flexural stress (MPa)	Deflection (mm)	Ductility Ratio ($\frac{\Delta_{ss}}{\Delta_y}$)	Flexural stress (MPa)	Deflection (mm)	Ductility Ratio ($\frac{\Delta_{ss}}{\Delta_y}$)	Flexural stress (MPa)	Deflection (mm)	Ductility Ratio ($\frac{\Delta_{ss}}{\Delta_y}$)
	No.1			No.2			No.3			Average		
PE30-0	10.3	1.6	3.03	9.4	1.8	2.66	10.1	1.7	2.89	10.0	1.7	2.86
PE30-10	14.1	2.2	3.85	9.1	2.4	2.08	14.1	2.5	2.92	12.5	2.4	2.95
PE70-0	16.6	2.3	2.18	18.0	0.7	1.50	14.3	0.4	1.66	16.3	1.1	1.78
PE70-10	20.8	2.6	1.67	21.2	3.5	6.25	18.6	1.8	2.25	20.2	2.6	4.29
PE100-0	20.5	1.8	3.73	23.7	2.3	3.17	22.3	2.1	4.44	22.2	2.1	3.78
PE100-10	14.8	2.5	4.12	18.3	6.6	2.63	17.4	7.4	4.00	16.8	5.5	3.58

SHCC 배합에 있어서 PE100-10의 경우 PE100-0배합에 비해서 휨강도가 약 30% 낮게 나타났다.

4. 시험결과 분석

4.1 수축시험

Fig. 1에 나타난 바와 같이 압축강도 3수준의 모든 SHCC 배합에서 팽창재를 대체한 경우 초기 수축이후 팽창이 유발되었다. 특히 팽창재를 대체하지 않은 배합의 초기 수축 기울기는 W/B가 낮은 PE100-0 배합에서 상대적으로 크게 나타났으며, 그 외 PE70-0 및 PE30-0 배합의 순으로 기울기가 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 W/B가 낮을수록 건조수축에 비해 자기 수축이 지배적이기 때문인 것(Ei-ichi, and Shingo, 1995)으로 판단되며 특히 PE100-0 배합에서는 상대적으로 다른 재료에 비해서 분말도가 큰 실리카 흙의 빠른 수화반응으로 인하여 수축량이 가장 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한 팽창재를 대체 하였을 경우에도 W/B가 가장 낮고 실리카 흙이 혼입된 PE100-10 배합에서 초기 수축량이 가장 크게 나타났다. 또한, Fig. 1(a)에서 PE30-10 배합은 3시간 이후부터 팽창이 진행되었으며 이는 높은 W/B에 따른 팽창재의 수화반응이 조기에 진행됨에 따라 시멘트가 아직 굳지 않은 상태이기 때문에 팽창량은 크지만 팽창력이 흡수되어(이선우, 1996) 최종 수축량에서는 PE30-0과 크게 차이가 나타나지 않은 것으로 판단된다. 그리고 각 배합별 팽창량이 다른 이유는 팽창재의 수화반응 속도가 각각 W/B가 다르기 때문에 나타난 현상이며, 특히 PE70-10 배합에 비하여 W/B가 낮은 PE100-10 배합이 높은 팽창량을 보이는 것은 PE70-10 배합에 혼

입되지 않은 실리카 흙의 팽창특성에 따른 것으로 판단된다.

PE30-0 및 PE30-10 배합의 경우 재령 약 20일후부터 90일까지 수축량 약 100 μ 의 일정한 차이로 수축이 진행되었으며 실험종료 시점 90일에도 수축이 진행되었다. PE100-10 배합의 경우 약 18일 이후 안정화 시점이 나타났는데 이는 낮은 W/B 와 분말도가 높은 실리카 흙의 사용 때문에 빠른 자기수축의 진행으로 인한 건조수축량의 저감에 의해 나타난 것으로 판단된다(황인동 외, 2000). 또한 PE30-10의 수축 진행은 W/C가 클 경우 자기수축 현상보다는 건조 수축이 지배적으로 나타나는 현상인 것으로 판단된다(Naaman, 1996). 최대팽창 후 수축량은 팽창재 대체유무와 관계없이 강도가 높을수록 작아지는 것으로 나타났다. PE70 및 PE100 배합의 경우 팽창재를 대체함에 따라 최대팽창 후 수축량이 감소하였지만 PE30의 경우 팽창에 따른 팽창력의 전달이 미흡했기 때문에 최대 팽창 후 수축량이 오히려 증가되는 결과를 나타내었다.

4.2 SEM(Scanning electron microscopy)분석

SEM 분석은 수축시험 종료시점인 90일후 각 배합별 시료를 채취하여 촬영을 실시하였다. SEM은 PE30 배합에서는 3,000배율로 PE70 및 PE100 배합에서는 10,000배율로 촬영하였다. 본 연구의 SEM 분석에서는 기존 연구(Charlotte et al, 2001; 정민철, 1996)의 에트링자이트 현상 분석을 기초하여 본 연구의 결과와 현상비교를 통한 각 강도별 배합에 팽창재 대체에 따른 에트링자이트 생성 현상에 대해서 평가 및 분석 하였다. Fig. 3의 SEM 분석 결과에서와 같이 팽창재를 대체하지 않은 각 배합에서는 PE70-0을 제외하고 에트링자이트 생성물이 나타나지 않았다. PE70-0에서는 보통 포틀랜드 시멘트 복합

Fig. 3 Secondary electron image of fracture surface of undamaged portland cement to moisture for 90 days(SEM)

체에서 나타나는 에트링자이트 생성 효과가 나타난 것으로 판단되며, 팽창재를 대체한 세 타입의 배합의 경우 강도가 증가됨에 따라 에트링자이트 생성량이 크게 증가되었다. 특히 PE30에서 상대적으로 에트링자이트 생성량이 작은 이유는 팽창시작 시간이 시멘트가 경화되지 않은 3시간이후이기 때문에 침상형 에트링자이트 생성물이 나타나지 않은 것이며, PE70 및 PE100배합의 경우 적정시간에 팽창이 일어나 침상형 에트링자이트 생성물이 뚜렷하게 나타난 것으로 판단된다.

4.3 압축시험

W/B가 큰 PE30-0과 PE30-10 배합의 경우 팽창재 대체 유무와 관계없이 평균응력이 유사한 결과를 나타내었다. 이는 PE30-10의 수축실험 결과 팽창반응이 이른 시점에 발생하여 팽창압의 전달에 의한 응력증진효과가 적절히 발현되지 못하여 나타난 것으로 판단된다(이선우 외, 1996). 70MPa 와 100MPa 배합의 경우 팽창재를 대체한 배합의 압축강도가 높게 나타났다. 이는 팽창재가 시멘트매트릭스에 적절한 점성을 유지하여 줌으로써 경화체의 구조를 균일하게 형성시키기 때문이며, 특히 100MPa 배합의 경우 실리카흙을 사용함에 따라 미세공극을 충전하여 팽창률뿐만 아니라 압축강도 증진에 기여하였기 때문인 것으로 판단된다(황인동 외, 2000). Fig. 4는 압축강도와 탄성계수와의 관계를 KCI 07(한국콘크리트학회, 2007) 및 박완신(박완신 외, 2009)에 의해 제안된 식과

Fig. 4 Elastic modulus versus compressive strength

비교해 나타내었다. PE30배합은 팽창재 대체와 관계없이 박완신에 의해 제안된 값 보다 다소 낮게 나타났으며 PE70 및 PE100 시험체의 경우 기준 값에 대체로 만족하는 것으로 나타났다.

4.4 직접 인장시험

인장시험체의 팽창재 대체시 응력의 증가 경향은 경화시 지속적인 SO_3 공급으로 인한 에트링자이트 수화물이 생성되어 초기양생시점에 모르타르 경화체를 팽창시켜 팽창압을 발생시키고, 이 압축응력을 인장강도가 작은 초기 양생시점의 경화체에 생기게 하여 수축응력을 보상하였기 때문으로 판단된다(전준영 외, 2000).

Fig. 5는 인장시험체의 최종파괴시 균열형상을 나타낸

Fig. 5 Crack pattern of tensile test

Fig. 6 Strain hardening indicator

것이다. PE70, PE100배합의 경우 팽창재를 대체한 PE70-10, PE100-10이 팽창재를 대체하지 않은 배합에 비해 균열 분산특성이 우수하게 나타났다. 한편 PE30의 경우 최대응력시 평균변형률이 유사한 경향을 보였고 균열 분산에서 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

4.5 직접 인장시 변형경화지표

SHCC의 경우 일반 콘크리트나 ECC에 나타나지 않는 변형경화특성이 우수한 경향을 보인다. 하지만 변형경화특성의 정량적 표현의 기준이 정의되지 않아 직접적인 변형경화특성의 비교가 어려운 실정이었다. 따라서 Fig. 6의 왼쪽상단 SHCC 직접인장실험 그래프부분 음영 면적 부분(초기균열시점 과 최대응력시점 사이 면적) 산출을 통해 변형경화특성을 정량화시켜 평가하고자 하였다. Fig. 6의 각 강도별 시험체에서 팽창재를 대체한 경우 변형경화지표는 높은 경향을 나타내었다. PE30 두 타입의 경우 팽창재를 대체한 타입인 PE30-10 배합에서 변형경화지표가 높은 경향을 보이며 변형률은 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. PE70 및 PE100 배합은 팽창재를 대체한 경우가 변형경화지표와 변형률이 다소 높게 나타났다. 따라서 SHCC의 배합시 팽창재 대체는 변형경화특성을 개선시켜 주는 것으로 나타났다.

Fig. 7 Load-deflection curve of flexural test

Fig. 8 Crack pattern of flexural test

4.6 휨시험

Fig. 7은 배합별 휨시험의 응력-처짐의 평균값을 나타낸 그래프이다. PE30과 PE70 배합의 경우 대체적으로 팽창재를 대체함에 따라 휨응력과 처짐이 향상된다. 하지만 고강도 SHCC인 PE100 배합의 경우 팽창재 대체시 시멘트 페이스트 및 에트랑자이트 생성과정에서 마이크로 균열이 초기시점에서의 수축에 의해 발생되어서 휨강도가 저하된 것으로 판단된다(Mohammed et al, 2011). 또한 이전 연구에서 실리카 흡과 바인더의 배합비(SF/B)에 따라 휨응력의 영향의 결과가 달라지는데 SF/B가 5%일 때 응력이 높게 나타났고 10%일 경우 다소 저하되는 것으로 나타났다(Houssam, 1999). 본 연구에서는 고강도 SHCC 배합의 낮은 W/B 및 실리카 흡을 시멘트 량에 비해 15% 대체함에 따라 PE100-10 배합의 휨강도가 PE100-0 배합에 비해 감소하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 하지만 최대 응력시 처짐량은 팽창재를 대체하지 않은 PE100-0에 비해서 약 2.5배 높게 나타났다. Fig. 8은 각 타입별 휨 시험체의 최종 파괴 양상을 나타

낸 것이다. 모든 타입의 배합에서 팽창재를 대체함에 따라 균열 분산 측면에서 팽창재를 대체하지 않은 시험체에 비해 우수한 경향을 보였다.

4.7 힘 연성비

각 배합별 힘 시험 결과를 통한 연성비 평가를 위해 각 배합의 힘 특성이 비교적 잘 나타나는 최대 응력의 40~85% 구간을 회귀분석 하여 연성비를 도출하였으며 Table 6에 나타내었다. PE30 및 PE100 배합의 경우 팽창재 대체유무와 관계없이 연성비가 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 따라서 팽창재 대체에 따른 파괴 패턴의 변화는 크게 나타나지 않는 것으로 판단된다. PE70의 경우 팽창재를 대체했을 때 연성비가 약 2배 높게 나타났다. 따라서 PE70-10의 경우 팽창재를 대체하지 않은 PE70-0 배합에 비해 연성적인 파괴패턴을 나타내었다.

5. 팽창재 대체에 따른 영향평가

SHCC의 압축강도 및 팽창재 대체에 따른 역학적 특성을 평가하기 위하여 압축강도, 인장강도, 최대인장변형률, 휨강도, 최대 처짐에 대하여 각 항목의 시험값을 무차원화 하였다. 무차원화는 각 팽창재를 대체한 배합의 시험값에 대체하지 않은 시험값을 나누어 산출하였다. Fig. 9에서 나타난 바와 같이 PE30-10 배합은 인장변형률이 낮아지는 경향을 나타내었으나 인장강도, 휨강도, 처짐이 증가하는 양상을 보였다. PE70-10 배합은 인장강도가 미소하게 낮아지는 경향을 나타내었으나 압축강도, 인장

변형률, 휨강도, 휨처짐이 다소 개선되는 결과를 나타내었다. PE100-10 배합의 경우 휨강도가 다소 낮아지는 양상을 나타내었으나 압축강도, 인장강도, 인장변형률, 휨처짐이 개선되는 결과를 나타내었다. 이처럼 각 배합의 시험에 따라 성능의 상승과 하락이 동시에 나타났으나 PE70-10배합의 경우가 PE30-10과 PE100-10 배합에 비해 팽창재를 대체함에 따라 성능 향상이 우수한 것으로 판단된다.

6. 결 론

팽창재를 대체한 경우 압축, 인장, 힘 특성이 각 강도별로 개선되는 경향이 있었다. 특히 PE70-10의 경우 압축강도, 휨강도, 처짐, 인장강도, 변형률의 성능이 팽창재를 10% 대체함에 따라 높아지는 결과를 나타내었다. PE30-10의 경우에는 인장강도, 휨강도, 처짐, PE100-10에서는 압축강도, 처짐, 변형률 측면이 개선되는 결과를 나타내었다. 하지만 PE100-10의 경우는 휨강도가 줄어드는 경향을 보였고, PE30-10의 경우에는 압축강도와 인장강도에서 크게 차이가 나타나지 않는 결과를 나타내었다. 이와 같이 팽창재를 대체함에 따라 일관적인 성능개선효과를 나타내지 않는 것은 각 강도별 팽창재 대체 유무에 따른 최종 수축 길이 변화와 연관되어 있다. PE70의 경우 740 μ 가 팽창재 대체로 인해 수축이 저감되었고, PE100의 경우 682 μ 가 저감되었다. 하지만 PE30의 경우는 팽창재를 대체했을 시 오히려 391 μ 가 증가되었는데 이는 수화반응 시점이 조기에 진행됨에 따라 팽창진행 속도에 비해 팽창력의 흡수가 이뤄지지 않았기 때문으로 판단된다. 그러므로 각 강도별 배합에 팽창재가 역학적 특성 개선에 유효하게 작용하려면 각각 배합에 따라 다른 대체율이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 이후 각 강도 수준별 팽창재를 대체할 시 역학적 특성 개선이 우수하게 나타나는 최적의 최종 수축길이 변화량을 찾기 위해 압축강도에 따른 팽창재 대체량 선정을 위한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 한-일 협력사업(NRF-2011-D00022)의 일부이고, 이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 2단계 BK21 사업

Fig. 9 Performance assessment of SHCC with expansive admixture.

의 지원비를 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 박완신, 윤현도, 전에스더, 남상현, “섬유의 혼입이 변형 경화형 시멘트 복합체에 미치는 영향”, 대한건축학회 논문집 구조계, 제25권 11호, 2009, pp.29-36.
2. 송종택, 조진상, 전준영, “산업부산물을 이용한 CSA계 팽창시멘트의 제조 및 특성”, 한국세라믹학회지, 제38권 2호, 2001, pp.183-192.
3. 윤현도, 김용철, 김선우, “보강섬유 종류에 따른 변형경화형 시멘트 복합체의 거동특성”, 대한건축학회 논문집 구조계, 제24권 5호, 2008, pp.141-148.
4. 이선우, 김남호, “CSA 팽창재의 콘크리트에 사용”, 한국콘크리트학회 논문집, 제8권 6호, 1996, pp.59-66.
5. 이영오, 윤현도, “팽창재 치환율에 따른 섬유보강 시멘트 복합체의 역학적 특성”, 한국콘크리트학회 논문집, 제22권 5호, 2010, pp.617-624.
6. 전준영, 송종택, “칼슘 설포알루미네이트계 팽창재의 제조 및 기초 물성”, 한국세라믹학회지, 제37권 4호, 2000, pp.388-394.
7. 정민철, “Meta kaolin 및 Silica Fume를 이용한 고성능 고강도 시멘트 모르타르 특성에 관한 연구”, 한국세라믹학회지, 제33권 5호, 1996, pp.519-523.
8. 한국콘크리트 학회, “콘크리트 구조설계 기준 해설”, 2007.
9. 황인동, 엄희남, 정윤중, “팽창재를 포함한 시멘트 모르타르의 팽창요인”, 한국세라믹학회지, 제37권 6호, 2000, pp.517-616.
10. Charlotte Famy, Hal F. W. Taylor, “Ettringite in hydration of portland cement concrete and its occurrence in mature concretes”, ACI Materials Journal, vol. 98, No. 4, 2001, pp.350-356.
11. CRDC 621, “Corps of Engineers Specification for Nonshrink Grout”, 1980.
12. Ei-ichi. Tazawa, Shingo. Miyazawa, “Experimental Study on Mechanism of Autogenous Shrinkage of Concrete”, Cement and Concrete Research, vol. 25, No. 8, 1995, pp.1633-1638.
13. Houssam A. Toutanji, “Properties of polypropylene fiber reinforced silica fume expansive-cement concrete”, Construction and Building Material, vol. 13, 1999, pp.171-177.
14. Mohammed Seddik Meddaha, Masahiro Suzuki, Ryoichi Sato, “Influence of a combination of expansive and shrinkage-reducing admixture on autogenous deformation and self-stress of silica fume high-performance concrete”, Concrete and Building Materials, vol. 25, No. 1, 2011, pp.239-250.
15. Naaman. A. E. and Reinhardt. H. W., “Characterization of high performance fiber reinforced cement composites -HPFRCC.”, Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2(HPFRCC2), pp.1-23.
16. P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro, Concrete, 3th edition, 2006.

(접수일자 : 2012년 1월 19일)

(수정일자 : 2012년 3월 5일)

(심사완료일자 : 2012년 3월 8일)

요 지

변형경화형 시멘트 복합체(SHCC)는 직접인장 상황에서 FRCCs에 비해 우수한 변형경화 특성을 갖는 재료이다. 하지만 SHCC는 일반적인 콘크리트에 비해서 시멘트비율이 높은 부배합 이며, 이에 따라서 자기수축이 큰 특성을 갖는 재료이다. 따라서 시멘트 복합체 내에 팽창재를 대체함으로써 수축저감을 통한 성능향상을 기대하였다. 이 연구에서는 각 강도별 SHCC의 배합에 팽창재를 대체함에 따른 역학적특성을 평가하고자 하였다. 시험결과 설계기준 압축강도 70MPa 배합이 압축, 인장, 휨, 시험에서 우수한 역학적 특성을 나타내었으며, 균열 특성에서는 팽창재를 대체한 SHCC가 균열분산 및 연성에서 우수한 특성을 나타내었다.

핵심 용어 : 변형경화형 시멘트 복합체, 팽창재, 칼슘설포알루미네이트, 수축, 균열