자원순환형 재료를 사용한 변형경화형 시멘트 복합체(SHCC)의 역학적 특성

김선우¹⁾ · 차준호¹⁾ · 김윤용²⁾ · 윤현도^{1)*}

¹⁾충남대학교 건축공학과 ²⁾충남대학교 토목공학과

Mechanical Properties of Strain Hardening Cement-Based Composite (SHCC) with Recycled Materials

Sun-Woo Kim,¹⁾ Jun-Ho Cha¹⁾, Yun-Yong Kim²⁾, and Hyun-Do Yun^{1)*}

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

²⁾Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT This paper describes results of an preliminary study to produce strain hardening cement-based composites (SHCCs) with consideration of sustainability for infrastructure applications. The aims of this study are to evaluate the influence of recycled materials on the mechanical characteristics of SHCCs, such as compressive, four-point bending, and direct tensile behaviors, and to give basic data for constitutive model for analyzing and designing infra structures with SHCCs. In this study, silica sand, cement, and PVA fibers, were partially replaced with recycled sand, fly-ash, and PET fibers in the mixture of SHCCs, respectively. Test results indicated that fly-ash could improve both bending and direct tensile performance of SHCCs due to increasing chemical bond strength at the interface between PVA fibers and cement matrices. However, SHCCs replaced with PET fibers showed much lower performance in bending and direct tensile tests due to originally low mechanical properties of own fibers, although compressive behavior is similar to PVA2.0 specimen. Also, it was noted that the recycled sand would increase elastic modulus of SHCCs due to larger grain size compared to silica sand. Based on pre-set target value to maintain the performance of SHCCs, it was concluded that the replacement ratio below 20% of fly-ash or below 50% of recycled sands would be desirable for creating sustainable SHCCs.

Keywords : Strain-hardening cement composite, Recycled sands, Fly-ash, PET fibers, Mechanical behavior

1. 서 론

섬유보강 시멘트 복합체(fiber-reinforced cementitious composites, FRCCs)는 2% 내외의 보강섬유를 혼입함으로써 인장강도 및 변형성능을 획기적으로 개선하여 콘크리트의 취성적 파괴특성을 보완할 수 있다. 또한, 보강섬유의 가교작용(fiber bridging)을 통해 무수히 많은 미세균열(micro cracks)을 형성시킴으로써 우수한 내구성능을 부여할 수 있으며, 이는 곧 구조물 자체의 내구연한을 증가시킬 수 있음을 의미한다. 그러나 FRCCs 제조시 섬유와 시멘트 복합체와의 부착면적을 증가시킴으로써 섬유보강 효과를 극대화하기 위하여 잔골재 대신 규사를 치환하여 사용하는 실정이다. 또한, FRCCs는 모르타르 계열로써 일반 콘크리트에 비해 상대적으로 많은 시멘트

양(시멘트 1톤 생산시 870 kg의 CO₂가 배출)을 필요로 하는 고에너지 소비형 재료이다.¹⁾ 일반 콘크리트의 경우 플라이애쉬(fly-ash, FA) 및 고로슬래그 등의 산업 부산물을 시멘트 대체 혼화제로 사용하여 각종 산업폐기물의 처분 및 재활용률을 증가시킴으로써 에너지의 재이용 및 CO₂ 배출량을 감소시키고자 하는 연구가 국내·외적으로 활발하게 이루어지고 있다.^{2,3)} 그러나 FRCCs에 관한 현재까지의 연구는 대부분 마이크로역학(micro mechanics)에 근거한 재료의 인장성능 향상 및 구멍에 집중되었을 뿐 환경부하를 저감시키고자 하는 방안에 관해서는 일부만이 이루어지고 있다.⁴⁾

따라서 이 연구에서는 FRCCs의 미세균열 제어를 통한 응력분배 기능을 넘어, 초기균열 발생 이후 강재(steel)와 같은 변형경화 성능을 발현함으로써 인장성능을 극대화할 수 있는 변형경화형 시멘트 복합체(strain-hardening cement composites, SHCCs)를 제조 및 개발하고자 하였다. 이와 같은 SHCC 제조시 필요한 시멘트, 규사, 보강섬유 등을 플라이애쉬, 순환골재, PET 섬유 등의 자원순환형 재료

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

Received June 24, 2010, Revised September 6, 2010,

Accepted September 9, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

로 일부 대체함으로써 이러한 재료의 제조시 발생하는 환경부하요소를 저감하고자 하였다. 이와 더불어 자원순환형 재료 치환시 SHCC의 역학적 특성을 실험적으로 평가함으로써 지속가능성, 경제성뿐만 아니라 환경부하 저감성능(green)을 동시에 갖출 수 있는 green SHCC 재료 개발 및 해석에 필요한 재료구성모델 구축을 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. Green SHCC 재료 및 시험체 제작

2.1 실험계획

이 연구에서는 SHCC의 역학적 특성에 관한 기존 연구⁵⁻¹⁶⁾를 분석하여, 강도와 연성 두 가지에 초점을 두어 보수/보강시 요구되는 목표성능을 만족시키고자 하였다. 휨거동 목표성능은 경제성을 고려하여 변형경화거동과 다수균열 특성을 보이며 $3.0\sqrt{f_c'}$ MPa의 파괴계수(modulus of rupture), 2.0 mm 내외의 처짐량으로 설정하였으며, 직접인장거동의 경우 다수의 미세균열 발생을 통한 구조물의 연성을 확보하기 위해 1축 인장 하에서 최소 2.0 MPa 이상의 응력, 2.0% 이상의 변형률을 발현하도록 하였다. SHCC 제조시 시멘트 복합체에 PVA 섬유를 전체 체적의 2.0% 혼입한 SHCC 제조시 필요한 시멘트, 규사,

섬유 등을 플라이애쉬, 순환잔골재, PET 섬유 등과 같이 순환형 건설재료로 치환한 SHCC의 역학적 특성을 평가하고자 하였다. SHCC 제조시 혼입되는 시멘트의 20%를 플라이애쉬로 치환하였고, PVA 섬유의 20%를 PET 섬유로 치환, 규사의 30%, 50%를 순환잔골재로 치환하였다. 각 시리즈별로 압축강도 공시체 3개, 휨몰드 3개 및 직접인장 시험체 5개를 제작하였다.

2.2 사용 재료

Table 1에 나타난 바와 같이 SHCC의 제조시 시멘트로 는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 시멘트 치환재인 플라이애쉬는 Table 2에 나타난 바와 같이 KS L 5405¹⁷⁾를 만족하였다. 또한 보강용 섬유 중 PVA 섬유는

Fig. 1 Shape of fibers and recycled sands

Table 1 Mix proportion of SHCC

SHCC	Fiber contents (%)		W/B	Unit weight (kg/m ³)					MC ³ (g)	SP ⁴ (g)	DF ⁵ (g)	Replacement ratio (%)		
	PVA	PET		W	C	FA ¹	S	RS ²				Fiber	Cement	Sand
PVA2.0	2.0	-	0.48	440	916	-	586	-	79.19	15.84	70.39	-	-	-
PVA2.0a30	2.0	-			916	-	410	176				-	-	30
PVA2.0a50	2.0	-			916	-	293	293				-	-	50
PVA2.0FA20	2.0	-			733	183	586	-				-	20	-
PVA1.6PET0.4	1.6	0.4			916	-	586	-				20	-	-
PVA1.6PET0.4FA20	1.6	0.4			733	183	586	-				20	20	-

1) Fly-ash, 2) Recycled sands, 3) Methyl cellulose, 4) Super plasticizer, 5) Defoamer

Table 2 Properties of fly-ash

Inventories		Physical properties			Chemical properties	
		KS L 5405 ⁶⁾		Measured value	Component	Content (%)
		Class-I	Class-II			
SiO ₂ (%)		above 45	above 45	50.72	SiO ₂	50.72
Moisture (%)		below 1.0	below 1.0	0.30	Fe ₂ O ₃	6.37
Loss ignition (%)		below 3.0	below 5.0	3.04		
Density (g/cm ³)		above 1.95	above 1.95	2.16	Al ₂ O ₃	20.73
Finess	Residual fineness (45 μm)	below 10	below 40	-	CaO	3.61
	Specific surface area (cm ² /g)	above 4,500	above 3,000	3,645		
Flow ratio (%)		above 105	above 95	101	MgO	1.08
Activity factor (%)	28 days	above 90	above 80	92	SO ₄	0.54
	91 days	above 100	above 90	102		

Table 3 Mechanical properties of reinforcing fibers

Fiber	Density (g/cm ³)	Length (mm)	Dia. (μm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
PVA	1.30	12	39	307	1,600	40
PET	1.37	10	33	300	953	11

Table 4 Physical properties of recycled sands

Finess modulus	Specific gravity (g/cm ³)	Water absorption (%)	Clay (%)	Organic impurity (%)
3.07	2.49	2.90	0.16	0.47

일본 K사의 REC-15, PET 섬유는 폐 페트병에서 추출된 C사의 제품을 사용하였으며, 각 섬유의 기계적 특성은 Table 3과 같다. 잔골재는 S사에서 생산된 집착제용 규사 7호(비중 2.61, 직경 105~120 μm), 규사 치환재인 순환잔골재(골재최대치수 : 2.5 mm)는 Table 4에 나타난 바와 같이 KS F 2573¹⁸⁾의 조건을 만족하는 것으로 사용하였다.

2.3 실험 방법

이 연구에서는 자원순환형 재료를 사용한 SHCC의 역학적 특성을 평가하기 위해 압축, 휨 및 직접인장 실험을 실시하였다. 압축강도 평가를 위한 공시체는 KS F 2403¹⁹⁾에 준하여 $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 공시체를 제작하였으며, 휨성능 평가를 위하여 KS F 2408²⁰⁾에 준하여 $100 \times 100 \times 400$ mm의 휨물드를 제작하여 실험하였다. 또한 덤벨형(dumbbell shape) 시험체를 이용하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 직접인장실험을 실시함으로써 인장거동 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다. 제작된 시험편은 타설 2일 경과 후 탈형하여 14일간 $40 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 조건으로 고온 수중 양생하였다.

Fig. 2 Test setup for direct tension

3. Green SHCC 실험 결과 및 고찰

3.1 압축거동 특성

이 연구에서는 시멘트 복합체에 보강섬유를 체적비 2.0%로 혼입한 SHCC에서 순환잔골재, 플라이애쉬, 재생 섬유인 PVA 섬유를 각각 치환한 SHCC의 압축거동 특성을 평가하고자 하였다. Fig. 3은 시험체의 압축응력-변형률 관계를 나타낸 것이며, 시리즈별 3개의 실험 결과에 대한 평균값을 정리하여 Table 5에 나타내었다. 압축강도 측정 결과, 기준 시험체인 PVA2.0 시험체는 23.48 MPa의 압축강도를 보였으며, 순환골재 또는 PET 섬유를 치환하여도 23.11~26.01 MPa로 유사한 강도특성을 나타내어 압축거동 특성에는 큰 영향을 끼치지 않을 것으로 판단된다. 그러나 플라이애쉬를 20% 치환한 PVA2.0 FA20과 PVA1.6PET0.4FA20 시험체는 각각 18.53 및 17.97 MPa의 압축강도를 보이는 등, PVA2.0 시험체에 비해 21.1 및 23.5%의 강도저하 특성을 나타내었다. 이는 조기강도 발현속도가 상대적으로 느린 플라이애쉬의 특성²¹⁾ 때문이며, 특히 이 연구에서와 같이 바인더(binder)가 다량으로 사용되는 SHCC 제조시, 이러한 강도발현 지연 특성이 더욱 심화되는 것으로 판단된다. 따라서 SHCC와 같은 섬유보강 시멘트 복합체 제조시 플라이애쉬를 혼입할 경우 압축강도 발현에 필요한 충분한 양생기간 및 제조방법이 확보되어야 할 것으로 사료된다.

Fig. 4는 압축응력-변형률 관계에서 계산된 정탄성계수를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이

Fig. 3 Compressive behavior of Green SHCC**Table 5** The results of compressive tests

SHCC	f_{cu} (MPa)	$\epsilon_{cu} (\times 10^{-6})$	E_c (GPa)
PVA2.0	23.48	3383	10.80
PVA2.0a30	23.11	3350	10.97
PVA2.0a50	26.01	3243	11.24
PVA2.0FA20	18.53	2608	11.06
PVA1.6PET0.4	24.60	3207	11.47
PVA1.6PET0.4FA20	17.97	3114	10.15

*The listed values are the average of three test specimens

Fig. 4 Comparison of elastic modulus

탄성계수는 순환골재 치환율에 비례하여 증가하였으며, 이는 섬유와 매트릭스의 부착력 확보를 위한 규사의 사용이 SHCC의 탄성계수를 다소 감소시킴을 의미한다. 한편, PVA 섬유 및 플라이애쉬를 동시에 치환한 PVA1.6PET0.4FA20에서 10.15 GPa의 탄성계수가 산정되어 가장 낮은 값을 보였다.

3.2 휨거동 특성

Fig. 5는 SHCC 휨 시험체에 도입된 휨하중(bending stress)-처짐 관계곡선을 나타낸 것이다. 이 때, Fig. 5(b)~(f)에 Fig. 5(a)의 평균곡선을 연한 실선으로 표시함으로써 PVA2.0 시험체의 휨거동 특성과 직접 비교가 가능하도록 하였다. 시리즈별 3개의 실험결과에 대한 평균값을 정리하여 Table 6에 나타내었다.

휨강도 측정 결과, Table 6에 나타난 바와 같이 PVA2.0 시험체의 파괴계수는 및 처짐은 14.61 MPa 및 1.62 mm로 나타났다. 또한, 순환골재 또는 플라이애쉬를 치환한 경우에도 15.64~15.96 MPa의 파괴계수를 보여 8% 내외

Table 6 The results of flexural tests

Specimen	f_r^* (MPa)	δ^* (mm)
PVA2.0	14.61	1.62
PVA2.0a30	15.64	1.69
PVA2.0a50	15.96	1.49
PVA2.0FA20	15.73	2.29
PVA1.6PET0.4	13.08	1.14
PVA1.6PET0.4FA20	13.02	1.66

* The listed values are the average of three test specimens

의 휨내력이 향상되는 것으로 나타났다. 그러나 PET 섬유를 치환한 PVA1.6PET0.4 및 PVA1.6PET0.4FA20 시험체의 파괴계수는 각각 13.08 MPa 및 13.02 MPa로 나타나 기존 시험체인 PVA2.0에 비해 10% 이상의 강도저하를 나타내었다. 이는 PVA 섬유에 비해 PET 섬유의 인장강도 및 탄성계수 등 물리적 특성에 기인한 것으로, 발생하는 휨균열 응력에 대해 충분한 가교인장성능을 확보할 수 없었기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 이와 같은 강도저하 특성은 3.1절의 압축강도 결과에도 기인한 것으로 판단되었으며, 이는 일반적으로 휨강도에 영향을 미치는 중립축 상부의 매트릭스 압축강도 기여분이 섬유를 보강한 SHCC에서도 발현되는 것으로 평가되었다.

휨에 대한 처짐량을 비교한 결과, 순환골재 치환율이 30%인 PVA2.0a30 시험체는 1.69 mm로 PVA2.0 시험체와 유사했으나, 치환율이 50%인 PVA2.0a50 시험체에서는 1.49 mm를 보여 처짐량의 감소특성을 나타내었다. 이러한 처짐량의 감소는 휨강도 특성에서도 나타난 바와 같이 PET 섬유를 20% 치환한 PVA1.6PET0.4 시험체에서 1.14 mm를 보여, 가장 취약한 변형 능력을 보였다. 한편, 플라이애쉬를 20% 치환한 PVA2.0FA20 시험체의 처짐은 2.29 mm로 PVA2.0의 141%, PVA1.6PET0.4의 200%인 것으로 나타났

Fig. 5 Bending behavior of Green SHCC

다. 이러한 처짐량 개선 특성은 PVA1.6PET0.4FA20 시험체를 통해 재확인할 수 있었으며, 이는 PVA1.6PET0.4 시험체보다 46% 증가된 처짐량이다. PVA 섬유는 강한 친수성으로 인해 인장시 파단되는 특성을 보이기 때문에 일반적으로 오일링(oiling)처리를 하고 있으며, 이 연구에서는 1.2% 오일링 처리된 REC-15 제품을 사용하였다.²²⁾ 한편, 이 연구에서 사용된 플라이애쉬는 시멘트에 비해 높은 분말도를 지님으로써 PVA 섬유와 매트릭스 간 부착력 확보에 보다 유리한 것으로 알려져 있다.^{23,24)} 또한, 플라이애쉬는 구형의 소립자로서 볼베어링 역할^{25,26)}을 하기 때문에 유동성이 확보되어 비빔시 보강섬유의 분산성을 높여주어 보다 높은 변형성능을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 각 시험체의 최종파괴양상을 나타낸 것으로, 모든 시험체에서 초기균열이 나타난 지점 부근에서 미세균열이 진전되는 특성을 보였으며 치환재 및 치환율과 관계없이 유사한 최종파괴양상을 나타내었다.

3.3 직접인장거동 특성

Fig. 7은 SHCC의 덤벨형 직접인장 시험체에 도입된 인장응력-변형률 관계를 나타낸 것이며, Table 7은 실험결과를 정리한 것이다. 기준 시험체인 PVA2.0 시험체의 평균 최대인장응력 및 최대 인장응력시 변형률이 각각 2.80 MPa 및 3.11%로 나타났다. 순환재료를 치환한 SHCC 중 플라이애쉬를 20% 치환한 PVA2.0FA20 시험체에서 3.38 MPa

Fig. 6 Crack patterns observed at failure of Green SHCC

Fig. 7 Tensile behavior of Green SHCC

Table 7 The results of tensile tests

SHCC	f_t (MPa)	ε_t (%)
PVA2.0	2.80	3.11
PVA2.0a30	3.22	2.78
PVA2.0a50	2.48	1.00
PVA2.0FA20	3.38	3.70
PVA1.6PET0.4	1.69	1.87
PVA1.6PET0.4FA20	2.50	2.63

*The listed values are the average of five test specimens

및 3.70%의 인장응력 및 변형률을 나타내어 가장 우수한 직접인장성능을 보였다(Fig. 7(d)). 그러나 규사를 순환잔 골재를 치환한 경우에는 PVA2.0a30에서 약 15% 향상된 3.22 MPa를 나타내었으나, 50% 치환한 PVA2.0a50에서는 11% 저하된 2.48 MPa를 나타내었다. 변형률 측면에서는 PVA2.0a50에서 1.00%로, PVA2.0에 비해 68% 감소되어 현저하게 변형률이 저하되었다.

이는 규사에 비해 큰 골재 직경을 갖는 순환잔골재의 일부 치환시 시멘트 매트릭스에 보다 높은 파괴에너지, 즉 매트릭스의 인성을 유발시키며,²⁷⁾ 이는 곧 SHCC의 마이크로역학(micro-mechanics)에 기인한 인장변형성능의 감소로 이어진다. 따라서 순환잔골재를 50% 치환할 경우, 전술한 바와 같이 섬유와 변형능력 향상을 위한 플라이애쉬와의 병행 치환에 관한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

PET 섬유를 치환한 PVA1.6PET0.4는 인장응력 및 변형률에서 1.60 MPa 및 1.87%를 나타내는 등 기준 시험체인 PVA2.0에 비해 각각 40%의 응력 및 변형률 저하를 보여, 휨성능 결과에서 확인한 바와 같이 섬유의 가교성능에 직접적으로 영향을 미치는 섬유의 기계적 특성에 기인한 것으로 판단된다. PET 섬유 및 플라이애쉬를 치환한 PVA1.6PET0.4FA20은 2.50 MPa 및 2.64%의 인장응력 및 변형률을 보여, 기준 시험체인 PVA2.0에 비해 각각 11% 및 15% 감소되었다. 그러나 PVA1.6PET0.4와 비교할 때 48% 및 41%의 응력 및 변형률이 증가되어 플라이애쉬 치환시 PVA 섬유의 원활한 가교작용 효과를 부여함으로써 전반적인 인장성능을 개선할 수 있는 것으로 판단되었다.

Fig. 8은 각 시험체의 균열분산 특성을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 순환재료를 치환에 따른 균열분산 특성은 대체적으로 기준 시험체인 PVA2.0과 유사하였다. 그러나 Fig. 8(c)에 나타난 바와 같이 규사의 50%를 순환잔골재로 치환한 PVA2.0a50 시험체의 경우 다소 국부적인 미세균열 분포를 보였으며, Fig. 8(e)의 PVA1.6PET0.4에서는 다른 시험체에 비해 절반 이하의 미세균열 개수를 나타내었다.

4. 역학적 특성 분석

이 연구에서는 순환재료를 치환한 SHCC의 역학적 특

Fig. 8 Tensile crack formation in the Green SHCC

성에 관해 실험적으로 평가하였으며, 이러한 결과들의 분석을 통해 추후 SHCC 재료 및 구조부재 설계 및 해석 시 필요한 근거자료를 제시하고자 하였다.

Fig. 9는 압축거동시 탄성계수-압축강도 관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 모르타르 계열인 SHCC는 일반 콘크리트에 비해 낮은 탄성계수를 보이고 있다. 그러나 압축강도 증가에 비례하여 탄성계수가 증가하고 있어, 자원순환형 재료를 사용한 경우에도 박완신 등²⁸⁾이 제안한 식 (1)과 같이 기존 탄성계수 산정식의 수정을 통해 부재의 사용성 검토시 예측이 가능할 것으로 판단된다.

$$E_{cr} = 0.57m_{cr}^{1.5r} 3r\sqrt{f_{cu}} \quad (1)$$

Fig. 10은 휨거동시 파괴계수-압축강도 관계를 나타낸 것이다. 3.2절의 휨거동 특성에서 평가한 바와 같이 PET 섬유를 치환한 PVA1.6PET0.4를 제외하고 모두 $3.0\sqrt{f_{cu}}$ 이상의 값을 보여, 현행 ACI 기준에서의 설계식의 약 5 배를 보였다. 이는 이 연구 범위에서 적용한 순환잔골재 및 플라이애쉬를 치환하더라도 SHCC에서 요구되는 휨 성능의 설계가 가능한 것을 의미하며, 따라서 휨거동의 인장 측에서 작용하는 응력을 충분히 분담함으로써 인장 철근비를 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

일반적으로 SHCC의 인장거동은 매트릭스에 혼입된 보

강섬유의 인장강도 및 탄성계수 등 기계적 특성에 의해 직접적인 영향을 받으며, 상관관계는 다음 식 (2) 및 (3)과 같이 섬유보강지표(fiber reinforcing index, FR index) 및 변형계수(strain coefficient)로 산정할 수 있다.²⁹⁾

$$FR \text{ index} = f_f \times V_f \quad (2)$$

$$\text{Strain coefficient} = V_f \times E_f / f_f \quad (3)$$

따라서 이 연구에서와 같이 순환재료를 치환한 경우, 기존의 SHCC 실험결과와의 정량적인 비교·평가 요구된다. Fig. 11은 기존 연구⁵⁻¹⁶⁾에서 사용된 보강섬유의 기계적 특성 및 직접인장 실험결과를 인용한 것으로, 마이크로 섬유(micro fibers) 단독 또는 두 가지 이상의 마이크로 섬유를 하이브리드한 경우(micro hybrid fibers)에서의 각 추세선들을 이 연구 결과와 비교한 것이다.

인장강도-섬유보강지표 관계에서는 Fig. 11(a)에 나타난 바와 같이 기존 SHCC의 인장강도에 비해 다소 저감되는 특성을 보였으며, 이는 기준시험체인 PVA2.0에서도 관찰되었다. 그러나 인장변형률-변형계수 관계에서는 Fig. 11(b)와 같이 순환골재를 50% 치환한 PVA2.0a50을 제외하고, 기존 SHCC에 비해 변형 능력이 우수한 것으로 나타났다.

또한 인장강도-압축강도 관계에서는 Fig. 12에 나타난 바

Fig. 9 $E_c - f'_c$ relationship

Fig. 10 $f_r - f'_c$ relationship

Fig. 11 Tensile behavior characteristics

Fig. 12 $f_t - f'_c$ relationship

와 같이 PVA2.0, PVA2.0a30 및 PVA2.0FA20은 기존 SHCC 실험 결과와 유사 또는 우수한 인장강도를 나타내었다. 그러나 PVA2.0a50, PVA1.6PET0.4 및 PVA1.6PET0.4FA20은 기존 결과에 비해 낮게 나타났으며, 특히 PVA1.6PET0.4는 50%의 저하를 보였다.

5. 환경부하 저감성능 평가

SHCC 등 보강섬유가 혼입되는 시멘트계 재료는 상대적으로 시멘트량이 많이 소요됨에 따라 CO₂ 배출량이 일반 콘크리트의 2.61배에 달하는 것으로 보고되고 있다.³⁰⁾ 이에 이 연구에서는 자원순환형 재료를 SHCC에 적용함으로써, 인장성능을 유지함과 동시에 환경부하를 저감시키고자 하였다. Table 8은 건설 및 화학재료의 CO₂ 배출량에 관한 연구결과³¹⁻³³⁾를 참고하여, 이 연구에서 SHCC 제조에 사용된 재료 생산시 CO₂ 배출량을 부피 및 중량 단위로 나타낸 것이다. Table 8에 나타난 바와 같이 CO₂ 배출량은 PVA 섬유 > 시멘트 > PET 섬유 > 규사 > 순환잔골재 > 물 순으로 나타났으며, 플라이애쉬는 산업부산물 이므로, 생산시 CO₂ 배출량은 없는 것으로 하였다. 여기서 순환골재는 폐콘크리트의 파쇄, 상차, 운반 등 생산 과정에서의 공정으로 인해 규사와 CO₂ 배출량 면에서 큰 차이를 보이지 않았으며, 구조물 해체 과정은 배제하였다.

Fig. 13은 Table 8의 CO₂ 배출량을 Table 1의 SHCC 배합표에 입력하여, 단위 배합량(m³) 당 CO₂ 배출량을 나

Table 8 CO₂ emission of ingredients for SHCC

SHCC	CO ₂ emission	
	kg/m ³	kg/ton
Water	0.19	0.19
Silica sand	8.92	23.28
Recycled sand	8.04	20.10
PVA fiber	1315.38	1710.00
PET fiber	591.24	810.00
Cement	280.65	870.00
Fly-ash	0.00	0.00

Fig. 13 Comparison of CO₂ emission

타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 순환골재 또는 PET 섬유를 치환한 경우 CO₂ 배출량은 PVA2.0에 비해 0.5% 이내의 차이를 보이고 있다. 그러나 자연환경 보전 및 폐기물 처리 관점에서 고려할 때, CO₂ 배출량 이외의 부가효과가 기대된다. 플라이애쉬를 치환한 경우, PVA2.0에 비해 약 20%의 CO₂ 배출량 저감효과를 보여 성능 및 환경부하 저감 측면에서 가장 우수한 것으로 나타났다.

6. 결 론

이 연구에서는 고인성 및 고내구성 재료인 SHCCs에 환경부하저감성능을 부여하기 위하여 순환잔골재, 플라이애쉬, PET 섬유 등 자원순환형 재료를 일부 치환하였으며, 이에 따른 역학적 특성을 평가·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PVA 섬유의 20%를 PET 섬유로 치환하였을 경우, 압축강도는 크게 차이가 나타나지 않았으나, PET 섬유의 낮은 기계적 특성으로 인해 휨 및 인장성능이 다소 저하되는 특성을 보였다.
- 2) 시멘트의 20%를 플라이애쉬로 치환하였을 경우, 플라이애쉬의 초기강도발현 지연 효과에 의해 압축강도가 다소 저하하는 경향을 보이고 있으나, 휨거동 및 인장거동에서 최대응력 및 변형 능력이 개선되었다. 특히 PET 섬유와 동시에 치환한 경우에도 탁월한 개선능력을 보여, 섬유의 부작용발과피를 유도할 수 있는 것으로 판단되었다.
- 3) 규사를 순환잔골재로 치환한 경우, 치환율에 따라 압축강도 및 탄성계수가 증가하는 경향을 보였다. 그러나 순환잔골재를 50% 치환시 휨 및 직접인장응력 및 변형률이 저하되는 것으로 보아 섬유와 매트릭스 간 부착면적이 소요부착응력에 필요한 조건을 만족하지 못하는 것으로 사료된다.
- 4) 이 연구에서 설정한 SHCC의 목표성능은 아래와 같으며,

- 휨성능 : $f_r \geq 3.0 \sqrt{f'_c}$ MPa, $\delta \geq 2.0$ mm
- 직접인장성능 : $f_t \geq 2.0$ MPa, $\epsilon_t \geq 2.0\%$

이를 근거로, 이 연구 범위에서의 실험 결과에 따른 적정 치환율을 최종 정리하면 다음과 같다.

- ① 플라이애쉬 : 20% 이하
 - ② 순환잔골재 : 50% 이하
 - ③ PET 섬유 : 플라이애쉬와 함께 치환시 20% 이하
- 5) CO₂ 배출량 측면에서 살펴본 결과, 플라이애쉬를 치환한 경우 20%로 가장 우수한 환경부하저감능을 나타내었으나, PET 섬유 또는 순환골재 치환시에는 0.5% 이내의 차이를 보였다. 그러나 이와 같이 직접산출적인 CO₂ 배출량 뿐만 아니라 자연환경 보호 및 폐기물 재활용 측면에서 바람직한 것으로, 환경친화형 재료개발시 적극적으로 고려되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었으며(KRF-2008-314-D00421), 이 연구에 참여한 연구자의 일부는 2단계 BK21사업의 지원비를 받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 윤석경, “시멘트산업 치환연료의 온실가스 배출계수 개발 및 저감량 평가 연구,” 세종대학교 대학원 석사학위논문, 2007, 61 pp.
2. B. K. Raghu Prasad, Hamid Eskandari, and B. V. Venkatarama Reddy, “Prediction of Compressive Strength of SCC and HPC with High Volume Fly Ash Using ANN,” *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 1, 2009, pp. 117~128.
3. Ginés, O., Chimenos, J. M., Vizcarroa, A., Formosa J., and Rosell, J. R., “Combined Use of MSWI Bottom Ash and Fly Ash as Aggregate in Concrete Formulation: Environmental and Mechanical Considerations,” *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 169, Nos. 1~3, 2009, pp. 643~650.
4. Yang, E. H., Yang, Y., and Li, V. C., “Use of High Volumes of Fly Ash to Improve ECC Mechanical Properties and Material Greenness,” *ACI Materials Journal*, Vol. 104, No. 6, 2007, pp. 620~628.
5. 윤현도, 김용철, 김선우, “보강섬유 종류에 따른 변형경화형 시멘트 복합체의 거동특성,” 대한건축학회 논문집(구조계), 24권, 5호, 2008, pp. 114~121.
6. 박완신, 윤현도, 전에스터, “PET 합성섬유의 혼입조건에 따른 시멘트 복합체의 변형경화 특성,” 대한건축학회 논문집(구조계), 24권, 10호, 2008, pp. 37~44.
7. Likhitrungsilp, V., “Moment-Rotation Response and Punching Shear Resistance of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite Structural Members,” Ph.D. Thesis, University of Michigan, 2006, 157 pp.
8. Chompreda, P., “Deformation Capacity and Shear Strength of Fiber Reinforced Cement Composite Flexural Members Subjected to Displacement Reversals,” Ph. D. Thesis, University of Michigan, 2005, 186 pp.
9. Parra-Montesinos, G. J., “High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites: a New Alternative for Seismic Design of Structures,” *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 5, 2005, pp. 668~675.
10. Kim, Y. Y., Ficher, G., and Li, V. C., “Performance of Bridge Deck Link Slabs Designed with Ductile ECC,” *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 6, 2004, pp. 792~801.
11. Li, V. C., Mishra, D. K., Naaman, A. E., Wight, J. K., LaFave, J. M., Wu, H. C., and Inada, Y., “On the Shear Behavior of Engineered Cementitious Composites,” *Journal of Advanced Cement Based Materials*, Vol. 1, No. 3, 1994, pp. 142~149.
12. Fukuyama, H., Sato, Y., Li, V. C., Matsuzaki, Y., and Mihashi, H., “Ductile Engineered Cementitious Composite Elements for Seismic Structural Applications,” *Proceedings of the 12 WCEE*, Paper 1672, 2000, pp. 1~8.
13. Chandrangsu, K., “Innovative Bridge Deck with Reduced Reinforcement and Strain-Hardening Fiber-Reinforced Cementitious Composites,” Ph.D. Thesis, University of Michigan, 2003, 265 pp.
14. Fukuyama, H. and Suwada, H., “Experimental Response of HPFRCC Dampers for Structural Control,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 3, 2003, pp. 317~326.
15. Nagai, S., Kanda, T., Maruta, M., and Miyashita, T., “Shear Capacity of Ductile Wall with High Performance Fiber Reinforced Cement Composite,” *Proceedings of the 1st fib Congress*, Japan, 2002, pp. 767~774.
16. 전에스터, 윤현도, 김윤수, 장용현, 유영찬, 김금환, “단 PE섬유를 혼입한 변형경화형 시멘트 복합체(SHCC)의 인장거동특성,” 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 28권, 1호, 2008, pp. 451~454.
17. 지식경제부 기술표준원, “플라이애쉬” KS L 5405, 2009, 16 pp.
18. 지식경제부 기술표준원, “콘크리트용 순환 골재,” KS F 2573, 2006, 10 pp.
19. 지식경제부 기술표준원, “콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법,” KS F 2403, 2005, 18 pp.
20. 지식경제부 기술표준원, “콘크리트의 휨 강도 시험 방법,” KS F 2408, 2000, 11 pp.
21. Liu, B., Xie, Y., Zhou, S., and Yuan, Q., “Influence of Ultrafine Fly Ash Composite on the Fluidity and Compressive Strength of Concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 9, 2000, pp. 1489~1493.
22. Yang, E. H., Wang, S., Yang, Y., and Li, V. C., “Fiber-Bridging Constitutive Law of Engineered Cementitious Composites,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 6, No. 1, 2008, pp. 181~193.
23. Sahmaran, M., Christianto, H. A., and Yaman I. O., “The Effect of Chemical Admixtures and Mineral Additives on the Properties of Self-Compacting Mortars,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, No. 5, 2006, pp. 432~440.
24. ACI Committee 232, “Use of Natural Pozzolans in Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No. 4, 1994, pp. 410~426.
25. Wei, S., Handong, Y., and Binggen, Z., “Analysis of Mechanism on Water-Reducing Effect of Fine Ground Slag,

- High-Calcium Fly Ash, and Low-Calcium Fly Ash,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 8, 2003, pp. 1119~1125.
26. Okamura, H. and Ouchi, M., “Self-Compacting Concrete,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 11, No. 1, 2003, pp. 5~15.
 27. Perdikaris, P. C. and Romeo, A., “Size Effect on Fracture Energy of Concrete and Stability Issues in Three-Point Bending Fracture Toughness Testing,” *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No. 5, 1995, pp. 483~496.
 28. 박완신, 윤현도, 전에스터, 남상현, “섬유의 혼입이 변형 경화형 시멘트 복합체에 미치는 영향,” *대한건축학회 논문집(구조계)*, 25권, 11호, 2009, pp. 29~36.
 29. 윤현도, 김선우, 전에스터, “섬유 혼입조건에 따른 섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 인장거동 특성,” *대한건축학회 논문집(구조계)*, 22권, 12호, 2006, pp. 79~86.
 30. Kentucky Transportation Center (KTC), “The Cost of Construction Delays and Traffic Control for Life-Cycle Cost Analysis of Pavements,” KTC-02-07/SPR197-99 & SPR218-00-1F, 2002, http://www.ktc.uky.edu/Reports/KTC_02_07_SPR197_99_SPR218_00_1F.pdf.
 31. 한국수자원공사, 2010, <http://www.kwater.or.kr>.
 32. 정종석, 이재성, 안양진, 이경희, 배기선, 전명훈, “폐콘크리트 재활용 방식에 따른 이산화탄소 발생량 분석,” *대한건축학회 논문집(구조계)*, 24권, 10호, 2008, pp. 109~116.
 33. 이강희, 양재혁, “주요 건축자재의 에너지소비와 이산화탄소 배출원단위 산정 연구,” *대한건축학회 논문집(계획계)*, 25권, 6호, 2009, pp. 43~51.

요 약 본 논문은 인장에서의 연성능력을 유지하면서도 구조물 적용시에 지속가능성을 확보할 수 있는, 지속가능한 SHCCs를 제조하기 위한 기초자료를 제공하고자 한다. 본 연구의 목적은 자원순환형 재료가 압축, 휨, 직접인장거동 등 SHCCs의 역학적 특성에 미치는 영향을 평가함과 동시에, 구조물의 개발 및 해석시 구성모델에 대한 기초자료를 제공하는 것이다. 규사, 시멘트, PVA 섬유의 치환재로써 순환잔골재, 플라이애시, PET 섬유가 각각 SHCCs 배합에 일부 치환되었다. 실험결과, 플라이애시는 PVA 섬유와 시멘트 매트릭스 간 화학적 부착력을 증가시켜 SHCCs의 휨 및 직접인장성능을 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 PET 섬유가 치환된 SHCCs는 압축에서는 기준시험체인 PVA2.0과 유사하였으나, 섬유 자체의 낮은 기계적 특성으로 인해 휨 및 직접인장성능에서는 매우 낮게 나타났다. 순환골재의 경우 기존 규사보다 큰 골재치수로 인해 SHCCs의 탄성계수를 증가시키는 것으로 나타났다. SHCCs의 성능을 유지하기 위해 설정된 목표치를 근거로 할 때, 플라이애시는 20% 이하, 순환잔골재는 50% 이하로 치환하는 것이 지속가능한 SHCCs 제조에 바람직할 것으로 판단되었다.

핵심어 : 변형경화형 시멘트 복합체, 순환잔골재, 플라이애시, PET 섬유, 역학적 거동