

고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 이용한 철근콘크리트 보의 구조성능 평가 및 개선

Improvement and Evaluation of Structural Performance of Reinforced Concrete Beam using
High Ductile Fiber-Reinforced Mortar with Ground Granulated Blast Furnace Slag

하 기 주¹⁾

이 동 렬^{2)*}

Ha, Gee Joo

Lee, Dong Ryul

Abstract

In this study, eleven reinforced concrete beams, without stirrup, using high ductile fiber-reinforced mortar with ground granulated blast furnace slag(SHF Series, SHFSC Series) and standard specimens without or with stirrup(SSS, BSS) were constructed and tested under monotonic loading. Experimental programs were carried out to improve and evaluate the shear performance of such test specimens, such as the load-displacement, the failure mode, the maximum strength, and shear strength. All the specimens were modeled in scale-down size.

Test results showed that test specimens(SHF Series, SHFSC Series) was increased respectively the shear strength carrying capacity by 26%, 20% and the ductility capacity by 5.27, 5.75 times in comparison with the standard specimen without stirrup(SSS). And the specimens(SHF Series, SHFSC Series) showed enough ductile behavior and stable flexural failure.

Keywords : High ductile fiber-reinforced mortar, Ground granulated blast furnace slag, Structural performance, PVA fiber

1. 서 론

1.1 연구의 목적

최근 국내·외 건축물이 초고층화, 대형화되고 다양화됨으로써 콘크리트 성능에 대한 고도화가 요구되고 이에 사용되어지는 건설재료들의 변화 및 발전이 빠르게 진행되고 있다. 그중에서도 가장 널리 사용되어지고 있는 콘크리트의 변화와 발전은 다른 건설재료들 보다 그 속도가 빠르게 진전되고 있는 실정이다. 콘크리트의 장점인 높은 압축강도와 경제성, 내구성 등으로 인하여 토목 및 건축 구조물의 건설재료로 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 휨강도, 인장강도가 약하고 취성적 파괴거동을 보이며 균열에 대한 저항성이 작은 단점을 가지고 있으므로 보통콘크리트의 제반 특성을 향상시키거나 개선할 필요성이 부각되어 왔다. 이런 점을 인식하여 개선하고 보완하기 위

하여 높은 인장강도와 탄성율을 가진 고인성섬유 복합재료가 주목 받고 있으며, 국내·외에서 활발한 연구가 진행 중에 있다. 국내에서는 김윤용^{1)~3)}, 윤현도⁴⁾⁵⁾ 하기주⁶⁾⁷⁾, 등에 의하여 국내 실정에 맞는 최적의 시멘트계 복합재료에 대한 연구가 진행 중이고, 국외에서는 Victor C. Li⁸⁾ 등이 PVA섬유를 이용한 시멘트계 복합재료에 마이크로역학(micromechanics)을 적용하여 인장변형률 경화거동특성을 제안하였고, Marshall¹⁰⁾ 등은 안정상태 균열이론을 제안하였다.

따라서 본 연구에서는 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르의 개발을 위하여 우선 마이크로역학이론을 이용해 역학적 구성요소인 섬유(fiber), 매트릭스(matrix), 섬유-매트릭스 경계면(fiber-matrix interface)의 역학적 특성을 파악하고, 이를 최적화하기 위해 안정상태 균열이론을 적용한다. 이런 과정으로 사용성, 안정성 및 신뢰성이 우수한 최적배합의 고로슬래그

1) 정회원, 경일대학교 정교수, 사)건설기술정책연구원 원장, 공학박사

2) 정회원, 경일대학교 겸임교수, 사)건설기술정책연구원 책임연구원

* Corresponding author : puram68@hanmail.net 053-768-3020

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 개발하고자 한다. 그리고 이를 이용하여 철근콘크리트 구조물의 취성적인 성질과 구조성을 개선하고자 한다. 또한, 산업폐기물에 속하는 고로슬래그를 재자원화하여 콘크리트 구조물에 사용함으로써 사회·자연친화적이고 내구적이며 친환경 녹색성장에 부합하는 지속가능한 건설재료가 될 것이다. 그리고 이 개발재료를 철근콘크리트 보 부재에 적용하여 파괴양상 및 전단응력, 연성 등을 고찰하여 구조성을 개선하고 철근콘크리트 구조물의 설계시 기초 자료를 제시하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 절차

본 연구에서는 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 적용하여 철근콘크리트 보의 구조성을 평가하고, 부재의 역학적 거동특성에 관한 PVA섬유의 보강효과를 규명하기 위하여 전단보강 철근의 유무 및 PVA섬유 혼입율(0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 0.5+1.0%, 0.5+1.5%, 0.75+1.0%, 0.75+1.5%)의 변화에 따른 구조성을 규명하기 위하여 11개의 축소모델 실험체를 제작하였다. 또한 표준 철근콘크리트 보 실험체와 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 활용한 철근콘크리트 보 실험체의 구조성을 평가하기 위하여 실험을 통해 얻어진 결과를 비교분석하여 연성능력, 내력 및 파괴형태 등을 규명함으로써 구조성의 개선정도를 평가하였다.

2. 고로슬래그미분말의 적용과 고인성섬유 복합모르타르의 이론적 배경 및 특성

2.1 고로슬래그미분말의 적용

본 연구에서 적용된 고로슬래그미분말은 국내에서 상용중인 것을 사용하였으며, 그 특성을 고찰하여 고인성섬유 복합모르타르에 혼입에 대한 기본 배합비를 제시하고자 한다. 이러한 고로슬래그미분말을 고인성섬유 복합모르타르에 혼입할 경우 시멘트 수화반응에 의해 생성되는 수산화칼슘이 포졸란 반응에 의해 없어지기 때문에 매트릭스가 치밀해지고, 강도 및 연성이 증가되는 등, 관련된 역학적 특성이 향상된다. 그리고 매트릭스와 섬유 사이의 부착특성도 함께 향상되는 것으로 알려져 있다. 또한 고로슬래그미분말은 유리질 구조로 되어있어 표면에 입자

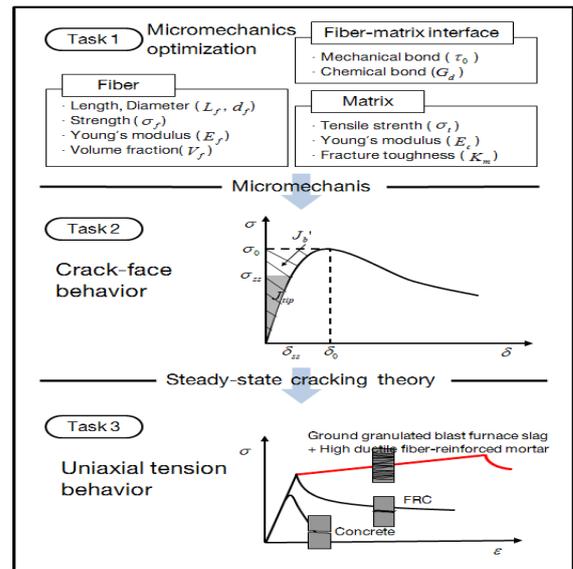


Fig. 1 Design Concept

들이 산화피막을 형성함으로써 코팅효과가 나타나 미분말이 물 분자를 구속하지 않으므로 유동성 확보를 위한 단위수량을 절감 할 수 있어 배합시 유동성을 증가시킴으로써 PVA섬유의 효과적인 분산효과를 돕는다. 본 연구에서는 고로슬래그미분말의 분말도가 $4,000\text{cm}^2/\text{g}$ 인 B사의 제품을 선정하였다.

2.2 고인성섬유 복합모르타르의 이론적 배경

콘크리트, 모르타르, 섬유보강 콘크리트(또는 섬유보강 모르타르, FRC) 등의 유사취성적인 시멘트계 재료와는 다르게 고인성섬유 복합모르타르의 경우 1축인장 하에서 금속과 같은 인장변형을 경화거동 특성을 나타낸다. 이러한 특성을 갖도록 하기 위해서는 안정상태 균열발생의 기본 요구 조건을 만족하여야 한다. 이를 통하여 인장 하에서 다수의 미세균열이 발생하게 되는데, 이러한 필요조건에 대한 이론적 배경을 제공하는 것이 마이크로역학이론이다. 이 두가지 이론을 근거로 본 연구에서는 고인성섬유 복합모르타르에 고로슬래그미분말을 혼입하여 연성과 강도 측면에서 보다 개선된 재료를 개발하였다. 또한, 이때에 고려되는 기본적인 역학적 구성요소는 섬유, 모르타르 매트릭스, 섬유-매트릭스 경계면으로 재료 개발 과정을 개념적으로 표현하면 Fig. 1과 같다.

안정상태 균열이론에서 매트릭스 내에 안정상태의 균열을 발생시키기 위한 첫 번째 조건은 섬유복합 모르타르의 균열면 보상에너지 J'_b 가 매트릭스의 균열전단 파괴인

성 J_{tip} 보다 항상 커야 한다는 에너지 조건이다. 이 조건을 수식으로 나타내면 식(1)과 같다.

$$J_{tip} \leq \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta_0) d\delta \equiv J_b' \quad (1)$$

$$J_{tip} = \frac{K_m^2 m}{E_c} \quad (2)$$

δ_0 : 최대 균열면 응력 σ_0 에 해당되는 균열개구변위

K_m : 매트릭스의 파괴 인성

E_c : 탄성계수

여기서 J_b' 는 Fig. 1의 Task 2에 나타난 균열면 응력(σ)와 균열개구변위(δ)의 관계로부터 계산할 수 있다.

두 번째 조건은 σ_0 가 1축인장 균열강도 σ_{fc} 보다 반드시 큰 값이어야 한다는 인장강도 조건이다. 이 조건이 만족되지 못할 경우, 변형이 다수의 균열(multiple cracks)로 전파되지 못하고, 최초로 발생된 균열로 모든 변형이 집중되는 유사취성재료의 거동을 나타내게 된다.

$$\sigma_{fc} < \sigma_0 \quad (3)$$

여기서 σ_{fc} 는 최대초기결합의 크기와 K_m 에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있다. 마이크로역학 이론에 관한 자세한 내용은 Li⁽⁸⁾⁹⁾ 등에 의한 연구 결과에 나타난 바와 같다.

에너지 조건과 인장강도 조건은 반드시 함께 충족되어야 한다. 결과적으로 식 (1), (3)을 만족시킴으로써 기존의 콘크리트(또는 모르타르)가 갖고 있는 유사취성을 높은 연성으로 변화시킬 수 있다. 이러한 방법을 이용하면 최소의 실험적인 접근으로 고인성섬유 복합모르타르를 설계할 수 있고 보강 섬유의 효율을 극대화 할 수 있을 것으로 판단된다.

2.3 고로슬래그미분말이 함유된 고인성섬유 복합모르타르의 특성

2.3.1 최적의 물-결합재비 범위의 결정

본 연구에서는 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르가 안정적인 인장 변형률 경화 거동을 하는

Table 1 Toughness ratios calculated based on micro-mechanical analysis

Age (days)	W/C = 60 % (W/B = 48%)			W/C = 47.5 % (W/B = 38%)			W/C = 35 % (W/B = 28%)		
	J_{tip} (J/m ²)	J_b' (J/m ²)	J_b'/J_{tip}	J_{tip} (J/m ²)	J_b' (J/m ²)	J_b'/J_{tip}	J_{tip} (J/m ²)	J_b' (J/m ²)	J_b'/J_{tip}
7	1.879	18.094	9.641	3.279	19.676	5.999	5.665	20.174	3.560
14	2.287	18.266	7.987	4.900	19.561	3.992	9.205	20.343	2.209
28	2.480	18.379	7.412	5.423	19.784	3.648	14.51	20.452	1.407

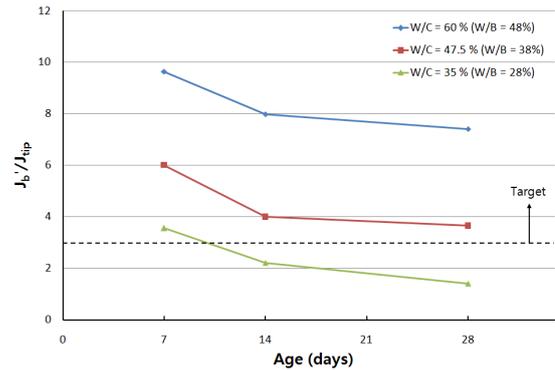


Fig. 2 Toughness ratio as a function of the composite age for the effects of W/C and the addition of slag particles

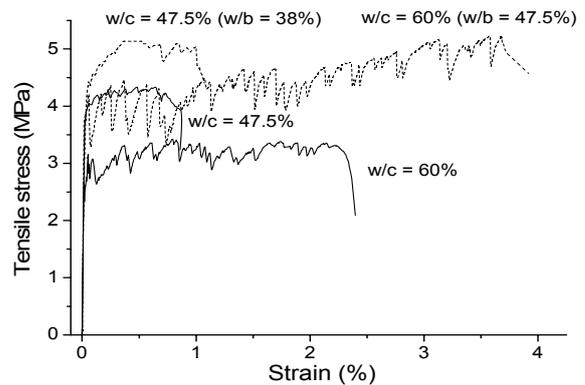


Fig. 3 Typical uniaxial tensile stress-strain curves of high ductile fiber-reinforced mortar

최적의 물-결합재비의 범위를 결정하기 위하여 마이크로역학적 특성과 파괴역학적 특성을 이용하여 인성비 (J_b' / J_{tip})를 계산하였다. 인성비를 계산하기 위하여 각각의 물-시멘트비에 대한 마이크로역학 해석을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 Table 1에 나타난 것처럼 보상 에너지와 인성비를 계산하였다.¹⁾ 각각의 물-결합재비 및 재령에 대하여 계산된 인성비는 Fig. 2에 나타내었다. 기존 연구에서는 3.0이상의 인성비를 갖는 섬유복합 재료가 인장변형률 경화거동을 안정적으로 나타낼 수 있는 것으로 밝혀진 바 있다.¹⁾ 본 연구에서는 재령 28일의 인성비

Table 2 Design parameters of test specimens

Type	Specimen	Section		PVA fiber content (%)	Steel bar		Length (mm)	Shear reinforcement
		Width (b, mm)	Depth (D, mm)		Tension	Compression		
Standard	SSS	150	300	-	3-HD13	2-HD10	2200	-
	BSS	150	300	-	3-HD13	2-HD10	2200	○
PVA fiber reinforcement specimen	SHF0.5	150	300	0.5	3-HD13	2-HD10	2200	-
	SHF0.75			0.75	3-HD13	2-HD10	2200	
	SHF1.0			1.0	3-HD13	2-HD10	2200	
	SHF1.5			1.5	3-HD13	2-HD10	2200	
	SHF2.0			2.0	3-HD13	2-HD10	2200	
	SHFSC1	150	300	Combination of 0.5+1.0	3-HD13	2-HD10	2200	-
	SHFSC2			Combination of 0.5+1.5	3-HD13	2-HD10	2200	
	SHFSC3			Combination of 0.75+1.0	3-HD13	2-HD10	2200	
	SHFSC4			Combination of 0.75+1.5	3-HD13	2-HD10	2200	

ex) combination for 0.5+1.0: PVA fiber volume fraction 0.5% of cementer, PVA fiber volume fraction 1.0% of end region

가 물-시멘트비 35%(물-결합재비 28%)를 제외한 2가지 경우에는 3.0이상이므로 물-결합재비 38%~48%의 범위에서는 섬유복합 모르타르가 안정적인 인장변형률 경화거동을 나타낼 것으로 판단된다.

2.3.2 고인성섬유 복합모르타르의 1축인장 거동

선정된 최적배합에 대한 고인성섬유 복합모르타르의 역학적 특성을 평가하기 위하여 재령 28일에 직접인장시험을 수행하였다. Fig. 3은 대표적인 1축인장 하에서 측정된 섬유복합 모르타르의 응력-변형률 관계를 나타내고 있다. 고로슬래그미분말을 25% 혼입하여 물-결합재비 38%, 48%에 해당하는 실험체의 평균 인장강도는 각각 5.1MPa, 5.3MPa인 것으로 측정되었고, 이 값은 각각의 1축인장 균열강도의 평균값인 4.3MPa(38%), 4.0MPa(48%)에 비하여 약 1.25배 큰 값이다. 결과적으로 물-결합재비 38%, 48%의 섬유복합 모르타르는 안정상태 균열발생을 위한 2번째 식(3)을 만족하도록 설계된 것이다.

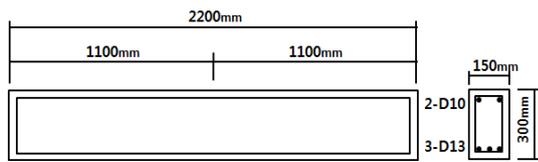
인성비 조건을 만족하는 섬유복합 모르타르는 1축인장 하에서 뚜렷한 변형률 경화거동을 나타내었으며, 변형능력은 최대 3.6%이었다. 또한 파괴형태에서 섬유복합 모르타르는 응력이 증가하여 균열강도에 도달하게 되면 초기 균열이 발생하고, 그 이후 다수의 미세균열이 형성되면서 인장변형률 경화거동을 나타낸다. 그리고 고로슬래그미분말이 25% 혼입된 경우가 보다 우수한 인장 변형 성능과 높은 인장 강도를 나타내었다.

3. 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 이용한 철근콘크리트 보의 구조성능 실험

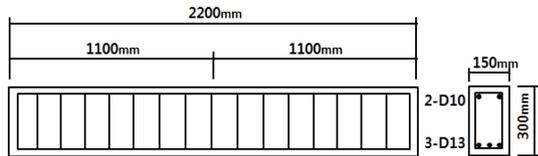
3.1 실험체의 형태 및 변수

고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합 모르타르를 이용한 철근콘크리트 보의 구조성능을 평가하고 부재의 역학적 거동특성에 관한 PVA섬유의 보강효과를 규명하기 위하여 전단보강 철근의 유무 및 PVA섬유 혼입율(0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 0.5+1.0%, 0.5+1.5%, 0.75+1.0%, 0.75+1.5%)의 변화에 따른 구조성능을 규명하기 위하여 11개의 축소모델 실험체를 제작하였다. 그 중에서 성능개선 실험체인 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 이용한 철근콘크리트 보 실험체인 SHF시리즈의 경우 Fig. 4(c)에 나타난 것과 같이 전단보강근이 없는 철근콘크리트 보에 섬유 혼입율(0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%, 2.0%)을 변화시켜 보 전체에 타설하였고, SHFSC시리즈의 경우 PVA섬유 혼입율의 적정량의 선정 및 철근콘크리트 구조물체의 경제적인 적용성을 검토하기 위하여 Fig. 4(d)에 나타난 것과 같이 철근콘크리트 보 실험체에 PVA섬유 혼입율을 2가지로 조합하였다. 철근콘크리트 보를 3등분하여 휨과 전단의 영향에 따라 PVA섬유 혼입율을 0.5%와 1.0%, 0.5%와 1.5%, 0.75%와 1.0%, 0.75%와 1.5%의 조합으로 타설하여 실험을 실시하였다.

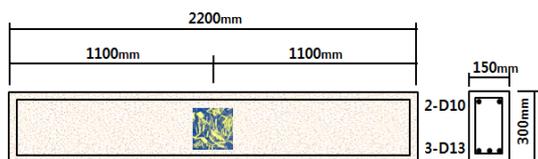
고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르



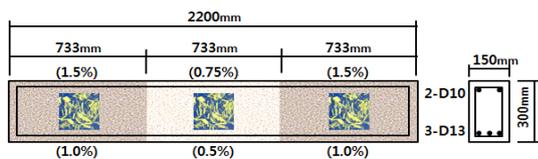
(a) Standard specimen without shear reinforcement(SSS)



(b) Standard specimen with shear reinforcement(BSS)



(c) Specimens using PVA fiber reinforcement(SHF Series)



(d) Specimens using combination of PVA content(SHFSC Series)

Fig. 4 Details of test specimen

의 유, 무에 따른 철근콘크리트 보 실험체의 변수 및 내용은 Table 2와 같고, 각 실험체의 상세는 Fig. 4에 나타나 있다.

3.2 실험체의 제작

본 연구에 사용되어진 실험체는 강도설계법에 의한 콘크리트구조 설계기준(2007), 국토해양부 규준에 의하여 설계하였다. 모든 철근콘크리트 보는 단면치수 150mm × 300mm, 유효 높이(d=280mm), 철근량은 최대철근비로 설계하여 인장철근 3-HD13, 스티럽 HD10@125mm, 압축철근 2-HD10, 길이(L) 2.2m, 순스팬길이 2m인 장방향 보로 제작하였다. 그리고 피복두께를 확보하기 위하여 스페이서를 이용하였다.

실험체의 제작과정에서 SHFSC시리즈의 경우 분리 타설을 하기 위해 최적의 철망을 삽입하여 재료가 혼합되지 않도록 하였다.

Table 3 Material properties of the reinforcing bar

Bar	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
HD13	414	600.5	2.04×10^5
HD10	455	636	1.95×10^5

Table 4 Mix proportion of concrete

Compressive strength (MPa)	W/C (%)	S/A (%)	Mix proportion (kg/m ³)					Slump (mm)
			C	W	S	A	AD	
42	31.3	42.9	530	154	738	958	5.3	120

Table 5 Test result of concrete strength

Age(days)	(unit : MPa)		
	7	14	28
Compressive strength	30.62	34.14	45.5

3.3 사용재료의 특성

3.3.1 철근

본 연구의 실험체에 사용된 철근은 국내에서 생산된 SD400의 고강도철근이 사용되었으며, 보의 압축철근에는 HD10이, 인장철근에는 HD13이 배근되었고, 전단보강 철근은 HD10이 배근 되었다. 그리고 본 실험에 사용된 철근의 재료 특성을 파악하기 위하여 KS B 0801(금속재료 인장시험편 규정)에 따라 시험편을 제작하였으며 KS B 0802의 금속재료 인장 시험방법에 따라 시험을 하였고 결과는 Table 3과 같다.

3.3.2 콘크리트

콘크리트의 배합은 요구강도와 시공성 및 선정된 재료를 고려하여 설계되었고 콘크리트의 배합표는 Table 4와 같다. 각 실험체는 타설과 함께 압축강도 실험용 공시체를 제작하였다. 압축강도 실험용 원주형 공시체는 $\Phi 100 \times 200$ mm 몰드를 사용하여 KS F 2405에 따라 몰드를 3개 층으로 나누어 각 층을 25회씩 붓다짐하여 제작하였고, 재령 28일까지 수중양생을 실시하였다. 그리고 1000kN용량의 U.T.M으로 일방향 압축강도 시험을 하였다. Table 5에 나타난 콘크리트 압축강도는 각각 5개의 공시체의 시험 결과에 대한 평균값이다.

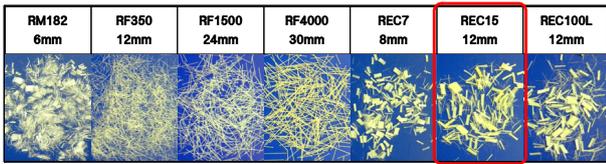


Fig. 5 PVA fiber

Table 6 Properties of PVA fiber

Diameter (μm)	Length (mm)	Nominal strength (MPa)	Elongation (%)	Oiling agent content (%)	Young's modulus (GPa)
39	12	1,620	6	0.8	38.9

Table 7 Mix proportion of high ductile fiber-reinforced mortar with slag

Material	Cement	Sand	Slag	Water	PCSP	HPMC	PVA Fiber
Ratio of weight (%)	100	80	25	48	3	0.3	0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0

* All numbers are ratios of cement weight except for PVA fiber.
* PCSP: Superplasticizer, HPMC: hydroxymethylcellulose

3.3.3 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르

실험체에 사용된 섬유는 Fig. 5와 같이 다양한 형태의 섬유 중에서 분산성, 시공성, 적합성 등을 고려하여 K사에서 생산되는 PVA섬유로 길이가 12mm인 REC15로 선정하였으며, 사용된 섬유의 물리적인 특성과 배합표는 각각 Tables 6, 7과 같다. 제1종 포틀랜드 시멘트가 주 결합재로 사용되었고 잔골재는 평균입도가 $110\mu\text{m}$ 인 규사를 사용하였으며, 강도증진을 위하여 고로슬래그미분말은 분말도가 $4,000\text{cm}^2/\text{g}$ 인 B사의 제품을 사용하였다. 또한, 섬유의 효과적인 분산을 위하여 카르복실계 감수제(PCSP)와 셀룰로즈계 분리저감제(HPMC)를 혼화제로 첨가하였다. 공시체는 KS F 2405방법으로 제작하였다.

3.4 실험방법 및 장치

3.4.1 실험방법

본 연구의 하중재하는 Fig. 6에서와 같이 유압잭으로 경간 중앙점에서 재하하였다. 가력시의 하중을 측정하기 위하여 유압잭에 하중계를 설치하였다. 재하는 극한하중에 도달 후 80%가 될 때까지 2kN간격으로 재하를 하였

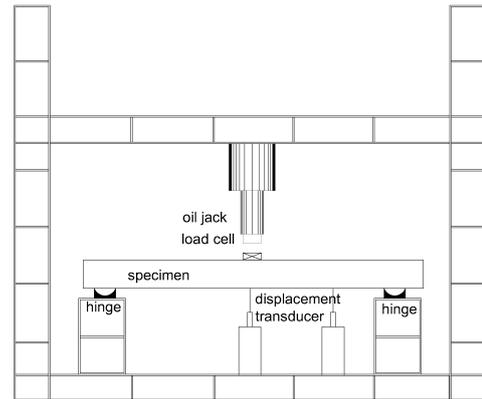
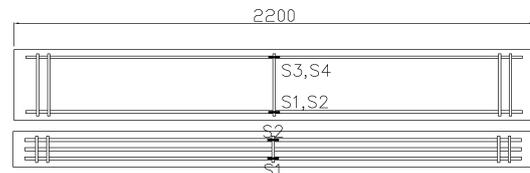
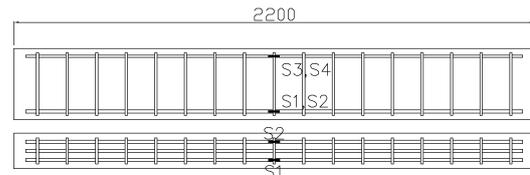


Fig. 6 Test setup of test specimen



(a) Specimen without shear reinforcement



(b) Specimen with shear reinforcement

Fig. 7 Location of steel strain gauges

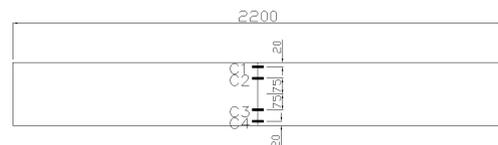
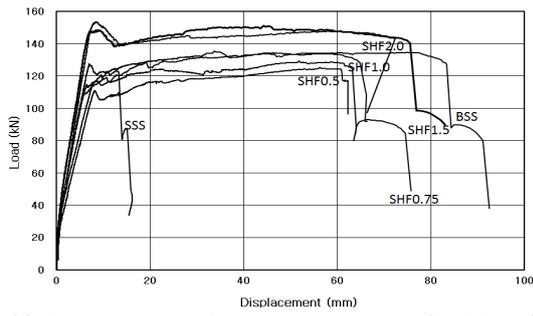


Fig. 8 Location of con/c strain gauges

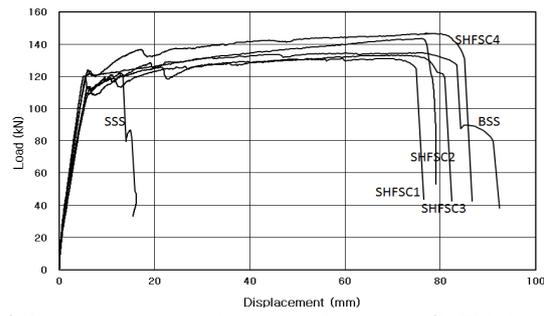
고, 그 이후에는 변위제어방법으로 가력하였다. 보 실험체의 하중 단계별 처짐은 실험체 중앙에 설치된 변위계(LVDT)를 이용하여 측정하였다. 철근과 콘크리트의 변형은 Fig. 7, 8에서와 같이 스트레인게이지 (5mm, 60mm)를 인장철근(2개), 압축철근(2개)과 콘크리트 경간 중앙(4개)에 부착하여 측정하였다.

3.4.2 측정장치의 부착 위치

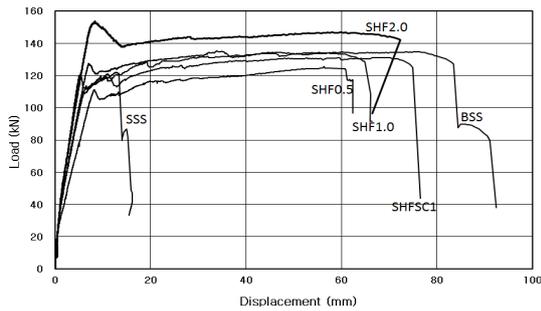
각 실험체의 경간 중앙의 실험체 하부에서 각 하중 단계별 하중-처짐량을 측정하였다. 철근의 변형은 Fig. 7과 같이 스트레인게이지 5mm를 각 인장, 압축 철근의 중앙부에 각각 2개씩 부착하여 하중단계에 따라 측정하였



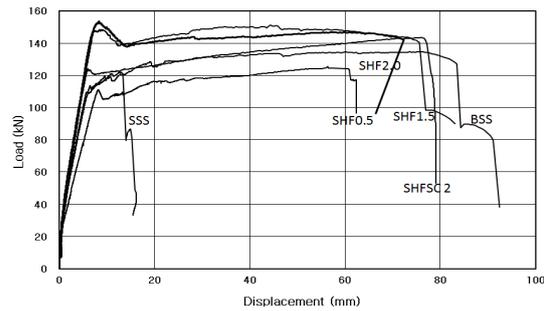
(a) Specimens using PVA fiber reinforcement (SHF Series)



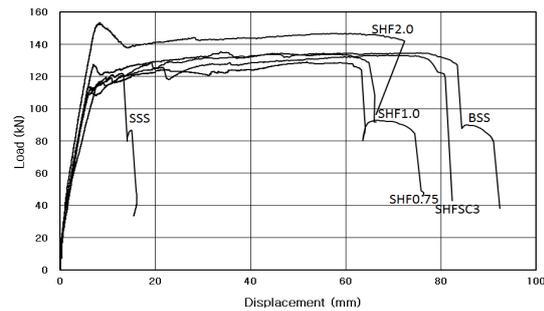
(b) Specimens using combination of PVA content (SHFSC Series)



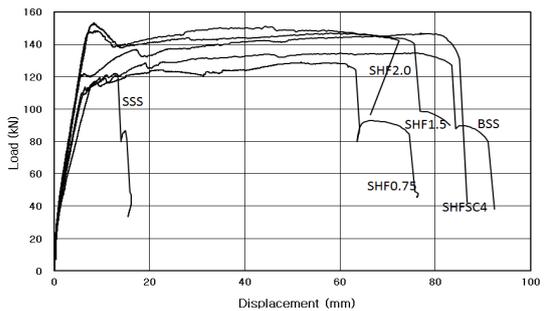
(c) Comparison of SHF Series and SHFSC1



(d) Comparison of SHF Series and SHFSC2



(e) Comparison of SHF Series and SHFSC3



(f) Comparison of SHF Series and SHFSC4

Fig. 9 Load-displacement relation of each specimen

다. 콘크리트의 변형은 Fig. 8과 같이 스트레인게이지 60 mm를 사용하여 경간 중앙위치의 콘크리트 상·하단면으로부터 20mm, 중심에서 상·하부로 75mm 위치에 콘크리트 용 스트레인게이지(C1, C2, C3, C4)를 부착하였다.

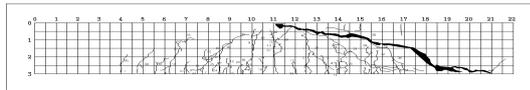
4. 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 이용한 철근콘크리트 보의 구조성능 평가

4.1 하중-변위

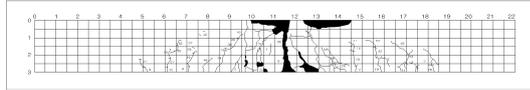
전단보강근이 없는 표준실험체(SSS)의 사인장균열이 120kN 가력시 발생하였고 극한하중은 121.9kN으로 측정되었으며, 전단보강근이 있는 표준실험체(BSS)의 초기 균열은 재하하중 22kN 가력시 발생하였고, 사인장균열은

발생하지 않았다. 극한하중은 134.6kN으로 측정되었다.

고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 이용한 철근콘크리트 보 실험체 SHF시리즈와 SHFSC시리즈는 전 구간을 통하여 안정적인 거동을 나타내었고, 최대내력과 연성능력이 향상되었음을 알 수 있었다. Fig 9(a) ~ (f)에서 보는 것과 같이 PVA섬유 혼입율을 조합한 실험체 SHFSC시리즈는 PVA섬유 혼입율의 변화에 따른 실험체 SHF0.5와 SHF0.75보다 최대내력이 향상되었으며, 충분한 연성능력을 확보하면서 거동하는 것을 알 수 있다. 그리고 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 활용한 철근콘크리트 보 실험체(SHF시리즈, SHFSC시리즈)는 전단보강근이 있는 표준실험체(BSS)와 유사한 거동을 나타내었으며, 시공성, 경제성, 구조성능 개선의 측면에서 PVA섬유 혼입율이 1.5%일

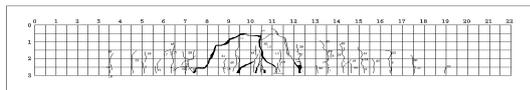


(a) SSS

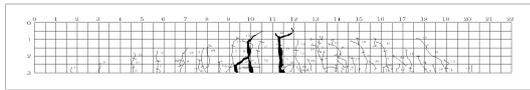


(b) BSS

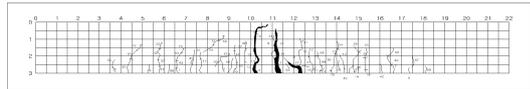
Fig. 10 Cracking and final failure mode of standard specimens



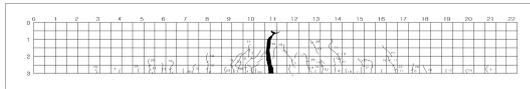
(a) SHF0.5



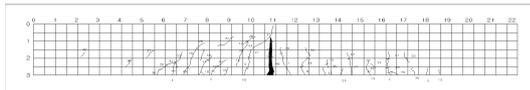
(b) SHF0.75



(c) SHF1.0



(d) SHF1.5



(e) SHF2.0

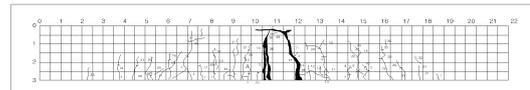
Fig. 11 Cracking and final failure mode of SHF Series specimens

때 가장 효과적인 성능을 발휘하였고, 최적의 혼입율이라고 판단된다.

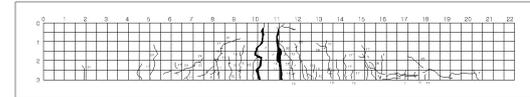
4.2 파괴형태

4.2.1 표준실험체

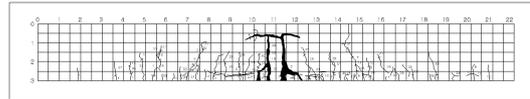
전단강근이 없는 표준실험체(SSS)는 Fig. 10(a)에서와 같이 사인장균열이 발생하여 최대내력에 도달한 후 급격히 파괴되는 전형적인 전단파괴형태를 나타내고 있다. 전단보강근이 있는 표준실험체(BSS)는 Fig. 10(b)에서와 같이 가력시 인장철근의 항복에 의한 전형적인 휨인장 파괴를 나타내었다.



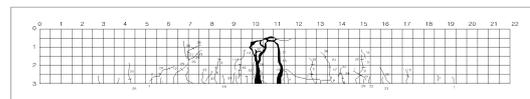
(a) SHFSC1



(b) SHFSC2



(c) SHFSC3



(d) SHFSC4

Fig. 12 Cracking and final failure mode of SHFSC Series specimens

Table 8 Final failure mode of each specimen

Specimen	PVA fiber content (%)	Shear reinforcement	Failure
SSS	—	—	Shear
BSS	—	○	Flexural
SHF0.5	0.5	—	Flexural
SHF0.75	0.75		Flexural
SHF1.0	1.0		Flexural
SHF1.5	1.5		Flexural
SHF2.0	2.0		Flexural
SHFSC1	Combination of 0.5+1.0	—	Flexural
SHFSC2	Combination of 0.5+1.5		Flexural
SHFSC3	Combination of 0.75+1.0		Flexural
SHFSC4	Combination of 0.75+1.5		Flexural

4.2.2 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 이용한 철근콘크리트 보(SHF시리즈, SHFSC시리즈)

PVA섬유 혼입율에 따른 실험체 SHF시리즈와 PVA섬유 혼입율을 조합한 실험체 SHFSC시리즈의 파괴형태는 충분한연성을 확보하면서 안정적인 휨인장 파괴를 나타내었으며, Fig. 11, 12와 Table 8에 나타낸 바와 같다.

각 실험체들은 휨 균열이 발생된 이후에 균열의 폭이 증가하지 않고, 이미 발생되어진 균열의 주변으로 추가의 미세 균열들이 발생하는 특성을 나타내었다. 이때의 균열

Table 9 Load-carrying capacity ratio of each specimen

CASE(i)	Specimen	Maximum strength (kN)	Strength ratio (CASEi/CASE0)
0	SSS	121.9	1
1	SHF0.5	125.56	1.03
2	SHF0.75	129.21	1.06
3	SHF1.0	135.31	1.11
4	SHF1.5	151.16	1.24
5	SHF2.0	153.59	1.26
6	SHFSC1	131.18	1.08
7	SHFSC2	143.59	1.18
8	SHFSC3	133.28	1.09
9	SHFSC4	146.81	1.20

폭은 최종 파괴를 일으킨 균열을 제외하고는 모두 미세하게 제어되었다. 이것은 섬유가 균열과 균열사이의 가교역할에 의한 것으로 판단된다. 이러한 특성은 구조물의 전단 및 내구성 증진에 기여할 것으로 판단된다.

4.3 최대내력

표준실험체(SSS)의 내력은 121.9kN으로 나타났다. 한편, 고로슬래그미분말이 함유된 고인성섬유 복합모르타르를 활용한 철근콘크리트 보 실험체(SHF시리즈, SHFSC시리즈)는 이에 비하여 내력이 상승되었음을 알 수 있다. Table 9는 각 실험체의 최대내력과 전단보강근이 없는 표준실험체(SSS)에 대한 각 실험체의 최대내력의 비(CASE i/CASE 0)를 분석한 것이다.

각 실험체의 내력 비교를 통하여 PVA섬유 혼입율에 따른 실험체 SHF시리즈는 3~26%, PVA섬유 혼입율을 조합한 실험체 SHFSC시리즈는 8~20%를 상회하였고, 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 이용한 철근콘크리트 보 실험체(SHF시리즈, SHFSC시리즈) 모두 섬유 혼입율이 1.5%이상 일 때 내력이 가장 크게 향상되었고, 전단보강근이 있는 표준실험체(BSS)보다도 내력이 향상되었음을 알 수 있다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 고로슬래그미분말로 인하여 섬유-매트릭스의 천이영역(interfacial transition zone)에 크게 영향을 주지 않고 매트릭스의 강도를 증진시키는 효과 때문에 내력이 향상된 것으로 판단된다.

4.4 전단강도

각 실험체의 극한전단력, 극한전단응력 및 전단보강근

Table 10 Shear force and stress of each specimen

Specimen	PVA fiber volume fraction (%)	Ultimate shear force (kN)	Ultimate shear stress (MPa)	Ultimate shear stress ratio ($v_u/v_{u,SSS}$)
SSS	-	60.95	1.45	1
SHF0.5	0.5	62.78	1.49	1.03
SHF0.75	0.75	64.61	1.54	1.06
SHF1.0	1.0	67.66	1.61	1.11
SHF1.5	1.5	75.58	1.80	1.24
SHF2.0	2.0	76.80	1.83	1.26
SHFSC1	0.5+1.0	65.59	1.56	1.08
SHFSC2	0.5+1.5	71.63	1.71	1.18
SHFSC3	0.75+1.0	66.64	1.58	1.09
SHFSC4	0.75+1.5	73.21	1.74	1.20

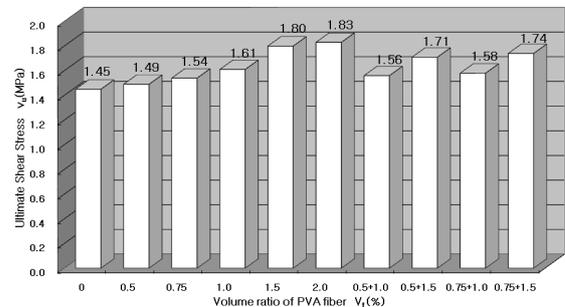


Fig. 13 Ultimate shear stress on change of PVA fiber content

이 없는 표준실험체(SSS)에 대한 극한전단응력의 비를 Table 10에 나타내었으며, PVA섬유혼입율에 따른 극한전단응력의 비교는 Fig. 13과 같다. 표준실험체(SSS)와의 상대 극한전단응력비는 PVA섬유 혼입율이 증가함에 따라 실험체 SHF시리즈는 최대 26%, 실험체 SHFSC시리즈는 최대 20%가 증가되는 현상을 나타내었다. PVA 섬유 혼입율이 클수록 극한전단응력은 증가하고 있다.

PVA섬유 혼입율에 따른 실험체 SHF시리즈의 경우 PVA섬유 혼입율을 조합한 실험체 SHFSC시리즈 보다 증가되었다. 그리고 PVA섬유 혼입율이 클수록 극한전단응력이 증가하였으며, 실험체 SHFSC2, SHFSC4가 SHFSC1, SHFSC3보다 약 10%정도 상승된 것을 알 수 있다. 또한, 섬유 혼입율이 2%이상일 때 전단응력이 가장 크지만 시공성, 분산성 등을 고려할 때 현실적으로 경제성 및 실용성이 없는 것으로 판단된다.

4.5 연성능력

본 연구에서의 보 부재의 연성능력은 항복변위에 대한

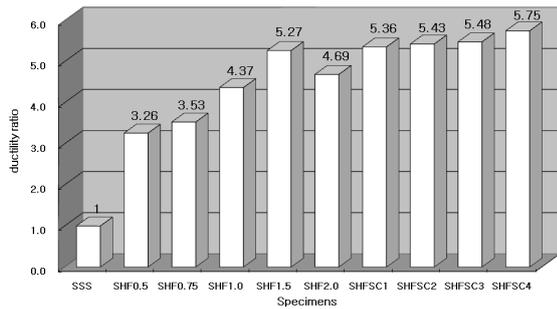


Fig. 14 Displacement ductility ratio of each specimen

변위연성비($\mu = \delta_u / \delta_y$)로 정의하였으며, 부재항복시(δ_y)의 처짐량을 기준으로 하여 부재 최대하중시의 변위와 최대하중 이후의 최대하중의 80%에서의 변위(δ_u)를 이용하여 평가하였다. 또한, 부재 항복변위(δ_y)는 극한강도점을 지나는 수평선과 극한강도의 75%점을 지나는 활선강성선(secant stiffness line)과의 교점으로 하는 Park Method¹¹⁾로 정하였다.

각 실험체의 연성능력은 Fig. 14와 Table 11에 나타난 것과 같이 PVA섬유 혼입율에 따른 실험체(SHF시리즈)는 전단보강근이 없는 표준실험체(SSS)에 비하여 3.26~5.27배 증가하였고, PVA섬유 혼입율을 조합한 실험체(SHFSC시리즈)는 전단보강근이 없는 표준실험체(SSS)에 비하여 5.35~5.75배 증가하였다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 일반적으로 콘크리트는 균열이 발생되어진 이후에는 더 이상 인장력을 전달하지 못하고 파괴되지만, 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 이용한 철근콘크리트 보 실험체(SHF시리즈, SHFSC시리즈)는 고로슬래그미분말이 산화피막을 형성하여 섬유에 코팅효과를 주고 유동화제로 인하여 유동성이 증진되면서 PVA섬유의 분산효과가 증진되면서 콘크리트 속에 골고루 분산되고, 이로 인하여 미세하게 균열의 폭을 유지하고 균열과 균열사이의 가교역할을 함으로써 인장력의 전달 능력이 지속되면서 연성능력이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 고인성섬유 복합모르타르에 고로슬래그미분말을 혼입한 철근콘크리트 보 실험체(SHF시리즈, SHFSC시리즈)의 성능을 평가하기 위하여 총 11개의 실험체를 제작하여, 구조성능 평가 및 개선을 위한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

Table 11 Strength and ductility of each specimen

Specimen	δ_y (mm)	V_y (kN)	δ_{max} (mm)	V_{max} (kN)	δ_u (mm)	V_u (kN)	$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y}$
SSS	6.12	91.43	12.9	121.9	13.67	97.52	2.23
BSS	6.56	100.95	75.7	134.6	83.59	107.68	12.74
SHF0.5	8.57	94.17	56.33	125.56	62.34	100.45	7.27
SHF0.75	8.08	96.91	51.87	129.21	63.69	103.37	7.88
SHF1.0	6.78	101.48	33.74	135.31	66.15	108.25	9.76
SHF1.5	6.48	113.37	44.33	151.16	76.27	120.93	11.77
SHF2.0	6.62	115.19	8.37	153.59	69.33	122.87	10.47
SHFSC1	6.25	98.39	69.59	131.18	74.75	104.94	11.96
SHFSC2	6.48	107.69	76.97	143.59	78.53	114.87	12.12
SHFSC3	6.68	99.96	70.94	133.28	81.7	106.62	12.23
SHFSC4	6.69	110.11	75.23	146.81	85.9	117.45	12.84

- (1) 전단보강근이 없는 표준실험체(SSS)는 사인장균열에 의한 전단파괴를 나타내었고, 전단보강근이 있는 표준실험체(BSS)는 휨인장 파괴를 나타내었다. 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 이용한 철근콘크리트 보 실험체(SHF시리즈, SHFSC시리즈)는 미세 균열이 휨 구간 전반에 나타나면서 안정적인 휨인장 파괴를 나타내었다.
- (2) 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 이용한 철근콘크리트 보 실험체(SHF시리즈, SHFSC시리즈)는 PVA섬유 혼입율이 증가함에 따라 극한전단응력은 전단보강근이 없는 표준실험체(SSS)에 보다 최대 26% 증가되었다.
- (3) 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 이용한 철근콘크리트 보 실험체(SHF시리즈, SHFSC시리즈)의 경우 전단보강근이 없는 표준실험체(SSS)에 비하여 연성능력이 3.26~5.96배 증가하였다. 이것은 고로슬래그미분말과 유동화제로 인한 유동성과 섬유의 분산성이 크게 증진되고 PVA섬유가 가교 역할을 하여 인장력 전달 능력이 지속되어 연성능력이 크게 증가하기 때문인 것으로 판단된다.
- (4) 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 이용한 철근콘크리트 보 실험체(SHF시리즈, SHFSC시리즈)는 경제성, 시공성, 구조성능개선 측면에서 섬유 혼입율이 1.5%일 때 우수한 성능을 나타내었고, 적절한 섬유 혼입율인 것으로 판단된다.
- (5) 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 이용한 철근콘크리트 보 실험체(SHF시리즈)

즈, SHFSC시리즈)는 전단보강근이 있는 표준실험체(BSS)와 유사한 연성적인 휨거동과 특성을 나타냄으로써 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성 섬유 복합모르타르는 전단보강근의 대체효과 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김윤용, 김정수, 김희신, 하기주, 김진근, “마이크로역학에 의하여 설계된 ECC (Engineered Cementitious Composite)의 역학적 특성”, 한국콘크리트학회 논문집, 제17권 5호, 2005. 10, pp.707-714.
2. 김윤용, 김정수, 하기주, 김진근, “고로슬래그미분말이 혼입된 ECC(Engineered Cementitious Composite)의 개발”, 한국콘크리트학회 논문집, 제18권 1호, 2006. 2, pp.21-28.
3. 김윤용, 하기주, 신종학, “마이크로역학과 안정상태 균열이론에 의한 ECC(Engineered Cementitious Composite) 매트릭스 배합의 설계”, 대한건축학회 논문집, 제23권 5호, 2007. 5, pp.11-18.
4. 김장호, 윤현도, 전에스터, “ECC의 재료설계 특성 및 활용”, 한국콘크리트 학회지, 제18권 1호, 2006. 1, pp.28-35.
5. 양일승, 윤현도, 김선우, 박완신, 한병찬, 문연준, “고인성 섬유보강 시멘트 복합체를 사용한 내진요소의 이력특성”, 대한건축학회 논문집(구조계), 제21권 1호, 2005. 1, pp.51-58.
6. 하기주, 신종학, 곽윤근, 권철성, “초기재령 강섬유보강 철근 콘크리트 보의 구조성능 평가 및 개선”, 한국구조물진단학회 논문집, 제3권 3호, 1999. 7, pp.129-138.
7. 하기주, 신종학, 김윤용, “고인성섬유 복합모르타르 전단벽체의 구조성능 평가”, 대한건축학회 연합논문집, 제7권 1호, 2005. 2, pp.39-45.
8. Li, V.C, Wang, Y., Backer, S., “A Micromechanical Model of Tension-Softening and Bridging Toughening of Short Random Fiver Reinforced Brittle Matrix Composites”, J. Mechanics and Physics of Solids, Vol.39 Issue.5, 1991, pp.607-625.
9. Li, V.C., Wu, H.C., “Condition for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites”, Journal Applied Mechanics Review, Vol.45 Issue.8, 1992, pp.390-398.
10. Lin, Z., Kanda, T., Li, V.C., “On Interface Property Characterization and Performance of Fiber Reinforced Cementitious Composites”, Journal of Concrete Science and Engineering, RILEM, 1, 1992, pp.173-184.
11. Marshall, D.B., Cox, B.N., “A J-integral Method for Calculating Steady-state Matrix Cracking Stresses in Composite”, Mechanics of Materials, Issue.8, 1998, pp.127-133.
12. Park, R., “Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing”, Proceedings of Ninth Word Conference on Earthquake Engineering, VII, 1988. 8, pp.605-616.

(접수일자 : 2010년 5월 11일)
 (수정일자 : 2010년 7월 27일)
 (심사완료일자 : 2010년 8월 11일)

요 지

본 연구는 표준실험체인 전단보강근이 없는 철근콘크리트 보(SSS)와 전단보강근이 있는 철근콘크리트 보(BSS), 성능개선실험체로는 전단보강근이 없는 철근콘크리트 보에 고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 타설한 실험체(SHF시리즈, SHFSC시리즈)로 총 11개의 실험체를 축소 제작하여 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 얻어진 결과를 비교·분석하여 하중-변위, 파괴형태, 최대내력, 전단응력 등을 규명함으로써 구조성능의 개선정도를 평가하였다.

고로슬래그미분말을 혼입한 고인성섬유 복합모르타르를 이용한 철근콘크리트 보 실험체(SHF시리즈, SHFSC시리즈)의 경우 전단보강근이 없는 표준실험체(SSS)보다 전단응력은 각각 26%, 28%, 연성능력은 각각 5.27, 5.75배 증가하는 결과를 나타내었다. 또한, 충분한 연성적인 거동과 안정적인 휨인장 파괴를 나타내었다.

핵심 용어 : 고인성섬유 복합모르타르, 고로슬래그미분말, 구조성능, PVA섬유