

고로슬래그미분말이 혼입된 ECC (Engineered Cementitious Composite)의 개발

김윤용¹⁾·김정수¹⁾·하기주²⁾·김진근¹⁾*

¹⁾한국과학기술원 건설및환경공학과 ²⁾경일대학교 건축학부

(2005년 1월 31일 원고접수, 2005년 10월 30일 심사완료)

Development of an ECC (Engineered Cementitious Composite) Designed with Ground Granulated Blast Furnace Slag

Yun Yong Kim¹⁾, Jeong-Su Kim¹⁾, Gee-Joo Ha²⁾, and Jin-Keun Kim¹⁾*

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

²⁾School of Architecture, Kyungil University, Gyeongsan 712-904, Korea

(Received January 31, 2005, Accepted October 30, 2005)

ABSTRACT

This paper presents both experimental and analytical studies for the development of an ECC (Engineered Cementitious Composites) using ground granulated blast furnace slag (slag). This material has been focused on achieving moderately high composite strength while maintaining high ductility, represented by strain-hardening behavior in uniaxial tension. In the material development, micromechanics was adopted to properly select optimized range of the composition based on steady-state cracking theory and experimental studies on matrix, and interfacial properties. A single fiber pullout test and a wedge splitting test were employed to measure the bond properties of the fiber in a matrix and the fracture toughness of mortar matrix. The addition of the slag resulted in slight increases in the frictional bond strength and the fracture toughness. Subsequent direct tensile tests demonstrate that the fiber reinforced mortar exhibited high ductile uniaxial tension behavior with a maximum strain capacity of 3.6 %. Both ductility and tensile strength (~5.3 MPa) of the composite produced with slag were measured to be significantly higher than those of the composite without slag. The slag particles contribute to improving matrix strength and fiber dispersion, which is incorporated with enhanced workability attributed to the oxidized grain surface. This result suggests that, within the limited slag dosage employed in the present study, the contribution of slag particles to the workability overwhelms the side-effect of decreased potential of saturated multiple cracking.

Keywords : ECC, ground granulated blast furnace slag, micromechanics, steady-state cracking, strain-hardening behavior

1. 서 론

모르타르와 같은 유사취성적인 시멘트계 재료에 합성섬유를 혼입함으로써 콘크리트의 수축, 수백 배에 달하는 변형능력과 파괴인성을 보이는 고인성 섬유복합 모르타르를 얻을 수 있음은 기존의 연구에 의하여 밝혀진 바 있다¹⁾. ECC(engineered cementitious composites)로 알려진 이 재료는 모르타르에 2%이내의 합성섬유를 혼입함으로써 콘크리트의 수축, 수백 배에 달하는 인장변형을 경화거동을 보이는 고인성 섬유복합 모르타르로서 미시간대학의 Li 등²⁾이 제안한 마이크로역학(micromechanics)을 이론적인 배경

으로 하고 있다. 특히 2종류의 취성적인 재료(모르타르, 합성섬유)로 구성된 섬유복합 모르타르(또는 콘크리트)에 높은 연성을 부여하기 위해서는 역학적 구성요인인 섬유, 모르타르 매트릭스(mortar matrix) 특성을 파악하고 이를 이용하는 방법이 효과적이기 때문에 본 연구진은 이에 관련한 연구를 선행한 바 있다³⁾.

기존 연구⁴⁾에 의하여 국내에서 상용 중인 재료를 이용한 고인성 섬유복합 모르타르의 기본 배합이 이미 결정되었는데, 이 연구에서는 고로슬래그미분말을 혼입하여 특히 연성과 강도 측면에서 보다 개선된 재료를 개발함에 목적이 있다. 이 목적을 달성하기 위하여 잠재수경성을 갖고 있는 혼화재료인 고로슬래그미분말을 도입하였으며, 이를 이용하여 제조된 모르타르 매트릭스의 파괴역학적 특성과 섬유-모르타르 경계면의 마이크로역학적 특성을 파악하였다.

* Corresponding author

E-mail : kimjinkeun@kaist.ac.kr

©2006 by Korea Concrete Institute

특히 시멘트계 재료의 역학적 특성에 가장 큰 영향을 미치는 물-시멘트비에 대한 연구에 초점을 맞추어 물-시멘트비 35%, 47.5%, 60%에 대하여 각각 고로슬래그미분말을 혼입하여 섬유인발실험(fiber pullout test)과 모르타르의 썬기조개실험(wedge splitting test)을 수행하고 마이크로역학(micromechanics)에 의거한 균열면 섬유 가교(fiber bridging) 거동을 해석하여 1축인장 하에서 인장변형을 경화거동을 보이는 고인성 섬유복합 모르타르를 개발하였다.

2. 섬유복합 모르타르 개발의 이론적 배경과 고로슬래그미분말의 적용

2.1 마이크로역학

이 연구에서는 섬유복합 모르타르를 개발하기 위하여 마이크로역학과 안정상태 균열이론(steady-state cracking theory)에 근거하여 최적의 배합을 결정하였다. 이 때 고려되는 기본적인 역학적 구성요소는 섬유, 모르타르 매트릭스, 섬유-매트릭스 경계면(interface)으로써 재료의 개발과정을 개념적으로 표현하면 Fig. 1에 나타난 바와 같다.

섬유복합 모르타르가 인장변형을 경화거동을 나타내기 위해서는 안정상태 균열발생의 필요조건을 만족함으로써, 인장력 하에서 다수의 미세균열이 발생하여야 한다. 이러한 필요조건이 안정상태 균열이론이며 이를 적용하기 위해서는 우선 섬유복합 모르타르 미세구조의 역학적 특성을 이용하여 균열면 거동을 해석적으로 구하여야 한다. 이 때 사용되는 이론적인 배경이 마이크로역학이다²⁾.

안정상태의 균열을 발생시키기 위한 첫 번째 조건은 에너지 조건으로써 섬유복합 모르타르의 균열면 보상에너지 J_b' 가 매트릭스의 균열선단 파괴인성 J_{mb} 보다 항상 커야 한다는 것이다.

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

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

여기서, J_b' 는 Fig. 1의 Task 2에서 도시한 균열면 응력(σ)와 균열개구변위(δ)의 관계로부터 계산할 수 있다. 그리고 δ_0 는 최대 균열면 응력 σ_0 에 해당되는 균열개구변위이고 K_m 과 E_c 는 각각 매트릭스의 파괴인성과 탄성계수이다.

에너지 조건과 함께 반드시 충족되어야 하는 또 다른 요구조건은 σ_0 가 1축인장 균열강도 σ_c 보다 반드시 큰 값이어야 한다는 인장강도 요구조건이다. 이 조건이 만족되지 않을 경우, 다수의 균열로 변형이 전파되지 못하고, 최초 발생한 균열로 모든 변형이 집중되는 유사취성재료의 거동을 나타내게 된다.

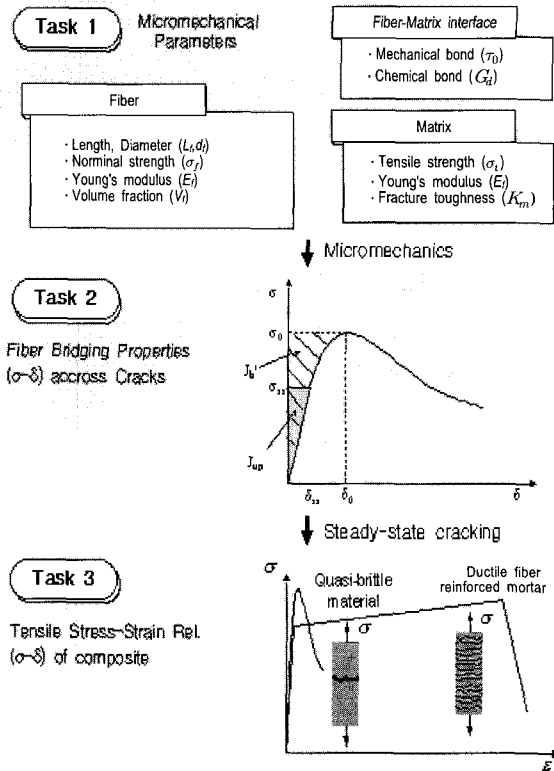


Fig. 1 Flow-chart of important elements based on micromechanics and steady-state cracking theory for the development of strain-hardening fiber reinforced cementitious composites

$$\sigma_c < \sigma_0 \quad (3)$$

여기서, σ_c 는 최대초기결함의 크기와 K_m 에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있다⁵⁾. 마이크로역학의 이론에 관한 보다 상세한 내용은 Li 등^{6,7)}에 의하여 소개된 바 있다.

결과적으로 식 (1)과 식 (3)을 만족시킴으로써 기존 콘크리트(또는 모르타르)가 갖고 있는 유사취성을 높은 연성으로 변화시킬 수 있다.

이러한 방법을 이용하면 최소의 실험적인 접근(trial-error)으로 고인성 섬유복합 모르타르를 설계할 수 있고 보강 섬유의 효율을 극대화할 수 있다.

2.2 고로슬래그미분말

이 연구에서는 국내에서 상용중인 고로슬래그미분말을 이용하여 고인성 섬유복합 모르타르의 기본 배합을 제시하고자 한다. 이러한 혼화재를 섬유복합 모르타르에 혼입할 경우 시멘트 수화반응에 의해 생성되는 수산화칼슘을 포졸란 반응에 의해 소비하므로 매트릭스가 치밀화되어 강도 증진과 더불어 관련된 역학적 특성이 향상되고, 매트릭스와 섬유 사이의 부착특성도 향상되는 것으로 알려져 있다⁶⁾.

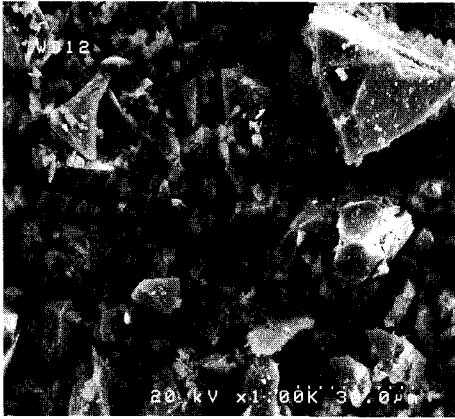


Fig. 2 Particle morphology of blast furnace slag

또한 유리질의 고로슬래그미분말을 혼입함으로써 입자 표면의 산화피막에 의한 코팅효과로 미분말이 물을 구속하지 않아 소오의 유동성을 확보하기 위한 단위수량을 절감할 수 있으므로 섬유복합 모르타르를 배합할 때 유동성을 증가시켜 섬유복합 모르타르에서 섬유의 효과적인 분산을 돕는다. 따라서 이 연구에서는 국내에서 고로슬래그미분말을 전문적으로 생산하는 B사의 분말도 4000cm²/g급의 고로슬래그미분말 제품을 충전재로 선정하였다. 이 연구에서 사용된 고로슬래그미분말의 형상은 Fig. 2에 나타난 바와 같다.

기존의 연구에 따르면 고로슬래그미분말을 30% 범위 내로 첨가할 경우, 레올로지 특성이 크게 증진되는 것으로 알려져 있다⁸⁾.

그러나 이 값은 콘크리트에 고로슬래그미분말을 첨가하는 경우에 적용되는 것이므로 30%를 중심으로 섬유복합 모르타르에 고로슬래그 첨가량을 변화시켜가면서 레올로지 실험을 수행한 결과 25% 고로슬래그미분말을 첨가하는 경우가 레올로지 특성이 가장 우수하였기 때문에 고로슬래그미분말을 25% 첨가하기로 결정하였다.

3. 실험 계획 및 방법

3.1 실험 개요

물-시멘트비 35%, 47.5%, 60%에 대하여 고로슬래그미분말을 25% 첨가함으로써 각각 물-결합제비 28%, 38%, 48%에 대하여 섬유 인발실험과 모르타르의 췌기췌갸실험을 수행하여 섬유-매트릭스 경계면과 모르타르 매트릭스의 역학적 특성을 구하였다.

그리고 구한 값을 마이크로역학과 안정상태 균열이론에 적용시켜 안정적인 인장변형률거동을 보이는 물-결합제비의 범위를 선정하고 선정된 배합에 대하여 직접인장실험을 통하여 인장변형률 경화거동을 검토하였다.

3.2 실험 재료

실험에서 사용된 섬유는 K사에서 생산된 Poly Vinyl Alcohol(PVA) 섬유이며, 섬유의 물리적인 성질은 Table 1에 나타내었다.

S사의 제1종 포틀랜드 시멘트가 주 결합재로 사용되었고 잔골재는 평균입도가 110µm인 규사를 사용하였으며 섬유의 효과적인 분산을 위하여 카르복실계 감수제(PCSP)와 셀룰로즈계 분리지감제(HPMC)를 혼화제로 첨가하였다. 각 재료의 품질 특성은 Table 2와 3에 제시한바와 같고, 모든 값은 제조회사에서 제공하는 품질 특성을 그대로 인용하였으며, 배합조건은 Table 4와 같다.

3.3 실험체 제작

3.3.1 섬유 인발실험

섬유 인발실험을 위한 실험체는 섬유 필라멘트를 아크릴 몰드에 통과시킨 후 모르타르를 몰드에 부어서 실험체를 제작하였다⁴⁾. 실험체는 재령 2일에 탈형하였고 인발실험 하루 전에 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였다. 섬유 인발실험을 할 때 섬유가 완전한 뽑힘거동을 보이도록 실험체를 1.0mm 미만의 두께(=문힘길이)로 연마하는 방법으로 제작하였다⁹⁾.

Table 1 Properties of PVA fiber

Diameter (µm)	Length (mm)	Nominal tensile strength(MPa)	Elongation (%)	Oiling agent content(%)	Young's modulus (GPa)
39	12	1620	6	0.8	38.9

Table 2 Properties of cement and sand

Material Property	Type I cement	Slag	Sand
Grain size(µm)	11.7±14.8	11.0±3.0	110±38
Specific gravity	3.15	2.90	2.60

Table 3 Properties of chemical admixtures

Admixture Property	HPMC	PCSP
Water content	0%(powder)	60%(liquid)
Specific gravity	1.3	1.2

Table 4 Mix proportions

W/C(%)	Slag/C(%)	W/B(%)	S/C(%)	PCSP(%)	HPMC(%)
35	25	28	80	3.0	-
47.5	25	38	80	2.0	-
60	25	48	80	1.0	0.1

* W: water, C: cement, S: sand, Slag: ground granulated blast furnace slag, B: binder(C+slag). All numbers are mass ratios

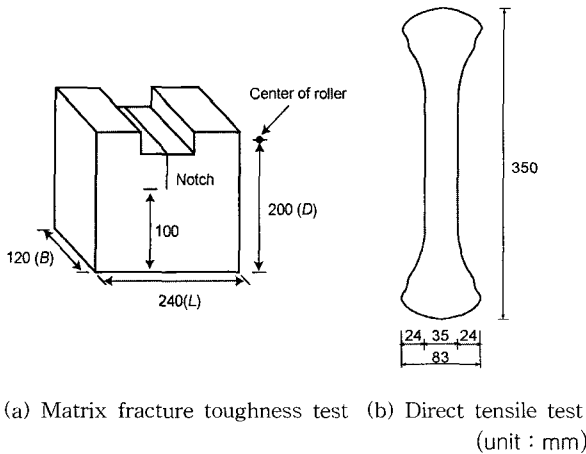


Fig. 3 Specimen geometries

3.3.2 모르타르의 썬기쪼갠실험

썬기쪼갠실험은 콘크리트 또는 모르타르의 파괴인성 ($K_{Ic}=K_m$)을 구하는 파괴역학 실험 방법의 일종으로써 자중의 영향을 배제하면서, 균열면을 직접 열기 때문에 매우 안정적인 결과를 나타낸다. 선행된 연구¹⁰⁾와 동일한 방법으로 실험을 수행하였다.

실험체의 기하학적 형상은 Fig. 3(a)와 같으며 실험체의 초기 균열은 타설 전에 강관을 삽입한 후, 탈형 이후에 이를 제거하는 방법으로 만들었다. 또한 로울러 하중장치를 고정시키고, 클립게이지(*clip gage*)를 설치하기 위하여 실험체의 윗부분에 홈을 만들었다.

3.3.3 직접 인장실험

직접인장실험은 두께 20 mm이고 단부파괴를 방지하면서 효율적인 1축 인장실험이 수행될 수 있는 dog-bone형상을 채택하였다. 실험체의 형상은 Fig. 3(b)에 나타내었다.

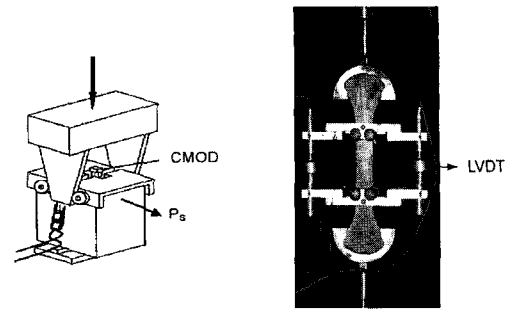
3.4 실험 방법

3.4.1 섬유 인발실험

실험체의 밑면과 노출된 섬유의 일부를 Instron 실험장치의 Actuator와 로드셀에 각각 부착하였다. 0.2 mm/min의 변위제어 방식으로 인발실험을 수행하였으며 섬유 인발실험에 작용되는 하중은 10 N 용량의 로드셀로 측정하였다⁴⁾.

3.4.2 모르타르의 썬기쪼갠실험

썬기쪼갠실험을 이용하여 이 연구에서 수행한 실험방법은 Fig. 4(a)에 나타낸 바와 같다. 수직하중(P)과 함께 로울러와 썬기가 접하는 위치(썬개는 힘(P_s))가 작용하는 위치에서 균열개구변위(CMOD)가 측정된다. 균열개구변위를 0.06 mm/min의 속도로 제어하는 방법으로 실험을 수행하였으며, 이 제어 속도에 의하면 실험 시작 후 약 20~40초 사이에 최대하중에 도달하게 된다.



(a) Matrix fracture toughness test (b) Direct tensile test
Fig. 4 Experimental test setup

3.4.3 직접인장실험

1축인장 하에서의 변형률 경화거동은 고인성 섬유복합재료 고유의 특성으로서 제작된 실험체가 변형률 경화거동을 나타내는지를 검증하기 위하여 직접인장실험을 수행하였다. 9.8 kN 용량의 로드셀이 부착된 만능재료시험기에서 0.18 mm/min의 변위제어로 수행되었고 Fig. 4(b)에 도시한 바와 같이 2개의 LVDT가 실험체의 양측에 부착되어 150 mm의 계측길이에 대한 변위를 측정 후, 변형률로 환산하였다. 재령 28일에 실험이 수행되었고, 응력-변형률 관계와 함께 균열장도, 인장장도, 극한변형률 등이 측정되었다.

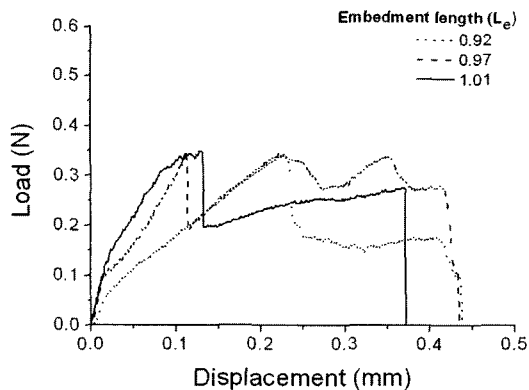
4. 실험 결과 및 분석

4.1 섬유 인발실험

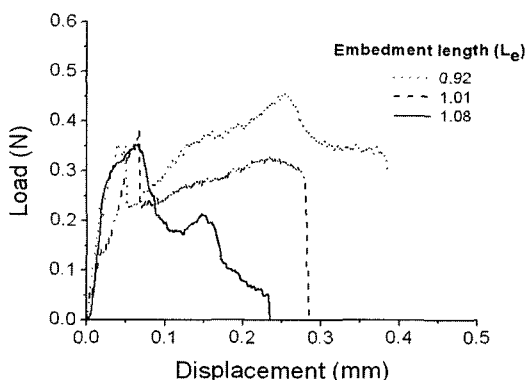
섬유 인발실험을 통하여 각각의 물-결합제비에 대한 인발하중-뿔힘량의 관계(재령 28일)는 Fig. 5에 나타내었다. 섬유 인발실험 할 때 인발하중이 증가하다 섬유와 매트릭스의 임계 부착하중에 도달하면 섬유와 매트릭스의 부착이 떨어져 하중이 급격히 떨어지면서 매트릭스로부터 섬유의 인발이 일어나게 된다. 인발하중-뿔힘량의 관계로부터 섬유와 매트릭스의 화학적 부착(G_d)과 마찰부착(τ_0)을 구하였으며^{4,10)} 계산한 섬유-매트릭스의 화학적, 마찰부착 특성은 Table 5에 나타내었다.

4.2 모르타르의 썬기쪼갠실험

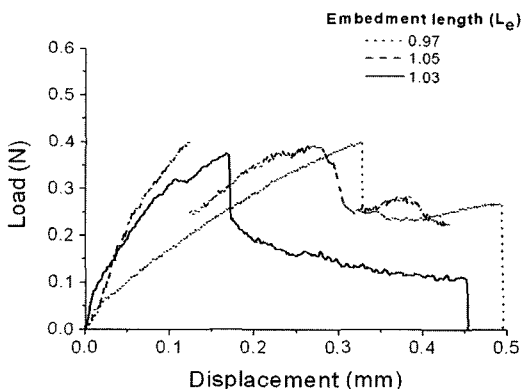
썬기쪼갠실험으로부터 얻은 하중-균열개구변위 곡선은 Fig. 6과 같다. 나타난 바와 같이 실험체의 물-시멘트비(물-결합제비)가 감소하면서 P-CMOD 곡선의 기울기가 증가하는데 이는 매트릭스의 강도가 증가하기 때문이다. 하중-균열개구변위 곡선으로부터 얻은 CMOD, P , P_c (최대 수직하중) 등을 이용하며 $K_{Ic}(=K_m)$ 를 구하였으며^{4, 10)} 이 과정을 통하여 계산한 매트릭스의 파괴인성을 Table 5에 나타내었다.



(a) W/C = 60% (W/B = 48%)



(b) W/C = 47.5% (W/B = 38%)



(c) W/C = 35% (W/B = 28%)

Fig. 5 Fiber pullout displacement vs. applied load curves obtained from single fiber pullout tests at 28 days

Table 5 Matrix fracture toughness and fiber-matrix interface properties in case of the 25% addition of the blast furnace slag

Age (day)	W/C = 60% (W/B = 48%)			W/C = 47.5% (W/B = 38%)			W/C = 35% (W/B = 28%)		
	τ_0 (MPa)	G_{d_i} (J/m ²)	K_{i_c} (MPa·m ^{1/2})	τ_0 (MPa)	G_{d_i} (J/m ²)	K_{i_c} (MPa·m ^{1/2})	τ_0 (MPa)	G_{d_i} (J/m ²)	K_{i_c} (MPa·m ^{1/2})
7	1.385	1.773	0.075	1.424	1.791	0.121	1.470	1.806	0.169
14	1.434	1.833	0.110	1.498	1.870	0.153	1.536	1.870	0.218
28	1.646	1.877	0.120	1.847	1.833	0.168	1.942	1.864	0.262

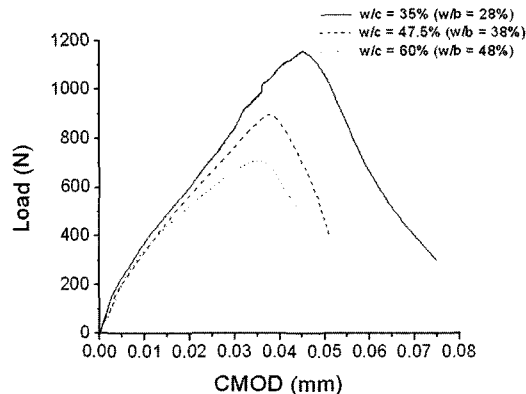


Fig. 6 CMOD vs. applied load curves obtained from wedge-splitting tests at 28 days

4.3 최적의 물-결합재비 범위의 결정

고로슬래그미분말이 혼입된 경우 섬유-매트릭스 경계면의 마이크로역학적 특성과 모르타르의 파괴역학적 특성을 결정하기 위하여 섬유 인발실험과 모르타르의 썬기조깅실험을 수행하였으며 그 결과를 이용하여 구한 매트릭스와 섬유 사이의 마찰부착과 화학적 부착, 매트릭스의 파괴인성을 Table 5에 나타내었다. 선행된 연구^{4,10)}에 의하여 파악된 고로슬래그미분말이 첨가되지 않은 경우의 매트릭스와 섬유 사이의 마찰부착과 화학적 부착, 매트릭스의 파괴인성은 Table 6에 나타내었다.

Tables 5와 6에 나타난 바와 같이 고로슬래그미분말을 사용하였을 경우 화학적 부착은 큰 변화가 없지만 마찰부착은 약 10% 이내로 증가하는 것을 알 수 있다. 화학적 부착이 큰 변화가 없는 이유는 이 연구에서 사용한 PVA 섬유가 친수성 섬유이므로 최소한의 물이 존재한다면 화학적 부착이 물-시멘트비와 결합재의 양에 큰 영향을 받지 않기 때문인 것으로 판단된다. 또한 마찰부착이 약 10% 이내로 소폭의 증가를 보이는 이유는 고로슬래그 미분말의 크기가 1종 시멘트의 입자 크기와 유사하여 매트릭스-섬유 천이영역(interfacial transition zone)을 충전하는 효과가 크지 않기 때문이다¹¹⁾. 이러한 결과는 섬유-매트릭스 경계면의 부착을 기존의 값(Table 6¹⁰⁾과 유사한 수준으로 유지할 수 있는 긍정적인 효과가 될 것으로 판단된다.

Table 6 Matrix fracture toughness and fiber-matrix interface properties in case of the no addition of the blast furnace slag

Age (day)	W/C = 60%			W/C = 47.5%			W/C = 35%		
	τ_0 (MPa)	G_{d_i} (J/m ²)	K_{i_c} (MPa·m ^{1/2})	τ_0 (MPa)	G_{d_i} (J/m ²)	K_{i_c} (MPa·m ^{1/2})	τ_0 (MPa)	G_{d_i} (J/m ²)	K_{i_c} (MPa·m ^{1/2})
7	1.297	1.795	0.069	1.397	1.923	0.106	1.488	1.796	0.149
14	1.361	1.809	0.086	1.494	1.844	0.134	1.526	1.840	0.188
28	1.617	1.819	0.100	1.822	1.853	0.146	1.903	1.702	0.227

한편 모르타르의 썩기쪼개실험을 통하여 결정된 매트릭스의 파괴인성은 고로슬래그미분말을 사용하지 않았을 경우보다 파괴인성 값이 다소 증가하는 경향을 보인다. 이러한 이유는 잠재수경성 재료인 고로슬래그를 첨가함으로써 전체적인 물-결합재비가 감소되었고 이로 인하여 매트릭스의 강도가 증진되었기 때문인 것으로 판단된다. 매트릭스 파괴인성이 지나치게 증가하면 섬유복합 재료에 높은 연성을 부여하는데 저해 요인이 될 수 있기 때문에(식 (1)) 마이크로역학 이론에 의거한 균열면 해석을 통하여 연성의 수준을 검토하여야 한다.

안정적인 인장 변형을 경화 거동을 하는 최적의 물-결합재비의 범위를 결정하기 위하여 Table 5에서 제시된 마이크로역학적 특성과 파괴역학적 특성을 이용하여 인성비(toughness ratio= J_b'/J_{fb})를 계산하였다. 이 때에 섬유의 혼입률은 2% (체적비)를 기준으로 하였는데 보다 자세한 내용은 저자의 선행된 논문에 제시된 바 있다¹⁰⁾. Table 6은 마이크로역학에 의하여 계산된 보상에너지와 매트릭스의 파괴인성의 비율, 즉 인성비를 물-결합재비에 따라 나타내고 있다. 인성비를 계산하기 위하여 각각의 물-시멘트비에 대한 마이크로역학 해석을 수행하였으며 그 결과를 이용하여 보상에너지와 인성비를 계산하였다(Table 6). 각각의 물-결합재비, 재령에 대하여 계산된 인성비는 Fig. 7에 나타내었다.

3.0이상의 인성비를 갖는 섬유복합 재료가 인장변형을 경화거동을 안정적으로 나타낼 수 있는 것으로 밝혀진 바 있다¹⁰⁾. 재령 28일의 인성비가 물-시멘트비 35%(물-결합재비 28%)를 제외한 2가지 경우에는 3.0이상이므로 물-결합재비 38%~48%의 범위에서는 섬유복합 모르타르가 안정적인 인장변형을 경화거동을 나타낼 것으로 판단된다. 따라서 이 범위에 해당되는 섬유복합 모르타르에 대하여 직접인장 실험을 수행하였으며, 그 결과는 다음 절에서 상세하게 다룰 것이다.

4.4 섬유복합 모르타르의 1축인장 거동

선정된 배합에 대한 고인성 섬유복합 모르타르의 역학적 특성을 평가하기 위하여 재령 28일에 직접인장실험을 수행하였다. Fig. 8은 1축인장 하에서 측정된 섬유복합 모르타르의 응력-변형률 관계를 나타낸다. 그림에서 보인 바와

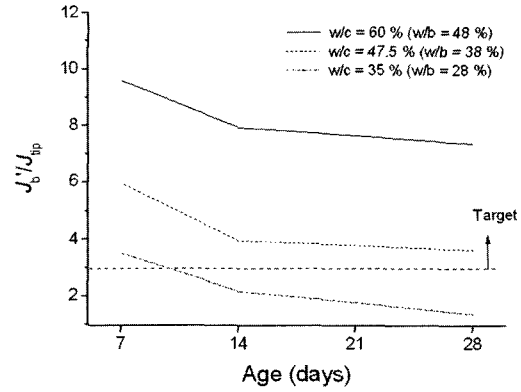


Fig. 7 Toughness ratio as a function of the composite age for the effects of W/C and the addition of slag particles

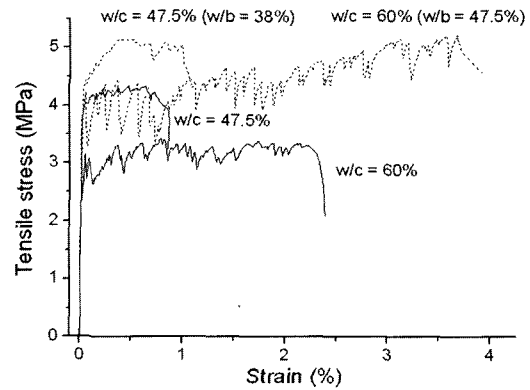


Fig. 8 Typical uniaxial tensile stress-strain curves of fiber-reinforced mortar

같이 고로슬래그미분말을 25% 혼입하여 물-결합재비 38%, 48%에 해당하는 실험체의 평균 인장강도는 각각 5.1 MPa, 5.3 MPa인 것으로 측정되었으며, 이 값은 각각의 1축 인장 균열강도의 평균값인 4.3 MPa(38%), 4.0 MPa(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.

Fig. 8은 대표적인 1축 인장응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 이 그림에는 선행된 연구^{4,10)}의 결과인 고로슬래그미분말이 혼입되지 않은 섬유복합 모르타르(W/C = 47.5%, W/C = 60%)의 실험 결과를 이 연구에서 얻은 실험 결과

Table 6 Toughness ratios calculated based on micro-mechanical analysis

Age (day)	W/C = 60%(W/B = 48%)			W/C = 47.5%(W/B = 38%)			W/C = 35%(W/B = 28%)		
	τ_0 (MPa)	G_{d_0} (J/m ²)	K_{ic} (MPa·m ^{1/2})	τ_0 (MPa)	G_{d_0} (J/m ²)	K_{ic} (MPa·m ^{1/2})	τ_0 (MPa)	G_{d_0} (J/m ²)	K_{ic} (MPa·m ^{1/2})
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

Table 7 Mechanical properties of fiber-reinforced mortar

W/C (%)	W/B (%)	Strain capacity (%)	Tensile strength (MPa)	
			First crack	Ultimate
60	48	3.6	4.0	5.3
60	60	2.2	2.2	3.2
47.5	38	1.0	4.3	5.1
47.5	47.5	0.9	2.8	4.1

(W/B = 38%, W/B = 48%)와 함께 도시하였다. 그림에서 보인 바와 같이, 인성비 조건을 만족하는 섬유복합 모르타르는 1축인장 하에서 뚜렷한 변형을 경화거동을 나타내었으며, 변형능력은 최대 3.6% 변형률(연신율)이었다. 또한 파괴형태를 보면 섬유복합 모르타르는 응력이 증가하여 균열강도에 도달하면 첫 균열이 발생하고, 그 이후 다수의 미세균열이 형성되면서 인장변형을 경화거동을 나타낸다. Table 7에 최대 인장 변형을 평균값, 최대 균열면 응력의 평균값, 1축인장 균열강도의 평균값 등을 제시하였다.

Fig. 8에서 비교한 바와 같이 고로슬래그미분말이 25% 혼입된 경우가 보다 우수한 인장 변형 성능과 높은 인장 강도를 나타내었다. 4.3절에서 언급한 바와 같이 고로슬래그미분말이 매트릭스-섬유의 천이영역을 증진하는 효과를 나타내어 마찰부착(τ_0)이 약 10% 증가하였다. 또한 강도 증진에 의하여 매트릭스의 파괴인성($K_{IC}=K_m$)도 증가하였는데 이는 고로슬래그를 첨가함으로써 물-결합제 비 K_m 감소되었기 때문이다. 이러한 2가지 증진효과(τ_0 , K_m)는 안정상태의 균열이론을 만족시키는 데에 오히려 장해 요인이 된다. 그러나 결과적으로는 이러한 단점을 극복하고 오히려 우수한 인장변형 성능을 나타내었다. 즉, 변형을 경화거동으로 표현되는 높은 연성에는 악영향을 주지 않으면서 매트릭스의 강도를 향상시키는 효과를 나타낸 것이다. 이러한 우수한 수준의 성능을 보인 이유는 고로슬래그미분말을 혼입함으로써 유동성과 섬유의 분산성이 크게 증진되었기 때문인 것으로 사료된다. 고로슬래그미분말의 표면에 존재하는 산화피막 코팅으로 인하여 입자가 물에 의하여 구속되지 않고 이로 인하여 우수한 유동성과 섬유 분산성이 확보된 것으로 판단할 수 있다. 실제 타설 중에도 고로슬래그를 첨가함으로써 유동성이 크게 개선되었음을 관찰할 수 있었다. 현재 뿔칠 성능과 초유동 성능을 갖고 있는 섬유복합 모르타르에 대한 연구가 진행 중에 있으며¹²⁾, 향후의 연구 논문에서는 재료의 유동성에 초점을 맞추어 보다 면밀히 검토할 계획이다.

5. 결 론

이 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 마이크로역학과 안정상태 균열 이론을 이용하여 고로슬래그를 혼입한 섬유복합 모르타르의 인장변형 경화 거동을 위한 재료의 기본배합과 물-결합제비의 범위(38% ~ 48%)를 제시하였다. 개발된 재료는 1축 인장 하에서 변형을 경화 거동을 나타내었으며 변형 능력은 최대 3.6% 변형률이었다.
- 2) 고로슬래그미분말을 혼입하지 않은 경우와 비교하여 고로슬래그미분말을 혼입한 경우에는 보다 높은 강도와 연성을 나타내었다. 이러한 현상이 나타난 이유는 고로

슬래그미분말을 혼입하였을 경우 섬유-매트릭스의 천이 영역에는 크게 영향을 주지 않으면서 매트릭스의 강도를 증진하는 효과를 갖고 있기 때문이다. 즉, 변형을 경화거동에는 악영향을 주지 않으면서 인장강도를 향상시키는 효과를 나타낸 것으로 판단된다.

- 3) 우수한 수준의 성능(연성, 강도)을 나타낸 이유는 고로슬래그미분말을 혼입함으로써 유동성과 섬유의 분산성이 크게 증진되었기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 유동성에 대한 보다 상세한 연구 결과는 향후의 연구 논문에서 다룰 계획이다. 또한 이러한 섬유복합 모르타르에 뿔칠 성능, 초유동 성능 등의 유동특성을 부여함으로써 보다 광범위한 적용을 가능하게 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김윤용, “습식스프레이공법으로 타설된 고인성 섬유보강 모르타르(ECC)의 역학적 특성과 보수 성능”, 콘크리트학회 논문집, 15권 3호, 2003. 6, pp.462~469.
2. Li, V. C. and Wu, H. C., “Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites”, *Journal Applied Mechanics Review*, Vol.45, No.8, 1992, pp.390~398.
3. 김윤용, 김정수, 김희신, 김진근, “섬유-모르타르 경계면과 모르타르의 역학적 특성에 미치는 고로슬래그미분말의 영향”, 대한토목학회 학술발표회논문집, 2004. 10, pp.546~551.
4. 김윤용, 김정수, 김희신, 김진근, 하기주, “마이크로역학에 의하여 제조된 고인성 섬유복합 모르타르의 역학적 특성”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 16권 1호, 2004. 5, pp.336~339.
5. Li, V. C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A., and Saito, T., “Interface tailoring for strain-hardening PVA-ECC”, *ACI Materials Journal*, Vol.99, No.5, 2002, pp.463~472.
6. Lin, Z., Kanda, T., and Li, V. C., “On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites”, *Journal of Concrete Science and Engineering*, RILEM, Vol.1, 1999, pp.173~184.
7. Kanda, T. and Li, V. C., “A new micromechanics design theory for pseudo strain hardening cementitious composite”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.125, No.4, 1999, pp.373~381.
8. 양승규, “혼화제를 첨가한 시멘트의 레올로지 특성”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회논문집, 15권 1호, 2003. 5, pp.271~276.
9. Katz, A. and Li, V. C., “A special technique for determining the bond strength of microfibers in cement matrix by pull-out test”, *Journal of Material Science Letter*, Vol.15, 1996, pp.1821~1823.

10. 김윤용, 김정수, 김희신, 김진근, 하기주, “마이크로역학에 의하여 제조된 고인성 섬유복합 모르타르의 역학적 특성”, 콘크리트학회 논문집, 17권 5호, 2005. 10, pp.707~714.
11. Kanda, T. and Li, V. C., “Interface Property and Apparent Strength of High-strength Hydrophilic Fiber in Cement Matrix”, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.10, No.1, 1998, pp.5~13.
12. Yun-Yong Kim, Jeong-Su Kim, Jin-Keun Kim, and Gee-Joo Ha, “Wet-Mix Shotcreting Application of High Ductile Fiber Reinforced Mortar Designed by Optimizing Mix Proportion”, *In Proceedings of the Conference of Korea Concrete Institute*, Vol.16, No.2, 2004. 11, pp.581~584.

요 약

이 연구는 기존에 연구에 의하여 개발된 고인성 섬유복합 모르타르에 고로슬래그미분말을 혼입하여 연성과 강도 측면에서 보다 개선된 재료를 개발함에 목적이 있으며 이를 위해 고로슬래그미분말이 혼입한 배합에 대하여 섬유-모르타르 경계면의 마이크로역학(micromechanics)적 특성과 모르타르 매트릭스의 파괴역학(fracture mechanics)적 특성을 파악하였다. 고로슬래그미분말이 혼입된 배합의 경우에는 고로슬래그미분말을 혼입하지 않은 경우와 비교하여 화학적 부착은 큰 변화가 없지만 마찰부착은 10% 정도 증가하는 것을 알 수 있었다. 한편 모르타르의 썬기썬실험을 통해 결정된 매트릭스의 파괴인성은 고로슬래그미분말을 혼입하지 않은 경우보다 파괴인성이 약간 증가하는 것을 알 수 있었다. 결정된 섬유-매트릭스 경계면의 마이크로역학적 특성과 모르타르의 파괴역학적 특성을 이용하여 안정상태 균열이론(steady-state cracking theory)을 배경으로 1축인장 하에서 인장변형률 경화거동을 하는 고인성 섬유복합 모르타르의 기본배합과 물-결합제비의 범위를 선정하였다. 개발된 재료는 1축 인장 하에서 변형률 경화 거동을 나타내었으며 변형률은 3.6%, 인장강도는 약 5.3MPa를 나타냈으며 이는 고로슬래그미분말을 혼입하지 않은 섬유복합 모르타르보다 뛰어난 인장 변형 성능과 높은 인장 강도이다. 고로슬래그미분말을 혼입할 경우 마찰부착과 파괴인성이 증가하는 효과는 안정상태의 균열이론을 만족시키는 데에 오히려 장애 요인이 된다. 그러나 결과적으로는 이러한 단점을 극복하고 오히려 우수한 인장변형 성능을 나타내었다. 즉, 변형률 경화 거동으로 표현되는 높은 연성에는 악영향을 주지 않으면서 매트릭스의 강도를 향상시키는 효과를 나타낸 것이다. 이러한 우수한 수준의 성능을 보인 이유는 고로슬래그미분말을 혼입함으로써 유동성과 섬유의 분산성이 크게 증진되었기 때문인 것으로 사료된다.

핵심용어 : ECC, 고로슬래그미분말, 마이크로역학, 썬기썬시험, 변형률 경화거동