



고로슬래그 미분말이 혼입된 자기충전 및 슛크리트용 ECC의 개발을 위한 시멘트풀 레올로지 제어

박승범¹⁾ · 김정수²⁾ · 김윤용^{1)*}

¹⁾충남대학교 토목공학과 ²⁾한국과학기술원 건설및환경공학과

Rheology Control of Cement Paste for Applying ECC Produced with Slag Particles to Self-Consolidating and Shotcreting Process

Seung-Bum Park¹⁾, Jeong-Su Kim²⁾, and Yun-Yong Kim^{1)*}

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

²⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

ABSTRACT An engineered cementitious composite produced with slag particles (Slag-ECC) had been developed based on micromechanical principle. Base grain ingredients were properly selected, and then the mixture proportion was optimized to be capable of achieving robust tensile ductility in the hardened state. The rheological design is performed in the present study by optimizing the amount of admixtures suitable for self-consolidating casting and shotcreting process in the fresh state. A special focus is placed on the rheological control which is directly applicable to the construction in field, using prepackaged product with all pulverized ingredients. To control the rheological properties of the composite, which possesses different fluid properties to facilitate two types of processing (i.e., self-consolidating and shotcreting processing), the viscosity change of the cement paste suspensions over time was initially investigated, and then the proper dosage of the admixtures in the cement paste was selected. The two types of mixture proportion were then optimized by self-consolidating & shotcreting tests. A series of self-consolidating and shotcreting tests demonstrated excellent self-consolidation property and sprayability of the Slag-ECC. The rheological properties altered through this approach were revealed to be effective in obtaining Slag-ECC hardened properties, represented by pseudo strain-hardening behavior in uniaxial tension, allowing the readily achievement of the desired function of the fresh Slag-ECC. These ductile composites with self-consolidating and shotcreting processing can be broadly utilized for a variety of applications, e.g., in strengthening seismic resistant structures with congested reinforcements, or in repairing deteriorated infrastructures by shotcreting process.

Keywords : slag, ECC, self-consolidating, shotcreting, rheology control

1. 서 론

최근 국내외에서 새로운 개념의 고인성 섬유복합재료에 대한 관심이 점차 증가하고 있다. 특히 ECC (engineered cementitious composite)는 고인성 섬유보강 모르타르로서, 모르타르에 2% 이내의 합성섬유를 혼입함으로써 콘크리트의 수십, 수백 배에 달하는 인장변형능력 (인장변형률 2% 이상)을 갖는 고인성 재료이다. 이 재료를 개발하기 위하여 우선 Li 등^{1,2)}이 제안한 마이크로역학 (micromechanics)을 이용하여 섬유복합재료의 기본 구성 요소 (섬유, 매트릭스, 섬유-매트릭스 경계면 (interface))의 역학적 상호관계를 해석적으로 구명하고 이 결과를 Marshall 등³⁾이 제안한 안정상태 균열이론 (steady-state cracking theory)

에 적용하여 복합재료가 1축 인장 하에서 변형을 경화 거동을 하도록 ECC를 최적화 할 수 있다. 이러한 방법을 적용하여 최소한의 실험을 통하여 효과적으로 섬유복합재료를 설계할 수 있음이 선행된 연구^{4,5)}에 의하여 밝혀진 바 있다. 이러한 재료 개발 과정에서 소요 성능에 따라 섬유의 혼입률을 최적화할 수 있기 때문에 경제성 뿐만 아니라, 재료의 시공도 다양화 될 수 있는 장점을 갖고 있다.

기존의 연구에 의하여 자기충전용 ECC가 개발된 바 있으며, 이외에도 슛크리트에 의한 타설 등 다양한 시공에 응용하고자 하는 연구가 끊임없이 시도되고 있다^{6,7)}. 여기서 자기충전 (self-consolidating)용 ECC란 소요 타설 시간 동안 재료분리 없이 높은 유동성을 유지할 수 있는 고유동 ECC를 의미하며, 슛크리트용 ECC란 굳기 전에 습식 슛크리트에 적합한 펄핑성, 점착성 등을 갖는 ECC를 의미한다. 또한 굳은 후에는 2가지 재료 모두

*Corresponding author E-mail : yunkim@cnu.ac.kr
Received May 21, 2007, Accepted August 23, 2007
©2008 by Korea Concrete Institute

ECC의 고유 특성인 고인성 특성, 즉 1축 인장변형을 경화 특성과 미세균열 (micro-crack)의 분포를 나타내어 야 한다. 따라서 굳은 후의 역학적 성능뿐만 아니라 굳기 전의 유동성도 함께 제어하여야 다양한 시공성을 구현할 수 있다.

그러나 기존의 연구에서는 유동 특성을 조절하기 위하여 혼화제의 투입 순서와 첨가량을 달리하였는데, 실제 현장에서 혼화제의 투입 순서를 구분한다는 것은 시공성 측면에서 매우 불리하다. 더욱이 이 재료를 상용화하기 위해서는 모든 재료를 분말의 형태로 사용하는 프리팩키지화가 필요하다.

Slag-ECC (고로슬래그 미분말을 혼입한 ECC)는 잔골재, 슬래그, 물, 섬유, 보통포틀랜드시멘트, 혼화재료 등을 포함하고 있으며, 직접인장이 작용할 때 높은 연성을 나타내도록 마이크로역학에 의하여 배합비가 최적화되었다. 따라서 구성 재료의 조합을 변화시켜 유동성을 조절하는 방법은 바람직하지 않기 때문에 혼화재료를 이용하여 Slag-ECC의 유동성을 제어하는 방법이 합리적이다. 즉 굳지않은 Slag-ECC의 유동 특성을 혼화재료로 정교하게 제어함으로써 동일한 재료에 상이한 시공성을 부여하게 되는 것이다. 특히 외부의 압밀 없이 타설이 진행되는 자기충전 시공은 전 타설 시간에 걸쳐 낮은 점도가 유지되어야 하는 반면, 슛크리트 시공에서는 특정 시간이 흐른 후에 서스펜션의 점도가 빠르게 증가하여야 한다.

따라서 이 연구에서는 현장에서의 시공성을 높이기 위하여 모든 재료를 분말의 형태로 사용하여 프리팩키지화하고자 하며, 시멘트풀의 레올로지를 제어함으로써 서로 상반되는 시공 (자기충전, 슛크리트)에 적용할 수 있는 Slag-ECC의 개발에 대하여 논하고자 한다. 우선, 기존 연구를 통하여 결정된 기본 배합을 기초로 하여, 시멘트풀 레올로지의 경시 변화를 연구하여 대략적인 혼화재료 첨가량을 선정할 것이다. 이러한 대략적인 양은 자기충전 및 슛크리트 시공성을 검증하면서 최적의 첨가량으로 결정되었다. 그리고 다양한 시공법에 의하여 타설된 재료가 굳은 이후에도 ECC의 고유 특성을 그대로 유지하고 있음을 검증함으로써 시공법의 적용성을 최종 평가할 것이다.

2. Slag-ECC의 레올로지 제어 개념

2.1 기본 배합 설정의 배경

마이크로역학과 안정상태균열이론에 기반한 연구를 통하여 48~60%의 물-시멘트비, 약 80%의 잔골재-시멘트비,

약 25%의 슬래그 첨가율이 Slag-ECC의 기본 배합비인 것으로 밝혀진 바 있다^{4,5)}. 또한 섬유의 혼입률과 섬유의 길이를 결정하기 위하여 마이크로역학 연구 결과에 따라서 해석을 하여본 결과 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 섬유 혼입률 (V_f)이 1.5%를 상회할 때에 인장변형을 경화 거동이 나타날 수 있는 인성비 조건 3.0⁸⁾을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 2%의 섬유 혼입률을 안전측의 최적값으로 결정하였다. 섬유의 길이의 경우에는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 7 mm 이상일 때에 인성비 조건을 만족한다. 한편, Wu의 연구 결과⁹⁾에 따르면 섬유의 변장비 (길이/직경비)가 200~300 정도일 때에 섬유의 분산성이 최적화 되는데, 이 연구에서 채택한 섬유의 직경 (39 μ m)을 기준으로 하였을 때에 섬유 길이 8~12 mm가 이 변장비에 해당된다. 따라서 인성비 조건을 만족하면서 섬유의 분산에도 유리한 8~12 mm의 섬유 길이를 최적값으로 채택하였다. 최종적으로 기존의 배합 범위에 기초하여 Table 1과 같이 기본적인 배합 조건을 설정하였고, 이 배합조건에 시멘트풀의 레올로지를 조절을 통하여 혼화재료의 투입량을 선정하고, 자기충전용 Slag-ECC와 슛크리트용 Slag-ECC를 개발하였다. 또한 슬래그는

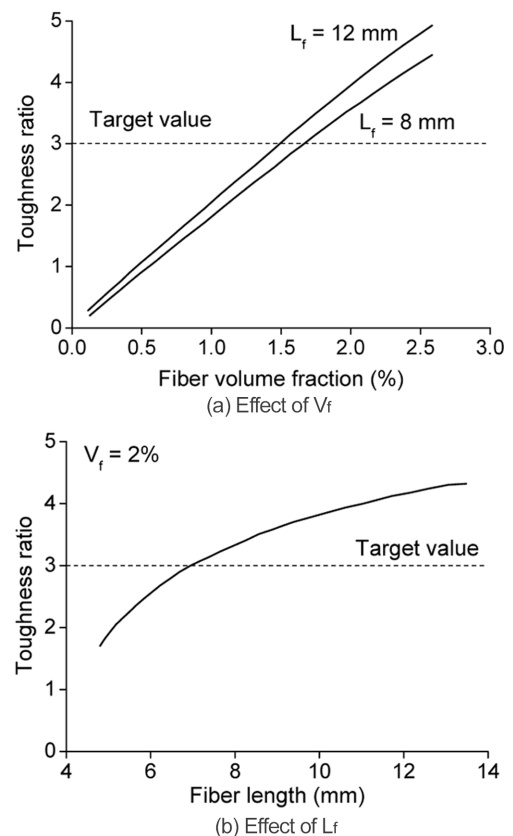


Fig. 1 The effects of fiber volume fraction, V_f and fiber length, L_f on toughness ratio

Table 1 Basic mix composition determined based on micromechanical analysis for shotcreting & self-consolidating slag-ECC

Water-cement ratio in weight (W/C)	Water-binder ratio in weight (W/B), 25% addition of slag	Sand-cement ratio in weight (S/C)	Fiber volume fraction (V_f)	Fiberlength (L_f)
53%	43%	80%	2%	8~12 mm

래그에 대한 첨가율과 첨가에 따른 영향은 기존의 논문에 설명되어져 있다^{5,10}. 그리고 앞에서 언급한 마이크로역학적 해석과 인장변형률 경화거동을 나타내기 위한 인성비 조건에 대하여는 기존의 논문에서 상세히 소개된 바 있다^{4,11,12}.

2.2 ECC 레올로지 제어를 위한 기존 연구

포틀랜드시멘트의 광범위한 이용에도 불구하고, 시멘트계 혼합물의 유동 특성은 잔골재, 굵은골재, 혼화재료 등의 영향이 다양하게 작용함으로써 그 특성이 명확히 밝혀지지 않고 있다. 따라서 기존의 많은 연구에서는 콘크리트 또는 모르타르의 유동 특성을 시행착오에 의존하여 제어하여 왔다. 최근의 연구에 따르면, 시멘트풀의 유동 메커니즘이 입자 주변에 형성되는 정전기력과 더불어 수화반응 또는 혼화제에 의하여 형성된 반데르발스 인력에 크게 좌우된다는 사실이 밝혀진 바 있다^{13,14}. 따라서 정전기력, 반데르발스 힘 등에 의한 시멘트 입자 간 상호 작용을 조절함으로써 시멘트풀의 유동 특성을 보다 합리적으로 제어할 수 있을 것으로 사료된다.

기존의 연구에 의하여 레올로지의 특성을 상이하게 만드는 것은 서스펜션에 투여하는 혼화제의 순서와 첨가량을 달리함으로써 구현할 수 있다고 보고된 바 있다^{6,7}. MFS (poly-electrolyte melamine formaldehyde sulfonate, 감수제)와 HPMC (hydroxymethylcellulose, 증점제)의 투여 순서를 결정하기 위한 기존의 연구 결과⁷에서 HPMC를 먼저 투여하고 MFS를 나중에 투여한 경우에는 시멘트풀이 상대적으로 천천히 점도를 갖는 것으로 나타났다. 이러한 현상이 나타난 이유는 Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 HPMC를 먼저 투여함으로써 반데르발스 힘에 의한 안정층이 우선 형성되고, 이후에 투여된 MFS는 강력한 대전층을 형성하면서 HPMC 층과 공조하여 시간에 따른

재응집 현상을 효과적으로 방지하였기 때문이다. 이러한 투여 순서 (HPMC 다음에 MFS)는 오랜 시간동안 낮은 점도를 유지하여야 하는 자기충전 시공에 적합한 것으로 판단된다. 이와 유사한 실험 결과는 기존의 PE (polyethylene) 섬유복합재료에서도 관찰된 바 있다⁷. 반면, MFS를 먼저 투여하고 HPMC를 나중에 투여한 경우(Fig. 2(b))에는 시멘트풀이 매우 빠른 속도로 점도를 회복하는 것으로 나타났다⁶. 이러한 결과가 나타난 이유는 MFS에 의하여 형성된 강력한 대전층 때문에 나중에 투여되는 HPMC가 시멘트 입자에 충분히 흡착되지 못하기 때문이다. 이 때 HPMC는 입자 주변에서 층을 형성하지 못하므로 서스펜션 내의 자유수 (free water)와 주로 반응하여 시멘트풀의 점도를 증진시키는 효과만을 나타내게 된다. 즉 HPMC의 시멘트 친화력은 MFS의 정전기적 친화력에 비하여 현저히 낮기 때문에 나중에 투여될 경우 증점제의 역할만을 수행하게 되는 것이다. 이러한 투여 순서 (MFS 다음에 HPMC)는 빠른 시간 내에 점도를 회복하여야 하는 슛크리트 시공에 적합하다고 밝혀졌으며, CA (calcium aluminate cement, 알루미나 시멘트)를 추가로 투입하여 시멘트풀의 점도 증진을 최적화하였다.

2.3 현장 여건을 고려한 Slag-ECC 레올로지 제어

기존의 연구 결과^{6,7}는 혼화제 MFS와 HPMC의 투여 순서에 따라서 레올로지를 조절함으로써 상이한 시공성을 구현하였는데, 실제 현장에서 혼화제 순서를 구분하여 투입한다는 것은 시공성 측면에서 매우 불리하다. 또한 시공성을 극대화하기 위하여 모든 재료를 분말의 형태로 사용하는 프리팩키지 제품화를 목표로 하는 경우에는 혼화재료를 순차적으로 투입하는 것이 불가능하다. 이 연구에서는 이러한 제반 여건을 고려하고, 현장 시공성을 충분히 확보하기 위하여 분말형태의 혼화재료를 한번에 투입한다는 가정 하에서 혼화재료의 투입량만을 갖고서 레올로지를 조절하였다.

이 연구에서는 유동성과 섬유 분산성을 향상시킬 수 있도록 MFS를 사용하였고, 이를 증점제와 함께 사용하였을 때에 점도의 경시변화를 최소화할 수 있는 것으로 알려져 있으므로, HPMC도 함께 사용하였다. 또한 슛크리트 시공을 위해서는 재료의 점도가 빠른 속도로 증가하여야 하므로 반응성이 높은 혼화재료인 CA입자를 첨가하였다.

이 연구에서는 자기충전 시공과 슛크리트 시공에 맞게 MFS, HPMC, CA의 투여량을 결정하여 시간에 따른 레올로지를 조절하고자 한다. 위에서 언급한 혼화재료에 따른 특성을 이용하여 자기충전용 Slag-ECC와 슛크리트용 Slag-ECC를 개발하고자 하며 그 개념도는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3(a)에서 도시한 바와 같이, 자기충전용 Slag-ECC는 시간에 따라서 낮은 점도가 유지되어야 한다. 이 연구에서는 시간에 따라서 낮은 점도가 유지되도록 MFS를 이용하여 초기 점도를 낮추고 HPMC를 함께 사용하

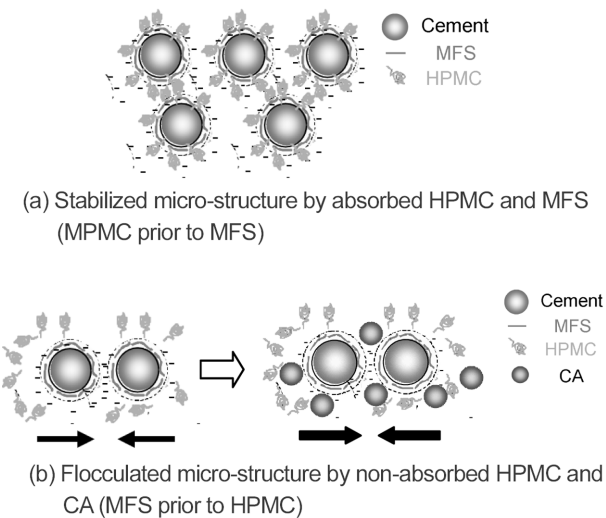
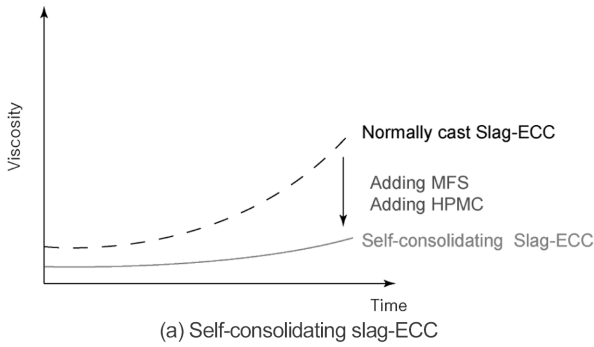
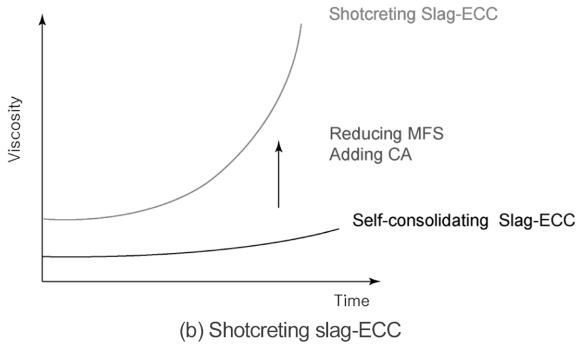


Fig. 2 Micro-structures developed in a cement paste by control of cement particle interactions for (a) stabilized micro-structure desirable for self-consolidating and (b) flocculated microstructure desirable for shotcreting.



(a) Self-consolidating slag-ECC



(b) Shotcreting slag-ECC

Fig. 3 Rheological control for self-consolidating and shotcreting Slag-ECC

여 시간에 따른 점도의 변화가 최소화되도록 유도하였다. 슛크리트용 ECC는 슛크리트 펌프에 의하여 재료가 이동하는 동안에는 낮은 점도를 유지하다가 타설면에 슛크리트 된 후에는 높은 점도가 발현되어야 하기 때문에 최소한의 MFS를 사용하여 섬유분산성을 확보하고, HPMC를 사용하여 재료의 점착성을 확보하며, 함께 첨가한 CA가 재료의 빠른 점도 증진을 유도하도록 계획하였다.

3. 실험 계획 및 방법

3.1 실험 재료

Slag-ECC 보강용 섬유로는 K사에서 생산한 8~12 mm 길이의 PVA (polyvinylalcohol) 섬유가 사용되었다. 제1종 보통포틀랜드시멘트 (평균입도 = $11.7 \pm 14.8 \mu\text{m}$)와 고로슬래그 (slag, 평균입도 = $11.0 \pm 3.0 \mu\text{m}$)가 각각 주결합재와 보조결합재로 사용되었고, 잔골재로는 평균입도 $130 \mu\text{m}$ 의 실리카 골재를 사용하였다. 한편, 굳기 전 Slag-ECC의 유동 특성을 제어하기 위하여 HPMC와 MFS를 혼화재로, CA (알루미나시멘트, 평균입도 $5.5 \pm 1.5 \mu\text{m}$)를 혼화재로 각각 첨가하였다. 또한 프리팩키지 제품화를 위하여 섬유를 제외한 모든 재료들을 분말의 형태로 사용하였다.

3.2 시멘트풀의 레올로지 실험

시간에 따른 시멘트풀의 점도를 측정하기 위하여 회전

점도계 (Brookfield controlled stress rheometer, DVII-Pro)를 이용하였다. 점도계의 회전속도를 내부의 시멘트풀 점도가 선형 점탄성 (linear viscoelastic)의 범위 이내가 되도록 조절하였으며, 실험 결과로서 시멘트풀의 점도 (viscosity)가 측정되었다. 이 연구에서는 CA, MFS, HPMC 등을 Slag-ECC의 레올로지 제어를 위한 혼화재료로 사용하였으며, 혼화재료의 양을 최적화하기 위하여 Table 2와 같은 변수의 시멘트풀 실험을 수행하였다.

3.3 유동성 실험 (슬럼프콘 실험)

일반적인 슬럼프 실험에 사용되는 슬럼프콘 (직경 = 200 mm)을 이용하여 자기충전용 Slag-ECC와 슛크리트용 Slag-ECC의 유동 특성을 정량화하였다. Slag-ECC를 배합한 후 5분이 지났을 때의 유동 특성을 측정하였으며, 이때의 측정 시간은 자기충전용 Slag-ECC와 슛크리트용 Slag-ECC가 펌핑기계나 슛크리트 기계에 의해서 이송되는 시간을 고려한 것이다. 동일 조건에 대하여 2회 실험을 실시한 후 그 평균값을 취하였다. 다짐 또는 진동 등의 방법을 사용하지 않으면서 재료를 콘에 채워 넣은 후, 콘을 수직으로 들어 올려 붕괴된 재료의 퍼진 직경 (대표성을 갖는 2개의 직교 방향 직경)을 갖고서 유동 특성을 정량화한다. 이 연구에서 적용한 유동성 (Γ) 값은 다음의 식 (1)⁶⁾에 의하여 구할 수 있다.

$$\Gamma = \frac{(D_1 \times D_2) - D_0^2}{D_0^2} \quad (1)$$

여기서 D_0 는 슬럼프콘의 직경이고 D_1 과 D_2 는 직교 방향으로 재료가 퍼진 직경이다.

Table 2 Mix proportions for testing rheology control of cement paste

Mix.	C (%) = cement + CA	Slag/C (%)	MFS/C (%)	HPMC/C (%)
B1	100 + 0	25	0	0.0
B2				0.1
B3				0.2
C1			1	0.0
C2				0.1
C3				0.2
C4	2	0.0		
C5		0.1		
C6		0.2		
H1	95 + 5	25	0	0.2
H2			1	
H3			2	
H4			0	

*Water to binder (cement + slag + CA) ratio = 35%
All numbers are mass ratios.

3.4 자기충전성 실험

자기충전성 실험에는 직육면체 박스의 중앙에 칸막이를 두어 2개의 챔버로 분리된 실험 장치를 사용하였다. 2개의 사각형을 연결하는 바닥 통로에는 30 mm의 간격으로 3개의 D13철근 (#4 rebar)이 수직방향으로 배근되어 있다 (Fig. 4). 실험은 바닥 통로를 막은 후에 오른쪽 챔버의 300 mm 높이까지 Slag-ECC를 채운 후에 바닥 통로를 여는 방법으로 실험이 시작된다. 바닥 통로를 열면 Slag-ECC가 그 통로를 통과하여 왼쪽의 챔버로 흘러들어오게 된다. 이때에 바닥 통로에 수직으로 위치한 철근에 의하여 섬유가 뭉치거나, 재료가 분리되는 현상이 발생하지 않아야 한다. 자기충전성을 정량적으로 평가하기 위하여 실험에서는 오른쪽 챔버에 채운 재료의 높이 (h_0)와 왼쪽 챔버에 흘러들어간 재료의 도달높이 (h)를 측정 한 후, 자기충전계수 ($L = 2h / h_0$)를 계산하였다⁷⁾. Slag-ECC가 완전히 자기충전 된다면 $L = 1.0$ 이 된다.

3.5 슛크리트 실험

이 연구에서는 나선형 동력펌프가 슛크리트 실험에 사용되었고, 이 슛크리트 기계는 최대 골재 크기 8 mm 이하이고 미리 배합된 액체나 모르타르를 슛크리트 하는데 사용된다. 슛크리트 기계를 이용하여 슛크리트하는 과정은 다음과 같다. 우선 100 l 용량의 강제식 믹서에서 배합된 Slag-ECC를 펌프로 이동시킨 후, 직경 35 mm 호스

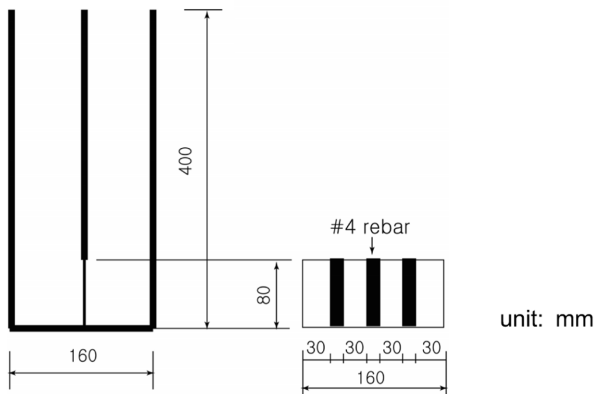


Fig. 4 Testing box for self-consolidating of Slag-ECC where three #4 re-bars are positioned at the bottom gate between two chambers

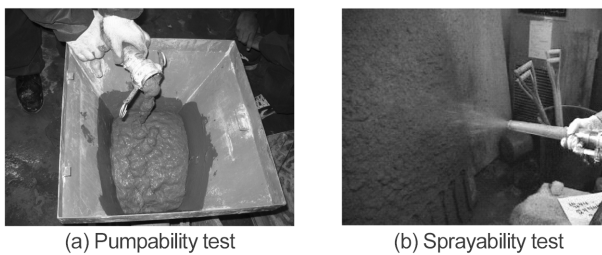


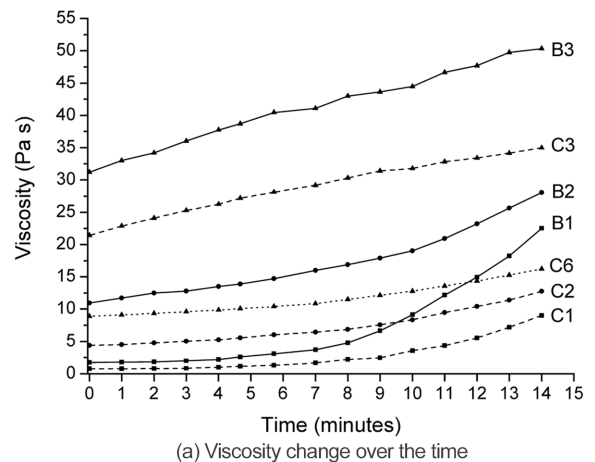
Fig. 5 Pumpability & sprayability tests for shotcreting Slag-ECC

를 거쳐 노즐로 운송한다 (Fig. 5(a)). 운송된 Slag-ECC는 (Fig. 5(b))에 나타난 바와 같이 노즐에서 일정한 공기압에 의하여 분사되면서 타설면으로 슛크리트 된다. 이 때에 노즐은 타설면에서 0.5~1.0 m의 거리를 유지하면서 타설면과 수직이 되도록 하였고, 펌프를 운전하면서 과도한 압력이 발생하지 않으면 재료의 펌핑성 (pumpability)이 양호한 것으로 판정하였다. 점착성 (sprayability)을 검증하기 위하여 1회의 슛크리트 과정에 의하여 수직면에 타설되는 Slag-ECC의 두께를 측정하였다. 이때에 타설된 Slag-ECC는 자중에 의한 미끄러짐이나 탈락이 발생하지 않아야 한다. 슛크리트가 되어 타설면에 타설되기 시작하는 시점은 배합 후에 약 5~10분 정도이었다.

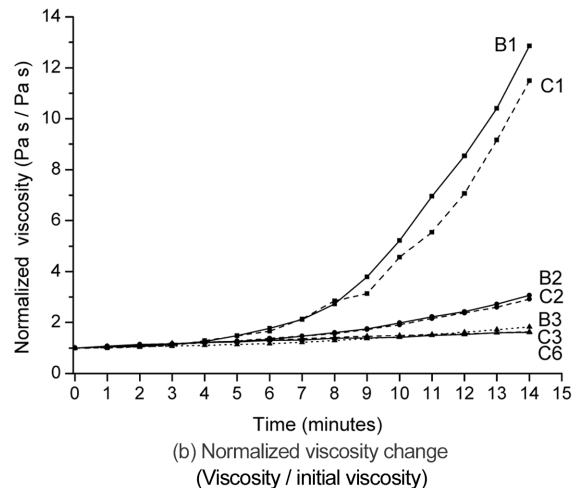
4. 실험 결과 및 분석

4.1 시멘트풀의 레올로지 특성

MFS와 HPMC의 첨가량에 대한 실험은 MFS의 양을 0%, 1%, 2%로 HPMC의 양을 0%, 0.1%, 0.2%로 변화 시키면서 수행하였다. MFS 2%, HPMC를 0% 또는 0.1% 투입한 시멘트풀 (C4, C5)은 재료 분리가 발생하여 점도 측정을 할 수 없었으므로 나머지 변수에 대한 결과만을 측정하였다. MFS와 HPMC의 투여량에 대한 결과는 Fig.



(a) Viscosity change over the time



(b) Normalized viscosity change (Viscosity / initial viscosity)

Fig. 6 Viscosity change for self-consolidating slag-ECC

6(a)에 나타난 바와 같이 MFS의 증가에 따라 초기의 점도가 감소함을 알 수 있다. 이는 MFS가 시멘트 입자 표면에 흡착되어 확산전기 이중층이라 불리는 이온 분포가 발생하기 때문이다. 이로 인하여 제타전위 (zeta potential)가 변화하고, 시멘트 입자간의 정전기적 반발력이 작용하여 입자가 분산된다. 반면 HPMC의 양이 증가하게 되면 초기 점도는 증가하는 것으로 측정되지만, 시간에 따른 점도 증진의 기울기는 감소하는 경향을 나타내었다. HPMC의 양이 증가함에 따라 시간에 따른 점도 증진 기울기가 감소한 이유는 2절에서 기술한 바와 같이 MFS의 대전층과 더불어 HPMC의 반데르발스 힘에 의한 안정층이 형성되었기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 경향은 초기 점도에 대하여 정규화된 점도를 비교한 Fig. 6(b)을 통하여 더욱 뚜렷이 나타난다. 한편, HPMC의 양에 따라 초기 점도가 높아진 이유는 안정층을 형성하지 못하고 서스펜션에 잔류한 잉여 HPMC가 자유수 (free water)와 반응하여 시멘트풀의 초기 점도를 증진시켰기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 배합 B1, B2, C1과 같이 MFS 또는 HPMC 중에 하나만 투여된 경우에는 초기의 점도가 높거나, 점도의 경시 변화가 급격하다는 단점이 있어 자기충전 시공에 적합하지 않다. 반면 배합 C2 (MFS 1%, HPMC 0.1%)는 낮은 초기 점도와 더불어 시간에 따른 점도의 변화가 적다는 장점이 있기 때문에 가장 유리할 것으로 판단된다. 다만, C2의 초기 점도가 다소 높기 때문에 Slag-ECC의 시공성 검증을 통하여 MFS의 양을 소폭 증가시킴으로써 초기의 점도를 낮출 수 있을 것으로 판단한다.

시멘트풀에 MFS만을 첨가한 기존의 연구 결과¹⁵⁾를 보면 MFS의 첨가량이 적은 경우 시멘트 입자에 대한 MFS의 흡착량이 크지만, MFS의 첨가량이 많은 경우에는 흡착량이 상대적으로 감소함을 알 수 있다. Fig. 7에서 직선은 첨가된 MFS 입자가 100% 흡착되었을 때의 가상적인 선을 나타내며, 시멘트 중량의 약 6%에 해당되는 MFS를 첨가할 때에 시멘트 입자 표면에 MFS가 완전히 흡착되는 것으로 밝혀졌다¹⁵⁾. 배합 C2의 경우, MFS가 시

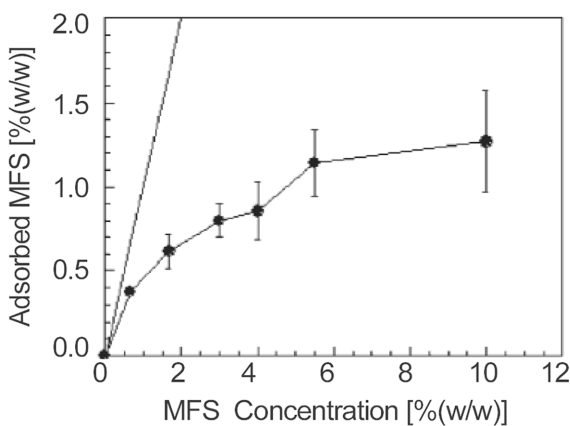


Fig. 7 Adsorption isotherm of MFS. ● : actual, - 100% adsorption of MFS assumed (adopted from Kong et. al)¹⁵⁾

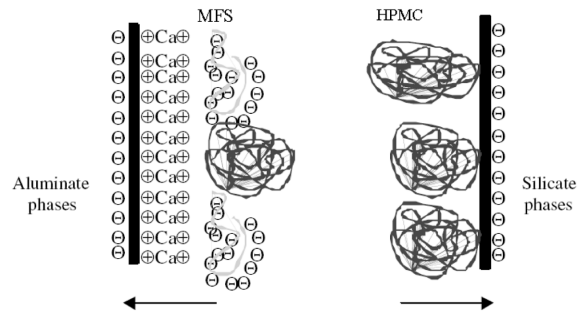


Fig. 8 Schematic description of the polymer adsorption layer resulting from the competitive adsorption of the ionic MFS and the nonionic HPMC (adopted from Kong et.al)¹⁶⁾

멘트 입자에 100% 흡착되지는 않으므로, 시멘트 입자 표면에 HPMC가 흡착될 수 있는 여유가 생긴 것으로 볼 수 있다. 즉 배합 C2의 경우, Fig. 8에 개념적으로 도시한 바와 같이 MFS가 강력한 이온전하를 띠므로 먼저 알루미네이트상 (aluminate phases)에 흡착되고 남은 공간에 HPMC가 흡착되어 MFS에 의하여 형성된 대전층과 HPMC에 의하여 형성된 안정층이 서로 공존하여 오랜 시간 동안 낮은 점도가 유지된 것으로 판단된다.

2.3절에서 언급한 바와 같이 슛크리트용 Slag-ECC는 초기에 낮은 점도를 유지하다가 슛크리트 된 후에는 높은 점도가 발현되어야 한다. 다만 이송 중의 점도가 자기충전 재료와 같이 지나치게 낮을 때에는 섬유가 매트릭스와 분리되어 뭉침 현상이 일어나 이송로가 폐색될 수 있다. 또한 초기부터 빠르게 점도가 증가할 경우, 펌프에 과도한 압력이 발생하거나, 높은 점도의 재료가 이송로를 폐색시킬 수도 있다. 따라서 너무 낮은 초기 점도를 갖는 배합 H2, H3와 초기부터 빠르게 점도가 증가하는 배합 H4는 슛크리트 시공에 적합하지 않다 (Fig. 9). 펌프에서 이송되는 초기 5~10분에는 점도가 일정하게 유지되다가 이후에 빠르게 점도가 증가하는 배합 H1 (CA 5%, MFS 0%, HPMC 0.2%)이 슛크리트 시공에 가장 이상적인 것으로 판단하였다.

Fig. 10에 나타난 바와 같이, 시멘트풀에 HPMC만 첨가한 연구 결과¹⁶⁾를 살펴 보면 HPMC의 양이 약 0.1% 이상

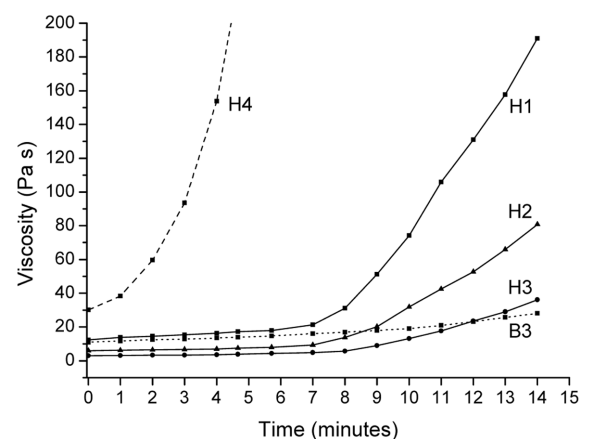


Fig. 9 Viscosity change for shotcreting Slag-ECC

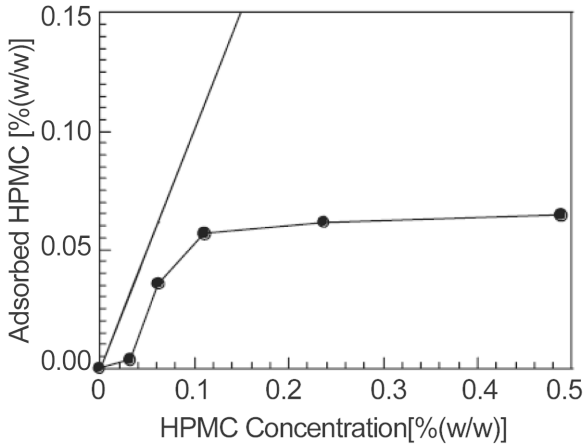


Fig. 10 Adsorption isotherm of MPMC. ● : actual, - 100% adsorption of MFS assumed (adopted from Kong et. al)⁵⁾

이 될 때, HPMC의 흡착률이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이러한 경우 흡착되지 않은 HPMC 입자들은 시멘트 서스펜션 내 (suspension medium)의 점도를 증가시키는 역할을 하게 된다. 즉 배합 H1의 경우, Fig. 11에 개념적으로 도시한 바와 같이 CA가 HPMC와 공조하여 시멘트 서스펜션의 점도를 증가시키게 된다. 다만 섬유유 분산성을 위하여 MFS의 양을 소폭 요구될 것으로 판단되며, 이는 Slag-ECC의 시공성 검증을 통하여 결정하게 된다.

4.2 Slag-ECC의 자기충전과 슛크리트 시공성

위에 기술한 시멘트풀 연구 결과를 바탕으로 예비 비빔과 시공성 검증을 수행하였으며, 이를 통하여 Table 3과 같은 자기충전용 및 슛크리트 Slag-ECC의 배합을 결정하였다. 이 배합에 대하여 우선, 슬럼프콘 유동 특성을 실험한 결과는 Fig. 12에 나타난 바와 같다. 자기충전

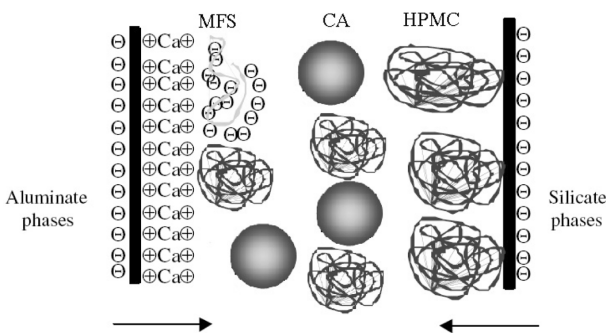


Fig. 11 Schematic description of the polymer adsorption layer resulting from the competitive adsorption of the ionic MFS and the nonionic HPMC and CA

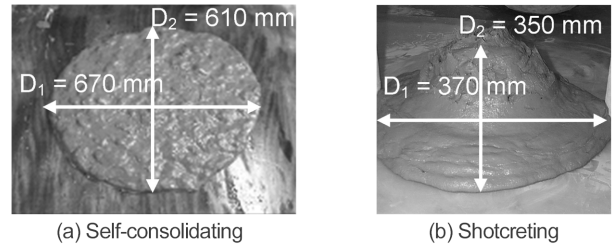


Fig. 12 Deformability of Slag-ECCs obtained after mixing

용 Slag-ECC의 퍼진 직경은 $D_1 = 670$ mm, $D_2 = 610$ mm이며, 슛크리트용 Slag-ECC의 퍼진 직경은 $D_1 = 370$ mm, $D_2 = 350$ mm이다. 이 결과를 식 (1)에 대입하여 얻은 유동 특성값은 자기충전용 Slag-ECC가 9.2, 슛크리트용 Slag-ECC가 2.2이다. 이 값들은 기존의 연구를 통하여 얻은 자기충전용 콘크리트의 유동 특성값 (약 8~12)^{7,17)}과 슛크리트용 ECC의 유동 특성값 (약 2~5)⁶⁾의 범위에 각각 해당된다.

자기충전의 시공성을 검증하기 위하여 Table 3의 자기충전용 Slag-ECC의 배합에 대하여 자기충전성 실험을 수행하였다. Fig. 13에 나타난 바와 같이 오른쪽 챔버에 채운 자기충전용 Slag-ECC가 왼쪽 챔버에 흘러들어간 도달높이 (h)는 125 mm로서 자기충전계수 L 은 0.83이다. 이 값은 자기충전용 콘크리트가 갖는 범위 (0.73~1)에 해당된다¹⁷⁾. 또한, 재료가 과다한 유동성을 갖게 되면 쉽게 재료분리가 발생하는 단점이 있는데, 자기충전용 Slag-ECC의 타설 중에는 섬유의 뭉침, 재료 분리 등의 현상이 관찰되지 않았고, 자기충전 실험에서 바닥 통로의 철

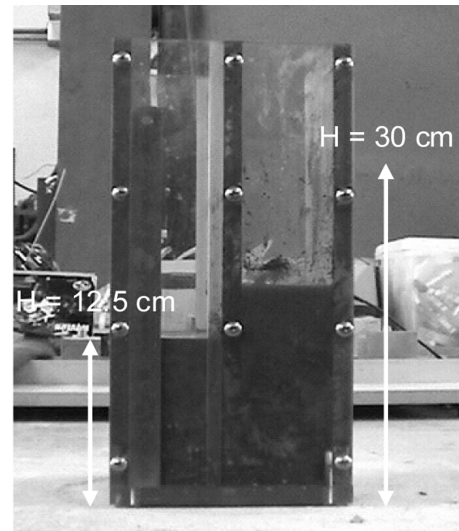


Fig. 13 Demonstration of the self-consolidating property of the fresh Slag-ECC mix

Table 3 Mix proportions for shotcreting ECC and self-consolidating Slag-ECC

Mix	W/C	S/C	V_f (volume ratio)	Slag/C	MFS/C	HPMC/C	CA/C
Shotcreting	0.53	0.8	0.02	0.25	0.003	0.0025	0.05
Self-consolidating				0.25	0.015	0.0015	-

*W : water, C : cement, S : sand, All numbers are mass ratios except for V_f

근 주위에 뭉친 섬유도 발견되지 않았다.

샷크리트 시공성을 검증하기 Fig. 5(a)에 도시한 펌핑성 실험을 수행하였다. 이 실험 과정에서 뿐만 아니라 전체 샷크리트 시공에서 1 MPa 이하의 양호한 펌프압이 측정되었다. 또한 Fig. 14에 보인 바와 같이 점착성 실험을 통하여 1회 최대 타설두께를 측정하였는데, 수직면에 대하여 약 50 mm의 값을 얻었다. 이 두께는 미국콘크리트학회 (ACI)와 유럽의 관련협회 (EFNARC)에서 추천하는 보수용 샷크리트 타설두께 (수직 50 mm)와 거의 동일한 값이다⁶⁾. 더욱이 1회의 연속적인 샷크리트 시공에 의하여 얻어낼 수 있는 샷크리트용 Slag-ECC의 타설 두께가 관련학회에서 추천하는 것과 유사하기 때문에 현장 적용성에도 문제가 없을 것으로 판단된다.

4.3 개발된 재료의 1축 인장거동 특성

ECC 고유의 특성인 인장변형경화거동에 미치는 시공법의 영향을 검증하기 위하여 직접인장실험이 수행되었다. 굳은 후의 자기충전용 Slag-ECC와 샷크리트용 Slag-ECC의 1축 인장거동 특성이 시공법에 상관없이 인장변형률 경화거동을 유지함을 확인함으로써 자기충전 및 샷크리트 시공의 성공 여부를 판정할 수 있다. 다양한 시공법에 의하여 제작된 실험체에 대하여 직접인장실험을 수행한 결과, Fig. 15와 같이 일반적인 타설법에 의하여 제작된 실험체와 거의 동등한 일축인장거동을 얻었다. 모든 실험체가 뚜렷한 인장변형률 경화거동 특성을 보이면서 콘크리트의 약 100배에 가까운 우수한 변형 성능(연성)을 나타내고 있다. 또한 실험체에는 균열폭 80 μm 이하의 미세균열이 다수 분포되었다 (Fig. 16).

5. 결 론

이 연구를 통하여 ECC 고유의 1축 인장 특성을 보이면서 다양한 시공성을 구현한 자기충전용 Slag-ECC와 샷크리트용 Slag-ECC를 개발하였다. 보강섬유로는 PVA 섬유를 이용하였고, 재료 개발의 이론으로서 마이크로역학,

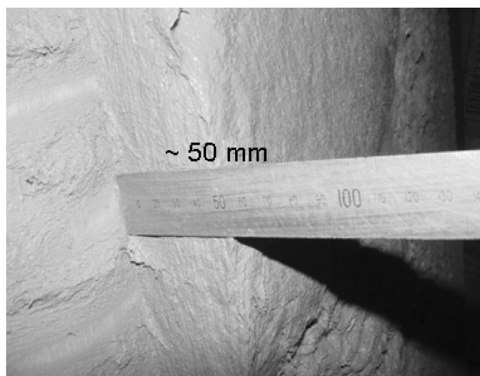


Fig. 14 Spray-on test to a vertical surface for a 50 mm thickness of shotcreted Slag-ECC layer

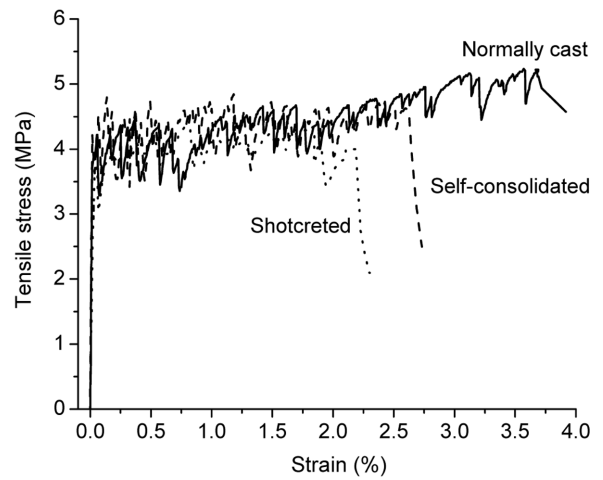


Fig. 15 Comparison of typical uniaxial tensile stress vs. strain curves obtained from Slag-ECCs cast by diverse processing

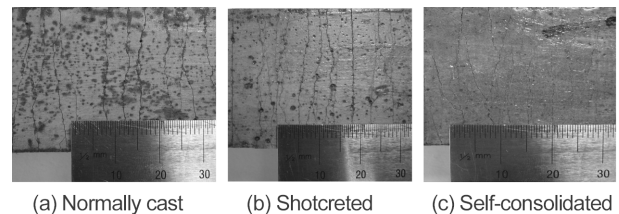


Fig. 16 Multiple cracking of specimens

안정상태균열이론과 레올로지 제어기법을 도입하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 개발된 ECC의 기본 배합은 W/C = 53%, Slag/C = 25%, S/C = 80%로서 마이크로역학과 인성비 조건에 따라 결정되었고, 기본 배합을 기초로 하여 시멘트풀의 레올로지를 제어함으로써 서로 상반되는 시공 (자기충전, 샷크리트)에 적용할 수 있는 Slag-ECC를 개발하였다.
- 2) 섬유를 제외한 모든 재료를 동시에 투여하는 현장 시공성을 고려하여 시멘트풀의 레올로지에 대한 연구를 수행하였다. 따라서 MFS, HPMC, CA의 투여량이 시멘트풀의 레올로지 특성에 미치는 효과를 측정하였다. 3개 혼화재료의 시멘트 친화도 또는 반응성을 이용하여 자기충전과 샷크리트 시공에서 요구하는 유동 성능에 부합할 수 있도록 재료의 배합비를 최적화하였다.
- 3) 자기충전용 Slag-ECC를 자기충전성 실험을 하여 자기충전성을 검증한 결과, 순수한 자중에 의하여 손쉽게 타설될 수 있는 것으로 나타났다. 이때에는 섬유의 뭉침 또는 재료 분리 현상이 나타나지 않는 우수한 유동성이 관찰되었다. 또한 자기충전용 Slag-ECC의 유동성은 자기충전용 콘크리트의 유동성 값과 유사한 값을 보였으며, 충분히 자기충전 되었다고 판단된다. 그리고 샷크리트용 Slag-ECC로 샷크

리트 실험을 실시하여 1회에 타설된 최대 두께는 수직면에 대하여 50 mm인 것으로 측정되었다. 이 값은 구미 선진국에서 제시한 보수용 숏크리트의 요구 성능을 충분히 만족한다.

- 4) 자기충전과 숏크리트 시공으로 타설된 실험체에 대하여 직접인장실험을 수행하였다. 모든 실험체는 일반 타설에 의하여 제작된 실험체와 동등한 일축인장 특성을 나타내었다. 뚜렷한 인장변형률 경화거동과 함께 콘크리트의 100배에 가까운 연성이 측정되었고 실험체에는 ECC 고유의 미세균열 (균열폭 < 80 μm)이 다수 분포되었다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-331-D00470).

참고문헌

1. 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.
2. Li, V. C. and Leung, C. K. Y., "Steady State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.118, No.11, 1992, pp.2246~2264.
3. Marshall, D. B. and Cox, B. N., "A J-Integral Method for Calculating Steady-State Matrix Cracking Stresses in Composites", *Mechanics of Materials*, No.8, 1988, pp.127~133.
4. 김윤용, 김정수, 김희신, 하기주, 김진근, "마이크로역학에 의하여 설계된 ECC (Engineered Cementitious Composite)의 역학적 특성", 콘크리트학회 논문집, 17권 5호, 2005, pp.707~714.
5. 김윤용, 김정수, 하기주, 김진근, "고로슬래그 미분말이 혼입된 ECC의 개발", 콘크리트학회 논문집, 18권 1호, 2006, pp.21~28.
6. Kim, Y. Y., Kong, H. J., and Li, V. C., "Design of Engineered Cementitious Composite Suitable for Wet-Mixture Shotcreting", *ACI Materials Journal*, Vol.100, No.6, 2003, pp.511~518.
7. Kong, H. J., Bike, S., and Li, V. C., "Development of a Self-Consolidating Engineered Cementitious Composite Employing Electrosteric Dispersion/Stabilization", *J. Cement and Concrete Composites*, Vol.25, No.3, 2003, pp.301~309.
8. Kanda, T. and Li, V. C., "A New Micromechanics Design Theory for Pseudo Strain Hardening Cementitious Composite", *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol.125, No.4, 1999, pp.373~381.
9. Wu, C., "Micromechanical Tailoring of PVA-ECC for Structural Applications", Ph. D. Thesis, Ann Arbor, University of Michigan, 2000, 238pp.
10. Kim, J. K., Kim, J. S., Ha, G. J., and Kim, Y. Y., "Tensile and Fiber Dispersion Performance of ECC Produced with Ground Granulated Blast Furnace Slag", *Cement and Concrete Research*, Vol.37, No.7, 2007, pp.1096~1105.
11. Li, V. C., "Reflections on the Research and Development of Engineered Cementitious Composites (ECC)", *Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) - Application and Evaluation (DFRCC- 2002)*, Takayama, Japan, 2002, pp.1~21.
12. 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.
13. Lewis, J. A., "Polyelectrolyte Effects on the Rheological Properties of Concentrated Cement Suspensions", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.83, 2000, pp.1905~1913.
14. Yoshioka, K., Sakai, E., Daimon, M., and Kitahara, A., "Role of Steric Hindrance in the Performance of Superplasticizers for Concrete", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.80, No.10, 1997, pp.2667~2671.
15. Kong, H. J., Bike, S., and Li, V. C., "Effects of a Strong Polyelectrolyte on the Rheological Properties of Concentrated Cementitious Suspensions", *Cement and Concrete Research*, 2006, Vol.36, pp.851~857.
16. Kong, H. J., Bike, S., and Li, V. C., "Electrosteric Stabilization of Concentrated Cement Suspensions Imparted by a Strong Anionic Polyelectrolyte and a Non-ionic Polymer", *Cement and Concrete Research*, 2006, Vol.36, pp.842~850.
17. Okamura, R. H. and Ozawa, K., "Mix-Design for Self-Compacting Concrete", *Concr Lib JSCE*, Vol.25, 1995, pp.107~120.

요약 마이크로역학을 기초로 하여 Slag-ECC (고로슬래그 미분말이 혼입된 ECC)가 개발되었으며, 기존의 연구에서는 Slag-ECC가 높은 연성을 나타내도록 마이크로역학을 도입하여 재료의 배합비가 제시되었다. 이 연구에서는 Slag-ECC의 자기충전과 숏크리트 시공성을 구현하기 위하여, Slag-ECC의 기본 배합에 혼화재료의 투입 순서에 상관없이 혼화재료를 한번에 투입하여 유동 특성을 제어하는 레올로지 개념을 도입하였으며, 이는 현장에서 시공성을 높이기 위하여 모든 재료를 분말의 형태로 사용하는 프리팩키지화를 위한 기초 자료로 사용될 것이다. 그리고 자기충전과 숏크리트의 서로 상반되는 레올로지 특성을 구현하기 위하여, 시멘트풀 레올로지 경시 변화 연구를 통해 대략적인 혼화재료의 첨가량을 선정하였고, 자기충전 및 숏크리트의 시공성 감증을 통해 재료의 배합비를 최적화 하였다. 개발된 Slag-ECC의 자기충전성과 숏크리트 적합성은 실험을 통하여 입증되었으며, 자기충전 및 숏크리트의 시공 방법에 의하여 타설된 재료가 굳은 이후에도 Slag-ECC의 역학적 특성인 고인성 특성을 유지하는 것으로 나타났다. 따라서 시멘트풀의 레올로지 특성을 조절하여 개발된 자기충전용 Slag-ECC와 숏크리트용 Slag-ECC는 재료의 고인성 특성을 유지하면서 다양한 현장 적용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 슬래그, ECC, 레올로지 제어, 자기충전, 숏크리트