

고인성 섬유복합재료 ECC (Engineered Cementitious Composite)의 시공성

Processability of High Ductile Fiber-Reinforced ECCs (Engineered Cementitious Composites)

김 윤 용^{*} 김 정 수^{**} 김 진 근^{***} 하 기 주^{****}
Kim, Yun Yong Kim, Jeong-Su Kim, Jin-Keun Ha, Gee-Joo

ABSTRACT

In the recent design of high ductile fiber-reinforced cementitious composite ECC, which exhibits tensile strain-hardening behavior in the hardened state, optimizing both processing mechanical properties for specific applications is critical. This study introduced a method to develop useful ECCs in field, which possess the different fluid properties to facilitate diverse types of processing (i.e., self-consolidating or spray processing). Control of rheological modulation was regarded as a key factor to allow the performance of the desired processing, while retaining the ductile material properties. To control the rheological properties of the composite, we first determined basic ECC composition, which is based on micromechanics and steady-state cracking theory. The stability and consequent viscosity of suspensions were, then, mediated by optimizing dosages of chemical and mineral admixtures. The rheological properties altered by this approach were revealed to be effective in obtaining ECC hardened properties, allowing us to readily achieve the desired function of the fresh ECC.

1. 서 론

최근 국내외에서 새로운 개념의 고인성 섬유복합재료에 대한 관심이 집중되고 있다. 특히 ECC(Engineered Cementitious Composite)는 고인성 섬유보강 모르타르로서, 모르타르에 2% 이내의 합성섬유를 혼입함으로써 콘크리트의 수축, 수백 배에 달하는 인장변형성능(인장변형률 2%이상)을 갖는 고인성 재료이다. 이 재료를 개발하기 위하여 우선 Li 등[1]이 제안한 마이크로역학(micromechanics)을 이용하여 섬유복합재료의 기본 구성 요소(섬유, fiber; 매트릭스, matrix; 섬유-매트릭스 경계면, interface)의 역학적 상호 관계를 해석적으로 구명한다. 그리고 Marshall 등[2]이 제안

* 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구교수

** 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정

*** 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

**** 정회원, 경일대학교 건축학부 교수

한 안정상태 균열이론(steady-state cracking theory)에 의하여 복합재료가 1축인장 하에서 변형을 경화거동을 하도록 재료를 최적화함으로써 ECC를 개발할 수 있다.

기존의 연구[3]에 의하여 슛크리트용 ECC가 개발된 바 있으며, 이외에도 초유동성에 의한 타설 등 다양한 공정에 응용하고자 하는 연구가 끊임없이 시도되고 있다. 여기서 슛크리트용 ECC란 굳기 전에 습식 슛크리트에 적합한 펌핑성, 점착성 등을 갖는 ECC를 의미하며, 자기충진(self-consolidating) ECC란 소요 타설시간 동안 재료분리 없이 높은 유동성을 유지함으로써 외부의 도움 없이 자중에 의하여 시공이 되는 ECC를 의미한다. 또한 굳은 후에는 2가지 재료 모두 ECC의 고유 특성인 고인성 특성, 즉 1축인장 변형경화특성을 나타내어야 한다. 즉 굳은 후의 역학적 성능뿐만 아니라 굳기 전의 유동성 제어가 매우 중요한 과제이다. 따라서 이 연구에서는 기존의 연구[4]에 의하여 선정된 배합비를 기본으로 하여 혼화재료의 양을 조절함으로써 상이한 공정(스�크리트, 자기충진)에 적용하면서도 굳은 후에는 동일한 역학적 성능을 갖고 있는 ECC를 개발하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 기본재료

이 연구에서 ECC 보강용 섬유는 K사에서 생산한 PVA섬유(직경 $39\mu\text{m}$, 길이 8mm, 인장강도 1620MPa, 탄성계수 38.9GPa)이다. 제1종 보통포틀랜드 시멘트와 고로슬래그미분말(BFS)가 결합재료 사용되었고, 잔골재로는 평균입도 $130\mu\text{m}$ 의 실리카 골재를 사용하였다. 한편, 굳기 전 ECC의 유동특성을 제어하기 위하여 셀룰로오스계 분리저감제(HPMC)와 카르복실계 고성능감수제(PCSP)를 혼화재료, 칼슘알루미네이트 시멘트(CA)를 혼화재료 각각 첨가하였다.

2.2 ECC의 유동성(deformability) 실험

일반적인 슬럼프 실험에 사용되는 슬럼프콘(직경=200mm)을 이용하여 ECC의 유동특성을 정량화하였다. ECC 배합 직후의 유동특성을 측정하였으며, 동일 조건에 대하여 2회 실험을 실시한 후 그 평균값을 취하였다. 다짐 또는 진동 등의 방법을 사용하지 않으면서 재료를 콘에 채워 넣은 후, 콘을 수직으로 들어올려 붕괴된 재료의 퍼진 직경(대표성을 갖는 2개의 직교방향 직경)을 갖고서 유동특성을 정량화한다. 이 연구에서 적용한 유동성(Γ) 값은 다음의 식(1)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 직교방향으로 재료의 퍼진 직경이다.

2.3 ECC의 자기충진성(self-consolidating) 실험

자기충진성 실험에는 직사각형 통의 중앙에 칸막이가 있어서 두 사각형으로 구분되어진 실험 장치를 사용하였다. 두 사각형을 연결하는 중앙통로에는 30mm의 간격으로 3개의 D13철근을 수직방향으로 배근하였다. 실험은 중앙통로를 막은 후에 사각형의 한쪽을 300mm까지 채우고 중앙통로를 여는 방법으로 수행된다. 중앙통로를 열게 되면 ECC는 통로를 통하여 다른 사각형으로 흘러들어가게 되며, 이때 중앙에 위치한 철근에 의하여 섬유가 뭉치거나, 재료의 분리가 발생하지 않아야 한다. 자기충진성 실험에서는 첫 번째 사각형에 채운 재료의 높이(h_0)와 두 번째 사각형에 흘러들어간 재료의 도달높이(h)

를 측정하여 자기충진성(L)을 정량화할 수 있다(식(2)). 이 때에 자기충진성이 1.0일 때에 ECC가 완전히 자기충진 되었다고 볼 수 있다.

$$L = \frac{2h}{h_0} \quad (2)$$

3. 실험결과 및 분석

3.1 ECC의 유동성(deformability) 실험

선행된 연구에서 선정된 기본 배합을 토대로 표 1과 같이 슛크리트용 ECC와 자기충진용 ECC의 배합을 결정한 후 유동성 실험을 수행하였다. 그림 1에서 나타나는 바와 같이, 슛크리트용 ECC의 퍼진 직경은 380mm이며 자기충진용 ECC의 퍼진 직경은 600mm이다. 이 결과를 가지고 식 (1)에 대입하여 얻은 유동성 값은 표 1과 같다. 일반적으로, 자기충진용 콘크리트의 유동성 값의 범위는 8~12이며, 이 값은 자기충진용 ECC의 유동성 값과 유사한 것으로 알려져 있다[5]. 그림 1은 ECC의 유동특성을 나타내고, 표 1은 ECC 배합설계와 유동성, 자기충진성을 나타낸다.

표 1 ECC 배합설계와 유동성, 자기충진성

Mix	W/C	S/C	V_f (체적비)	BFS/C	PCSP/C	HPMC/ C	CA/C	Γ	L
SH (스�크리트)	55 %	80 %	2 %	25 %	2.5 %	0.3 %	5 %	2.5	-
SC (자기충진)				25 %	2.5 %	0.22 %	-	9.2	0.83

* 여기서 W, S, C는 각각 물, 잔골재, 시멘트이다. 그리고 V_f 를 제외한 모든 비율은 중량비이다.



그림 1. ECC의 유동 특성 (좌측은 슛크리트용, 우측은 자기충진용)

3.2 ECC의 자기충진성(self-consolidating) 실험

표 1의 SC 배합에 대하여 자기충진성 실험을 수행하였다. 그림 2에서 나타나는 바와 같이, 자기충진용 ECC가 두 번째 사각형에 도달한 높이는 125mm이다. 이 결과를 가지고 식 (2)에 대입하여 얻은 자기충진성(L)은 표 1과 같다. 이 값(0.83)은 자기충진용 콘크리트가 갖는 범위(0.73~1)와 유사한 값에 해당된다[5]. 한편 슛크리트 ECC에 대한 실험결과와 기존의 논문에서 논한 바 있다[4].

3.3 개발된 ECC의 1축인장거동

ECC고유의 특성인 인장변형경화거동에 미치는 타설 공정의 영향을 검증하기 위하여 직접인장실험이

수행되었다. 실험 결과 타설 공정에 상관없이 시편의 1축인장거동이 일반적인 타설법에 의하여 제작된 시험체와 거의 동일한 것으로 나타났다. 그림 4에 도시한 바와 같이 시험체 제작방법에 상관없이 모든 시험체가 뚜렷한 인장변형률 경화거동과 우수한 인장변형능력을 보여주고 있다. 일반적인 콘크리트의 경우 인장변형능력이 0.02% 이하이므로 이 값과 비교하여 볼 때, ECC는 약 100배에 가까운 연성을 나타낸다.

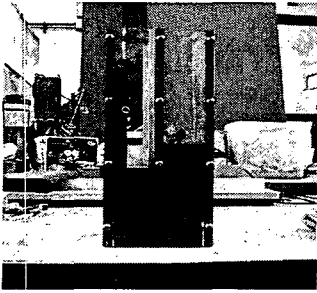


그림 3 자기충진용 ECC의 자기충진성능

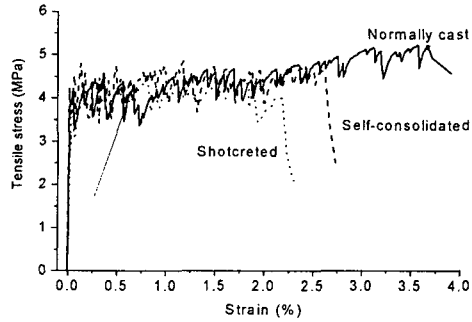


그림 4 다양한 타설 공정에 의하여 제작된 ECC의 유사한 1축인장거동

4. 결 론

이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 혼화재료의 양을 조절함으로써 동일한 배합에서 상이한 시공법(슛크리트, self-consolidating)을 적용할 수 있는 ECC를 개발하였다.
- 2) 개발된 ECC는 타설 공정에 상관없이 경화된 ECC의 고유 특성인 1축 인장변형률 경화거동과 탁월한 연성을 나타내었다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설기술연구개발사업(과제번호: 03산학연A06-04)에 의한 것임을 밝히며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

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. Marshall, D. B.; 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.
3. 김윤용, "습식스프레이공법으로 타설된 고인성 섬유보강 모르타르(ECC)의 역학적 특성과 보수 성능", 한국콘크리트학회 논문집, 제15권 제3호, 2003년 6월, pp.462-469.
4. 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 (KCI), 2004.11.6, pp.581-584.
5. Okamura, R.H. and Ozawa, K., "Mix-design for self-compacting concrete", Concr Lib JSCE Vol. 25, 1995, pp.107-120.