

마이크로 역학과 레올로지 제어에 의한 고인성 섬유복합재료 ECC(Engineered Cementitious Composite)의 다양한 타설 공정 구현

Facilitation of the Diverse Processing of High Ductile ECC (Engineered Cementitious Composite) Based on Micromechanics and Rheological Control

김 윤 용* · 김 정 수**

Kim, Yun Yong · Kim, Jeong Su

Abstract

In the recent design of high ductile fiber-reinforced ECC (engineered cementitious composite), optimizing both processing and mechanical properties for specific applications is critical. This study presents an innovative method to develop new class ECCs, which possess the different fluid properties to facilitate diverse types of processing (i.e., self-consolidating or shotcrete processing) while maintaining ductile hardened properties. In the material design concept, we employ a parallel control of fresh and hardened properties by using micromechanics and cement rheology. Control of colloidal interaction between the particles is regarded as a key factor to allow the performance of the specific processing. To determine how to control the particle interactions and the viscosity of cement suspension, we first introduce two chemical admixtures including a highly charged polyelectrolyte and a non-ionic polymer. Optimized mixing steps and dosages are, then, obtained within the solid concentration predetermined based on micromechanical principle. Test results indicate that the rheological properties altered by this approach were revealed to be highly effective in obtaining the desired function of the fresh ECC, allowing us to readily achieve hardened properties, represented by pseudo strain-hardening behavior in uniaxial tension.

Keywords : ECC, Cement paste, Rheology, Self-consolidating, Shotcrete processing, Tensile strain-hardening

* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과
** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과
* Corresponding author. Tel.: +82-42-869-3696
Fax: +82-42-869-3688
E-mail address: yunkim68@kaist.ac.kr

I. 서 론

최근 국내외에서 새로운 개념의 고인성 섬유복합 재료에 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(1991)이 제안한 마이크로 역학(micro-mechanics)을 이용하여 섬유복합재료의 기본 구성 요소(섬유, fiber; 매트릭스, matrix; 섬유-매트릭스 경계면, interface)의 역학적 상호 관계를 해석적으로 구명한다. 그리고 Marshall 등(1988)이 제안한 안정상태 균열이론(steady-state cracking theory)에 의하여 복합재료가 1축 인장 하에서 변형을 경화거동을 하도록 재료를 최적화함으로써 ECC를 개발할 수 있다. 이러한 과정에서 섬유의 혼입률이 소요 성능에 따라 최소화 될 수 있기 때문에 경제성 뿐만 아니라, 재료의 제작 공정도 다양화 될 수 있는 장점을 갖고 있다.

기존의 연구(Kim et al., 2003)에 의하여 슛크리트용 ECC가 개발된 바 있으며, 이외에도 높은 유동성에 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, 자기충전(self-consolidating)용 ECC란 소요 타설시간 동안 재료분리 없이 높은 유동성을 유지할 수 있는 고유동 ECC를 의미한다. 또한 굳은 후에는 2가지 재료 모두 ECC의 고유 특성인 고인성 특성, 즉 1축 인장변형률 경화특성과 미세균열(micro-crack)의 분포를 나타내어야 한다. 따라서 굳은 후의 역학적 성능뿐만 아니라 굳기 전의 유동성도 함께 제어하여야 다양한 타설 공정을 적용할 수 있다.

ECC는 잔골재, 물, 섬유, 보통 포틀랜드 시멘트, 혼화재료 등을 포함하고 있다. ECC의 배합비는 높

은 연성을 만들기 위하여 마이크로 역학에 의하여 최적화되기 때문에 구성 재료의 조합을 변화시켜 유동성을 조절하는 방법은 바람직하지 않다. 따라서 혼화재료를 적절히 이용하여 시멘트풀의 레올로지를 조절하고 이를 통하여 ECC의 유동성을 제어하는 방법이 가장 합리적이다. 즉 굳지않은 ECC의 유동 특성을 혼화재료로 정교하게 제어함으로써 동일한 재료에 상이한 시공성을 부여하게 되는 것이다. 특히 슛크리트 공정에서는 특정 시간이 흐른 후에 서스펜션의 점성이 빠르게 증가하여야 하는 반면, 외부의 압밀 없이 타설이 진행되는 자기충전 공정은 전 타설 시간에 걸쳐 낮은 점성이 유지되어야 한다.

따라서, 이 연구에서는 시멘트풀의 레올로지를 제어함으로써 서로 상반되는 공정(스�크리트, 자기충전)에 적용할 수 있는 ECC를 개발하는 방법에 관하여 논하고자 한다. 우선 마이크로 역학과 안정상태 균열이론을 이용하여 고인성 ECC 특성을 갖도록 기본 배합을 결정한 후, 굳기 전의 유동성이 각각의 공정에 적합하도록 재료의 배합비를 최적화할 것이다. 개발된 ECC의 슛크리트 적합성(펌핑성(pumpability), 점착성(sprayability))과 자기충전성(고유동성)은 실험을 통하여 입증되며, 굳은 재료의 역학적 특성이 시공 방법에 상관없이 유사함을 증명하여 2가지 시공법의 적용성을 검증할 것이다.

II. 이론적 배경

1. 마이크로 역학과 안정상태 균열이론

콘크리트, 모르타르, 섬유보강콘크리트 (또는 섬유보강 모르타르, FRC) 등의 유사취성적인 시멘트계 재료와는 달리 ECC는 1축 인장 하에서 금속과 같은 인장변형률 경화거동을 한다. 이와 더불어 일반적으로 100 μm 이하의 폭으로 제어되는 다수의 미세균열(multiple micro-cracking) 발생이 이 재료의 고유한 특성이다(Fig. 1). 이런 탁월한 연성

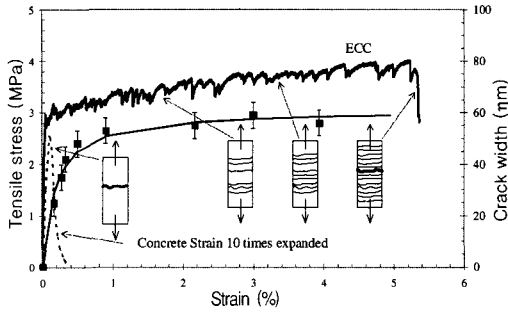


Fig. 1 Tensile stress-strain curve of typical ECC and concrete. The crack width as a function of tensile strain is also shown for the ECC (Weimann and Li, 2003)

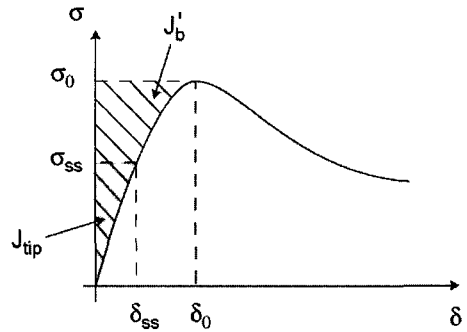


Fig. 2 Typical $\sigma(\delta)$ curve for ECC. Hatched area represents complementary energy J_b' and shaded area represents the crack tip toughness J_{tip}

은 마이크로 역학에 근거하여 매트릭스, 섬유, 경계면 등의 3가지 역학적 요소를 조절함으로써 구현된다. 특히 인장변형을 경화거동의 특성을 갖도록 하기 위해서는 안정상태 균열발생(steady-state cracking)의 기본 요구조건을 만족하여야 한다.

안정상태 균열이론(Marshall and Cox, 1988)에 의하여 ECC를 설계하기 위해서는 섬유인발실험을 통하여 얻은 섬유와 매트릭스 사이의 계면 특성, 그리고 파괴역학 실험에 의하여 구한 매트릭스의 파괴인성 등을 이용하여 복합재료의 균열면 응력(bridging stress, σ)-개구변위(crack opening, δ) 관계를 우선 구하여야 한다. 균열면 응력-개구변위 관계를 구하기 위해서는 식 (1)을 이용하여 균열면에 작용하는 단일 섬유의 가교 힘(bridging force)을 모두 적분하여야 한다.

$$\sigma_B(\delta) = \frac{4V_f}{\pi d_f^2} \int_{\phi=0}^{\pi/2} \left[\int_{z=0}^{(L_f/2)\cos\phi} P(\delta)p(\phi)p(z)dz \right] d\phi \dots\dots\dots (1)$$

여기서, V_f 는 ECC에 혼입된 섬유의 비율(부피비)이며 L_f 는 혼입된 섬유의 길이이다. 또한 $P(\delta)$ 는 단일 섬유가 균열면에서 작용하는 가교 힘이고, $p(\phi)$ 는 섬유와 균열면이 이루는 각에 대한 확률밀도함수이며 $p(z)$ 는 섬유의 도심과 균열면의 이격

거리에 대한 확률밀도함수이다. 균열면에 섬유가 균일하게 분포되어 있다면 $P(\phi) = \sin \phi$ 이고 $P(z) = 2/L_f$ 이다(Li et al., 1991). 식 (1)을 이용하여 구한 균열면 응력-균열면 개구변위는 일반적으로 Fig. 2와 같은 형태를 보인다. 마이크로역학 이론은 Fig. 2와 같은 관계를 해석적으로 구현할 수 있는 역학적인 도구로서 자세한 이론 및 수학적 전개는 Lin 등(1999)의 논문에 상세히 소개되어 있다.

안정상태의 균열을 발생시키기 위한 첫 번째 조건은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 ECC의 균열면 응력-개구변위 관계에서 계산된 보상에너지(complementary energy, J_b')가 모르타르 매트릭스의 균열선단 파괴인성(crack tip toughness, J_{tip})보다 항상 커야 한다는 것이다. 이를 수식으로 표현하면 식 (2)와 같으며, 이 식에서 J_{tip} 은 선형탄성 파괴역학에 따라 모르타르 매트릭스의 파괴인성($K_m = K_{Ic}$)과 탄성계수(E_c)를 이용하여 구할 수 있다(식 (3)).

$$J_{tip} \leq \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta_0) d\delta \equiv J_b' \dots\dots\dots (2)$$

여기서, σ_0 는 δ_0 에 해당되는 최대 균열면 응력이다.

$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_c} \dots \dots \dots (3)$$

여기서, J_{tip} 은 모르타르 매트릭스의 균열선단 파괴인성이다.

이러한 에너지 조건을 만족함으로써 일반적인 시멘트계 재료에서 발생하는 Griffith 균열(Fig. 3(a)), 즉 응력의 전달이 불가능한(traction-free) 균열로부터 응력을 지속적으로 전달할 수 있는 안정상태의 균열(Fig. 3(b))로 변화하게 된다. 인장변형을 경화거동을 보이는 재료를 만들기 위한 또 하나의 요구조건은 식 (4)에 표현된 바와 같이 σ_0 가 1축 인장 균열장도(tensile first crack strength, σ_{fc})보다 항상 큰 값이어야 한다는 것이다. 이 조건을 만족함으로써 먼저 발생한 균열이 최대 균열면 응력에 도달하기 전에 또 다른 위치에서 균열이 발생(multiple cracking)하고, 균열 폭도 δ_0 이하로 제어할 수 있다. 결과적으로 마이크로 역학과 안정상태 균열이론은 식 (2)와 식 (4)를 만족시켜 기존의 시멘트계 재료가 갖고 있는 취성적 특성을 ECC의 고인성 특성으로 변화시키는 이론적 수단이 된다.

$$\sigma_{fc} < \sigma_0 \dots \dots \dots (4)$$

여기서, σ_{fc} 는 최대초기결함의 크기와 K_m 에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있다.

2. 시멘트풀의 레올로지 제어

포틀랜드 시멘트의 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(Yoshioka et al., 1997; Lewis et al., 2000). 따라서 정전기력, 반데르발스 힘 등에 의한 시멘트 입자 간 상호 작용을 조절함으로써 시멘트풀의 유동 특성을 보다 합리적으로 제어할 수 있을 것으로 사료된다.

현재 가장 일반적인 시멘트풀 모델은 양으로 대전된 알루미늄(Al_2O_3) 입자를 주요소로 하는 서스펜션 모델이다. 따라서 음이온을 갖는 반응성 고분자를 첨가함으로써 시멘트 서스펜션의 점성이 효과적으로 감소된다고 보는 것이 일반적인 견해이며, 실제로 그 효과가 우수하기 때문에 고분자 성분을 갖고 있는 고성능 감수제 또는 유동화제가 널리 사용되고 있는 실정이다. 이 연구에서도 유동성과 섬유 분산성을 향상시키기 위하여 강력하게 대전된 음이온 유동화제(MFS, polyelectrolyte melamine formaldehyde sulfonate)를 사용한다. MFS를 사용함으로써 응집된 시멘트 입자를 분산시키는 효과

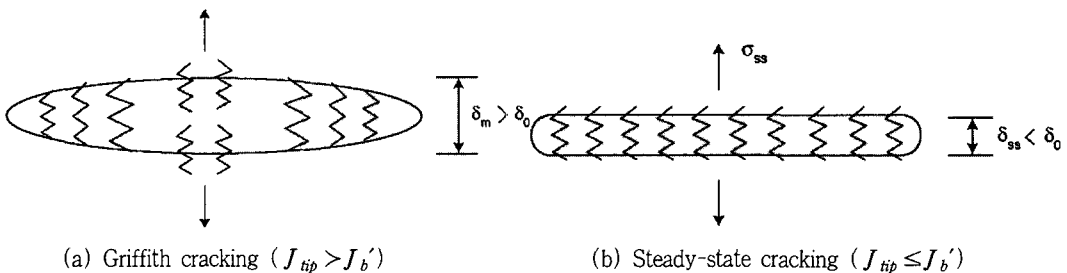


Fig. 3 Cracking in a composite based on the energy balance between J_b' and J_{tip}

를 얻게 되는데, 이 연구에서는 이와 더불어 비이온성 고분자(non-ionic polymer) 분리저감제의 일종인 HPMC(hydroxymethylcellulose)를 사용하여 반데르발스 인력의 효과도 적절히 이용하고자 한다.

HPMC를 사용하면 Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 입자간의 정전기층 뿐만 아니라 반데르발스 힘에 의한 안정층을 형성하게 되어 시간이 지나면서 시멘트 입자가 재응집하는 현상을 방지할 수 있게 된다. 이러한 서스펜션은 자기충전을 하기에 적합한 유동성을 ECC에 부여할 것으로 기대된다. 반면, 숏크리트 공정에서는 MFS와 HPMC의 역할이 자기충전성 ECC에서 하는 역할과는 상이하도록 제어할 것이다. 즉 MFS는 단순히 섬유의 분산을 촉진시키는 역할을 하도록 하고, HPMC는 시멘트입자의 점착성을 증진시키는 역할을 수행하도록 조절할 것이다. 이와 같이 혼화제의 효과를 상이하게 만드는 것은 서스펜션에 투여하는 양과 순서를 달리함으로써 구현할 수 있는데, 기존의 연구(Kong et al., 2003)에 의하여 그 방법론의 타당성이 입증된 바 있다. 또한 숏크리트용 ECC에는 반응성이 높은 혼화제인 칼슘알루미늄에이트 시멘트 입자(CA)를 추

가로 적용하여 타설 이후에 재료가 빠른 속도로 점성을 회복할 수 있도록 유도할 계획이다. 모든 공정에는 플라이 애쉬(FA)와 같이 입형이 구에 가까운 보조 결합제를 사용하여 섬유의 분산성을 극대화할 것이며, 그 양은 예비 비빔을 통하여 결정하게 된다.

III. 실험 방법

1. 기본재료

이 연구에서 ECC 보강용 섬유는 K사에서 생산한 PVA(polyvinyl alcohol)섬유(직경 39 μm , 길이 8~12 mm, 인장강도 1620 MPa, 탄성계수 38.9 GPa)이다. 제1종 보통포틀랜드 시멘트를 결합제로 사용되었고, 잔골재로는 평균입도 110 μm 의 실리카 골재를 사용하였다. 한편, 굳기 전 ECC의 유동 특성을 제어하기 위하여 HPMC와 MFS를 혼화제로, FA와 CA를 혼화제(보조 결합제)로 각각 첨가하였다.

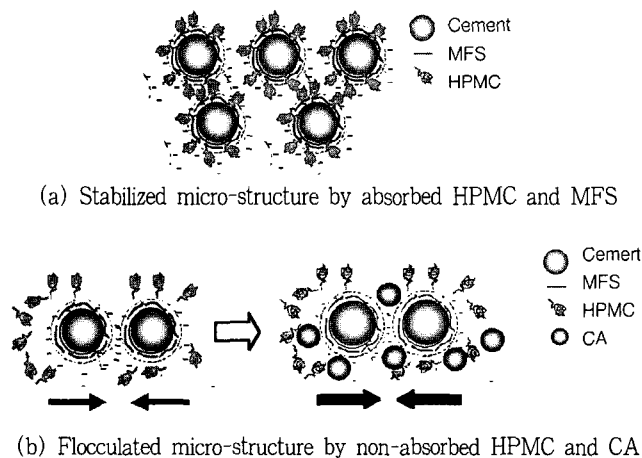


Fig. 4 Micro-structures developed in a cement paste by control of cement particle interactions for (a) stabilized micro-structure desirable for self-consolidating, and (b) flocculated micro-structure desirable for shotcreting

2. 시멘트풀의 레올로지 실험

시간에 따른 시멘트풀의 점도를 측정하기 위하여 회전점도계(Borlin controlled stress rheometer)를 이용하였다. 점도계의 회전속도를 내부의 시멘트풀 점성이 선형 점탄성(linear viscoelastic)의 범위 이내가 되도록 조절하였으며, 실험결과로서 시멘트풀의 동점성(dynamic viscosity)이 계산되었다.

3. ECC의 유동성(deformability) 실험

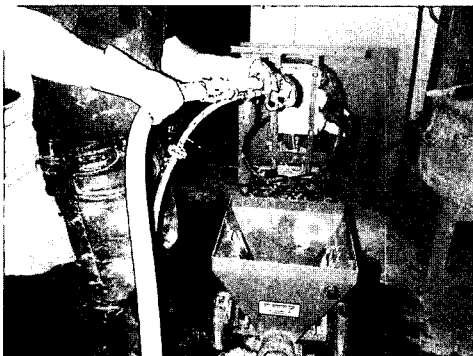
슬럼프 실험에 사용되는 슬럼프콘(직경=20 cm)을 이용하여 ECC의 유동 특성을 정량화하였다. 배합 직후에 ECC의 유동 특성을 측정하였으며, 동일 조건에 대하여 2회 실험을 실시한 후 그 평균값을 취하였다. 다짐 또는 진동 등의 방법을 사용하지 않으면서 재료를 콘에 채워 넣은 후, 콘을 수직으로 들어올려 붕괴된 재료의 퍼진 직경(대표성을 갖는 2개의 직교방향 직경)을 갖고서 유동 특성을 정량화하였다. 이 연구에서 적용한 유동성(Γ , deformability)은 식 (5)와 같이 슬럼프콘의 직경($D_0=200$ mm)과 직교방향으로 퍼진 재료의 직경(D_1, D_2)을 측정하여 구할 수 있다.

$$\Gamma = \frac{(D_1 \times D_2) - D_0^2}{D_0^2} \dots\dots\dots(5)$$

여기서, D_0 는 슬럼프콘의 직경이고 D_1 과 D_2 는 직교방향으로 재료의 퍼진 직경이다.

4. ECC의 슛크리트, 자기충전 실험

40리터 용량의 드럼믹서에서 배합된 ECC는 P사의 나선형 동력펌프에 의하여 직경 25 mm 호스를 거쳐 노즐로 운송된다(Fig. 5(a)). 운송된 ECC는 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 노즐에서 일정한 공기압에 의하여 분사되면서 타설면으로 뿜칠이 된다. 이 때에 노즐은 타설면에서 0.5~1.0 m의 거리를 유지하면서 타설면과 수직이 되도록 유지하였고, 펌프를 운전하면서 과도한 압력이 발생하지 않으면 재료의 펌핑성(pumpability)이 양호한 것으로 판정하였다. 점착성(sprayability)을 검증하기 위하여 1회의 뿜칠 과정에 의하여 수직면 또는 천장면에 타설되는 ECC의 두께를 측정하였다. 이 때에 타설된 ECC는 자중에 의한 미끄러짐이나 탈락이 발생하지 않아야 하며, 배합 후에 약 10~15분 정도가 경과하였을 때를 기준으로 슛크리트 실험을 하였다. 자기충전성 실험은 슬래브 보수현장에 ECC를 타설함으로써 그 타당성을 검증하였다. 이 때에

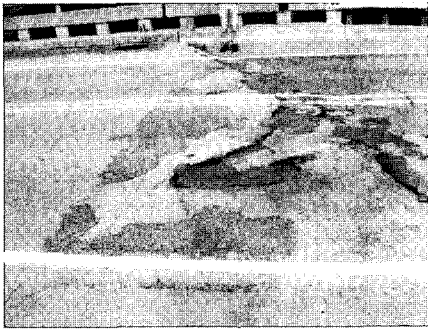


(a) Spiral pump employed in this study



(b) Spraying process on a vertical surface

Fig. 5 Shotcrete machine and spraying process

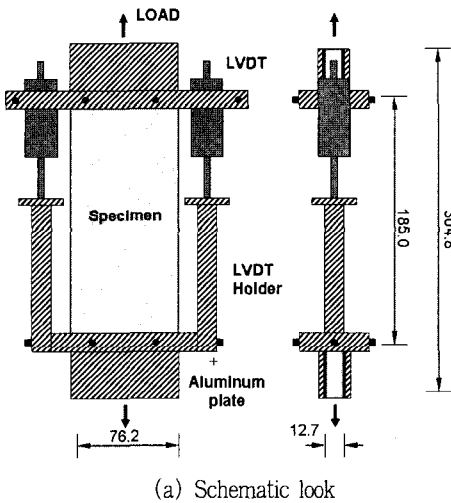


(a) Deteriorated surface of the slab

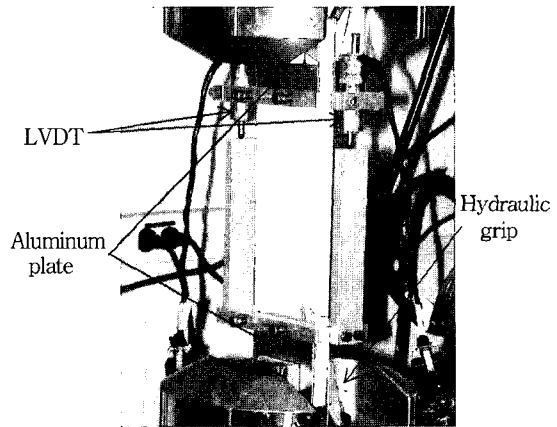


(b) Concrete substrate prepared for ECC pouring

Fig. 6 Patch repair site (SI3 of 81103 in Michigan State of the US) for the field test on ECC self-consolidating



(a) Schematic look



(b) Experimental setup

Fig. 7 Test setup for uniaxial tensile test

현장에서는 350리터 용량의 드럼믹서에서 배합된 ECC를 순수한 자중에 의하여 타설되도록 하며, 타설 전에 슬럼프콘을 이용하여 유동성을 측정하였다. Fig. 6은 ECC의 자기충전성 실험을 위하여 선정된 현장을 보여주고 있다.

5. 직접인장실험

1축 인장에서의 변형경화거동은 ECC 고유의 특성으로서 타설 방법과 상관없이 시험체가 동일한 거동을 나타내어야만 이 연구에서 적용하는 타설

방법(슛크리트, 자기충전)이 타당함을 증명할 수 있다. 따라서 슛크리트, 자기충전 및 일반타설 방법에 의하여 305 mm×76 mm×13 mm의 인장 실험체를 제작하였다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 직접인장실험은 MTS 810 실험기에서 수행되었고 2개의 LVDT(측정길이=185 mm)가 시험체의 양측에 부착되어 변형률을 측정하였다. 유압그립과 접촉되는 시험체의 상,하부에는 60 mm×76 mm 크기의 알루미늄판을 접착제로 부착하여 그립에 의하여 실험체의 단부가 손상되는 것을 방지하였다. 또한 알루미늄판을 부착할 때에는 4개의 판이 평행을 유지

하도록 하여 인장편심력이 실험체에 발생하지 않도록 하였다.

IV. 결과 및 분석

1. 마이크로 역학에 의한 선행조건 결정

Li 등(Li et al., 2001)의 기초 연구에 의하여, 약 45%의 물-시멘트비(W/C비) 그리고 80~100%의 잔골재-시멘트비(S/C비)가 최적의 배합비인 것으로 밝혀진 바 있다. 이 배합비에 의하여 결정된 매트릭스의 초기균열강도는 섬유의 최고가교응력의 약 70% 이내가 된다. 또한 PVA섬유의 친수성에 의하여 모르타르 매트릭스와 섬유의 경계면에 과다한 화학적 부착(G_d)과 마찰부착(τ_0)이 발생하는 것을 방지하기 위하여 섬유 제작시에 중량비 0.8%의 오일링(oiling)을 시행하여 최적의 부착특성을 부여하였다. 이 연구에서는 다양한 예비 실험을 통하여 구한 매트릭스의 파괴인성($K_m = 0.30 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$), 섬유의 화학적 부착($G_d = 2.09 \text{ J/m}^2$), 마찰부착($\tau_0 = 2.11 \text{ MPa}$) 등을 갖고서 마이크로 역학 해석을 수행하였다. 안정상태 균열이론에 따르면 인성비(toughness ratio = J'_b / J_{tip})가 1.0 이상일 때에 섬유복합재료에 안정상태의 균열

(Fig. 3(b))이 발생하고 그로 인하여 1축 인장 하에서 변형을 경화거동을 할 수 있게 된다. 그러나 Kanda 등(1999)은 시멘트계 매트릭스의 불확실성과 섬유 분산의 불완전성을 고려하여, 인성비 3.0 이상을 확보하여야만 인장변형을 경화거동을 위한 조건이 충족된다고 보고한 바 있다. 따라서 이 연구에서는 인성비 3.0을 기준으로 하여 최적의 섬유 혼입률과 섬유의 길이를 결정하였다. 마이크로 역학 해석의 결과로 Fig. 8(a)에 나타낸 바와 같이 섬유 혼입률(V_f)이 1.7%를 상회할 때에 인성비 조건 3.0을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 2%의 섬유 혼입률을 안전측의 최적값으로 결정하였다. 섬유의 길이의 경우에는 Fig. 8(b)에 나타낸 바와 같이 7 mm 이상일 때에 인성비 조건을 만족한다. 한편, Wu(2000)의 연구 결과에 따르면 섬유의 변장비(길이/직경비)가 200~300 정도일 때에 섬유의 분산성이 최적화 되는데, 이 연구에서 채택한 섬유의 직경($39 \mu\text{m}$)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 Table 1과 같이 기본적인 배합 조건을 설정하였다.

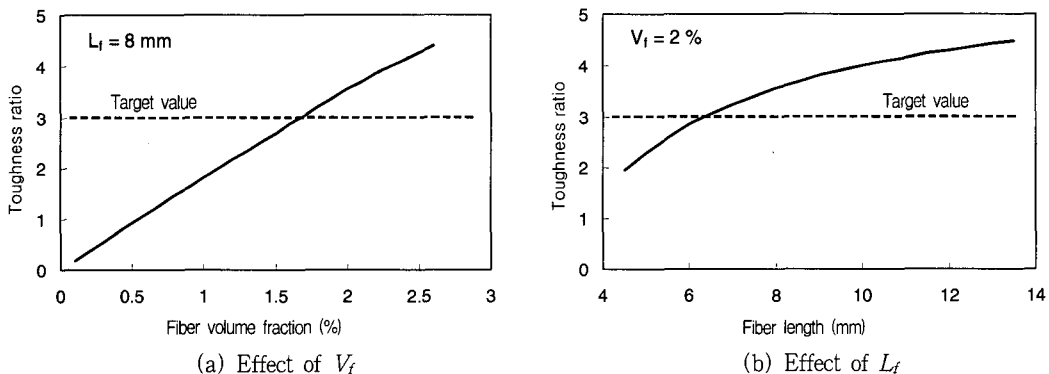


Fig. 8 The effects of fiber volume fraction, V_f and fiber length, L_f on toughness ratio, J'_b / J_{tip}

Table 1 Basic mix composition determined based on micromechanical analysis

Water-cement ratio in weight (W/C)	Sand-cement ratio in weight (S/C)	Fiber volume fraction (V_f)	Fiber length (L_f)
~ 45 %	80~100 %	2 %	8~12 mm

2. 시멘트풀과 ECC의 레올로지 제어

혼화재료를 이용하여 레올로지를 제어하기 위해서는 우선 사용할 재료를 선정한 후, 투여순서와 투여량을 결정하는 것이 바람직하다. 2.2절에서 언급한 바와 같이 이 연구에서는 FA, CA, 음이온 혼화제 MFS, 증점제 HPMC 등을 ECC의 레올로지 제어를 위한 혼화재료로 사용하였다. 따라서 혼화재료의 사용순서 및 양을 최적화하기 위하여 2가지의 시멘트풀 실험을 수행하였다. 우선 FA와 같이 구에 가까운 입형의 혼화재료를 시멘트와 함께 결합재로 사용함으로써 섬유 분산성을 증진시킬 수 있기 때문에, 이 연구에서는 소량의 FA입자를 보조 결합재로 사용하였으며 최적 사용량은 예비 비범을 통하여 시멘트량의 15~30% 범위로 결정하였다.

한편, 혼화제 MFS와 HPMC의 투여순서를 결정하기 위하여 동일한 투여량을 갖고서 투여순서와 시간에 따른 점성의 변화를 측정하였다. Fig. 9(a)에 나타난 바와 같이 HPMC를 먼저 투여하고 MFS를 투여한 경우에 시멘트풀이 상대적으로 천천히 점성을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 현상이 나타난 이유는 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 투여순서(HPMC 다음에 MFS)는 오랜 시간동안 낮은 점성을 유지하여야 하는 자기충진 ECC에 적합한 것으로 판단된다. 이와 유사한 실험 결과는 기존의 PE(poly-

ethylene)섬유 복합재료에서도 관찰된 바 있다 (Kong et al., 2003).

한편 Fig. 9(a)에서 MFS를 먼저 투여하고 HPMC를 나중에 투여한 경우에는 시멘트풀이 매우 빠른 속도로 점성을 회복하는 현상을 나타내었다. 이러한 결과가 나타난 이유는 MFS에 의하여 형성된 강력한 대전층 때문에 나중에 투여되는 HPMC가 시멘트 입자에 충분히 흡착되지 못하기 때문이다. 이 때에 HPMC는 입자 주변에서 층을 형성하지 못하므로 서스펜션 내의 자유수(free water)와 주로 반응하여 시멘트풀의 점성을 증진시키는 효과를 나타낸다. 즉 HPMC의 시멘트 친화력은 MFS의 정전기적 친화력에 비하여 현저히 낮기 때문에, 나중에 투여될 경우 증점제의 역할만을 수행하게 되는 것이다. 이러한 투여순서(MFS 다음에 HPMC)는 빠른 시간 내에 점성을 회복하여야 하는 슛크리트 공정에 적합하다. 따라서 MFS를 섬유 분산 직전에 투여하여 섬유의 분산성을 극대화시키고, 섬유가 분산된 이후에 HPMC를 투여함으로써 재료의 점착성을 증진시키는 방법이 슛크리트 공정에 바람직한 것으로 판단된다.

이 연구에서는 슛크리트용 재료 배합의 마지막 단계에 CA입자를 투여함으로써 뿔칠된 ECC의 점성을 보다 빠르게 회복시키는 방안을 적용하였다. Fig. 9(b)에 나타난 바와 같이 5%의 시멘트량을 CA로 대체한 경우, 투여 초기에는 낮은 점성을 보이다가 약 10분 전후를 기점으로 하여 급격하게 점성이 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 10%의 시멘트량을 대체한 경우에는 투여 직후부터 빠르게 점성이 증진하는 것으로 나타났다. 일반적으로 현장배합 이후에 슛크리트 공정을 한다고 본다면 초기인 폼핑, 운반과정에서는 낮은 점성을 나타내고, 뿔칠이 된 이후에는 빠른 속도로 점성이 증진되는 5%의 시멘트량 대체를 최적값으로 결정하였다. 5%의 시멘트를 CA로 대체하였을 때에 낮은 초기 점성을 보이는 이유는 CA 입자의 크기가 시멘트에 비하여 작기 때문인 것으로 판단된다. 즉 CA 미립

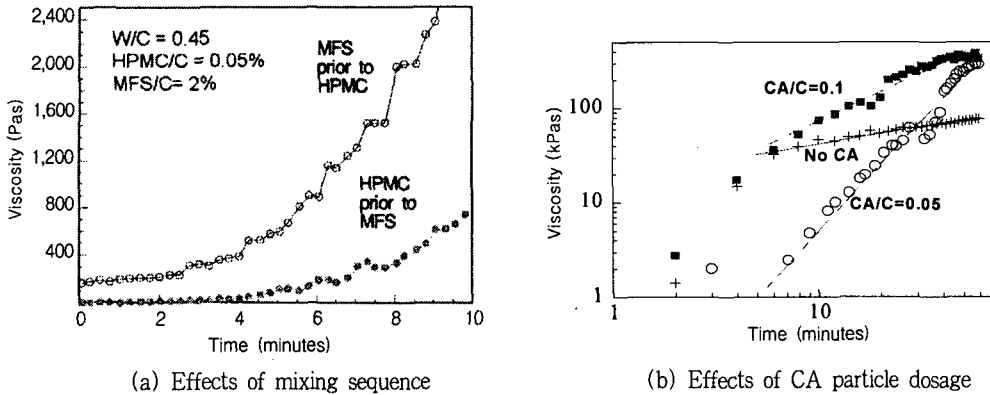


Fig. 9 Viscosity change in cement paste over time (adapted from Kim et al., 2003)

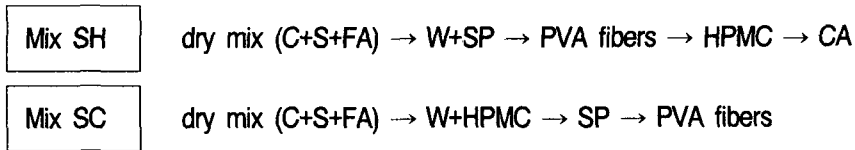


Fig. 10 Mixing sequences adopted for shcreting ECC (Mix SH) and self-consolidating ECC (Mix SC)

자가 시멘트 입자 사이에 있는 물의 공간을 차지하면서 서스펜션 내에 자유수의 양을 증가시키기 때문이다. 그러나 시간이 흐르면서 CA의 높은 반응성이 발현되어 Fig. 9(b)와 같이 서스펜션의 점성을 빠르게 증진시키는 역할을 하게 된다. 이러한 전반적인 연구 결과를 토대로 하여 Fig. 10에 나타난 바와 같이 공정에 따라 상이한 배합 순서를 채택하였다.

시멘트풀에 대한 연구 결과를 바탕으로 예비 비빔을 수행한 후 Table 2와 같은 최적의 ECC 배합을 결정하였다. 재료의 배합을 위하여 40리터, 350리터 용량의 드럼 믹서를 사용하였고, Fig. 10

에 나타난 배합 순서에 따라 재료를 제작하였다. Mix SH ECC는 슛크리트용 재료로서 FA의 양을 30%로 하여 서스펜션 내의 입자량을 높였으며, CA의 양은 시멘트풀 연구에 따라 5%로 정하였다. MFS와 HPMC의 투여량은 슛크리트 실험을 병행하면서 최적화하였는데 그 결과는 Table 2에 나타난 바와 같다. Mix SH의 유동성은 배합 직후에 수행된 슬럼프 실험에 의하여 3.1로 측정되었다. 한편, Mix SC는 자기충전용 ECC로서 FA의 양을 15%로 낮추어 서스펜션의 점성을 최소화하였고, MFS와 HPMC의 투여량은 유동성 10.0을 목표로 하여 Table 2에 나타난 바와 같이 최적화하였다.

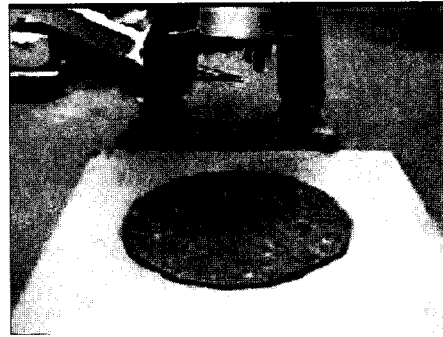
Table 2 ECC compositions and the deformability just after mixing

Mix	W/C	S/C	V_f (volume ratio)	FA/C	MFS/C	HPMC/C	CA/C	Γ
Mix SH	46 %	80 %	2 %	30 %	0.75 %	0.05 %	5 %	3.1
Mix SC				15 %	2.00 %	0.01 %	-	10.7

* W: water: C: cement: S: sand. All numbers are weight ratios except for V_f .



(a) Mix SH ($\Gamma = 3.1$)



(b) Mix SC ($\Gamma = 10.7$)

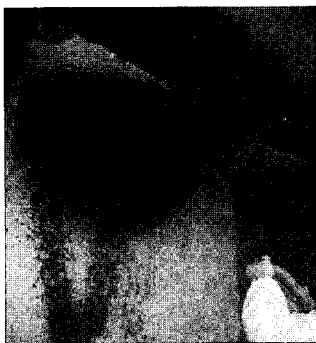
Fig. 11 Deformability of ECCs obtained just after mixing

자기충전용 재료에는 상대적으로 많은 양의 MFS가 투입되고, 슛크리트용 재료에는 상대적으로 많은 양의 HPMC가 투입된다. Fig. 11은 2종류의 ECC에 대한 유동성 실험 과정을 보여 주고 있다.

3. 개발된 ECC의 시공성

Mix SH에 대한 슛크리트 실험을 수행하여 ECC의 성능을 검증하였다. 슛크리트 실험 동안에 지속적인 펌프압 관찰을 통하여 과압력이 측정되지 않았음을 확인하였다. 따라서 이 연구에서 사용한 나선형 동력펌프에 대하여 Mix SH가 적절한 펌핑성을 갖는 것으로 판단된다. 또한 1회 연속 뿔철에

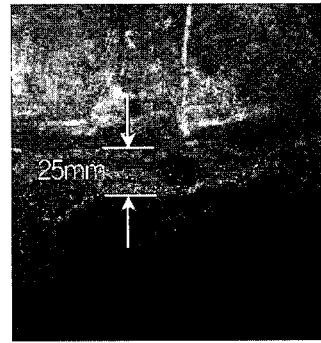
의하여 타설된 두께를 측정하였는데, 수직면과 천장면에 대하여 각각 45 mm와 25 mm의 값을 얻었다(Fig. 12). 이 두께는 미국과 유럽의 관련 학회(ACI, 1990; EFNARC, 1999)에서 추천하는 보수용 슛크리트의 타설두께 기준(수직면: 50 mm, 천장 수평면: 25 mm)에 해당되는 값이다. 이들이 추천하는 두께는 여러 번의 뿔철에 의하여 시공되는 것을 포함하므로 이 연구에서 개발된 ECC의 현장 적용성은 매우 우수하다고 판단할 수 있다. 한편, Mix SC에 대한 자기충전성은 콘크리트 보수 현장에서 검증되었는데 Fig. 13(b)에 나타낸 바와 같이 순수하게 자중에 의하여만 타설되어 만족스럽게 시공되었음을 알 수 있다. 재료가 과다한 유동



(a) Shotcreting process

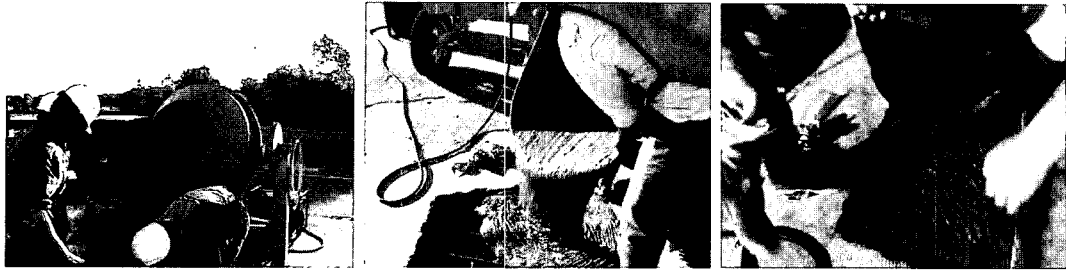


(b) Shotcreted ECC layer



(c) 25mm thickness of the layer

Fig. 12 Thickness of ECC shotcreted on an overhead surface



(a) A drum mixer used for mixing (b) ECC poured into the patch (c) ECC placed by self-consolidating

Fig. 13 ECC placed by self-consolidating into the patch

성을 갖게 되면 쉽게 재료분리가 발생하는 단점이 있는데, Mix SC의 타설 중에는 섬유의 뭉침, 재료 분리 등의 현상이 관찰되지 않고 균질한 재료 분산성을 나타내었다. 성공적인 타설 여부는 ECC의 인장 특성을 검증함으로써 다음 4.4절에서 보다 구체적으로 증명된다.

4. 개발된 ECC의 1축 인장거동

굳은 후의 ECC 특성이 시공법에 상관없이 서로 유사함을 확인함으로써 슛크리트 및 자기충전 공정의 성공 여부를 판정할 수 있다. 다양한 타설 공정에 의하여 제작된 실험체에 대하여 직접인장실험을 수행한 결과, Fig. 14와 같이 동등한 1축 인장 거동을 얻었다. 모든 실험체가 뚜렷한 인장변형을 경화 거동 특성을 보이면서 콘크리트의 약 100배에 가

까운 우수한 변형 성능(연성)을 나타내고 있다. 또한 실험체에는 균열폭 50 μm 이하의 미세균열이 다수 분포되었다.

V. 결 론

이 연구를 통하여 동등한 1축 인장 특성을 보이면서 다양한 타설 공정에 적용 가능한 고인성 섬유복합재료 ECC를 개발하였다. 보강섬유로는 PVA섬유를 이용하였고, 재료개발의 이론으로서 마이크로 역학, 안정상태 균열이론과 레올로지 제어기법을 도입하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 개발된 ECC의 기본 배합은 W/C=46%, FA/C=15~30%, S/A=80%로서 마이크로 역학과 안정상태 균열이론에 따라 결정되었다. 또한 섬유의 길이와 혼입률도 마이크로 역학적 해석결과와 섬유의 분산성을 동시에 고려하여 각각 8~12 mm와 2%(체적비)로 결정하였다.

2. MFS와 HPMC가 시멘트풀의 점성에 미치는 효과는 혼화제의 투여 순서에 따라 상이한 것으로 나타났다. 2개의 혼화제가 갖고 있는 시멘트 친화도의 차이에 의하여 이러한 현상이 발생한 것으로 판단되며, 이 특성을 이용하여 타설 공정에서 요구하는 성능에 부합하도록 재료의 배합 순서를 최적화하였다. 또한 MFS, HPMC, CA 등의 투여량은 시공법에 알맞도록 조절함으로써 공정에 적합한 최

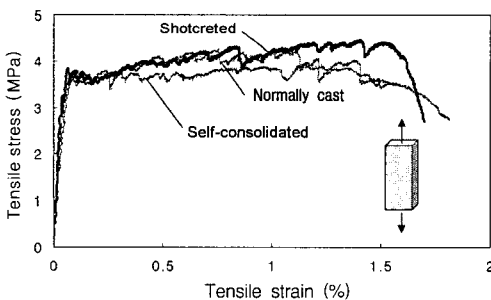


Fig. 14 Comparison of uniaxial tensile stress vs. strain curves obtained from ECCs cast by diverse processing

적의 유동성을 구현하였다.

3. Mix SH의 슛크리트 실험을 통하여 1회 최대 타설두께가 수직면, 천장면에 대하여 각각 45 mm와 25 mm인 것으로 측정되었다. 이 값은 구미 선진국에서 제시한 보수용 슛크리트의 요구 성능을 충분히 만족한다. 또한 Mix SC를 보수 현장에 적용하여 자기충진성을 검증한 결과, 순수한 자중에 의하여 손쉽게 시공될 수 있는 것으로 나타났다. 이 때에는 섬유와 모래 또는 재료 분리 현상이 나타나지 않는 우수한 유동성이 관찰되었다. Mix SH와 Mix SC의 정량화된 유동성(I')은 배합 직후를 기준으로 하여 각각 3.1과 10.7로 측정되었다.

4. 슛크리트와 자기충진 공정으로 타설된 실험체에 대하여 직접인장실험을 수행하였다. 모든 실험체는 일반 타설에 의하여 제작된 실험체와 동등한 1축 인장 특성을 나타내었다. 뚜렷한 인장변형률 경화거동과 함께 콘크리트의 100배에 가까운 연성이 측정되었고 실험체에는 ECC 고유의 미세균열(균열폭 < 50 μm)이 다수 분포되었다.

References

1. ACI, 1990, Guide to Shotcrete (ACI-506R-90), American Concrete Institute, p.41.
2. EFNARC, 1999, European Specification for Sprayed Concrete: Guidelines for Specifiers and Contractors, Hapshire, UK, p.31.
3. Kanda, T., and Li, V.C., 1999, A New Micromechanics Design Theory for Pseudo Strain Hardening Cementitious Composite, ASCE J. of Engineering Mechanics, Vol.125, No.4, pp.373-381.
4. Kim, Y.Y., et al., 2003, Design of Engineered Cementitious Composite Suitable for Wet-mixture Shotcreting, ACI Materials Journal, Vol.100, No.6, pp.511-518.
5. Kong, H.J., et al., 2003, Development of a Self-Consolidating Engineered Cementitious Composite Employing Electrosteric Dispersion/ Stabilization, J. Cement and Concrete Composites, Vol.25, No.3, pp.301-309.
6. Lewis, J.A., et al., 2000, Polyelectrolyte effects on the rheological properties of concentrated cement suspensions, J. Am. Ceram. Soc., Vol.83, pp.1905-1913.
7. Li, V.C., et al., 1991, A Micromechanical Model of Tension-softening and Bridging Toughness of Short Random Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites, J. Mech. Phys. Solid, Vol.39, No.5, pp.607-625.
8. Li, V.C., et al., 2001, Tensile Strain-hardening Behavior of PVA-ECC, ACI Materials Journal, Vol.98, No.6, pp.483-492.
9. Lin, Z., et al., 1999, On Interface Property Characterization and Performance of Fiber Reinforced Cementitious Composites, J. Concrete Science and Engineering, RILEM, Vol.1, pp.173-184.
10. Marshall, D. B., and Cox, B. N., 1988, A J-integral Method for Calculating Steady-state Matrix Cracking Stresses in Composites, Mechanics of Materials, No.8, pp.127-133.
11. Weimann, M. B., and Li, V.C., 2003, Hygral Behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC), International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 9, No 5, pp.513-534.
12. Wu, C., 2000, Micromechanical Tailoring of PVA-ECC for Structural Applications, Ph. D. Thesis, Ann Arbor, University of Michigan, p.238.
13. Yoshioka, K., et al., 1997, Role of steric hindrance in the performance of superplasticizers for concrete, J. Am. Ceram. Soc., Vol.80, pp.2667-2671.