

미세역학이론과 레올로지 제어에 의한 습식스프레이용 고인성 섬유보강 모르타르(ECC)의 개발

김윤용 ^{1)*}

¹⁾ 미시간대학교 토목환경공학과

(2003년 2월 24일 원고접수, 2003년 6월 27일 심사완료)

Development of a Sprayable Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite(ECC) Based on Micromechanics and Rheological Control

Yun-Yong Kim ^{1)*}

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 48109, USA

(Received February 24, 2003, Accepted June 27, 2003)

ABSTRACT

Sprayable high ductile fiber-reinforced cementitious composite (ECC), which exhibits tensile strain-hardening behavior in the hardened state, while maintaining sprayable properties in the fresh state, has been developed by employing parallel control of micromechanical design and rheological process design. Initially, micromechanical tools were adopted to properly select the matrix, fiber, and interface properties, and also to exhibit strain-hardening and multiple cracking behaviors in the ECC composites. Within the pre-determined micromechanical constraints, the fluid properties were controlled by the rheological process design to develop flocculations between cementitious particles at a proper rate. The sprayable properties of ECC mix were then developed by the controlled rheological properties of fresh matrix and the uniform dispersion of fibers. A series of spray tests showed the excellent pumpability, sprayability, and rebound property of the sprayable ECC. Subsequent uniaxial tensile tests demonstrated that the mechanical performance of sprayed ECC is comparable to that of ECC cast with external consolidation, for the same mix design.

Keywords : sprayable ECC, micromechanical principle, tensile strain-hardening behavior, pumpability, sprayability

1. 서 론

Engineered Cementitious Composite(ECC)는 Li 등¹⁾에 의하여 제안된 미세역학(micromechanics)을 근거로 하여 개발되는 일종의 고인성 섬유보강 모르타르로서, 모르타르에 2% 이내의 합성섬유를 혼입함으로써 콘크리트의 수십, 수백 배에 달하는 인장변형성능(인장변형률 2%이상)을 갖는 고인성 재료이다.(Fig. 1) 또한 100 μm 이하로 균열폭이 제어되는 특성을 갖고 있다. 최근 일본의 Kurary Co.과 함께 미시간대학의 첨단구조재료(ACE-MRL)연구실에서 poly(vinyl alcohol) (PVA)섬유를 보강재로 사용하는 PVA-ECC가 개발되어 신설구조물, 구조물의 보수보강, 프리캐스트부재 등 그 적용범위를 확대하는 연구가 활발

히 진행되고 있다²⁾.

습식스프레이용 ECC란 굳기 전에 습식스프레이에 적합한 펌핑성, 점착성 등을 갖고 있으면서, 굳은 후에는 고유한 ECC의 특성인 인장변형경화, 제어된 균열폭 등을 갖고 있는 ECC를 의미한다. 따라서, 굳은 후의 역학적 성능과 더불어 굳기 전의 유동성 제어 또한 이 재료를 개발하는데 있어서 매우 중요한 과제이다. 즉, 펌프에 의하여 재료가 호스를 거쳐 노즐까지 이동하는 중에는 변형에 용이한 낮은 점성이 요구되며, 고압의 공기분사에 의하여 노즐에서 타설면으로 스프레이 된 후에는 높은 점착성이 발현되어 타설면과의 부착 및 재료의 일체성을 유지하여야 한다. 이와 같이 단계별로 요구되는 상이한 유동특성을 ECC에 부여하기 위하여 미세역학에 의하여 결정된 재료 배합을 갖고서 혼화재료의 종류, 배합순서, 투여량 등을 조절함으로써 굳기 전의 레올로지를 제어하였다. 초유동 ECC³⁾의 개발과정에서 검증된 바와 같이 굳기 전과 굳은

* Corresponding author

Tel : +1-734-763-6832 Fax : +1-734-764-4292

E-mail : kim_yunyoung@hotmail.com

후의 2가지 재료특성을 함께 제어하는 방법은 시공방법과 상관없이 동일한 역학적 특성을 재료에 부여하는데 매우 효율적이다.

따라서, 본 연구는 습식스프레이에 적합한 굳기 전의 유동특성을 갖고 있으면서, 굳은 후에는 일반적인 타설방법에 의하여 제조된 ECC와 동일한 역학적 특성을 갖고 있는 ECC를 개발하는 데에 그 목적이 있다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 미세역학이론에 근거한 역학적 특성 제어와 시멘트풀 레올로지 조절을 통한 유동특성제어를 동시에 적용하였다.

이와 같이 개발된 ECC의 펌핑성(pumpability)과 점착성(sprayability)을 검증하기 위하여 pump-out실험, fill-up실험, spray-on실험 등의 스프레이 실험을 수행하였다. 또한 스프레이 공정에 의하여 제조된 인장시험체에 대하여 직접인장실험을 수행하여 스프레이 시공법에 대한 적용성을 판단하였다.

2. 재료개발의 이론적 체계

2.1 미세역학 (micromechanics)

콘크리트, 모르타르, 섬유보강콘크리트(또는 섬유보강 모르타르, FRC) 등의 유사취성적인 시멘트계 재료와는 달리 ECC의 경우 Fig. 2(a)에서 도시한 바와 같이 1축인장 하에서 금속과 같은 인장변형경화거동을 나타낸다. 이러한 인장변형경화와 더불어 일반적으로 $100 \mu\text{m}$ 이하로 제어되는 균열폭과 같은 ECC 고유의 재료특성은 미세역학에 근거하여 모르타르 매트릭스, 섬유, 경계면 등의 3가지 역학적 요소에 해당되는 각종 요인들을 조절함으로써 구현된다. 특히 인장변형경화거동을 하기 위해서는 안정상태 균열발생(steady-state cracking)의 기본 요구조건을 만족함으로써, 인장력 하에서 다수의 미세균열(multiple micro-cracking)이 발생하여야 하는데, 이러한 필요조건에 대한 이론적인 배경을 제공하는 것이 미세역학이론이다.

안정상태의 균열을 발생시키기 위한 첫 번째 조건은 Fig. 2(b)에서 나타난 바와 같이 ECC의 균열면 응력(bridging stress, σ)과 균열개구변위(crack opening, δ) 관계에서 계산되는 보상에너지(complementary energy, J_b')가 모르타르 매트릭스의 균열선단 파괴인성(crack tip toughness, J_{tip})보다 항상 커야 한다는 것이다.

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

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

여기서 σ_0 는 δ_0 에 해당되는 최대 균열면 응력이고 K_m 과 E_c 는 각각 모르타르 매트릭스의 파괴인성과 탄성계수

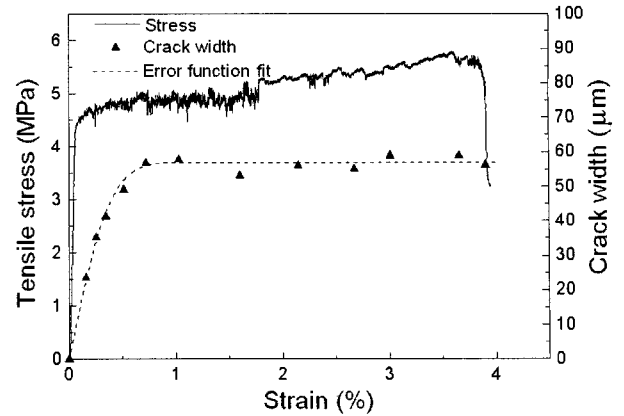
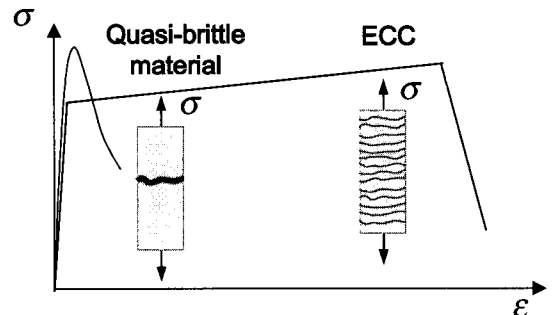
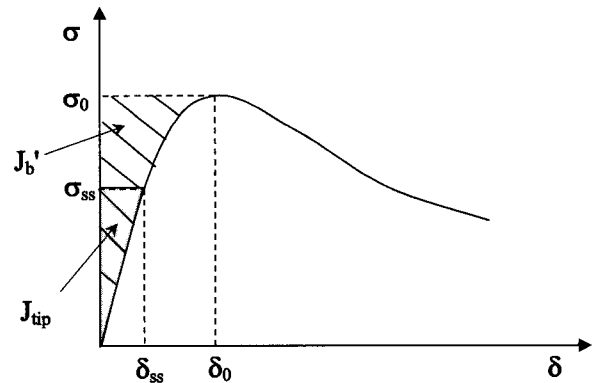


Fig. 1 Crack width vs. strain relationship of typical PVA-ECC material along with tensile stress vs. strain curve (from Li et al.²⁾)



(a) A comparison between the uniaxial tension behaviors of quasi-brittle cementitious material and of ECC



(b) A typical $\sigma(\delta)$ curve for ECC
Fig. 2 Requirements for strain hardening according to micromechanical principles

이다. 즉, 식(1)은 안정상태의 균열을 발생시키기 위한 에너지 조건이다. 인장변형경화거동을 유도하기 위한 또 다른 요구조건은 항상 σ_0 가 1축인장 균열강도(tensile first crack strength, σ_{fc})보다 큰 값이어야 한다는 것이다.

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

여기서 σ_{fc} 는 최대초기결합의 크기와 K_m 에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있다. 미세역학의 이론에 관한 자세한

한 내용은 Li 등^{4,7)}에 의한 연구결과에 나타난 바와 같다. 결과적으로 미세역학 이론은 식(1)과 식(3)을 만족시킴으로써 기존의 콘크리트와 같은 시멘트계 재료가 갖고 있는 취성적인 특성을 고유한 ECC의 고인성 특성으로 변화시키는 이론적인 근거를 제공한다.

이러한 미세역학이론을 이용함으로써 최소의 실험적인 접근으로도 고인성 ECC 재료를 개발할 수 있고, 보강재로 사용되는 섬유 효율을 극대화할 수 있으며, 섬유혼입량을 최소화하는 방법을 찾을 수 있다. 스프레이공법에 있어서는 특히 단섬유(discontinuous fiber) 혼입량을 최소화함으로써 섬유에 의한 펌핑성의 저하를 최소화 할 수 있는 장점을 얻을 수 있다.

2.2 단계별 레올로지 제어

습식스프레이 시공법에서 공정단계별로 요구하는 유동 특성(펌핑성, 점착성)을 구현하기 위하여 우선 미세역학에 의하여 모르타르 매트릭스, 섬유, 경계면 등의 선행 조건을 만족시키도록 재료배합을 결정한 후, 시멘트풀의 점성을 조절함으로써 굳기 전 ECC의 유동특성을 스프레이에 적합하도록 변형시킨다. 우선은 시멘트풀의 레올로지 연구를 통하여 혼화재료의 종류 및 배합순서와 혼화재료 투입량을 제어함으로써 레올로지를 최적화할 수 있는 방안을 모색한 후, 모르타르 및 ECC에 대한 유동성 실험을 통하여 최적의 혼화재료 투입량을 결정한다.

3. 실험방법

3.1 사용재료

미세역학에 근거하여 제작된 PVA섬유⁴⁾가 스프레이용 ECC의 보강섬유로 사용되었으며, 그 특성은 다음의 Table 1과 같다. 제1종 보통포틀랜드 시멘트와 플라이애쉬(F/A)가 주 결합재로 사용되었고, 잔골재로는 평균입도 110 μm 의 실리카 골재를 사용하였다. 한편, 굳기 전 ECC의 유동특성을 제어하기 위하여 셀룰로즈계 분리저감제(HPMC)와 멜라민계 고성능감수제(SP)를 혼화제로, 칼슘알루미늄에이트 시멘트(CA)를 혼화제로 각각 첨가하였다. 각 재료의 품질 특성은 Table 2와 Table 3에 제시한 바와 같으며, 모든 값은 제조회사에서 제공하는 품질 특성을 그대로 인용하였다.

3.2 시멘트풀 레올로지 실험

시간에 따른 시멘트풀의 점도를 측정하기 위하여 회전 점도계(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.

3.3 모르타르와 ECC의 유동성(deformability) 실험

일반적인 플로우 실험에 사용되는 플로우콘(직경=10 cm)과 슬럼프 실험에 사용되는 슬럼프콘(직경=20 cm)을 이용하여 모르타르와 ECC의 유동특성을 각각 정량화하였다. 모르타르 또는 ECC의 배합 직후 일정한 시간간격으로 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 갖 고서 유동특성을 정량화한다. 본 연구에서 적용한 유동성(Γ) 값은 다음의 식(4)에 의하여 구할 수 있다.

$$\Gamma_{rest}^F, \text{ or } \Gamma_{rest} = \frac{(d_1 \times d_2) - d_0^2}{d_0^2} \quad (4)$$

여기서, d_0 는 플로우콘 또는 슬럼프콘의 직경이고 d_1 과 d_2 는 직교방향으로 재료의 퍼진 직경이다. 윗첨자 F는 플로우콘 실험에 의하여 결정된 모르타르의 유동성임을 의미하고, 아랫첨자 rest는 모르타르 또는 ECC 배합 직후 실험까지의 경과시간(rest time)을 분으로 나타낸 것이다.

Table 1 Properties of PVA fibers

Diameter (μm)	Length (mm)	Nominal strength (MPa)	Elongation (%)	Oiling agent content (%)	Young's modulus (GPa)
39	8	1620	6	0.8	38.9

Table 2 Properties of cementitious binders and sand

Material property	Type I Cement	Sand	Type F F/A	CA
Grain size (μm)	11.7 \pm 14.8	110 \pm 38	26.9 \pm 6.8	5.5 \pm 1.5
Specific gravity	3.15	2.60	2.41	-
Setting time	-	-	-	Initial 100 min, Final 160 min,

(*: Vicat setting properties (KS L 5102), - : not available)

Table 3 Properties of chemical admixtures

Admixture property	HPMC	SP
Water content	0% (powder)	65% (liquid)
Specific gravity	1.3	1.2

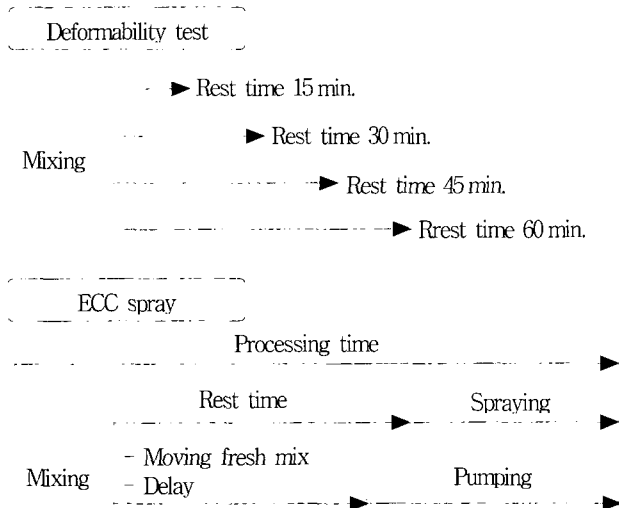


Fig. 3 Schematic comparison between the definitions of the rest time in mortar deformability test and in ECC spray processing.

모르타르의 유동특성 실험에서 정의하는 경과시간과 ECC의 스프레이 공정에서 정의하는 경과시간을 Fig. 3에 비교, 도시하였다.

3.4 스프레이 실험

40l 용량의 드럼믹서에서 배합된 ECC는 나선형 동력펌프(spiral pump)에 의하여 직경 25mm 호스를 거쳐 노즐로 운송되었다. 운송된 ECC는 노즐에서 700 KPa의 공기압으로 분사되어 타설면으로 스프레이 된다. 노즐은 타설면에서 0.5~1.0m의 거리를 유지하면서 타설면과 수직이 되도록 위치하여 스프레이 타설을 하였다. 펌핑성(pumpability)을 정량화하기 위하여 pump-out실험을 수행하였다(Fig. 4). 노즐을 제거한 후 펌프를 운전하면서 굳지 않은 ECC를 호퍼에서 호스를 거쳐 다시 호퍼로 되돌아 오게 하는 방법으로 실험을 진행하였다. pump-out실험 중에 펌프압을 기록하고, 펌핑 직전, 즉 배합 직후에 유동특성을 실험하여 그 때의 유동성(Γ_0)을 측정하였다.

점착성(sprayability)을 정량화하기 위하여 fill-up 및 spray-on 등의 2가지 실험방법을 도입하였다. 우선 fill-up 실험(Fig. 5)은 356×362 mm 크기에 51mm의 깊이를 갖고 있는 나무상자를 수직면에 기대어 놓고, 1회의 스프레이 과정에 의하여 이 상자를 다 채울 수 있을 때의 ECC 유동성(Γ_{rest})을 측정하였다. 또한 그 때까지 소요된 경과시간(rest time)을 배합 직후부터 측정하여 기록하였다. 본 연구에서는 스프레이 공정이 현장배합에 의하여 이루어진다는 가정 하에, 재료배합 후 스프레이 직전까지의 경과시간 15분을 목표 경과시간으로 설정하였고, 그 때의 ECC

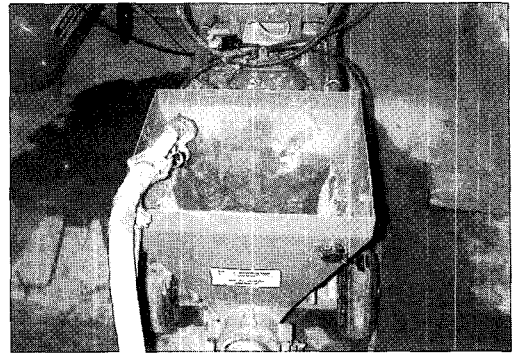


Fig. 4 Pump-out test on fresh ECC mix

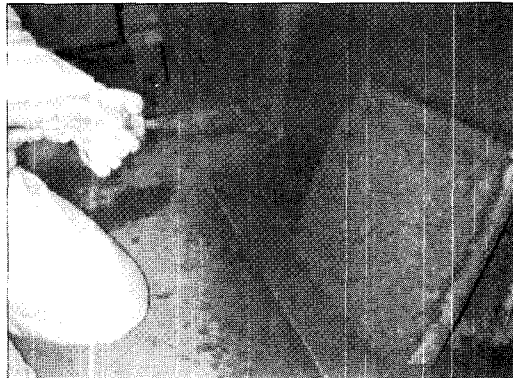


Fig. 5 Fill-up test on fresh ECC mix

가 fill-up실험에서 단 1회의 스프레이 과정에 의하여 51 mm 깊이의 상자를 다 채울 수 있도록 ECC의 유동성을 최적화 하였다.

점착성을 정량적으로 평가하는 또 다른 실험방법으로서 spray-on실험을 도입하였다. 이 실험을 통하여 1회의 스프레이 과정에 의하여 수직면 또는 천장 수평면에 최대한 타설할 수 있는 ECC의 두께를 알아낼 수 있다. 즉, 자중에 의한 미끄러짐이나 탈락이 발생하지 않으면서 1회의 연속적인 스프레이 과정에 의하여 타설되는 최대두께를 측정하는 실험이다. 이와 같은 방법으로 타설된 두께에 의하여 굳지 않은 재료의 물성이 스프레이 시공에 적합한지를 정량적으로 판단할 수 있다.

3.5 직접인장실험

1축인장에서의 변형경화거동은 ECC 고유의 특성으로서 스프레이 타설에 의하여 제작된 시험체가 일반적인 타설법에 의하여 제작된 시험체와 동일한 거동을 나타내는지를 검증하기 위하여 직접인장실험이 수행되었다. 수직으로 위치한 나무상자 안에 스프레이 타설된 305 mm×300 mm×13 mm 크기의 ECC 패널을 다이아몬드 톱으로 재단하여 인장시편(305 mm×76 mm×13 mm)을 제작하였다.

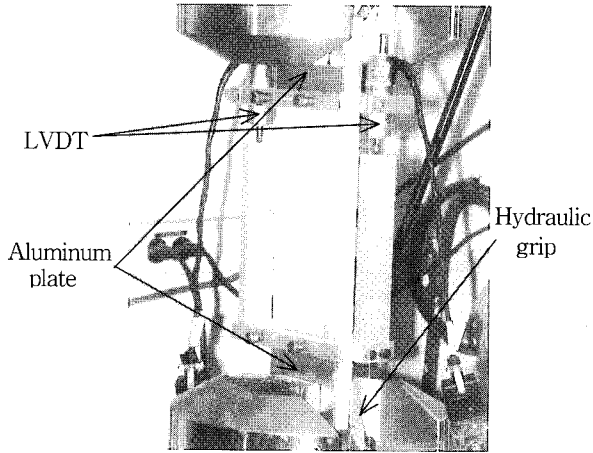


Fig. 6 Test setup for direct tensile test

이와 동일한 크기의 인장시험체가 일반적인 방법으로 몰드에 타설되어 비교, 검증용을 위한 시험체로 제작되었다. 직접인장시험은 MTS 810 실험기에서 수행되었고 2개의 LVDT(측정길이=180mm)가 시험체의 양측에 부착되어 변형률을 측정하였다(Fig. 6). Fig. 6에 도시한 바와 같이 유압그립과 접촉되는 시험체의 상·하부에는 60mm×76mm 크기의 알루미늄판을 접착제로 부착하여 그립에 의한 시험체의 단부손상을 방지하였다. 또한 알루미늄판 부착시 4개의 판이 평행을 유지하도록 함으로써 인장편심력이 시험체에 발생하는 것을 방지하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 미세역학에 따른 선행조건 결정

보강섬유로서 미세역학에 의거하여 제작된 PVA섬유가 사용되었다. Li 등²⁾에 의한 기초적인 PVA-ECC의 연구결과에 따르면, 45~47%범위의 물-시멘트비(W/C비) 그리고 80%의 잔골재-시멘트비(S/C비)가 최적의 모르타르 매트릭스와 경계면 부착응력을 만들 수 있는 배합비인 것으로 밝혀졌다. 또한, PVA섬유의 친수성에 의하여 모르타르 매트릭스와 섬유와 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. 또한 본 연구에서 채택된 섬유의 직경은 39 μ m로서 이 섬유의 경우 최적의 변장비(길이/직경비)가 약 300 정도인 것으로 알려져 있다⁹⁾. 이 변장비는 경계면의 부착특성과 배합과정에서의 작업성을 고려하여 결정하게 되는데 본 연구에서는 스프레이 공정에서 요구되는 펌핑성을 고려하여 200의 변장비를 선정하였다. 결과적으로 스프레이용 ECC를 위하여 채택된 섬유의 길이는 8mm이다. 이와 같은 모르타르 매트릭스, 경계면, 섬유의

Table 4 Micromechanical parameters

Matrix			Interface	
K_m (MPa· \sqrt{m})	E_c (GPa)	σ_{fc} (MPa)	τ_0 (MPa)	G_d (J/m ²)
0.3042	23	3.02	2.106	2.094

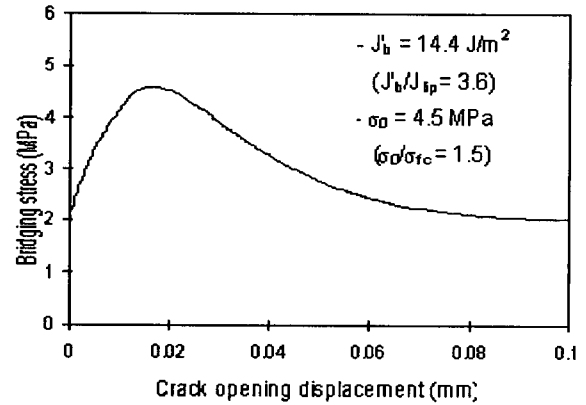


Fig. 7 $\sigma(\delta)$ curve obtained by micromechanical analysis ($V_f=2\%$ in volume fraction)

물리적 특성에 의하여 다음의 Table 4와 같은 미세역학적 특성값이 기존의 연구결과를 토대로 결정되었다.

Table 4에서 제시된 모르타르 매트릭스와 경계면의 미세역학적 특성과 Table 1에서 나타난 섬유의 역학적 특성을 갖고서 미세역학이론에 근거한 해석을 수행하였다. 그 결과, Fig. 7과 같은 ECC의 균열면 응력과 균열개구변위 관계를 얻었다. 이에 사용된 미세역학적 해석과정 및 수식전개는 Lin 등⁶⁾에 의하여 상세하게 제시된 바 있다.

한편, Kanda 등⁷⁾은 인성비(toughness ratio= J'_b/J_{tip})가 3.0 이상이어야 다수의 미세균열이 용이하게 분포되며, 그로 인하여 ECC가 인장변형경화거동을 하는 데에 보다 유리한 조건이 된다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 인성비 3.0 이상을 기준으로 하여 최적의 섬유혼입률 2% 결정하였으며, 이 때에 인성비는 3.57이다. 또한 Fig. 7에서 보인 바와 같이 최대 균열면 응력은 4.5MPa인 것으로 나타났다. 이 값은 Table 4에서 제시된 1축인장 균열강도 3.02MPa에 비하여 약 1.5배 큰 값이다. 따라서 본 연구에서 개발된 ECC는 안정상태 균열발생을 위한 2가지 조건인 식(1)과 식(3)을 모두 만족하도록 설계되었다.

기본적인 배합재료 (시멘트, 잔골재, 물) 이외에도 초기 반응성이 낮고 시멘트 입자와 크기가 유사한 F/A를 시멘트량의 30% 첨가함으로써 재료분리방지를 위한 소요 입자량(solid concentration)을 확보하였다. F/A가 ECC의 역학적 특성에 미치는 영향은 현재까지 이루어진 바가 없으므로 향후에 보다 세밀한 연구검토가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4.2 레올로지 제어방법 결정

혼화제를 이용하여 레올로지를 제어하기 위해서는 우선 사용할 재료를 선정한 후, 그 혼화제의 투입순서와 투입량을 결정하는 방법이 일반적이다. 본 연구에서는 굳지않은 재료의 유동성 및 점유의 분산성을 확보하기 위하여 고성능감수제로서 멜라민계 SP를 사용하였고, 재료분리의 방지 및 시멘트풀의 점착성을 증진하기 위하여 분리지감제의 일종인 HPMC를 사용하였다.

기존의 연구인 초유동PVA-ECC에서는 HPMC를 SP 이전에 투입하는 방법을 적용하였다. 이 결과 입자간의 전기적 안정층이 형성됨으로써 보다 오랫동안 유동성을 유지하는 것으로 나타났다. 그러나, 스프레이공법을 위해서는 빠른 시간 내에 점성을 확보하여 타설면과의 점착성을 증진시키는 것이 바람직하기 때문에 SP를 섬유분산 전에 투입하고, HPMC를 섬유분산 이후에 투입하는 배합순서를 도입하였다. 따라서 SP는 단지 섬유의 분산성을 증진하고, 입자의 뭉침을 방지하는 역할을 하게 되고, HPMC는 재료의 점착성을 증진시키면서 재료분리를 방지하는 역할을 하게 된다.

스프레이공정 이후 굳지않은 재료의 빠른 점성회복을 유도하기 위하여 SP와 HPMC에 의하여 이미 안정화된 시멘트 입자에 상대적으로 크기가 작은 칼슘알루미네이트 시멘트(CA) 입자를 투입하는 방안을 연구하였다. 그 결과 투입 초기에는 작은 입자크기에 의하여 점성을 오히려 감소시키다가, 어느 정도 시간이 지남에 따라 CA의 높은 반응성에 의하여 빠른속도로 점성을 회복하는 효과가 나타났다(Fig. 8). 5%의 시멘트량을 CA로 대체한 경우, 10분을 기점으로 급격하게 점성이 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 10%의 시멘트량을 대체한 경우에는 투입 직후부터 빠르게 점성이 증진하는 결과를 보여주었다.

3.4절에서 기술한 바와 같이 본 연구에서는 스프레이 작업이 현장배합에 의하여 이루어진다는 가정 하에, 재료 배합 후 스프레이 직전까지의 경과시간 15분을 목표로 하

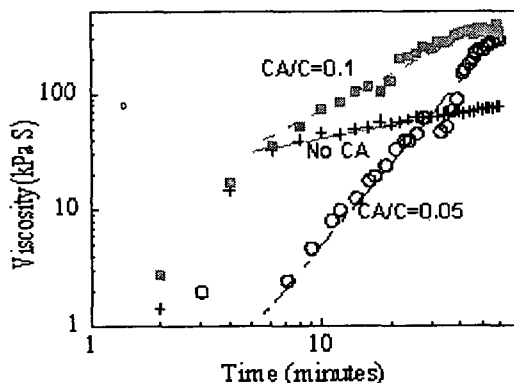


Fig. 8 Effects of calcium aluminate cement particles on the viscosity change

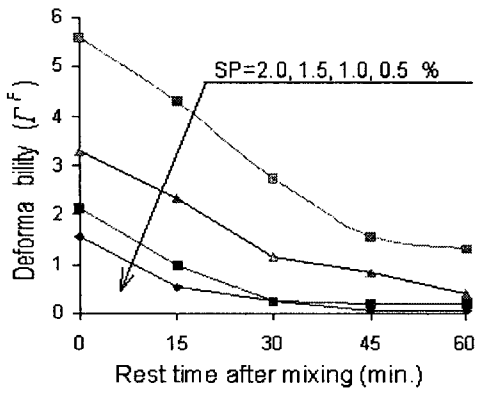
였다. 따라서, 배합직후 스프레이 공정 중 1단계인 펌핑 및 운반과정에서는 서서히 점성이 증진하다가, 약 10~15분이 경과된 후 즉 2단계인 스프레이 타설 이 후에는 빠른 속도로 점성이 증진되는 5%의 시멘트량 대체가 바람직한 CA 첨가량인 것으로 판단하였다. 또한 본 연구에서는 CA의 사용을 고려하지 않고 미세역학적 해석(4.1절)을 수행하였기 때문에 최소한의 시멘트를 CA로 대체하는 것이 가능한 한 해석결과와 동일한 배합설계가 될 수 있을 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 5% 이내의 범위에서 시멘트량을 대체하는 것으로 CA의 투입량을 결정하였다. 또한 배합의 마지막 순서에 CA를 투입함으로써 섬유의 분산성을 해치지 않으면서 요구되는 공정단계에 맞추어 최적의 점성을 부여할 수 있도록 하였다.

4.3 굳지않은 모르타르의 레올로지 특성

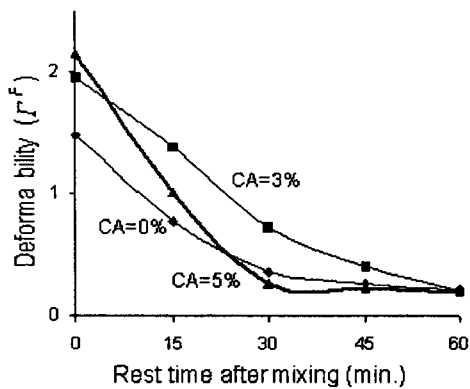
시멘트풀 레올로지 연구결과에 의하여 최적의 혼화재료 투입순서를 결정하였고, 5% 이내의 시멘트 대체량을 CA의 투입량으로 정하였다. 굳지않은 모르타르의 레올로지 연구에서는 SP가 굳지않은 모르타르의 유동성(Γ^F)에 미치는 영향을 파악하여 ECC 배합설계시 적용할 기초 지식을 습득하고, CA의 최적 투입량을 결정한다.

Fig. 9(a)는 SP의 첨가량에 따른 모르타르의 유동성 변화를 도시한 그림이다. 시멘트풀 레올로지 연구결과에 의거하여 물과 시멘트 그리고 잔골재 등으로 배합된 기본 모르타르 매트릭스에 SP, HPMC, CA의 순서로 혼화재료를 투입하였다. SP의 첨가량을 시멘트량에 대한 중량비로 0.5%에서 2.0%까지 투입하여 그 영향을 실험 평가하였다. 한편, HPMC의 투입량은 시멘트량에 대한 중량비로 0.05%를 동일하게 유지하였다. Fig. 9(a)에 나타난 바와 같이 SP의 첨가량이 2.0%에서 0.5%로 감소함에 따라 모르타르의 초기유동성(Γ^F_0) 또한 5.6에서 1.6까지 비례적으로 감소함을 알 수 있다. 반면, 시간에 따른 유동성의 변화는 SP의 첨가량에 상관없이 거의 동일한 기울기를 보이고 있다. 이러한 실험결과에 의하여 SP의 첨가량을 변화시킴으로써 굳지않은 모르타르의 Γ^F_0 를 제어할 수 있음을 알 수 있다. 이와 마찬가지로 ECC의 유동성(Γ) 또한 SP의 투입량을 변화시킴으로써 그 초기값을 제어하게 되며, 최종적으로 ECC 시험배합의 스프레이 실험을 통하여 SP 투입량이 최적화 된다.(4.4절)

CA의 투입량을 결정하기 위하여 0, 3, 5%의 시멘트량을 대체한 경우에 대하여 각각 유동성 실험을 수행하였다. SP와 HPMC 등의 혼화제의 첨가량은 동일한 조건으로 배합하였다. Fig. 9(b)에 도시한 바와 같이 시멘트의 대체량이 증가할수록 배합 직후에는 입자크기효과, 즉 작은 입경의 CA 입자가 시멘트 입자 사이에 충전됨으로써 점성



(a) Effect of SP concentration



(b) Effect of CA dosage

Fig. 9 Change in deformability of mortar matrix mix

을 오히려 감소시킨다. 그러나, 시간이 경과함에 따라 CA의 높은 반응성에 의하여 빠른 속도로 점성을 증진시키는 것을 알 수 있다. 특히 스프레이 공정의 목표 경과시간인 15분 동안에 뚜렷한 점성증진효과를 보이는 5%의 대체량을 최종 투입량으로 결정하였다.

모르타르 유동성 연구를 통하여 시멘트량의 5%를 CA로 대체하고, 굳지않은 ECC의 배합직후 유동성(Γ_0)은 SP의 투입량을 조절함으로써 제어하기로 결정하였다. 본 연구에서는 목표 경과시간을 15분으로 정하였으나, 현장의 특성에 따라 CA와 혼화제의 투입량을 조절함으로써 스프레이용 ECC의 유동성을 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 굳지않은 ECC의 스프레이 특성

시멘트풀과 굳지않은 모르타르에 대한 레올로지 연구의 결과를 토대로 하여 몇 가지의 시험배합을 한 후, 스프레이 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 40l 용량의 드럼믹서를 이용하여 ECC를 제조하였는데, 배합 중에 섬유가 뭉침현상이 발생되지 않았으며, 매우 균질한 섬유의 분산성이 관찰되었다. 이는

SP를 섬유 혼입 전에 그리고 HPMC와 CA를 섬유 혼입 이후에 투입하는 배합순서를 도입하였기 때문인 것으로 사료된다. 즉, SP가 굳지 않은 매트릭스의 유동성을 증진 시킴으로써 섬유의 뭉침현상을 방지하면서 분산성을 확보하였고, 후에 투입된 HPMC와 CA는 재료의 점착성을 증진시키면서 동시에 재료분리를 방지하는 역할을 한 것으로 판단된다.

ump-out 실험(Fig.4)에 의하여 펌핑성을 관찰하였는데, 이 실험 과정에서 뿐만 아니라 전체 스프레이 공정에서 1MPa 이하의 양호한 펌프압이 측정되었다. 배합 직후 펌핑 시에 ECC 유동성(Γ_0)을 측정하였는데, 펌핑에 적절한 유동성은 초기값을 기준으로 약 3.0 이상인 것으로 나타났다. 물론, 본 연구에서 사용한 나선형 동력펌프에 적용할 경우의 해당되는 값을 의미하며, 보다 용량이 크고 동력기구가 상이한 대형펌프를 사용할 경우에는 점성이 더 높은 재료를 펌핑하는 것도 가능할 것으로 판단된다.

점착성을 정량화하기 위한 방법의 하나로서 fill-up 실험(Fig.5)을 수행하였다. 그 결과, fill-up 실험조건을 만족할 때의 유동성(Γ_{rest})은 그 배합의 초기 유동성(Γ_0)에 관계없이 2.0에서 3.0 정도의 값을 갖는 것으로 나타났다. 위의 실험결과를 토대로 하여 목표 경과시간 15분을 만족할 수 있도록 SP의 투입량을 0.75%로 최종 결정하였다.

Fig. 10에서 보인 바와 같이 spray-on 실험을 통하여 1회 최대타설두께를 측정하였는데, 수직면과 천장 수평면에 대하여 각각 45mm와 25mm의 값을 얻었다. 이 두께는 미국콘크리트학회(ACI)⁸⁾와 유럽의 관련협회(EFNARC)⁹⁾에서 추천하는 보수용 스프레이 콘크리트의 타설두께(수직면: 50mm, 천장 수평면: 25mm)와 거의 동일한 값이다. 더욱이 1회의 연속적인 스프레이 시공에 의하여 얻어낼 수 있는 ECC의 타설 두께가 관련학회에서 추천하는 것과 유사하기 때문에 현장 적용성에도 문제가 없을 것으로 판단된다.

또한 리바운드율을 정량적으로 측정하지는 않았으나, ECC의 스프레이 실험 중에 리바운드가 거의 발생하지 않는 양호한 리바운드 특성이 관찰되었다. ECC에는 일반적인 모르타르 또는 콘크리트에 사용되는 잔골재에 비하여 입경이 작은 실리카 골재가 사용되고, 보강섬유로는 강섬유에 비하여 반발특성이 현저히 낮은 합성섬유가 혼입된다. 따라서, 굳지않은 ECC는 스프레이 압력과 타설면과의 반발력에 대하여 기존의 스프레이용 모르타르 및 FRC에 비하여 양호한 일체성을 유지하게 되며, 이러한 특성 때문에 우수한 리바운드 특성이 나타난 것으로 판단된다.

이와 같은 ECC의 적은 리바운드량은 시공 시의 경제적 측면과 굳은 후의 역학적 특성 면에서 큰 장점을 갖게 될 것으로 판단된다. 슛크리트 및 스프레이 모르타르에서 발생하는 리바운드는 일반적으로 공사비 5~8%의 상승요

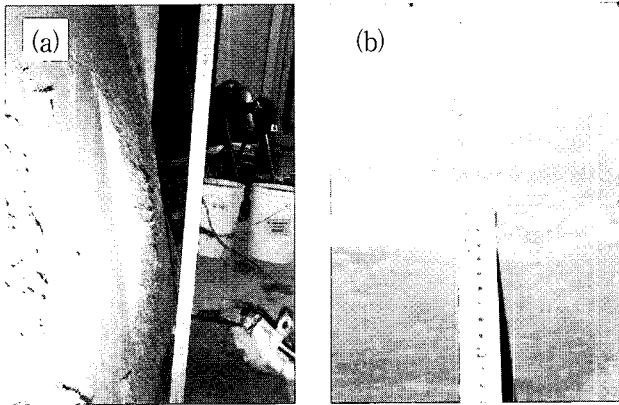


Fig. 10 Demonstration of sprayability by using spray-on test for (a) 45 mm thickness of sprayed ECC layer on vertical surface and (b) 25 mm thickness of sprayed ECC layer on overhead surface

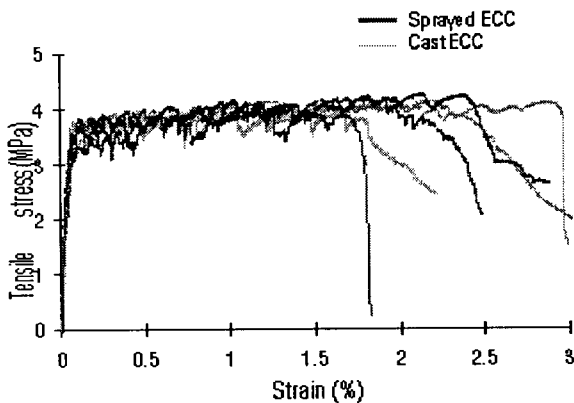


Fig. 11 Uniaxial tensile stress vs. strain curve of sprayed and cast ECC at 7 days.

인으로 작용하는 것으로 보고되고 있다¹⁰⁾. 또한, 섬유 리바운드는 타설 이후의 섬유보강 슛크리트 품질 특히 재료의 인성을 감소시키는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 터널의 1차 라이닝과 기존 구조물의 보수보강재로서 슛크리트 또는 스프레이 모르타르가 적용되기 때문에, 이러한 구조재에는 재료의 소요 인성이 반드시 요구되는 특성이 다. 스프레이용 ECC의 양호한 리바운드특성은 고인성의 ECC구조재 혹은 보수재를 타설할 수 있다는 장점이 될 것이다.

4.5 스프레이된 ECC의 1축인장거동

ECC고유의 특성인 인장변형경화거동에 미치는 스프레이 공정의 영향을 검증하기 위하여 직접인장실험이 수행되었다. 실험 결과 스프레이된 시편의 1축인장거동이 일반적인 타설법에 의하여 제작된 시편체와 거의 동일한 것으

로 나타났다. 또한 Fig. 11에 도시한 바와 같이 시편체 제작방법에 상관없이 모든 시편체가 인장변형경화거동을 보여주고 있으며, 인장변형능력은 약 2~3%를 나타내고 있다. 일반적인 콘크리트의 경우 인장변형능력이 0.02% 이하이므로 이 값과 비교하여 볼 때, 스프레이용 ECC의 경우 약 100배 이상의 연성을 나타낸다. 또한 인장하중을 받는 동안 다수의 미세균열이 발생하였으며, 시편체의 파괴 이후 전자현미경으로 관찰한 결과 최종 파괴면을 제외한 모든 미세균열의 폭은 50 μ m이하에서 평균 30 μ m로 제어된 것으로 나타났다. 굳은 후의 역학적 특성에 관한 상세한 연구결과는 관련된 논문에서 이미 다룬 바 있다¹¹⁾.

5. 결 론

본 연구를 통하여 굳지않은 상태에서는 적절한 펌핑성과 타설면에 대한 점착성을 갖고 있고, 굳은 후에는 ECC고유의 인장변형경화거동을 보이는 스프레이용 ECC를 개발하였다. 성공적인 재료개발을 위하여 미세역학이론에 따라서 굳은 후의 역학적 특성을 제어하고, 레올로지를 조절하는 기법을 적용하여 굳기 전의 유동특성을 제어하는 방법을 함께 적용하였다. 본 연구를 통하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 최적의 스프레이용 ECC 배합으로서 물-시멘트비는 46%, 잔골재-시멘트비는 80%로 각각 미세역학이론에 근거하여 결정되었다. 또한 미세역학이론의 요구조건에 부합하면서, 스프레이 공정에서의 펌핑성을 충족시킬 수 있는 8mm 길이의 PVA 섬유가 보강섬유로 사용되었다.
- 2) 미세역학이론에 따라 주어진 배합비를 기준으로 혼합재료의 종류와 투여순서를 결정하고, 투여량을 최적화함으로써 스프레이 공정에 적합한 단계별 유동특성(펌핑성, 타설면에서의 점착성)을 부여하였다.
- 3) 개발된 ECC의 스프레이실험 결과, 초기유동성(Γ)과 스프레이시의 유동성(Γ_{rest})은 각각 3.0과 2.5정도가 스프레이에 적합한 유동특성인 것으로 나타났다. 또한 1회 최대 타설두께는 수직면과 천장 수평면에 대하여 각각 45mm와 25mm인 것으로 측정되었다. 또한 ECC의 스프레이 실험 중에 리바운드가 거의 발생하지 않는 양호한 리바운드 특성이 관찰되었다. 이는 스프레이 압력과 타설면과의 반발력에 대하여 재료의 일체성을 보다 양호하게 유지할 수 있는 ECC의 배합재료 특성에 기인하는 것으로 판단된다.
- 4) 스프레이 공정에 의하여 타설된 ECC 인장시편체를 직접인장으로 실험한 결과, 일반적인 타설법에 의하여 제작된 시편체와 동등한 역학적 특성을 나타냈으며, 일반 콘크리트에 비하여는 약 100배 이상의 연성을 보이는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원비와 (주)원하중합건설로부터 University of Michigan으로 지원된 연구비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다. 또한 공동연구를 수행한 University of Michigan의 V.C. Li 교수에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Li, V.C., "Advance in ECC Research," ACI Special Publication on Concrete: Material Science to Applications, SP 206-23, American Concrete Institute, 2002, pp.373~400.
2. Li, V.C., Wang, S., and Wu, C., "Tensile Strain-hardening Behavior of PVA-ECC," *ACI Materials Journal*, Vol.98, No.6, 2001, pp.483~492.
3. Kong, H.J., Bike, S.G., and Li, V.C., "Constitutive Rheological Control to Develop a Self-Consolidating ECC Reinforced with Hydrophilic Poly(vinyl alcohol) Fibers," *Journal Cement and Concrete Composites*, Vol 25, No.3, 2003, pp.333~341.
4. Li, V.C., C. Wu, S. Wang, A. Ogawa, and T. Saito, "Interface Tailoring for Strain-hardening PVA-ECC," *ACI Materials Journal*, Vol.99, No.5, 2002, pp.463~472.
5. Wu, C., "Micromechanical Tailoring of PVA-ECC for Structural Applications," Ph. D. Thesis, Ann Arbor, University of Michigan, USA, 2000. 238pp.
6. Lin, Z., T. Kanda and V.C. Li, "On Interface Property Characterization and Performance of Fiber Reinforced Cementitious Composites," *Journal 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," *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol.125, No.4, 1999, pp.373~381.
8. ACI Committee 556, "Guide to Shotcrete (ACI-506R-90)," American Concrete Institute, 1990.
9. EFNARC, "European Specification for Sprayed Concrete: Guidelines for Specifiers and Contractors," Hapshire, UK, 1999. 31pp.
10. Melbye, T.A and Dimmock, R.H., "Modern Advances and Applications of Sprayed Concrete," in *Shotcrete: Engineering Developments*, ed. E.S. Bernard, ISBN, Swets & Zeitlinger Publishers, 2001, pp.7~29.
11. 김윤용, "습식스프레이공법으로 타설된 고인성 섬유보강 모르타르(ECC)의 역학적 특성과 보수 성능", 콘크리트학회논문집, 15권 제3호, 2003년, pp.462~469.

요 약

본 연구에서는 습식스프레이 공정에 적합한 고인성 섬유보강 모르타르(ECC)를 개발하였다. 습식스프레이에 적합한 ECC란 굳지않은 상태에서는 적절한 작업성, 펌핑성과 타설면에 대한 점착성을 갖고 있으면서, 굳은 후에는 ECC고유의 인장변형경화 거동을 나타내는 ECC로 정의할 수 있다. 재료개발을 위하여 미세역학이론에 의거하여 굳은 후의 역학적 특성을 제어하였고, 시멘트풀의 레올로지를 조절함으로써 굳기 전의 유동특성을 제어하였다.

우선 미세역학이론을 적용하여 인장변형경화특성을 갖도록 ECC의 배합비를 결정한 후, 결정된 배합을 갖고서 굳지않은 ECC가 스프레이공정의 단계별로 요구하는 유동특성을 만족할 수 있도록 시멘트풀의 레올로지를 조절하였다. 이 결과 균등한 섬유 분산, 적절한 펌핑성, 타설면에 대한 점착성 등이 효과적으로 구현되었다. 개발된 스프레이용 ECC에 대한 스프레이 실험에 의하여 굳기 전의 유동특성이 스프레이 공정에 적합하게 조절된 것으로 나타났으며, 스프레이 실험 중에는 ECC의 우수한 리바운드 특성도 관찰되었다. 또한 스프레이된 ECC에 대하여 직접인장실험을 수행한 결과, 스프레이된 ECC의 인장변형성능과 제어된 균열폭 등이 일반타설법에 의하여 제작된 ECC의 실험결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 습식스프레이용 ECC, 미세역학이론, 인장변형경화, 펌핑성, 점착성