論文

시멘트계 모르타르 매트릭스를 활용한 섬유복합재료 ECC (Engineered Cementitious Composite)의 설계와 시공 성능

김윤용*

Design and Constructibility of an Engineered Cementitious Composite Produced with Cement-based Mortar Matrix and Synthetic Fibers

Yun-Yong Kim*

ABSTRACT

This paper summarizes the design procedure and constructibility of an ECC (Engineered Cementitious Composite), which is a synthetic fiber-reinforced composite produced with the Portland cement-based mortar matrix. This study employs a stepwise method to develop useful ECC in construction field, which possesses different fluid properties to facilitate diverse types of processing (i.e., self-consolidating or spray processing). To control the rheological properties of the composite, the aggregates and reinforcing fibers were initially selected based on micromechanical analysis and steady-state cracking theory. The stability and consequent viscosity of the suspensions were then mediated by optimizing the dosage of the chemical and mineral admixtures. The rheological properties altered through this approach were revealed to be effective in obtaining ECC-hardened properties, represented by pseudo strain-hardening behavior in uniaxial tension, allowing the readily achievement of the desired function of the fresh ECC.

초 록

이 논문은 합성섬유를 이용하여 포틀랜드 시멘트 모르타르를 보강한 복합재료인 ECC(Engineered Cementitious Composite)의 설계 과정과 건설현장에 이 복합재료를 적용할 수 있도록 시공성을 부여한 연구 내용을 정리하였다. 이 연구에서는 다양한 시공성, 즉 자기충전(self-consolidating)과 스프레이 시공성을 갖는 ECC를 제작하기 위하여 단계적인 재료 개발 방법론을 채택하였다. 우선 마이크로역학(micromechanics)과 안정상태균열이론(steady-state cracking theory)을 이용하여 골재와 섬유를 선정한 후, 굳기 전 재료의 레올로지를 제어하는 방법으로 시공성을 구현하였다. 여기서, 굳기 전 재료의 레올로지를 제어하기 위하여 화학첨가제(chemical admixtures)와 광물첨가재(mineral admixtures)의 양을 소량으로 조절하는 방법을 사용하였다. 이러한 방법을 활용함으로써 굳기 전에는 다양한 시공성을 나타내면서, 굳은 후에는 높은 연성(인장변형경화 거동)을 나타내는 실용적인 ECC 복합재료를 개발하였다.

Key Words : ECC(Engineered Cementitious Composite), 합성섬유(Synthetic Fiber), 모르타르 매트릭스(Mortar Matrix), 인장변형경화(Tensile Strain Hardening), 시공성(Constructibility)

* 충남대학교 토목공학과 교신저자(E-mail:yunkim@cnu.ac.kr)

1. 서 론

현재 가장 널리 사용되고 있는 건설재료인 콘크리트(concrete)는 1820년대에 포틀랜드 시멘트(Portland cement)가 개발된 이래, 인류의 문명 발전에 절대적인 영향을 미친 매우 우수한 복합재료이다. 그러나 콘크리트는 인장응력과 인장변형에 취약한 유사취성(quasi-brittle) 재료라는 한계를 갖고 있기 때문에 철근(steel rebar), 강선(prestressing strand), 섬유보강폴리머(FRP; fiber reinforced polymer) 등과 같이 인장을 보완할 수 있는 재료와 함께 사용되어 왔다. 그러나 최근 들어 지진, 폭발, 충격 등과 같은 높은 수준의 재해 하중을 견딜 수 있는 구조물 요구가 증가하면서, 콘크리트의 근본적인 약점을 해결할 수 있는 연성적인 건설재료에 대한 연구가 1990년대 이후 활발하게 진행되어 왔다. 그 중에 하나가 콘크리트와 같은 시멘트계 매트릭스(matrix)에 섬유를 혼입한 복합재료인 ECC(Engineered Cementitious Composite)이다[1].

ECC는 포틀랜드 시멘트, 골재(aggregate), 물을 주결합재로 하는 모르타르(mortar) 매트릭스에 체적비 1~3%의 단섬유(chopped fiber)를 혼입함으로써 콘크리트의 수십, 수백 배에 달하는 인장변형성능(인장변형률 2% 이상, Fig.1)을 갖도록 설계한 복합재료이다. ECC는 마이크로역학(micromechanics)을 근거로 이 재료의 기본 구성 요소(섬유, 매트릭스, 섬유-매트릭스 경계면)의 역학적 상호 관계를 해석적으로 구명한 후, 안정상태 균열이론(steady-state cracking theory)을 적용하여 높은 연성을 구현하도록 설계한다[2]. 이 과정에서 섬유의 혼입률을 조절하여 경제성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라, 다양한 시공성(constructibility)을 부여하여 현장에서 재료를 제조하기에 유리하도록 할 수도 있다. 즉, 최적의 원자재를 선정하여 소량의 합성섬유만으로도 연성적인 재료를 만들 수 있기 때문에 기존의 재래장비(믹서, 펌프, 스프레이 노즐 등)를 그대로 사용하는 콘크리트 대체 재료가 될 수 있다.

따라서 이 연구는 일반적인 비율로 배합된 제1종 보통포틀랜드 시멘트, 물 등과 함께 사용할 원자재(합성섬유, 골재, 첨가재)를 선정한 후, 이를 이용하여 다양한 시공이 가능한 ECC를 제조하고자 한다. 우선 적용한 이론을 기술한 후, 이 이론에 근거하여 선정한 재료에 대하여 논할 것이다. 마지막으로 굳기 전 레올로지를 제어하여 다양한 시공성을 부여한 결과에 대하여 기술할 것이다.

2. 재료개발의 이론적 체계

2.1 마이크로역학과 안정상태 균열이론 (굳은 후)

콘크리트와 같은 유사취성적인 시멘트계 재료와는 달리 ECC는 1축인장 하에서 금속과 같은 인장변형률 경화거동을 한다. 이와 더불어 100μm 이하의 폭으로 제어되는 다수의 미세균열

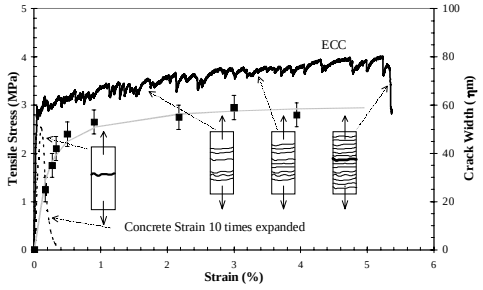

Fig. 1 1축인장 하에서 ECC의 응력-변형률 및 균열폭-변형률 관계.

(multiple micro-cracking) 발생이 이 재료의 고유한 특성이다(Fig. 1). 이러한 탁월한 연성은 마이크로역학과 안정상태의 균열이론에 근거하여 매트릭스, 섬유, 경계면 등의 3가지 역학적 요소를 조절함으로써 구현된다. 안정상태의 균열이란, 발생한 균열 면에서 합성섬유가 가교(bridging)하여 불안정하게 개구되는 것이 방지된 균열을 의미한다. 이 과정에서 다른 부위에서 연쇄적으로 균열이 추가 발생하며, 이들도 안정상태가 됨으로써 최종적으로는 안정상태의 다수 미세균열이 발생하여 ECC가 높은 연성을 발휘하게 되는 것이다.

안정상태의 균열을 발생시키기 위한 제 1조건은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 ECC의 균열면 응력(bridging stress, σ)과 개구변위(crack opening, δ) 관계에 의하여 계산된 보상에너지(complementary energy, J_b', Fig. 1에서 빗금친 면적)가 매트릭스의 파괴인성(crack tip toughness, J_{tip}, Fig. 1에서 어두운 면적)보다 항상 커야 한다는 것이다. 또한 최대 균열면 응력(maximum bridging stress, σ_0)이 매트릭스의 인장강도보다 높아야 하는 제 2조건과 σ_0에 해당되는 개구변위 δ_0가 ECC의 설계 균열폭보다 작어야 한다는 제 3조건이 있다. 이 이론을 적용하기 위하여 균열면 σ-δ 관계를 직접 실험에 의하여 구할 수도 있으나, 실험의 신뢰성을 확보하기에 어렵기 때문에 일반적으로는 수치해석에 의하여 이를 구하게 된다[3]. 이 때 사용하는 기법이 마이크로역학이다. 수치적분을 하기 위해서는 섬유인발실험(single fiber pullout test)을 통하여 얻은 경계면 특성, 그리고 파괴인성실험에 의하여 구한 매트릭스의 파괴인성 등의 역학적 특성 값이 필요하며 이를 이용하여 식 (1)과 같이 균열면에 작용하는 단섬유들의 가교 힘(bridging force)을 모두 적분하면 σ-δ 관계를 얻을 수 있다[4].

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

여기서, V_f는 ECC에 혼입된 섬유의 비율(부피비)이며 L_f는 혼입된 섬유의 길이이다. $P(\delta)$는 단일 섬유가 균열면에서 작용하는 가교 힘이고, $p(\phi)$와 $p(z)$는 섬유-균열면 사이의 각도와 이격거리에 대한 각각의 확률밀도함수이다.

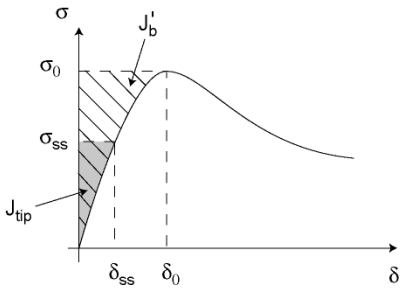

Fig. 2 균열면에서 전형적인 응력-개구변위 관계.

2.2 레올로지 제어 (굳기 전)

포틀랜드 시멘트의 광범위한 이용에도 불구하고, 시멘트계 혼합물의 레올로지 특성은 골재, 첨가재료 등의 영향이 다양하게 작용함으로써 그 특성이 명확히 밝혀지지 않고 있다. 따라서 기존의 많은 연구에서는 콘크리트 또는 모르타르의 레올로지 특성을 시행착오에 의존하여 제어하여 왔다. 최근의 연구에 따르면, 시멘트풀의 레올로지 특성이 입자 주변에 형성되는 정전기력과 더불어 화학첨가제에 의하여 형성된 반데르발스 인력과 시멘트의 수화반응에 크게 좌우된다는 사실이 밝혀진 바 있다[5]. 따라서 시멘트 입자 간 상호 작용을 조절하여 굳기 전 레올로지 특성을 보다 합리적으로 제어할 수 있게 된다.

현재 가장 일반적인 시멘트풀 모델은 양으로 대전된 알루미나(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 계면활성제가 화학첨가제로 널리 사용되고 있다. 이 연구에서도 유동성과 섬유 분산성을 향상시키기 위하여 강력하게 대전된 음이온 계면활성제 HRW(high-range water-reducing admixture)를 사용하고자 한다. HRW를 사용함으로써 응집된 시멘트 입자를 분산시키는 효과를 얻게 되는데, 이 연구에서는 이와 더불어 비이온성 고분자 분리저감제의 일종인 MC(hydroxymethycellulose)를 사용하여 반데르발스 인력의 효과도 적절히 이용하고자 한다. 또한, 반응성이 높은 광물첨가재인 칼슘알루미네이트 시멘트 입자 CA (calcium aluminate cement)를 투입하여 재료의 점성이 빠른 속도로 증가할 수 있도록 유도한다.

결과적으로 이 연구에서는 스프레이 시공과 자기충전(self-consolidating) 시공에 적합하도록 HRW, MC, CA의 투여량을 결정하여 비빔 이후의 경시적 레올로지를 조절할 것이다. 자기충전용 ECC는 시간이 경과하여도 지속적으로 낮은 점성을 유지하여야 한다. 따라서 HRW의 효과로 초기 점성을 낮추고, MC를 이용하여 낮은 점성이 유지되도록 할 것이다. 반면, 스프레이용 ECC는 펌프에 의하여 재료가 이송되는 동안에는 일정한 점성을 유지하다가 스프레이된 후에는 높은 점성이 빠르게 발현되도록 레올로지를 제어한다. 따라서 적정량의 HRW와 MC가 재료의 초기 점성을 안정시키고, CA의 수화반응에 의하여 재료의 점성이 빠르게 증진하도록 설계할 것이다.

3. 마이크로역학에 근거한 원자재 선정

3.1 최적의 섬유 선정

현재 시멘트계 복합재료의 보강용 섬유로 활용되고 있는 섬유는 크게 무기계 섬유와 유기계 섬유로 대별된다. 특히 유기계 섬유는 폴리프로필렌(PP)섬유, 폴리비닐알콜계(PVA)섬유, 폴리에틸렌(PE)섬유, 아라미드섬유, 폴리아크릴로 섬유, 폴리에스테르섬유 등이 있다. 그 중에서 고인성 섬유복합재료에 적합한 보강용 단섬유를 선정하기 위해서는 다음과 같은 조건을 고려하여야 한다. 우선, 1) 매트릭스와의 부착 측면에서 물과 시멘트로 이루어진 매트릭스에 대한 부착성이 있는 친수성(hydrophilic) 섬유가 유리하고, 2) 매트릭스의 균열 가교 측면에서 인장강도와 탄성계수가 큰 섬유가 효율적이며, 3) 매트릭스와의 배합 측면에서 변장비(aspect ratio, 길이/직경)가 100~400이어야 섬유뭉침(fiber ball)을 방지하기에 적합하다[6]. 전술한 3가지 조건을 모두 만족하면서 제품의 종류가 다양한 PVA섬유를 보강용 섬유로 선정하였다. 또한 PVA섬유는 다른 섬유에 비하여 비중이 작아 구조물의 경량화에 유리하고 알칼리에 대한 저항성이 높은 장점도 갖고 있기 때문에 시멘트계 복합재료용 섬유로서 활용성이 높다고 판단하였다.

이 연구에서는 2종류의 K사 PVA 섬유 (PVA40, PVA100)에 대하여 분석을 실시하였다. 2.1절에서 언급한 실험에 의하여 결정된 각종 특성(Table 1)을 마이크로역학 해석에 적용하여 Fig. 3과 같은 균열면 σ-δ 관계를 계산하였다. Fig. 3은 PVA40과 PVA100를 1% 혹은 2%의 체적비로 혼입하고, 일반적 물-시멘트비(60%)로 보조결합재인 슬래그를 25% 첨가한 경우의 수치해석 결과이다. 시멘트와 슬래그는 각각 국내산 S사와 B사의 제품이다. 2% 혼입률에 대하여 J_b'을 비교하여 보면 PVA40(~18.7 J/m^2)의 값이 PVA100(~25.4 J/m^2)의 값의 75% 정도이다. 그러나 σ_0와 δ_0의 경우, PVA40(~4.8MPa, ~14.8μm)이 PVA100(~2.5MPa, ~58.7μm)에 비하여 각각 약 200%, 400% 우수하게 평가되었다. 특히 시멘트 복합재료의 인장강도가 2~3 MPa인 것을 감안하여 보았을 때에 PVA40을 사용하는 것이 다수의 균열을 만들기에 보다 유리한 조건임을 알 수 있다. 따라서 최적의 섬유로서 PVA40을 선정하였다. 한편, 마찰부착과 화학적 부착을 구하기 위하여 Wu 등[6]이 제안한 섬유인발실험을 수행하였다(Fig. 4). 마찰부착과 화학적부착은 Table 1에 제시한 바와 같이 2종류의 섬유가 서로 유사한 값을 갖는 것으로 평가되었다.

Table 1 PVA섬유의 특성

섬유 종류	섬유 특성				섬유-매트릭스 경계면 (물-시멘트 60%)	
	탄성계수 (GPa)	길이 (mm)	직경 (μ m)	강도 (MPa)	마찰부착 (MPa)	화학적 부착 (J/m^2)
PVA40	39	12	40	993	1.7	1.9
PVA100	20	12	100	700	1.5	1.7

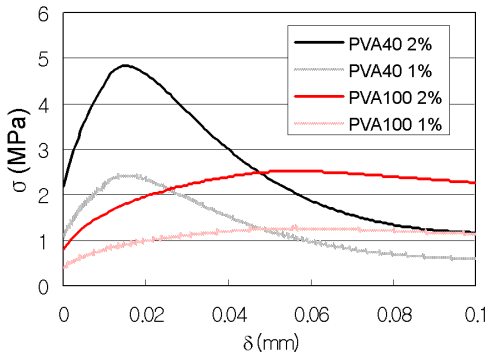

Fig. 3 PVA섬유 종류에 따른 균열면 σ-δ관계.

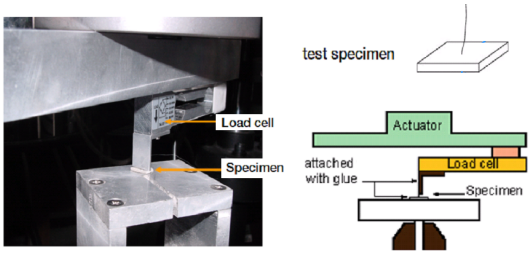

Fig. 4 섬유인발실험(single fiber pullout test) 형상.

3.2 최적의 골재 선정

최적의 골재를 선정하기 위해서는 2가지 조건을 만족하여야 한다. 우선 2.1절에서 기술한 안정상태의 균열을 위한 제1조건을 만족하도록 매트릭스의 파괴인성 J_{tip}을 낮출 수 있는 골재를 사용하여야 한다. 미분의 골재를 사용할수록 완전취성재료에 근접하기 때문에 J_{tip}을 낮추기 위해서는 최대한 작은 입경(grain diameter)의 골재를 사용하는 것이 유리하다. 2번째는 매트릭스와 비빔이 원활하여야 한다는 조건이다. 일반적으로 보통 포틀랜드 시멘트의 입경(평균 12μm)보다는 충분히 커야만 (일반적인 골재는 80μm 이상) 유동성과 굳은 후 물성을 저하시키지 않는다. 입경이 시멘트보다 작을 경우, 비빔 동안 많은 물을 흡수하여 유동성을 해칠 뿐만 아니라, 시멘트의 수화반응을 저해하여 굳은 후의 물성에도 악영향을 미칠 수 있기 때문이다.

현재 시멘트계 매트릭스에 사용되는 일반 골재는 강모래(river sand)로서 입경이 평균 450μm 정도이며, 비중이 2.6~2.7에 해당된다. 일반 강모래를 ECC의 골재로 경우, 배합이 용이하고 가격이 저렴하다는 장점이 있는 반면, J_{tip}이 높아지는 단점이 있을 것이다. 따라서 평균입경 130μm로서 강모래보다 작으면서 보통 포틀랜드 시멘트보다는 10배 이상 큰 입경을 갖고 있는 비중 2.65의 규사를 고려하여 강모래와 함께 비교/분석하였다.

파괴인성 실험을 수행하기 위하여 Fig. 5와 같은 쐐기쪼갬 실험 방법을 이용하였다. 이 방법의 효용성은 기존의 방법에 의하여 검증된 바 있다[7]. 실험체를 제작하기 위하여 3.1절에서 사용한 배합(물-시멘트비 60%, 슬래그 25% 첨가)과 동일한 조건 하에서 골재-시멘트 비율을 80%로 일정하게 두고 실험체를 제작하였다. 실험은 Instron 만능시험기를 이용하여 수행하였고, 실험을 통하여 얻은 하중-균열개구변위 곡선과 기하함수[8]를 이용하여 J_{tip}을 계산하였다. 계산한 결과, 규사의 J_{tip}(~3.2 J/m^2)이 강모래의 J_{tip}(~30.6 J/m^2)에 비하여 10배 정도 낮은 것으로 나타났다. 2.1절에서 기술한 안정상태 균열을 위한 3가지 조건에 따라 J_{tip}과 J_b', σ_0, δ_0 등(3.1절)을 비교/분석하여 Table 2에 나타내었다. 3가지 조건에 대한 각각의 에너지비, 강도비, 균열폭비를 비교하여 볼 때, 유일하게 모든 값을 1.0이상으로 갖고 있는 경우는 규사를 골재로 사용하고, PVA40을 보강용 섬유로 사용한 복합재료임을 알 수 있다. 다시 말해서 충분히 낮은 J_{tip}을 갖는 규사 골재를 매트릭스 재료로 사용하고, 상대적으로 높은 J_b', σ_0, 낮은 δ_0를 갖고 있는 PVA40 섬유를 혼입하여야 안정상태의 균열을 발생시킬 수 있다.

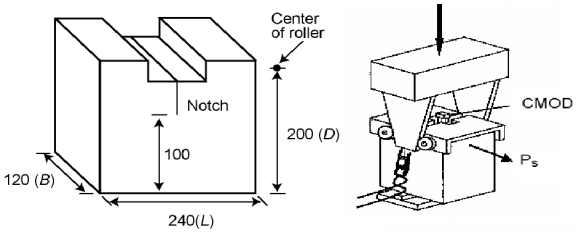

Fig. 5 매트릭스 파괴인성실험(fracture toughness test) 형상.

Table 2 안정상태의 균열발생 조건 분석 (섬유혼입율 2% 체적비)

원자재		1조건: 에너지			2조건: 강도			3조건: 균열폭		
섬유	골재	J_{tip} (J/m^2)	J_b' (J/m^2)	$\frac{J_b'}{J_{tip}}$	σ_0 (MPa)	f_t* (MPa)	$\frac{\sigma_0}{f_t}$	δ_0 (μm)	δ_t** (μm)	$\frac{\delta_0}{\delta_t}$
PVA 40	강모래	30.6	18.7	0.6	4.8	2~3	1.6~2.4	14.8	50	3.4
	규사	3.2	18.7	5.8	4.8	2~3	1.6~2.4	14.8	50	3.4
PVA 100	강모래	30.6	25.4	0.8	2.5	2~3	0.8~1.3	58.7	50	0.9
	규사	3.2	25.4	7.9	2.5	2~3	0.8~1.3	58.7	50	0.9

* 복합재료 인장강도: 일반적인 값으로 가정
** 목표 균열폭: 50μm 이하로 설정

3.3 직접인장실험에 의한 검증

마이크로역학을 기반으로 결정된 최적의 원자재로 제조된 ECC의 1축인장 거동을 확인하기 위하여 직접인장실험을 수행하였다. 실험체의 두께는 20mm이고 단부 파괴를 방지하면서 효율적인 1축 실험이 수행될 수 있는 dog-bone형상으로 제작하였다. 실험체의 양측에 고정된 LVDT와 Instron 만능시험기에 부착된 로드셀로부터 변위와 하중을 측정하였고, 균열 측정 현미경을 이용하여 균열폭의 변화를 계측하였다. 측정된 값으로부터 얻은 응력-변형률 관계와 균열폭-변형률 관계는 Fig. 6이다. Table 2에서 나타낸 바와 같이 에너지, 강도, 균열폭 등 3가지 조건을 모두 만족하는 원자재로 제조하였기 때문에 미세균열과 함께 뚜렷한 인장변형률 경화거동을 나타냄을 알 수 있다.

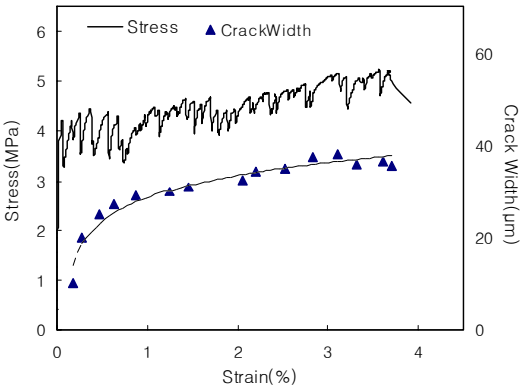

Fig. 6 ECC의 응력-변형률 관계와 균열폭-변형률 관계.

4. 레올로지 제어에 의한 시공 성능 구현

4.1 시멘트풀 레올로지 특성

기존의 연구[3,5]에 따르면, 첨가재료의 투여순서와 투여량을 결정하는 방법으로 굳기 전 레올로지를 조절하여 왔다. 그러나 ECC는 건설 현장에서 사용하는 재료이므로 첨가재료의 투여순서를 갖고서 재료의 품질관리를 한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 이 연구에서는 투여량만을 이용하여 재료의 레올로지를 조절하는 방법을 채택하였다.

시멘트풀 점성의 경시 변화를 측정하기 위하여 회전점도계(Stress rheometer, DVⅡ-Pro)를 이용하였다. 회전속도는 시멘트풀 점성이 선형 점탄성의 범위 이내가 되도록 조절하였다. HRW, MC, CA 등의 첨가재료는 일반 콘크리트에서 사용하는 권장 투여량 이내의 범위로 제한하여 경제성과 시공성을 확보하고자 하였다. HRW의 투여량은 시멘트 중량의 2% 이내, MC의 투여량 0.2% 이내, CA의 첨가량 10% 이내이다.

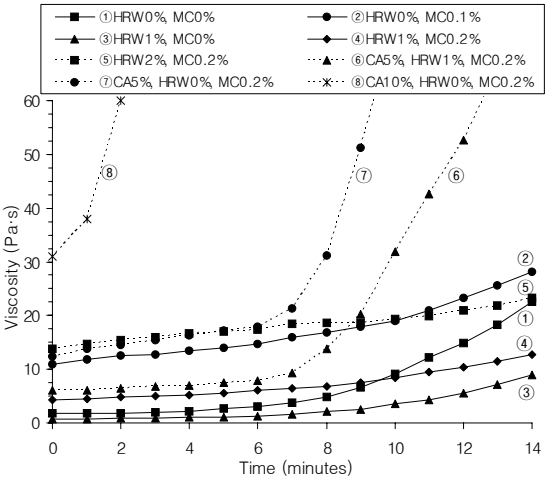

Fig. 7 비빔 직후부터 측정된 시멘트풀 점성의 경시 변화.

첨가재료의 투여량에 따른 시멘트풀 점성의 경시 변화는 Fig. 7에 나타낸 바와 같다. 2.2절에서 기술한 바와 같이 자기충전용 재료는 낮은 점성을 지속적으로 유지하는 것이 바람직하다. Fig. 7에 나타낸 바와 같이 재료①, ②, ③과 같이 HRW, MC가 투여되지 않은 경우에는 초기의 점성이 높거나, 점성의 경시 변화가 급격한 단점이 있어 자기충전 시공에 적합하지 않다. 반면, 재료④는 낮은 초기 점성과 더불어 시간에 따른 점성의 변화가 적은 장점이 있기 때문에 가장 유리할 것으로 판단하였다. 재료④가 초기 점성과 경시적 점성 증진이 모두 낮은 이유는 초기에 음이온 계면활성제 HRW가 응집된 시멘트 입자를 분산시키고, MC에 의해 형성된 안정층이 입자간의 재응집 현상을 방지하였기 때문인 것으로 판단된다[5]. 다만, 재료④의 초기 점성이 다소 높기 때문에 ECC의 현장실험을 통하여 HRW의 양을 소폭 증가하거나, MC의 양을 소폭 감소시킴으로써 초기의 점성을 낮출 수 있을 것으로 판단한다.

한편, 2.2절에서 기술한 바와 같이 스프레이용 재료는 펌프를 통해 재료가 이송되는 동안에 일정한 점성을 유지하다가 스프레이된 후에는 높은 점성이 빠르게 발현하여야 한다. 다만, 이송 중의 점성이 자기충전 재료와 같이 지나치게 낮을 때에는 섬유가 매트릭스와 분리되어 뭉침 현상이 일어나 이송로가 폐색될 수 있다. 또한 초기부터 빠르게 점성이 증가할 경우, 펌프에 과도한 압력이 발생하거나, 높은 점성의 재료가 이송로를 폐색시킬 수도 있다. 따라서 너무 낮은 초기 점성을 갖는 재료⑥과 초기부터 빠르게 점성이 증가하는 재료⑧은 스프레이 시공에 적합하지 않다. 펌프에서 이송되는 초기 5분에는 점성이 일정하게 유지되다가 이후에 빠르게 점성이 증가하는 재료⑦이 스프레이 시공에 가장 이상적인 것으로 판단하였다.

4.2 개발된 재료의 스프레이와 자기충전 시공성

시멘트풀의 레올로지 연구 결과를 바탕으로 첨가 재료를 투여하여 현장에서 ECC의 스프레이와 자기충전 시공성을 검증하였다. ECC를 배합할 때에는 현장에서 사용하는 콘크리트 강제식 믹서를 사용하였다. 스프레이 시공을 할 때에는 현장에서 사용하는 모르타르 펌프, 에어 컴프레서, 스프레이 건 등을 그대로 활용하였다. 스프레이에 의하여 시공된 두께는 약 60mm에 달하였고, 이 두께는 국내외 관련 학회에서 추천하는 스프레이 시공 두께인 최대 45mm를 월등히 상회하는 정도의 우수한 스프레이 시공성을 나타낸다. Fig. 8의 좌측 사진은 교량 교각의 보수 현장에 적용한 스프레이 시공 전경이다. 한편, 이 재료의 자기충진 시공성은 슬래브-기둥 접합부 시공 현장에서 검증되었는데 외부의 다짐 없이 순수하게 자중으로 시공되었다(Fig. 8, 아래).

Fig. 8 스프레이 재료(좌)와 자기충전 재료(우)를 이용한 현장 시공.

5. 결 론

이 연구에서는 역학적 이론과 레올로지 이론을 배경으로 스프레이와 자기충전 등 2가지 시공법에 적용이 가능한 고인성 섬유복합재료 ECC를 개발하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 0.6:1의 비율로 물, 시멘트가 혼합된 매트릭스에 대하여 마이크로역학적 실험 및 해석을 수행하여 PVA40 섬유와 평균입경이 130μm의 골재를 기본 재료로 결정하였다. 이 때에 섬유혼입율은 2% 체적비이었으며, 1축 인장에서 ECC의 최대 연신율과 최대 균열폭은 각각 4%와 40㎛로 나타났다.

(2) ECC의 시공성을 구현하기 위하여 HRW, MC, CA의 투여량에 따른 시멘트풀 레올로지를 연구하였다. 스프레이 시공과 자기충전 시공에 적합하도록 결정된 투여량을 기준으로 ECC를 제조하여 현장에 적용한 결과, 각각의 시공에 대하여 만족할 수 있는 성능을 얻었다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 충남대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1) 김윤용, “고인성 섬유복합모르타르 ECC(Engineered Cementitious Composites)의 구조물 적용,” 한국복합재료학회 추계학술발표대회 논문집, 2006, pp. 281-284.
2) V.C. Li and C.K.Y. Leung, “Steady State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites,” *ASCE J. of Engineering Mech.*, Vol. 188, No. 11, 1992, pp. 2246-2264.
3) Y.Y. Kim, H.J. Kong and V.C. Li, “Design of Engineered Cementitious Composite (ECC) Suitable for Wet-mix Shotcreting,”*ACI Materials J.*, Vol. 100, No. 6, 2003, pp. 511-518.
4) Z. Lin, T. Kanda and V.C. Li, “On Interface Property Characterization and Performance of Fiber Reinforced Cementitious Composites,” *J. Concrete Science and Engineering*, Vol. 1, 1999, pp. 173-184.
5) H.J. Kong, V.C. Li and S.G. Bike, “Electrosteric stabilization of concentrated cement suspensions imparted by a strong anionic polyelectrolyte and a non-ionic polymer,” *J. of Cement and Concrete Res.*, Vol. 36, 2006, pp. 842-850.
6) C. Wu, *Micromechanical Tailoring of PVA-ECC for Structural Applications*, University of Michigan, Ph. D. Thesis, 2000, p. 238.
7) J.K. Kim, Y.Y. Kim, “Fatigue Crack Growth of High Strength Concrete in Wedge Splitting Test,” *J. of Cement and Concrete Res.*, Vol. 29, 1999, pp. 705-712.
8) S. Xu and H.W. Reinhardt, “Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part III: Compact tension specimens and wedge splitting specimens,” *International J. of Fracture*, Vol. 98, 1999, pp. 179-193.