

석회석 미분말을 혼입한 시멘트계 매트릭스 섬유복합재료의 설계 및 구조부재의 휨성능

현정환* · 김윤용*[†]

Design of Fiber Reinforced Cement Matrix Composite Produced with Limestone Powder and Flexural Performance of Structural Members

Jung-Hwan Hyun*, Yun-Yong Kim*[†]

ABSTRACT: The purpose of this study is to develop fiber reinforced cement matrix composite (ECC) produced with limestone powder in order to achieve high ductility of the composite, and to evaluate flexural performance of structural members made with ECC. Four kinds of mixture proportions were determined on the basis of the micromechanics and a steady state cracking theory considering the matrix fracture toughness and fiber-matrix interfacial characteristics. The mechanical properties of ECC, represented by strain-hardening behavior in uniaxial tension, were investigated. Also, strength property of the composite was experimentally evaluated. Two structural members made with ECC were produced and tested. Test results were compared with those of conventional concrete structural members. Increased limestone powder contents of ECC provides higher ductility of the composites while generally resulting in a lower strength property. ECC structural members exhibited higher flexural ductility, higher flexural load-carrying capacity and tighter crack width compared to conventional structural members.

초 록: 이 연구의 목적은 석회석 미분말을 사용하여 복합재료의 연성이 향상된 시멘트계 매트릭스 섬유복합재료(ECC)를 개발하고 이 재료로 제작된 구조부재의 휨성능을 평가하는 것이다. 재료 개발을 위하여 4가지 종류의 배합을 마이크로역학과 안정상태 균열 이론을 활용하였고, 이를 위하여 시멘트계 매트릭스의 파괴인성과 섬유-시멘트 매트릭스 경계면 특성을 파악하였다. 개발된 ECC의 1축 인장변형특성과 압축강도 특성이 실험적으로 평가되었다. 또한, 2개의 구조부재를 제작하여 휨실험을 수행하였고 그 결과를 재래식 콘크리트 구조부재의 성능과 비교하였다. 재료실험 결과로 석회석 미분말의 혼입률 증가에 따라 압축강도는 감소하지만 연성은 증가하였다. 부재 실험 결과, ECC 구조부재는 재래식 콘크리트 구조부재에 비하여 높은 휨연성, 높은 휨내력, 작은 균열폭을 나타내었다.

Key Words: 고인성 섬유복합재료(ECC), 복합재료(Composite materials), 휨부재(Flexural members), 연성(Ductility), 석회석 미분말(Limestone powder)

1. 서 론

1820년대에 포틀랜드 시멘트(Portland cement)가 개발된 이후 그동안 콘크리트는 주요 건설재료로 사용되고 있다.

콘크리트는 경제성과 내구성이 우수하여 강재와 함께 건설 분야에서 가장 널리 사용되고 있는 재료지만 인장강도 및 연성이 본질적으로 낮아 균열이 발생하고 균열의 폭이 크게 증가하는 유사취성 재료라는 단점을 가지고 있다. 최

Received 31 October 2016, received in revised form 22 December 2016, accepted 27 December 2016

*Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

*[†]Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea, Corresponding author (E-mail: yunkim@cnu.ac.kr)

근 국내외에서는 고인성 섬유복합재료에 관한 관심이 증가하고 있으며, 그 중 대표적 재료인 ECC(Engineered Cementitious Composite)는 시멘트 모르타르에 2% 이내의 함성섬유를 혼입하여 콘크리트의 수백배에 달하는 인장변형능(연신율)과 인장변형률 경화거동을 보이는 고인성 섬유복합재료이다. ECC는 Li 등[1]이 제안한 마이크로역학(micromechanics)과 Marshall 등[2]이 제안한 안정상태 균열이론(steady-state cracking theory)을 이론적 배경으로 한다. 특히 두 가지 종류의 취성재료(시멘트계 모르타르, 섬유)로 구성된 섬유복합 모르타르에 높은 연성 특성을 부여하기 위하여 섬유(fiber), 시멘트계 매트릭스(cement-based matrix) 그리고 섬유-매트릭스 경계면(fiber-matrix interface)의 역학적 특성을 파악하고 이를 최적화 하는 방법을 활용할 수 있다[3].

또한, 시멘트 산업은 지구에서 발생하는 온실가스 발생량의 약 5%를 차지하고 있어 이산화탄소의 발생을 저감하고자 많은 연구들이 수행되고 있다[4-9]. 시멘트계 복합재료를 환경친화적으로 제조하기 위하여 온실가스 발생량이 큰 포틀랜드 시멘트 대신 플라이애시, 고로슬래그 미분말 등의 무기계 바인더와 석회석 미분말 등의 무기계 충전재의 사용량 증가가 요구되고 있다. 이중 석회석 미분말은 가격이 낮고 굳기전의 복합재료 유동성을 향상시키는 등 긍정적인 효과가 있어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다[10,11]. 섬유복합재료에 석회석 미분말을 혼입할 경우 시멘트계 매트릭스의 파괴에너지를 감소시켜 복합재료의 안정상태 균열을 발생시키는데 보다 유리해지는 추가적인 장점이 있을 것으로 판단된다.

따라서 이 연구에서는 석회석 미분말을 혼입한 ECC를 설계하고 혼입량 변화에 따른 역학적 특성을 평가하였다. 그리고, 이 재료로 제작한 ECC 구조부재(ECC 보)의 휨성능을 평가하였고 그 결과를 재래식 콘크리트 구조부재(RC 보) 휨성능과 비교하는 연구를 수행하였다.

2. ECC의 이론적 체계 및 설계

유사 취성적인 콘크리트 재료와는 달리 ECC는 1축인장 조건에서 금속과 같은 인장변형률 경화거동을 보인다. 이 재료는 다수의 미세균열(multiple microcracks) 발생과 함께 균열폭을 $100\ \mu\text{m}$ 이하로 제어하는 특성을 가지고 있다(Fig. 1). 이와 같이 우수한 연성능력은 마이크로역학과 안정상태 균열이론을 재료설계의 역학적 기반으로 활용하여 안정상태의 다수 미세균열을 발생시킴으로써 구현된다. 안정상태 균열이 발생하기 위한 조건은 Fig. 2와 같이 균열면 가교응력(bridging stress, σ)과 개구변위(crack opening displacement, δ) 관계를 이용하여 이론적으로 나타낼 수 있다. 여기서, σ_0 는 최대 균열면 가교응력, δ_0 는 최대 균열면 개구변위, σ_{ss} 는 안정상태균열에서의 균열면 가교응력, δ_{ss}

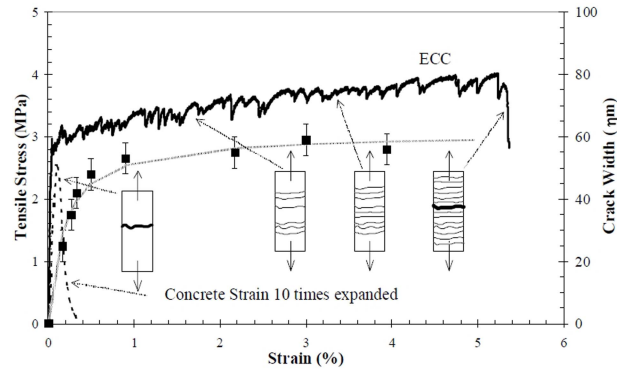


Fig. 1. Stress-strain curve and crack width-strain relationship of ECC under uniaxial tension [3]

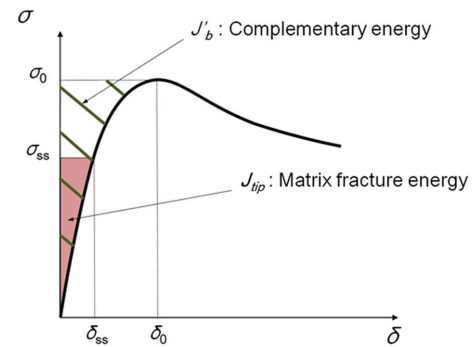


Fig. 2. Typical bridging stress-crack opening displacement curve for a strain hardening composite [3]

는 안정상태균열에서의 개구 변위를 나타낸다. 안정상태 균열이 발생하기 위한 첫번째 조건으로는 보상에너지 (complimentary energy, J'_b)가 시멘트 매트릭스 파괴에너지 (J_{tip})보다 커야 한다는 에너지 조건이다. 이 조건이 만족될 경우 ECC는 균열면에서 더 이상의 균열이 진전하지 않게 되어 일정한 폭을 가진 안정상태의 다수의 미세 균열이 발생하게 된다. 에너지 조건과 함께 반드시 충족되어야 하는 두번째 조건은 최대 균열면 가교응력 (maximum bridging stress, σ_0)이 매트릭스의 인장균열 응력(σ_{tc}) 보다 커야 한다는 인장강도 조건이다. 이 조건을 만족할 경우 인장력에 의해 초기균열이 발생한 이후 균열면에서 전달되는 가교 응력에 의해 재료의 다른 부분에서 다수의 균열이 발생하게 된다. 이러한 다수 미세균열이 발생함으로써 ECC는 인장 변형률 경화거동을 나타내게 된다. 반면, 이 조건을 만족하지 못하면 초기균열 후 섬유의 뽀뽀힘이나 파괴에 의한 즉각적인 응력 저하가 발생하며 다중 균열이 발생하지 못하고 국부파괴가 발생하게 된다. 이 이론을 재료에 적용하기 위하여 마이크로역학에 따른 수치해석을 수행하여 균열면 가교응력과 개구변위 관계를 구한다. 수치해석을 수행하기 위해서는 섬유인발 실험(single fiber pullout test)과 매트릭스 파괴인성실험을 통하여 섬유경계면 특성과 매트릭스의

파괴에너지 등과 같은 역학적 특성 값을 구한다. 이를 이용하여 식 (1)에 표기한 바와 같이 균열면 가교응력과 균열폭의 관계를 이론적으로 예측할 수 있다.

$$\sigma_0 = \frac{4V}{\pi d_f^2} \int_{\phi=0}^{\phi=\pi/2} \left[\int_{z=0}^{z=(L_f/2)\cos\phi} P(\delta)p(\phi)p(z)dz \right] d\phi \quad (1)$$

3. 고인성 섬유복합체(ECC) 설계

3.1 사용재료 및 배합

이 연구에서 사용한 ECC의 보강용 합성섬유는 Table 1에 표기한 바와 같이 직경 39 μm , 길이 12 mm, 인장강도 1,620 MPa, 탄성계수 38.9 GPa인 PVA 섬유를 사용하였다. 결합재로는 A사의 1종 보통포틀랜드 시멘트(밀도 3.15 g/cm^3)를 사용하였으며, 잔골재는 밀도 2.65 g/cm^3 , 평균 입도가 100 μm 인 규사를 활용하였다. 규사는 입자가 큰 일반 강모래에 비하여 매트릭스의 파괴에너지(J_{tip})를 낮출 수 있고, 골재의 최대크기 200 μm 를 초과하지 않는 범위 내에서 활용하면 섬유 복합체의 유동성과 섬유 분산성을 저하시키지 않아 최적의 유동 성능을 나타내는 것으로 기존 연구에서 밝혀진 바 있다[3]. 또한, 시멘트 매트릭스에 혼입되는 PVA 섬유의 효과적인 분산을 위하여 감수제(SP)와 셀룰로즈 계열의 분리저감제(HPMC)를 혼화제로 첨가하였다. 섬유-매트릭스간의 경계면 특성과 매트릭스의 파괴인성 실험을 위하여 Table 2과 같이 사용배합을 설계하였다. E-O 배합은 석회석 미분말을 혼입하지 않은 비교용 배합이다. 비교용 배합을 기준으로 석회석 미분말을 시멘트 중량비로 각각 10%, 20%, 30%를 치환하여 배합에 적용하였으며, 배합명은 각각 E-10, E-20, E-30이다. 이러한 4가지 배합을 갖고 섬유인발실험과 매트릭스의 파괴인성실험을 수행하였다.

3.2 섬유-매트릭스 경계면 특성

3.2.1 섬유인발실험

PVA 섬유와 매트릭스 경계면에서 발생하는 화학적 부착(G_d) 및 마찰 부착(τ_0) 특성을 얻기 위하여 섬유인발실험을 수행하여 그 결과로 섬유인발하중과 섬유 인발량의 관계를 구한다. 실험체의 형상은 Fig. 3에 나타내었으며, 1가닥의 PVA 섬유를 아크릴 몰드에 통과시킨 후 시멘트계 매트릭스를 몰드에 붓는 방식으로 제작하였다. 섬유인발 실험체는 재령 2일에 아크릴 몰드에서 탈형한 뒤 재령 28일까

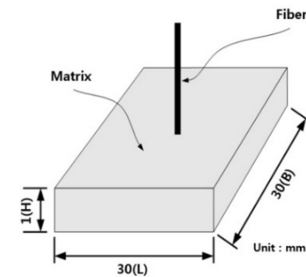


Fig. 3. Specimen geometry of fiber pullout test [12]

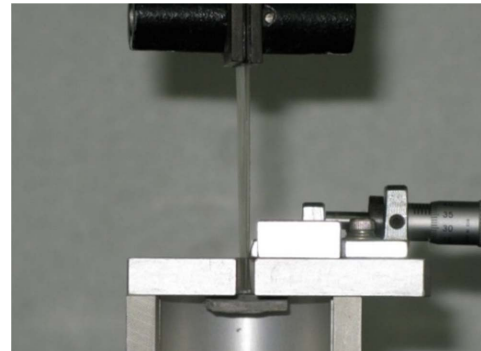


Fig. 4. Experimental setup for fiber pullout test

Table 1. Properties of PVA fiber

Fiber	Density (g/cm^3)	Length (mm)	Diameter (μm)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)
Polyvinyl alcohol (PVA)	1.30	12	39	1,620	38.9	3-113

Table 2. Mix proportion of ECC

Mix	W/B (%)	S/B (%)	LP/C (%)	Unit weight (kg/m^3)							
				W	C	LP	S	SP	HPMC	Deformer	PVA Fiber
E-0	45	80	0	390	865	0	694	3.8	1.6	1.6	25.8
E-10	45	80	10	390	779	85	694	3.8	1.6	1.6	25.8
E-20	45	80	20	390	692	172	694	3.8	1.6	1.6	25.8
E-30	45	80	30	390	604	260	694	3.8	1.6	1.6	25.8

*W : Water, B : Binder, C : Cement, LP : Limestone powder, S : Silica sand, SP : Super plasticizer, HPMC : Hydroxypropyl methyl-cellulose, PVA : Poly-vinyl alcohol

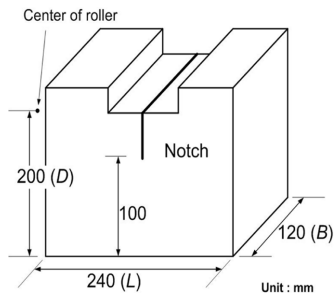


Fig. 5. Specimen geometry of fracture toughness test

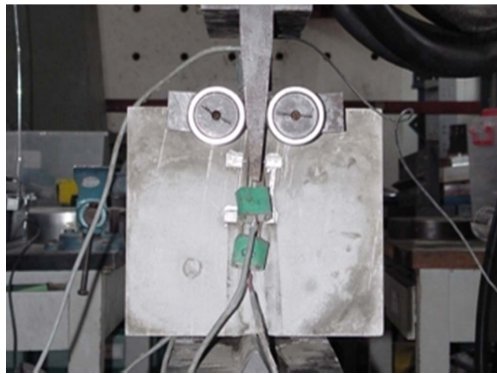


Fig. 6. Experimental setup for fracture toughness test

지 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 항온수조에서 수중 양생하였다. 섬유인발실험을 위하여 실험체의 밑면을 정착장치에 고정하였고, 돌출된 PVA 섬유는 아크릴 필름으로 감싼 후 실험장비의 로드셀에 부착된 그림에 고정하였다(Fig. 4). 실험은 변위제어 방식으로 0.2 mm/분 의 속도로 수행하였다.

3.2.2 매트릭스 켜기조깅실험

시멘트계 매트릭스의 J_{tip} 을 구하기 위하여 Fig. 5와 같은 형상의 실험체를 제작하였으며 28일간의 수중양생 후 실험을 진행하였다. 켜기조깅실험은 Fig. 6과 같이 균열 개구 변위(crack mouth opening displacement, CMOD) 측정을 위한 클립게이지를 설치하여 변위제어(0.001 mm/초) 방식으로 하중의 증가에 따라 CMOD를 측정하여 파괴인성(K_{IC})을 구하였다. 켜기조깅실험의 이론적인 근거 효용성은 기존의 연구에서 검증된 바 있다[3,13].

3.3 ECC 설계특성 분석

3.3.1 화학적 부착 및 마찰 부착

이 절에서는 섬유인발실험을 통해 얻은 실험결과를 바탕으로 섬유와 매트릭스간의 화학적 부착(G_d) 및 마찰 부착(τ_0)을 평가하였고 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 매트릭스와 섬유 사이의 부착은 크게 화학적 부착과 마찰부착 두 가지로 분류할 수 있다. 화학적 부착은 매트릭스와 섬유 사이의 정전기적 인력에 의하여 부착이 되는 것이며, 마찰 부착은 매트릭스와 섬유 사이의 역학적 부착으로서 매트

Table 3. Interfacial properties obtained from fiber bridging curve

	Chemical bond (G_d)	Friction bond (τ_0)
E-0	1.867	1.957
E-10	1.854	1.832
E-20	1.872	1.734
E-30	1.864	1.645

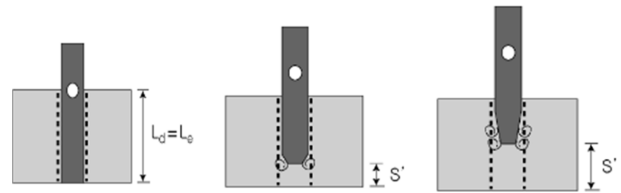


Fig. 7. Pull-out procedure of fiber in matrix [12]

릭스와 섬유사이의 화학적 부착이 파괴된 후 매트릭스에서 섬유가 인발될 때 섬유의 인발에 저항하는 부착을 말한다. 화학적 부착의 경우 동일한 물-결합재(W/B)비에서는 석회석 미분말 혼입량 증가에 따른 영향을 받지 않음을 확인하였다. 섬유와 매트릭스간 발생하는 화학적 부착은 시멘트계 매트릭스 내부에 소량의 수분만 존재하여도 시멘트 등의 바인더와 정전기적 인력이 발생하여 화학적 부착을 형성하기 때문인 것으로 판단된다[14]. 이러한 이유로 인해 일반적으로 사용하는 물-결합재비(W/B)의 범위에서는 섬유-매트릭스간 화학적 부착에는 큰 영향을 받지 않게 된다. 반면, 섬유-매트릭스간의 마찰부착은 석회석 미분말 혼입률이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. Fig. 7은 섬유와 매트릭스 사이의 부착이 떨어지는 과정을 도시한 그림이다. 섬유의 인발이 일어나는 동안 손상된 섬유 표면이 매트릭스에 걸려 섬유와 마찰력이 생기게 되며, 이때의 마찰력은 매트릭스의 강도와 연관이 있다. 매트릭스의 강도가 작을수록 섬유 인발 시 저항력 감소로 인한 마찰부착이 감소하게 되며, 석회석 미분말 혼입률 증가로 시멘트량이 감소하여 매트릭스의 강도저하가 발생하기 때문으로 판단된다.

3.3.2 파괴인성 및 인성비

이 절에서는 켜기조깅 실험을 통해 얻은 파괴인성(K_{IC}) 실험결과를 바탕으로 보상에너지(complimentary energy, J'_b)가 시멘트 매트릭스 파괴에너지(J_{tip})보다 커야하는 에너지 조건과, 최대 균열면 가교응력(maximum bridging stress, σ_0)이 매트릭스의 인장균열 응력(σ_c)보다 커야 하는 인장강도 조건과 비교하고자 한다. 또한, 균열폭의 검토와, 인성비(toughness ratio, R_T) 검토를 통해 석회석 미분말의 혼입량 증가에 따른 ECC의 인성비를 비교하여 연성능력을 검토하고자 하며, 섬유가교곡선 분석에는 마이크로역학을 기반으로 개발된 프로그램[3]을 활용하여 수행하였다.

Fig. 8은 수치해석으로 얻은 섬유가교곡선이며, Table 4에

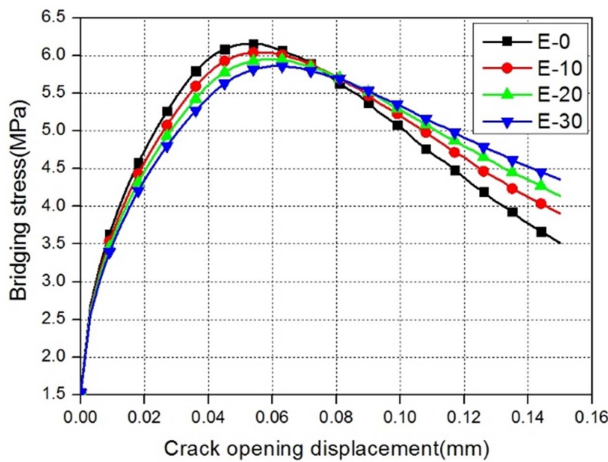


Fig. 8. Bridging stress-crack opening displacement relationship of ECC

Table 4. Fracture and strength properties of ECCs

	K_{IC}	J_{tip}	J'_b	R_T (J'_b/J_{tip})	σ_o	σ_{fc}
E-0	1.053	50.4	266.2	5.3	6.2	5.9
E-10	0.815	31.6	258.3	8.1	6.0	5.2
E-20	0.723	26.1	269.8	10.3	6.0	4.8
E-30	0.645	21.9	280.7	12.8	5.8	4.5

는 섬유가교곡선과 매트릭스 켄치조갯실험을 통해 얻은 R_T 와 σ_{fc} 를 표기하였다. 켄치조갯실험을 통해 얻은 매트릭스의 파괴인성(K_{IC}) 값은 석회석 미분말이 혼입되지 않은 E-0 실험체의 경우 1.053으로 측정되었고, 석회석 미분말을 30%를 치환한 E-30 실험체의 경우 가장 작은 파괴인성 값(0.645)이 도출되었다. 실험결과를 통해 석회석 미분말 혼입량이 증가할수록 매트릭스의 강도와 파괴인성 값이 작아지는 경향을 나타내었다. 파괴인성 값이 감소하면 매트릭스 내에 균열 발생이 유리하고 안정상태의 다중 미세균열 발생 가능성이 높아져 인성비가 증가한다. 결과적으로 섬유복합재료의 연성능력이 향상되는 효과가 나타나게 된다. Table 4에서는 각 배합별 실험체의 섬유가교곡선 해석을 통해 도출된 보상에너지(J'_b)와 매트릭스의 파괴에너지(J_{tip})를 계산하였다. 모든 ECC 실험체의 J'_b 는 J_{tip} 보다 큰 값을 나타내어 에너지조건을 만족함을 알 수 있다. 이와 같이 R_T 의 값이 커지게 되면 발생된 균열이 안정상태로 유지되어 섬유의 가교 작용을 통해 응력을 전달하면서 다른 부위에 안정상태 균열이 추가적으로 발생한다. 이러한 과정이 고인성 섬유복합체 내부에서 반복적으로 발생하면서 안정상태의 다중 미세균열이 발생하게 되고 이로 인하여 인성과 연성이 증가하는 결과를 얻게 된다. 기존의 연구를 통하여 R_T 가 3.0 이상일 경우 다중미세균열을 발생시키는 것으로 알려져 있다[12]. 모든 배합의 R_T 는 3.0 이상으로 나타나

에너지조건을 충분히 만족하며, 특히 E-30 배합의 인성비는 12.8로 예측되어 가장 우수한 연성능력을 발휘 할 것으로 예측되었다. Table 4에 나타난 바와 같이 모든 배합의 최대 균열면 가교응력(σ_o)은 인장균열 응력(σ_{fc})보다 크게 해석되어 인장강도 조건을 만족하는 것을 확인하였다. 따라서, 균열면 가교응력이 안정상태의 균열면을 통해 응력을 전달하면서 섬유복합재료에 다수 미세균열이 연속적으로 발생하여 안정적인 변형을 경화거동을 할 것으로 예상된다. 또한, Fig. 8의 섬유가교곡선에서 나타난 바와 같이 모든 배합의 σ_o 에서 균열개구변위(crack opening displacement)는 50~60 μm 으로 예측되어 콘크리트와 같은 시멘트계 재료의 허용 균열폭인 300 μm 을 충분히 만족할 것으로 판단된다.

4. 고인성 섬유복합체의 역학적 특성

4.1 압축강도

석회석 미분말을 혼입한 ECC의 압축강도 평가를 위하여 『KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법』으로 시험을 수행하였다. $\Phi 100 \times 200$ mm 원주형 공시체를 제작한 후 수중양생을 거쳐 재령 7, 14, 28일에 만능재료 시험기를 사용하여 압축강도를 측정하였다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 석회석 미분말을 혼입하지 않은 E-0 실험체가 가장 큰 압축강도(재령 28일, 평균 48.4 MPa)를 나타냈다. 석회석 미분말을 시멘트 중량비로 10%, 20%, 30% 치환한 E-10, E-20, E-30 시험체의 압축 강도는 각각 45.1 MPa, 40.4 MPa, 35.3 MPa로 나타나 혼입량이 증가할수록 압축강도가 감소하는 것을 확인하였다. 석회석 미분말 혼입을 증가로 시멘트량이 감소하여 매트릭스의 강도가 저하되었기 때문이다.

4.2 인장거동

ECC의 인장거동을 평가하기 위하여 직접인장 실험을 수행하였다. Fig. 10과 같이 단부의 파괴를 방지하면서 직접

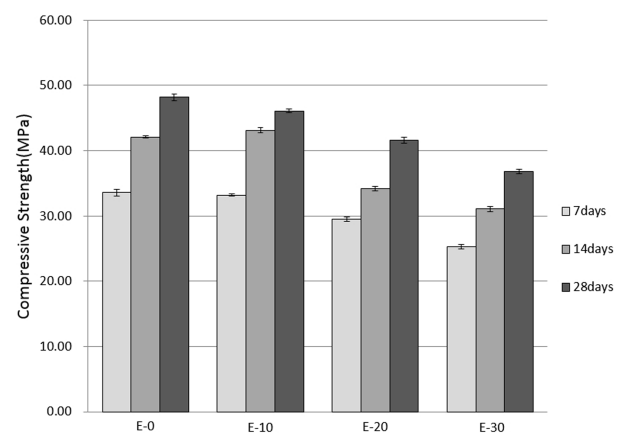


Fig. 9. Compressive strength of ECC (average values)

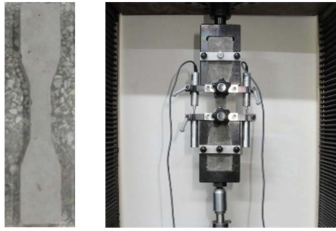


Fig. 10. Specimen and setup for uniaxial tensile test

Table 5. Result of uniaxial tensile test

Mix	Initial cracking stress(MPa)	Ultimate stress(MPa)	Ultimate strain (MPa)
E-0	3.9	4.7	2.7
E-10	3.8	4.5	3.1
E-20	3.5	4.2	3.4
E-30	3.4	3.9	4.3

인장 실험체에 균일한 1축 인장 하중이 가해지도록 Dog-bone 형상의 실험체를 제작하여 실험을 진행하였다. 실험체는 탈형 후 28일간 수중양생 후 24시간 건조를 마친 후 250kN 용량의 만능재료시험기를 사용하여 1축 인장력을 가하였다.

실험체 중앙부 80 mm 좌우 대칭 구간에 10 mm 변위계를 설치하여 인장강도 도입에 따른 실시간 변위를 측정하

였으며, 그 결과를 인장응력-변형률 관계로 나타내어 인장 거동을 평가하였다. 또한, 초기 균열강도, 최대 인장 변형률을 측정하였으며, 인장변형률 경화거동과 함께 실험체에 발생하는 균열 형태를 파악하였다. Fig. 11은 직접인장 실험을 통해 얻은 인장응력-변형률 관계 그래프를 나타낸 것이다. 각 배합별로 제작된 ECC 실험체는 1축인장 하에서 뚜렷한 변형률 경화거동을 발생하였으며, 균열폭이 아주 작은 다수의 미세균열이 발생하였다. 시험체의 최대 변형률은 E-0, E-10, E-20, E-30 실험체가 각각 2.7%, 3.1%, 3.4%, 4.3%로 측정되었다. 이 결과는 일반 콘크리트 최대 인장변형률 0.01%에 비해 약 300배 이상의 인장 변형성능을 나타낸다. 또한, 석회석 미분말의 혼입으로 E-10, E-20, E-30 시험체는 E-0 시험체와 비교하여 강도 저하현상이 발생하였지만, 변형률에 있어 각각 15%, 26%, 59% 인장변형률이 향상되는 것을 확인하였다. 이는 ECC 설계과정에서 E-30 배합이 가장 우수한 R_t 값을 갖는 것으로 평가되었고 이로 인하여 가장 안정적인 인장변형률 경화거동을 나타낸 것으로 판단된다.

5. ECC의 구조부재 적용

5.1 ECC보 제작 및 실험

석회석 미분말을 혼입한 ECC를 이용하여 Fig. 12, Fig. 13

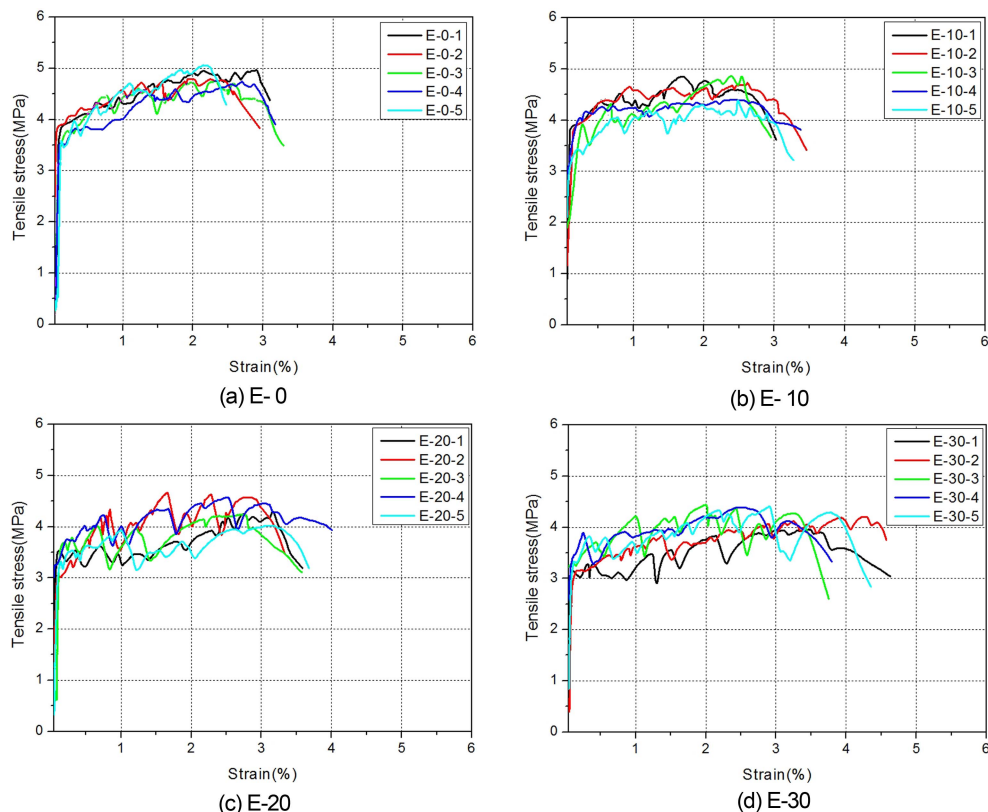
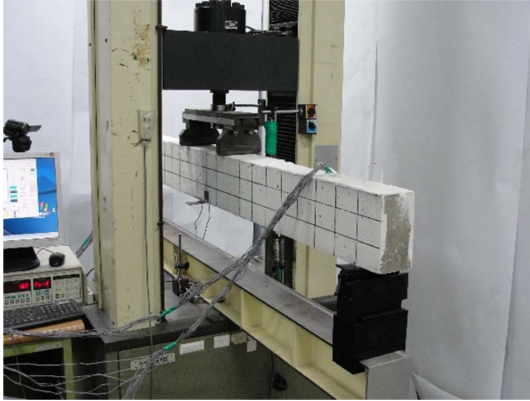


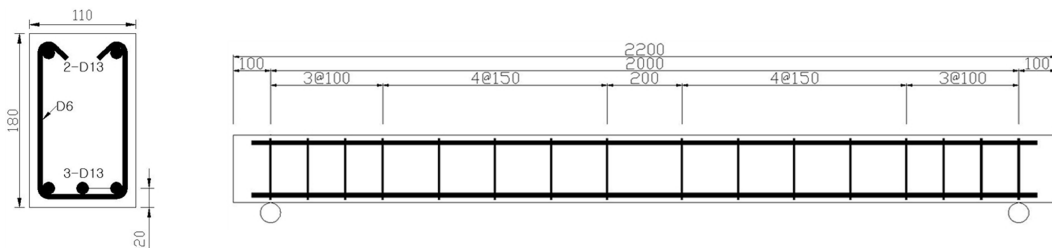
Fig. 11. Stress-strain curves in uniaxial tension

Table 6. Mechanical properties of rebar

Classification	Yield strength (MPa)	Diameter type	Nominal diameter (mm)
Longitudinal rebar	400	D13	12.7
Shear rebar	400	D6	6.35

**Fig. 12.** Experimental setup for 4 points bending test

과 같은 구조부재(ECC 보)를 제작하여 휨성능을 평가하고 그 결과를 재래식 콘크리트 구조부재(RC 보)의 성능과 비교 분석하였다. ECC 보 제작을 위한 배합에는 ECC 배합 중 연성능력이 가장 우수한 E-30 배합을 사용하였고, RC 보 제작에 사용한 콘크리트는 ECC-30 배합과 동일한 강도 규격의 콘크리트를 적용하였다. 이 콘크리트의 규격은 굵은골재 최대치수 20 mm, 슬럼프 150 mm, 공기량 4.5%, 배합강도 35 MPa이다. 구조부재에 배근된 철근은 Table 6에 표기한 바와 같이 압축부에 2개, 인장부에 3개의 주철근과 100 mm 간격으로 설계된 스티럽으로 현행 구조기준의 요건을 만족하도록 설계되었다. 실험체의 총 길이는 2,200 mm, 단면 치수는 110 mm × 180 mm의 직사각형 단면으로 제작하였다. 실험은 200 kN 용량의 만능 재료시험기를 활용하여 4 점재하 방식으로 Fig. 12에 도시한 바와 같이 수행하였다. 실험체 양 단부로부터 100 mm 위치에 회전단을 설치하여 순 지간이 2,000 mm가 되도록 단순 지지 하였으며 가력부의 재하지간은 순수 휨이 작용할 수 있도록 400 mm로 결정하였다. 보의 중앙부 처짐은 레이저 변위측정기를 이용하여 실시간 변위를 측정하였다.

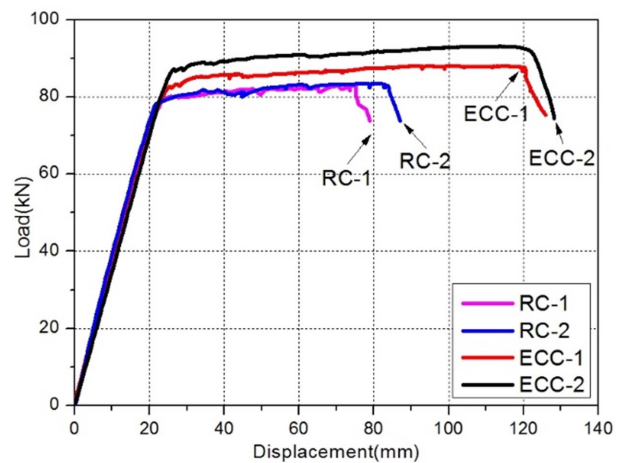
**Fig. 13.** Configuration and dimension of the beam specimen

5.2 ECC 구조부재의 휨성능

RC보의 휨 실험 결과를 살펴보면 RC-1과 RC-2의 경우 초기균열은 각각 9.6, 8.4 mm의 처짐에서 발생하였으며 ECC-1, ECC-2는 각각 11.2, 10.1 mm의 중앙부 처짐에서 초기균열이 발생하였다. RC-1, RC-2 실험체는 10개 이내의 균열이 발생하며 중앙부 처짐이 증가하였다. 인장철근이 항복한 이후 발생한 균열에 변형이 집중되면서 균열폭이 크게 증가한 후 파괴에 도달하였다. 압축부 콘크리트가 압축 파쇄되는 전형적인 휨파괴 형태를 나타내었다. ECC-1, ECC-2 실험체는 최대하중이 89.4, 91.4 kN으로 측정되어 RC 실험체와 비교하여 최대 내력이 약 11% 향상되는 것을 확인하였으며 최대내력에서의 처짐량 또한 약 39 mm 증가하였다. 또한, 실험 전반에 걸쳐 수십개의 미세균열이 촘촘히

Table 7. Results of flexural test

Specimen	Initial crack		Re-bar yielding		Ultimate load	
	Deflection (mm)	Load (kN)	Deflection (mm)	Load (kN)	Deflection (mm)	Load (kN)
RC-1	9.5	29.5	27.2	74.6	83.4	82.8
RC-2	8.3	29.4	25.7	75.7	77.5	80.4
ECC-1	11.5	34.2	31.3	83.3	121.2	89.4
ECC-2	10.3	32.7	29.2	81.8	118.3	91.4

**Fig. 14.** Load vs. midspan deflection curves obtained from flexural tests

발생하며 변형이 분산되어 100 μm 이하의 작은 균열폭을 나타내었다. 최종파괴는 RC 보와 마찬가지로 압축부 ECC가 파쇄되는 전형적인 휨파괴를 나타내었다.

6. 결 론

이 연구에서는 마이크로역학과 안정상태 균열이론을 적용하여 석회석 미분말 혼입 ECC를 개발하여 구조부재에 적용하였고, 재료의 역학적 특성과 부재의 휨성능 실험을 수행하였다. 이 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 석회석 미분말을 시멘트계 매트릭스에 혼입할 경우 안정상태 균열을 얻을 수 있는 에너지조건과 인장강도 조건을 모두 만족하였다. 모든 배합에서 3.0 이상의 충분한 인성비를 확보하였으며, 석회석 미분말을 30% 치환할 경우 인성비가 12.8로 계산되어 파괴인성 감소로 인한 연성능력이 보다 향상되는 것으로 예측되었다.

(2) 재료실험 결과, 모든 ECC는 인장변형경화 특성을 나타내었다. 석회석 미분말 혼입량이 증가할수록 강도는 감소하는 경향을 보인 반면, 매트릭스의 파괴인성이 감소하고 복합재료의 보상에너지가 증가함에 따라 인장변형성능(연신율)은 증가하였다. 석회석 미분말이 30% 혼입된 경우 인장변형성능은 62% 향상되는 것으로 측정되어 석회석 미분말 혼입이 ECC에 연성능력을 향상시키는 것으로 나타났다.

(3) 부재실험결과, E-30 배합의 ECC로 제작된 구조부재는 RC실험체에 비하여 최대 휨내력이 약 11% 향상되었고, 최대 휨내력에서의 처짐량 또한 약 39 mm 증가하여 보다 우수한 휨연성을 나타내었다. 또한, 최종 파괴 균열을 제외한 대부분의 균열은 100 μm 이하의 균열폭으로 제어되어 우수한 균열제어 성능을 발휘할 것으로 판단된다.

(4) 석회석 미분말이 30% 혼입되어 가장 큰 연성능력을 발휘하는 E-30 배합은 압축강도가 36.8 MPa로 측정되었다. 일반적인 구조물에 적용되는 콘크리트의 압축강도 범위가 21~28 MPa인 점을 감안할 때 E-30 배합은 구조부재에 충분히 적용 가능할 것으로 사료된다. 또한, 지진하중에 취약한 기둥, 교각 등 철근콘크리트 구조물의 소성힌지부에 ECC를 적용할 경우 내력과 연성능력의 향상과 함께 우수한 균열제어성능을 발휘할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1A5A1037548).

REFERENCES

1. Li, V.C., Wang, Y., and Backer, S., "A Micromechanical Model of Tension-Softening and Bridging Toughening of Short Random Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites", *J. Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 39, No. 5, 1991, pp. 607-625..
2. Marshal, D.B., and Cox, B.N., "A J-intergral Method for Calculating Steady-State Matrix Cracking Stresses in Composites", *Mechanics of Materials*, No.8, 1988, pp. 127-133.
3. Kim, Y.Y., "Design and Constructibility of an Engineered Cementitious composite Produced with Cement-based Mortar Matrix and Synthetic Fibers", *Composites Research*, Vol. 20, No. 2, 2007, pp. 21-26.
4. Government of Canada NRC, Energy Consumption Benchmark Guide, Cement Clinker Production Office of Energy Efficiency, 2009.
- 5) Heikal, M., El-Didamon, H., and Morsy, M.S., "Limestone Filled Pozzolanic Cement", *Cement and Concrete Research*, 30, 2000, pp. 1827-1834.
6. Lee, M.S., Yun, C.H., and Choi, H.K., "Influence of Limestone Powder on the Hydration of Slag Cement", *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 1999, pp. 85-88.
7. Lee, S.H., Lim, D.S., Lim, Y.J., and Lee, S.J., "Develpoment of Early Compressive Strength in Portland Cement by Lime Stone Powder", *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 1, 2012, pp. 197-198.
8. Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E., and Scrivener, K., "Influence of Limestone on the Hydration of Portland Cements", *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, 2008, pp. 848-860.
9. Oh, B.H., Park, D.G., Park, J.M., and Lee, J.H., "Mechanical and Durable Properties of Concrete Containing Slag and Limestone Powder", *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 2002, pp. 569-574.
10. Tsvivilisa, S., Tsantilasa, J., Kakalia, G., Chaniotakisb, E., and Sakellariou, A., "The Permeability of Portland Limestone Cement Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 2003, pp. 1465-1471.
11. Voglis, N., Kakali, G., Chaniotakis, E., and Tsvivilis, S., "Portland-limestone Cements. Their Properties and Hydration Compared to those of other Composite Cements", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, No. 2, 2005, pp. 191-196.
12. Kim, Y.Y., Ha, K.J., and Shin, J.H., "Design of ECC(Engineered Cementitious Composite) Matrix Compositions Based on Micromechanics and Steady-State Cracking Theory", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 23, No. 5, 2007, pp. 11-19.
13. Kim, J.K., and Kim, Y.Y., "Fatigue Crack Growth of High Strength Concrete in Wedge Splitting Test", *Journal of Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1999, pp. 705-712.
14. Lin, Z., Kanda, T., and Li, V.C., "On Interface Property Characterization and Performance of Fiber Reinforced CementitiousComposites", *Journal of Cement science and Engineering*, Vol. 1, 1999, pp. 173-184.