

그라우팅에 적합한 점성을 갖는 변형률 경화 시멘트 복합재료

Strain-Hardening Cementitious Composites with Low Viscosity Suitable for Grouting Application

이 방 연^{1)*}

Lee, Bang Yeon

Abstract

This paper presents materials and processing technique to manufacture low viscous strain-hardening cementitious composite which is suitable for structures requiring low viscosity of materials. The micromechanics and fracture mechanics tools coupled with processing techniques were adopted to achieve low viscosity of composites as well as high tensile strain capacity. Optimal volume and length of fibers and interfacial properties between fibers and matrix for composites with tensile strength of 2~3MPa were determined on the basis of the micromechanical analysis and the steady-state cracking theory. Then six mixtures were determined and the experiment was carried out to evaluate the viscosity and uniaxial tensile performance of those. From the test results, it is verified that the strain-hardening cementitious composite with low viscosity suitable for grouting applications in fresh state as well as high ductility over 1.5% in hardened state can be feasible.

Keywords : Grouting, Fiber, Uniaxial tension behavior, Strain-hardening cementitious composite

1. 서론

다중 균열에 의해 변형률 경화거동을 나타내는 고인성 섬유복합재료는 짧은 길이로 재단된 단섬유를 매트릭스 내부에 무작위로 분포시켜 균열이 발생하여도 섬유가 균열 면에서 가교작용을 하여 균열 폭이 제어되고 다중 균열이 발생하도록 설계된 고성능 콘크리트 중의 하나이다. 따라서 섬유복합재료를 설계하고 인장 성능을 분석하거나 예측하기 위해서는 섬유 가교 거동을 정확히 예측하거나 평가하여야 한다. 이는 섬유 가교 거동에 따라 복합재료의 거동이 결정되기 때문이다. 섬유 가교 곡선에 영향을 주는 인자들은 섬유, 매트릭스, 그리고 섬유와 매트릭스의 계면 특성 등이 있으며, 이러한 미시역학 변수들이 변형률 경화 거동을 나타내기 위한 조건을 만족하도록 설계하여야 한다. 미시역학이론을 이용하면 섬유 가교 거동을 이론적으로 예측할 수 있으며, 고인성 섬유복합재료를 개발하는데 성공적으로 적용되고 있다 (Yang and Li 2010, Li 2003).

이러한 미시역학 변수 이외에 섬유 분포 특성 역시 섬유 가교 작용에 영향을 미치며, 균일하지 못한 섬유분포는 섬유보강 효과를 상당히 저하시킨다 (Bentur 1990, Mobasher et al. 1990). Yang 등 (2009)의 연구에 따르면 ECC(Engineered Cementitious Composites) 모르타르의 점성이 높을수록 인장 변형 능력이 증가하며, 이는 모르타르의 점성이 높아 섬유의 분산성이 향상되었기 때문이다. 다른 조건이 동일한 상태에서 증점제의 양을 조절하여 모르타르의 점성만을 변화시킨 후 섬유 분포와 인장 변형 성능을 조사한 Li (2009)의 연구에서도 모르타르의 점성이 증가할수록 섬유 분산성이 좋아지고, 그에 따라 인장 변형 성능이 향상되는 것으로 나타났다. 즉, 모르타르의 점성이 약 7 Pa.s 이하일 때는 모르타르의 점성이 증가함에 따라 변형 성능이 증가하다가 7 Pa.s 이상일 때 모르타르의 점성에 관계없이 변형 성능이 3% 정도로 균일하게 나타났다. 또한 섬유 분산성 계수 또한 동일한 패턴을 보였다. 결국 섬유의 분포가 인장 거동에 영향을 미치지 않게 하기 위해서는 모르타르의 점성이 약 7

1) 정회원, 전남대학교 건축학부 전임강사, 교신저자

* Corresponding author : bylee@jnu.ac.kr 062-530-1648

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 2월 29일까지 학회로 보내주시면 2012년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Pa.s 이상이 되어야 한다는 결론을 얻을 수 있다.

이는 자기충전 콘크리트에서 재료 분리를 방지하기 위하여 일반 콘크리트에 비하여 모르타르의 점성을 높이는 것과 동일한 원리이다. 그러나 그라우팅 용 시멘트 페이스트의 점성이 약 1 Pa.s 이하 (Rosquoet et al. 2003, Sonebi 2006) 인 점을 감안하면 이러한 용도에 고인성 섬유 복합재료를 적용하는데 한계가 있다.

따라서 이 연구의 목표는 그라우팅이나 낮은 점성이 요구되는 구조물에 적합한 굳기 전 유동특성을 갖고 있으면서, 굳은 후에는 변형률 경화 거동에 의한 고인성을 갖는 섬유복합재료를 개발하는 것이다. 이러한 목적을 달성하는데는 두 가지 어려움이 있다. 하나는 전술한 바와 같이 매트릭스의 점성이 낮은 상태에서 균일한 섬유 분산성을 얻는 것이고, 두 번째는 낮은 점성을 얻기 위하여 매트릭스의 배합을 변경함에 따라 변형률 경화 거동을 보일 수 있도록 미시역학 변수들을 최적화하여야 한다. 이러한 두 가지 어려움을 해결하기 위하여 사용재료 및 제조 방법을 최적화함으로써 낮은 점성의 매트릭스 내에서 균열한 섬유 분산성을 얻고, 미시역학 및 파괴역학 이론을 바탕으로 한 해석 기법을 이용하여 동시에 변형률 경화 거동을 나타낼 수 있는 섬유복합재료를 개발하고자 하였다.

2. 방법론

2.1 낮은 점성과 고인성을 얻기 위한 전략

섬유를 혼입한 이후에도 낮은 점성을 얻으면서 균일한 섬유 분포를 얻고, 변형률 경화거동을 나타내는 섬유복합재료를 제조하기 위하여 다음과 같은 방법을 적용하였다.

Yang 등 (2009)의 연구에 따르면 물/결합제비와 감수제의 양이 증가함에 따라 점성이 감소하고, 증점제의 양이 증가함에 따라 점성이 증가하는 것으로 나타났다. Table 1은 적용 목적에 따른 시멘트 그라우트의 물/시멘트비를 나타낸다(Rosquoet et al. 2003). 물/결합제비의 경우, 그라우팅 용으로 사용하는 시멘트 페이스트의 물/

멘트비가 0.35-2 범위이고, 섬유를 혼입할 경우 점성이 더 증가하는 것을 고려하면 복합재료의 물/결합제비는 이보다 더 커야 한다. 변형률 경화 거동을 보이는 섬유복합재료 특히 PVA-ECC(Polyvynyle Alcohol-Engineered Cementitious Composites)를 설계할 때 적절한 계면 성질을 확보하기 위한 물/결합제비가 0.25 ± 0.05 인 점을 감안하면(Yang et al. 2009), 고성능 감수제를 사용한다고 하여도 목표로 하는 복합재료의 물/결합제비는 이보다 커야 한다. 감수제는 재료분리가 발생하지 않는 범위내에서 최대한 많이 넣어 점성을 감소시켜야 한다. 섬유의 경우, 일반적으로 8~12 mm를 사용하고 있는데 길이가 짧을수록 점성이 낮아지기 때문에 짧은 섬유를 사용하여야 한다. 다만, 다른 미시역학 변수들이 동일할 경우 길이가 짧아질수록 섬유 가교 능력 즉, 최대 섬유 가교 응력과 상보에너지가 감소하기 때문에 변형률 경화거동을 확보하기 위해서는 섬유와 매트릭스 사이의 계면 특성을 변화시켜야 한다. 또한 일반적으로 섬유를 총부피의 2% 정도 혼입하는데 섬유의 양이 감소할수록 복합재료의 점성이 감소된다.

낮은 점성을 갖는 매트릭스 내에서 균일한 섬유 분포를 얻기 위해서는 섬유와 매트릭스의 혼합에 들어가는 에너지를 증가시키는 방법이 있다. 혼합 에너지는 혼합기의 회전 속도와 혼합 시간에 의해 결정되는데, 고인성 섬유 복합재료를 제조하는데 일반적으로 사용되는 호박믹서의 최대 회전속도보다 고회전 믹서를 사용하고, 섬유 혼입 후 혼합 시간을 증가시킬 경우 섬유 분포를 보다 균일하게 확보할 수 있다. 또한 적절한 범위내에서 증점제를 혼입하면 균일한 섬유 분포를 얻을 수 있다.

전술한 방법에 따라 낮은 점성과 균일한 섬유 분포를 얻었다고 하여도 매트릭스의 특성이 기존 고인성 섬유 복합재료에 사용되는 매트릭스의 특성과 다르기 때문에 고인성을 얻기 위해서는 적절한 계면 특성을 확보하여야 한다. PVA 섬유의 표면 오일 코팅량을 감소시킬 경우 화학적 부착력이 증가하여 최대 섬유 가교 응력을 증가시킬 수 있으며, Yang 등 (2007)의 연구에 따르면 플라이 애쉬를 첨가할 경우 계면이 보다 밀실해져 계면 마찰력이 증가되어 최대 섬유 가교 응력을 증가시킬 수 있다. 또한 안정상태 균열이론에 따르면 매트릭스의 파괴인성이 작을수록 복합재료가 고인성을 나타낼 확률 높아지기 때문에 골재를 사용하지 않는 것이 좋다. 이는 매트릭스의 파괴인성이 골재의 크기가 증가함에 따라 증가하기 때문이다.

Table 1 Range of water to cement ratio according to application (Rosquoet et al. 2003)

Application	Coating of prestressed cables	Sealing	Repair and consolidation of masonry structures	Soil or rock injection
W/C	0.35-0.42	0.5-1	0.5-1.5	1-2

2.2 미시역학이론에 기반한 섬유 가교 거동 해석

이절에서는 2.1절에서 기술한 방법을 적용하여 실험하기에 앞서 섬유의 계면 특성과 섬유량에 따른 섬유 가교 거동 특성을 분석하여 최적 섬유 혼입량을 결정하고자 한다.

2.2.1 이론적 배경 및 해석법

섬유복합재료가 다중 균열에 의한 변형을 경화 거동을 나타내기 위해서는 강도 조건과 에너지 조건을 만족하여야 한다(Leung, 1996, Li and Leung, 1992). 강도 조건은 균열 면에서 섬유에 의한 최고 가교 응력이 복합체의 균열 강도보다 커야 한다는 조건으로서, 이 조건이 만족되지 못하면 균열이 발생한 후 변형을 연화거동이 나타나면서 콘크리트와 같이 단일 균열에 의하여 파괴가 발생하게 된다. 에너지 조건은 안정상태균열이 발생하기 위한 조건으로서, 외부 하중의 변화가 없이 일정한 개구 변위 상태로 균열이 진전하기 위한 조건이다. 에너지 조건은 외부에서 한 일, 매트릭스 균열이 진전하는데 필요한 에너지, 그리고 섬유 가교 작용에 의하여 소산된 에너지 사이의 에너지 평형 조건에 의하여 정의되며, 응력과 개구 변위의 관계를 나타내는 섬유 가교 곡선에서 상보 에너지가 매트릭스 파괴 인성보다 클 때 성립한다(Marshall and Cox, 1988). 이 두 조건을 모두 만족하게 되면 복합재료에서 균열강도가 작은 곳부터 순차적으로 균열이 발생하여 변형을 경화거동에 의한 고인성이 나타나게 된다. 따라서 섬유 가교 거동 특성은 섬유복합재료의 성능을 결정하는 가장 중요한 특성이다. 섬유 가교 곡선에 영향을 주는 인자들은 섬유, 매트릭스, 그리고 섬유와 매트릭스의 계면 특성 등이 있다. 이들 특성은 파괴인성 실험과 섬유 인발 실험 등을 통하여 측정할 수 있으며, 이렇게 측정된 미시역학 변수는 섬유 가교 모델을 통하여 섬유 가교 거동을 이론적으로 해석할 수 있다. 이 연구에서는 Lin 등 (1999)에 의해 유도된 섬유 가교 모델과 강철호 등 (2009)에 의해 제시된 섬유 가교 곡선을 계산할 수 있는 수치적분법을 사용하여 섬유 가교 거동을 해석하였다. 식 (1)은 화학적 부착이 존재하는 경우 단일 섬유가 균열면에서 인발이 될 때의 개구변위(δ)와 그 때의 섬유 인발 하중($P(\delta)$)과의 관계를 나타낸다.

$$P(\delta) = \sqrt{\frac{\pi^2 E_f d_f^3 \tau_0 (1+\eta)}{4} \delta + \frac{\pi^2 E_f d_f^3 G_d (1+\eta)}{2}} \quad (1)$$

여기서, $\eta = V_f E_f / V_m E_m$ 이며, E_f 는 섬유의 탄성계수, E_m 은 시멘트 매트릭스의 탄성계수, V_f 및 V_m 은 각각 섬유와 시멘트 매트릭스의 부피비, d_f 는 섬유의 직경, τ_0 는 마찰 부착응력, G_d 는 화학적 부착력이다(Lin 1999).

화학적 부착과 파괴가 완료되면 마찰 부착응력만 남기 때문에 P 와 δ 의 관계는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(\delta) = \pi d_f \tau_0 \left[1 + \frac{\delta - \delta_0}{d_f} \beta \right] [L_e - (\delta - \delta_0)] \quad (2)$$

여기서 β 와 L_e 는 각각 미끌림 경화 계수와 섬유 매입 길이이며, δ_0 는 부착과 파괴가 완료되는 섬유 뽑힘 길이를 나타내며, 식 (3)을 통해 계산할 수 있다.

$$\delta_0 = \frac{2\tau_0 L_e^2 (1+\eta)}{E_f d_f} + \sqrt{\frac{8G_D L^2 (1+\eta)}{E_f d_f}} \quad (3)$$

단일 섬유의 인발 하중을 구한 후 균열면에서 다수 섬유의 가교 응력은 식 (4)에 나타난 바와 같이 단일 섬유 인발 하중을 매입길이와 섬유 각도에 따라 적분하고 Fig. 1에 제시된 섬유 가교 곡선을 계산하기 위한 알고리즘을 적용하면 섬유 가교 곡선을 구할 수 있다.

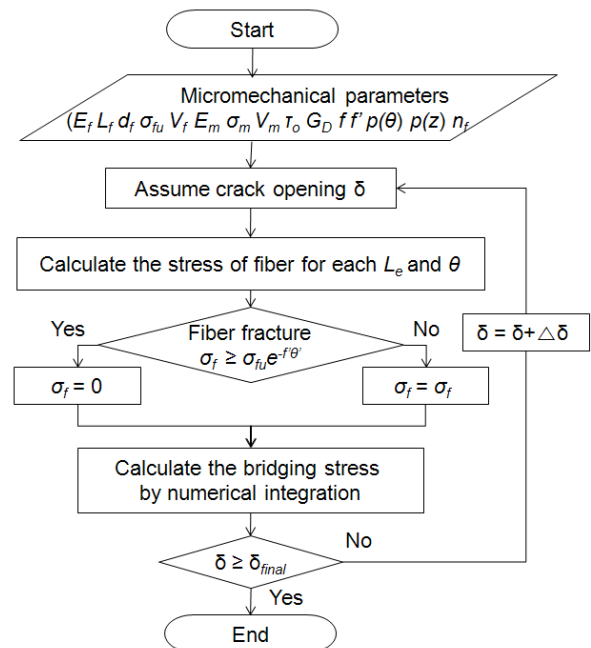


Fig. 1 Numerical procedure for calculation of fiber bridging curve

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

여기서, L_f 는 섬유의 길이, $P(\delta)$ 는 균열면에서 단일 섬유 가교 저항력이며, $p(\phi)$ 는 섬유가 시멘트 매트릭스에 묻힐 때 이루는 각의 확률밀도함수이고, $p(z)$ 는 섬유의 도심과 균열면까지의 거리에 대한 확률밀도함수이다.

섬유 가교 곡선을 구하는 절차는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 먼저, 입력된 미시역학 변수와 균열 개구변위에 대하여 각 섬유 매입길이와 각도에 따라 섬유에 유발된 응력이 식 (1)부터 식 (3)을 통해 계산된다. 섬유에 유발된 응력이 섬유 강도 이상이면 섬유의 파괴로 인하여 섬유가 저항할 수 있는 하중은 0이 되며, 미만이면 부과된 하중을 그대로 저항할 수 있다. 총 섬유 가교 응력은 수직적분을 통하여 계산되며 이러한 과정은 가정된 섬유 개구 변위가 마지막 균열 개구 변위에 이를 때까지 계속된다. 이에 대한 자세한 설명은 강철호 등(2009)의 논문에서 제시되어 있다.

2.2.2 최적 섬유 혼입량

Table 2는 섬유 가교 해석에 사용된 미시역학변수를 나타낸다. 섬유는 8 mm PVA 섬유를 가정하였다. 물/결합재비 및 플라이 애쉬 유무에 따라 계면 특성과 매트릭스의 탄성계수를 결정하였다. C1은 표준 PVA-ECC 대비 물/결합재비의 증가로 인한 매트릭스 강도 감소와 계면 부착력의 감소를 모사하기 위한 것이며, 대조 조건 대비 강도가 50% 감소하였다고 가정하여 화학적 부착과 마찰력이 절반으로 감소하였고, 매트릭스의 탄성계수도 절

Table 2 Micromechanical parameters used in calculating bridging stress vs. crack opening

Materials	Properties	Control	C1	C2
Fiber	Fiber diameter (μm)		39	
	Fiber length (mm)		8	
	Fiber elastic modulus (GPa)		40	
	Apparent fiber strength** (MPa)		1092	
Interface*	Chemical bond strength (J/m ²)	1.08	0.54	1.08
	Frictional bond strength (MPa)	1.31	0.65	1.57
	Slip-hardening coefficient		0.58	
	Snubbing coefficient		0.2	
	Fiber strength reduction factor		0.33	
Matrix	Elastic modulus (GPa)	20	10	10

* After Yang et al.(2008)

** Apparent fiber strength (2002)

반으로 감소한 것으로 가정하였다. C2는 섬유의 표면 오일 코팅량 감소에 따른 계면 부착력 증가와 플라이 애쉬 혼입에 따른 계면 부착력 증가를 모사하기 위한 것이다. Li 등 (2002)의 연구에 따르면 PVA 섬유의 표면 오일 코팅량이 1.2%에서 0.5%로 감소할 경우 화학적 부착 계수와 마찰 계수가 두 배로 증가한다. 따라서 C2의 경우 화학적 부착 계수와 마찰 계수를 다시 증가시켰고, 플라이 애쉬 혼입에 따른 마찰 부착 계수를 20% 증가시켰다 (Rosquoet et al. 2003). 미끌림 경화 계수, 스너빙 계수, 섬유 강도 감소 계수 등은 이들 영향에 대한 선행 연구가 없기 때문에 대조 조건, C1, C2 모두 동일한 값을 사용하였다.

Fig. 2는 세 가지 경우의 미시역학 변수들(Table 2)과 섬유 혼입량에 따른 최대 섬유 가교 응력과 상보에너지를 나타낸다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 섬유 혼입률이 증가함에 따라 섬유 가교 능력이 증가함을 알 수 있다. 기존 연구에 따르면 변형률 경화 거동을 위한 최소 조건은 최대 섬유 가교 응력과 균열 강도의 비가 1.45이고, 상보 에너

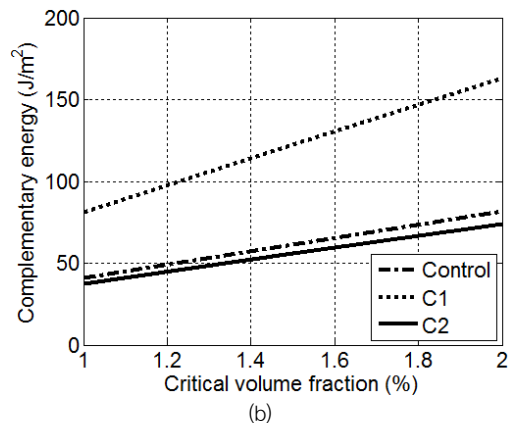
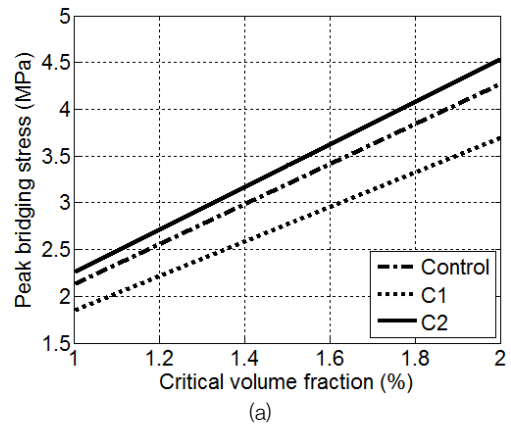


Fig. 2 (a) Peak bridging stress and (b) complementary energy according to fiber volume fraction

지와 매트릭스 파괴 인성의 비가 3이다(Li and Wu, 1992, Kanda and Li, 2006). 균열 강도와 매트릭스의 파괴 인성을 각각 2 MPa와 5 J/m²으로 가정할 경우, 변형률 경화 거동이 나타나기 위한 최대 균열 강도와 상보 에너지는 각각 2.9 MPa와 15 J/m²이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 에너지 조건은 모두 만족하는 반면 강도 조건의 경우 C1과 C2에서 최소 섬유 혼입률이 각각 1.6%와 1.3%로 나타났다.

3. 실험 방법

3.1 사용 재료 및 배합 설계

고인성 섬유복합재료를 개발하는데 성공적으로 적용되어 온 PVA 섬유를 보강섬유로 사용하였다. Table 3은 실험에 사용한 섬유의 물성을 나타낸다. 매트릭스의 강도 저하에 따른 계면 부착력의 감소를 보완하기 위하여 표면 오일 코팅량이 0.5%인 PVA 섬유를 사용하였고, 길이는 8 mm와 12 mm 두 종류를 사용하였다. 결합재로는 1종 보통 포틀랜드 시멘트, 분말도가 500 m²/kg인 3종 시멘트, 평균 직경이 15~20 μm인 플라이 애쉬(Class F)와 평균 직경이 3.0 μm인 플라이 애쉬(Class F)를 사용하였다. 화학 혼화제는 분말형의 증점제, 나프탈렌계 고성능 감수제를 사용하였으며, 물은 탈이온수(Deionized water)를 사용하였다. Table 4는 이 연구에서 조사한 배합을 나타낸다. 총 네 종류의 매트릭스와 섬유의 길이와 혼입량에 따라 세 종류의 섬유에 대하여 조사하였으며, 물/결합재 비는 0.5로 일정하게 유지하였다. 증점제와 고성능 감수제의 양은 예비 실험을 통하여 낮은 점성을 유지하면서 섬유가 균일하게 분포하도록 최적 혼입량을 결정하였다.

3.2 혼합 방법

섬유와 매트릭스의 혼합에너지를 증가시키기 위하여 회전 속도가 6,000 rpm인 믹서를 사용하였고, 혼입은 액체(물과 고성능 감수제), 고체(결합재와 증점제) 그리고

Table 3 Properties of PVA fibers

Diameter (μm)	Length (mm)	Apparent strength (MPa)	Elongation (%)	Oiling agent content (%)	Elastic modulus (GPa)
39	8, 12	1092	6	0.5	40

Table 4 Properties of cementitious binder

Mix #	GA1	GA2	GA3	GA4-1	GA4-2	GA4-3
Cement	Type I	0.5	0.5	-	-	
	Type III	-	-	0.25	0.5	
Fly ash	Normal	0.5	0.25	0.25	0.25	
	Fine	-	0.25	0.5	0.25	
<i>w/cm</i> ^a	0.5	0.5	0.5	0.5		
VMA/ <i>cm</i> ^b (%)	1.73	1.73	0.43	0.29	0.77	0.69
SP/ <i>cm</i> ^c (%)	1.50	1.50	2.17	2.17	2.60	2.43
Fiber volume (%)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.6
Fiber length (mm)	8	8	8	8	12	8

^a Water to cementitious material (cement + fly ash) ratio

^b Viscosity modifying admixture to cementitious material (cement + fly ash) ratio

^c Superplasticizer to cementitious material (cement + fly ash) ratio

Note: All numbers are mass ratios except for fiber volume

섬유 혼입의 3단계로 나누어 혼합하였다. 혼합 시간은 액체, 고체, 섬유 각각에 대하여 15초, 30초, 4분이며, 각 재료는 혼합기를 정지하지 않고 연속으로 투입하였다.

3.3 점성 측정 방법

Yang 등 (2009)과 Li (2009)의 연구에 따르면 점성은 마쉬콘 흐름 시간과 직접적인 상관관계를 가지고 있는 것으로 나타났다. 점성은 마쉬콘을 이용하여 간접적으로 측정하였는데, 점도계를 이용하여 바로 측정하지 않은 이유는 mm 단위의 섬유가 혼입된 섬유복합재료의 점성은 측정과정에서 재료의 비균질성이 유발되기 때문에 정확성이 떨어지기 때문이다. 이 연구에서 사용한 마쉬콘은 원뿔형으로 형상은 지름 118 mm, 높이 335 mm, 노출부의 높이 50 mm, 노출부의 지름이 18 mm이며, 1 리터의 굳기 전 실험체를 마쉬콘에 부은 후 흐름 시간을 측정하였다. 실험은 혼합이 완료된 후 바로 수행하였다.

마쉬콘 흐름 실험을 통해 간접적으로 얻은 복합재료의 점성 값의 범위를 알기 위하여 그라우팅 용으로 사용하는 두 가지 배합을 이용하여 점도계를 이용하여 점성을 측정하고 동시에 동일한 마쉬콘을 사용하여 흐름 시간을 측정하였다.

3.4 직접 인장 실험

일축 인장하에서 복합재료의 인장 성능을 평가하기 위하여 형상이 200×75×12.5 mm인 시편을 마쉬콘 흐름 실험 직 후 제작하였다. 타설 후, 수분 증발을 방지하기

위하여 표면을 플라스틱 쉬트로 덮고 24시간 후 탈형하여 온도 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 와 상대습도 $50 \pm 5\%$ 에서 재령 28일까지 기건양생하였다. 인장 실험을 수행하기에 앞서 75×50 mm 크기의 알루미늄판을 접착제로 부착하여 그림에 의한 실험체의 단부 손상을 방지하였으며, 인장실험은 Instron 실험기에서 0.1 mm/min. 속도로 변위 제어방식으로 수행하였다. 변위는 2개의 LVDT(측정길이=100 mm)를 실험체의 양측에 부착하여 측정하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 점성

그라우팅 용으로 사용하는 두 가지 시멘트 페이스트의 점성은 각각 0.04 Pa.s와 0.20 Pa.s로 측정되었고, 마쉬콘 흐름 시간은 각각 3초와 3.5초로 측정되었다. Table 5는 이 연구에서 조사한 여섯 가지 배합에 대한 마쉬콘 흐름 시간을 나타낸다. 측정과정에서 블리딩이나 섬유 뭉침 현상은 발견되지 않았다. Table 5의 실험 결과를 보면 유사한 형상의 마쉬콘으로 흐름 시간을 측정한 Li (2009)의 실험결과에서 매트릭스의 흐름 시간이 25초 이상일 경우에만 복합재료가 3% 이상의 고인성을 나타낸 것과 비교하면 이 연구에서 조사한 복합재료의 점성은 매우 낮은 것으로 유추할 수 있다. 특히 GA2, GA3 그리고 GA4-1 시편의 경우, 그라우팅 용으로 사용하는 시멘트 페이스트의 점성과 거의 유사한 점성을 갖는 것으로 나타났다. 반면 GA1, GA4-2 그리고 GA4-3의 점성은 이보다 큰 것으로 나타났다.

GA2는 GA1에서 일반 플라이 애쉬의 절반을 작은 입자크기의 플라이 애쉬로 치환하였고 다른 조건은 동일한 배합이다. 실험 결과를 보면 GA2가 점성이 더 작은 것으로 나타났는데 이는 작은 사이즈의 플라이 애쉬를 통하여 충전 밀도가 향상되었기 때문인 것으로 판단된다(de Larrard, 1999). GA3는 GA1과 GA2에 비하여 플라이 애쉬의 양이 1.5배 증가하고 시멘트의 종류가 1종 시멘트에서 3종 시멘트로 바뀐 배합이다. GA3에서는 고성능 감수제의 양을 늘리고 증점제의 양을 줄여도 섬유의 뭉침이 발생하지

않았으며, 이는 크기가 작은 입자의 양이 증가함으로써 고성능 감수제를 넣기 전에 매트릭스의 점성이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 실험 결과로부터 결합체의 종류와 양, 고성능 감수제와 증점제의 양을 조절함으로써 섬유 뭉침 없이 복합재료의 점성을 제어할 수 있다는 것을 알 수 있다. GA4-1의 경우도 GA3과 유사하게 고성능 감수제의 양을 늘리고 증점제의 양을 줄여도 섬유의 뭉침이 발생하지 않았다. GA4-1과 GA4-2를 비교하면 섬유의 양이 동일하더라도 섬유의 길이가 길어지면 점성이 증가하는 것으로 나타났다. GA4-1과 GA4-3을 비교하면 섬유의 양이 증가할수록 점성이 증가하는 것으로 나타났다. GA4-2와 GA4-3의 경우, GA4-1에 비하여 좋은 섬유 분산성을 얻기 위하여 더 많은 증점제가 필요하였고, 이 연구에서는 명확히 밝혀지지 않았으나 늘어난 증점제가 복합재료의 점성을 증가시킨 것으로 판단된다.

4.2 일축 인장 거동

Fig. 3은 여섯 가지 배합에 대한 일축 인장 실험 결과를 나타낸다. 모든 배합에서 다중 균열에 의한 변형을 경화거동이 어느 정도 나타났다. GA2는 GA1에 비하여 큰 인성을 나타내었고, 인장강도 또한 약간 증가하였다. 이는 입자 크기가 작은 플라이 애쉬를 혼입함으로써 GA1에 비하여 포졸란 반응 속도가 빠르고, 섬유와 매트릭스 사이의 계면이 더 치밀해져 계면 마찰력이 증가함에 따라 섬유 가교 능력이 향상된 것으로 판단된다. GA3의 경우, GA1과 GA2에 비하여 균열 강도와 인성 모두 감소하였는데 이는 플라이 애쉬의 양이 증가함에 따라 포졸란 반응이 일어나기 위해 필요한 수산화 칼슘의 양이 충분히 생성되지 못하여 균열 강도와 계면 마찰력이 감소하였기 때문인 것으로 판단된다. 인성이 낮은 이유는 매트릭스의 파괴인성과 섬유 인발 실험을 수행한 후 미시역학 해석을 통하여 분석할 수 있으나, 매트릭스의 파괴인성 감소량보다 계면 마찰력의 감소량이 더 커서 섬유 가교 능력이 충분하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 시멘트의 반응이 빠른 3종으로 바꾸고 시멘트의 양을 GA3에 비하여 두 배 증가시킨 GA4 시리즈의 경우 다른 배합에 비하여 다중 균열 발생에 의한 명확한 변형을 경화 거동을 나타내고 있으며, 큰 인장 변형 능력을 나타내고 있다. 이는 2.1절의 낮은 점성과 고인성을 얻기 위한 전략과 2.2절의

Table 5 Properties of cementitious binder

Mix #	GA1	GA2	GA3	GA4-1	GA4-2	GA4-3
Flow time (sec.)	4.67	3.85	3.25	3.22	4.60	4.25

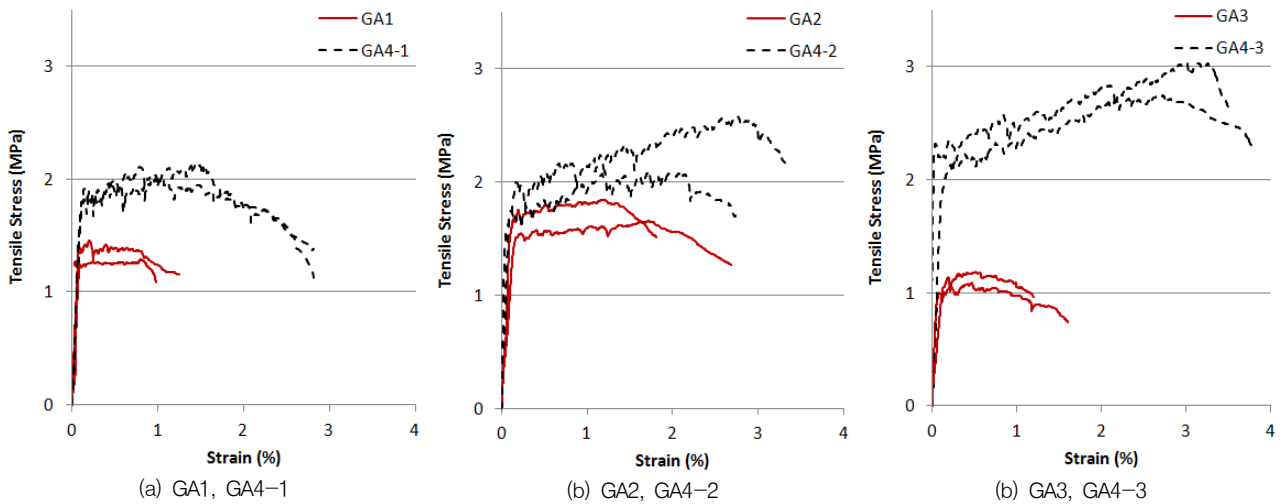


Fig. 3 Tensile stress and strain curves

미시역학 해석에 의한 가정에 따라 매트릭스의 특성(파괴 인성, 탄성계수)과 섬유와 매트릭스의 계면 특성이 다중 균열에 의한 변형을 경화 거동을 나타내기 위한 조건에 최적화되었기 때문이다. 섬유의 길이가 8 mm이고 섬유량이 1.3 vol. %인 GA4-1의 경우, 균열강도, 인장강도, 인장변형 능력은 각각 1.8 MPa, 2.0 MPa, 1.5%로 나타났다. 인장강도를 지난 이후에도 급격한 파괴는 발생하지 않았다. 섬유의 길이가 12 mm로 바뀐 GA4-2와 섬유의 길이는 8 mm이지만 섬유량이 1.6 vol. %로 늘어난 GA4-3는 GA4-1에 비하여 인장강도 및 인장변형 능력이 향상되었다. GA4-3의 경우, 인장변형 성능이 약 3%로 기존 고인성 섬유복합재료와 동일한 인장변형 성능을 나타내었다. 또한 GA4-3의 경우 GA4-2에 비하여 복합재료의 점성도 낮으면서 인장 성능 또한 우수하였다. 이러한 사실로부터 최대한 짧은 것으로 정하고 섬유의 양을 조절하는 것이 복합재료의 점성 및 인장 성능을 동시에 제어하는데 효과적인 것을 알 수 있다.

5. 결론

이 연구에서는 낮은 점성이 요구되는 구조물에 적합한 균기 전의 유동특성을 갖고 있으면서, 굳은 후에는 다중 균열을 바탕으로 변형을 경화 거동을 보이는 섬유복합재료의 제조기법을 제시하였다. 이를 위하여 미시역학 이론을 바탕으로 한 섬유 가교 거동 해석과 점성 측정 실험 및 일축인장 실험을 수행하였고, 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 사용재료, 혼합 방법, 혼화재료의 종류 및 양을 최적화함으로써 낮은 점성의 모르타르 내에서 균일한 섬유 분산성을 얻고, 미시역학 및 파괴역학 이론을 바탕으로 한 해석 기법을 이용하여 동시에 변형을 경화 거동을 나타내는 섬유복합재료의 배합 및 제조기법을 제시하였다.
- (2) 결합재의 종류 및 양과 섬유의 길이 및 양에 따른 여섯 가지 배합에 대한 점성 측정 결과 그라우팅에 적합한 점성을 만족시키기 위해서는 섬유 길이 8 mm와 섬유 혼입량 1.3%가 최적 값인 것으로 나타났다.
- (3) 일축인장 실험 결과 3종 시멘트, 일반 플라이 애쉬와 작은 크기의 플라이 애쉬가 각각 1.0, 0.5, 0.5의 비율로 된 결합재(GA4 시리즈 배합)가 인장강도 2.0~2.8 MPa, 인장 변형 성능 1.5~3.0% 범위의 일축인장 성능을 갖는 고인성 섬유복합재료를 제조하는데 적합한 것으로 나타났으며, 점성을 고려하였을 때, GA4-1 배합이 그라우팅에 가장 적합한 것으로 나타났다.
- (4) 섬유량과 길이가 각각 1.3%와 12 mm이고 섬유량과 길이가 각각 1.6%와 8 mm인 두 배합의 점성과 인장 성능을 비교한 결과, 후자의 경우 점성이 낮으면서 인장성능이 우수하게 나타났으며, 이로부터 섬유의 길이보다는 섬유의 양이 복합재료의 점성 및 인장 성능을 동시에 제어하는데 더 효과적임을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2011년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구이며(지역거점연구단육성사업/바이오하우징연구사업단과 바이오하우징연구소), 또한 2011년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행된 연구임.

참고문헌

1. 강철호, 이방연, 박승범, 김윤용, “보강 섬유 배향각에 대한 확률밀도함수를 고려한 ECC 내의 섬유 가교 모델”, 한국전산구조공학회 논문집, 제22권 6호, 2009, pp.587-596.
2. Bentur, A. “Fiber-reinforced Cementitious Materials”, Materials Science of Concrete, The American Ceramic Society, 1989, pp.225-285.
3. de Larrard, F., “Concrete Mixtrue Proportioning: a Scientific Approach”, E & FN Spon, New York, 1999.
4. Kanda, T. and Li, V. C., “Practical Design Criteria for Saturated Pseudo Strain Hardening Behavior in ECC”, Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 4, No. 1, 2006, pp.59-72.
5. Leung, C. K. Y., “Design criteria for pseudoductile fiber-reinforced composites”, Journal of Engineering Mechanics, vol. 122, No. 1, 1996, pp.10-14.
6. Li, M., “Multi-Scale Design for Durable Repair of Concrete Structures”, The University of Michigan, Ph. D. Thesis, 2009.
7. Li, V. C., “On Engineered Cementitious Composites (ECC) - A Review of the Material and its Applications”, Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 1, No. 3, 2003, pp.215-230.
8. Li, V. C. and Leung, K. Y., “Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites”, Journal of Engineering Mechanics, vol. 118, No. 11, 1992, pp.2246-2264.
9. Li, V. C. and Wu, H. C., “Conditions for Pseudo Strain Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites”, Journal of Applied Mechanics Review, vol. 45, No. 8, 1992, pp.390-398.
10. Li, V. C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A and Saito, T., “Interface Tailoring for Strain-Hardening Polyvinyl Alcohol-Engineered Cementitious Composites (PVA-ECC)”, ACI Materials Journal, vol. 99, No. 5, 2002, pp.463-472.
11. Lin, Z., Kanda, T. and Li, V. C., “On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites”, Concrete Science and Engineering (RILEM), vol. 1, 1999, pp.173-184.
12. Marshall, D.B. and Cox, B.N., “A J-integral method for calculating steady-state matrix cracking stressed in composites”, Mechanics of Materials, vol. 7, No. 2, 1988, pp.127-133.
13. Mobasher, B., Stang, H. and Shah, S. P., “Microcracking in Fiber Reinforced Concrete”, Cement and Concrete Research, vol. 20, 1990, pp.665-676.
14. Rosquoet, F., Alexis, A., Khelidj, A. and Phelipot, A., “Experimental study of cement grout: Rheological behavior and sedimentation”, vol. 33, 2003, pp.713-722.
15. Sonebi, M., “Rheological properties of grouts with viscosity modifying agents as diutan gum and welan gum incorporating pulverised fly ash”, Cement and Concrete Research, vol. 36, 2006, pp.1609-1618.
16. Yang, E. H. and Li, V. C., “Strain-hardening Fiber Cement Optimization and Component Tailoring by means of a Micromechanical Model”, Journal of Construction and Building Materials, vol. 24, 2010, pp.130-139.
17. Yang, E. H., Sahmaran, M., Yang, Y. and Li, V. C., “Rheological Control in the Production of Engineered Cementitious Composites”, ACI Materials Journal, vol. 106, No. 4, 2009, pp.357-366.
18. Yang, E. H., Wang, S., Yang, Y., Li, V. C., “Fiber-bridging constitutive law of engineered cementitious composites”, Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 6, No. 1, 2008, pp.181-193.
19. Yang, E. H., Yang, Y. and Li, V. C., “Use of High Volumes of Fly Ash to Improve ECC Mechanical Properties and Material Greenness”, ACI Materials Journal, vol. 104, No. 6, 2007, pp.620-628.

(접수일자 : 2011년 6월 5일)

(수정일자 : 2011년 10월 11일)

(심사완료일자 : 2011년 10월 24일)

요 지

이 연구에서는 타설 과정에서 낮은 점성이 요구되는 구조물에 적합한 낮은 점성을 가지면서 다중균열에 의한 변형률 경화거동을 보이는 고인성 섬유복합재료를 제조하기 위한 재료와 제조 방법을 제시하고자 한다. 섬유복합재료의 낮은 점성과 고인성을 얻기 위하여 미시역학과 파괴역학에 기반한 이론적 해석 방법과 제조 기법을 적용하였다. 2~3MPa 범위의 인장강도를 갖는 복합재료에 적합한 최적의 섬유 양과 길이, 그리고 섬유와 매트릭스의 계면 특성을 미시역학과 안정상태 균열 이론을 이용하여 해석적으로 구한 후 여섯 가지 배합을 결정하였다. 여섯 가지 배합으로 제조한 실험체는 실험을 통하여 점성과 일축인장 성능을 검증하였다. 실험 결과 굳기 전에는 그라우팅에 적합한 낮은 점성을 갖고있어서 굳은 후에는 1.5% 이상의 고인성을 갖는 변형률 경화 섬유복합재료를 제조할 수 있는 것으로 나타났다.

핵심 용어 : 그라우팅, 섬유, 일축인장 거동, 변형률 경화 시멘트 복합재료
