

섬유의 형상비에 따른 고연성 무시멘트 복합재료의 인장특성

Tensile Characteristics of High-Ductile Cementless Composite According to Aspect Ratio of Fiber

최정일¹ · 박세연² · 강수태³ · 오성우⁴ · 이방연^{5*}

Jeong-Il Choi¹ · Se Eon Park² · Su-Tae Kang³ · Sungwoo Oh⁴ · Bang Yeon Lee^{5*}

(Received August 30, 2018 / Revised September 16, 2018 / Accepted September 16, 2018)

The purpose of this study is to investigate experimentally the effects of aspect ratio of polyethylene fiber on the compressive strength and tensile behavior of alkali-activated cementless composite. Two mixtures were determined according to aspect ratio values of polyethylene fibers, and the compressive strength and tension tests were performed. Test results showed that the effect of aspect ratio of fiber on the compressive strength was negligible and the tensile strength, ductility, and number of cracks of the mixture including the fiber with high aspect ratio were higher than those of the mixture including the fiber with low aspect ratio. On the other hand, the crack spacing and crack width were low in the mixture including the fiber with high aspect ratio.

키워드 : 형상비, 무시멘트 복합재료, 압축강도, 섬유, 인장거동

Keywords : Aspect ratio, Cementless composite, Compressive strength, Fiber, Tensile behavior

1. 서론

콘크리트는 지구상에서 어떠한 합성 재료보다도 많은 양이 생산/소비되고 있으며, 나무, 철, 플라스틱 그리고 알루미늄을 포함한 모든 산업용 건설재료보다 약 2배 정도 건설에 사용되었다(Van Damme 2018). 이는 콘크리트가 다른 건설재료와 비교하여 경제적이며 가격 대비 압축강도가 높고 내구성이 높은 장점을 갖고 있기 때문이다. 그러나 콘크리트는 인장강도가 압축강도의 10% 정도로 작고(Mindess et al. 2003), 취성적인 거동을 갖는 단점을 갖고 있다. 이러한 콘크리트의 역학적 단점을 개선하기 위하여 단섬유를 혼입한 섬유보강 콘크리트를 개발하였으며(ACI Committee 544, IR 1996), 특히 미시역학과 파괴역학 이론을 바탕으로 높은 연성과 변형경화현상이 나타나는 고연성 콘크리트를 개발하였다(Maalej

and Li 1994). 콘크리트의 또 다른 단점은 생산과정에서 많은 이산화탄소를 배출하는 한다는 것이다(Malhotra 2001). 이에 많은 연구자들이 포졸란 반응이나 잠재수경성을 갖는 재료를 이용하여 시멘트의 사용을 줄이거나 시멘트를 사용하지 않은 콘크리트를 개발하는 연구가 수행되었으며, 현재 활발히 연구되고 있다(Roy 1999; Pacheco-Torgal et al. 2008; Shi et al. 2006).

최근에 콘크리트의 역학적 측면과 환경적 측면의 단점을 동시에 개선하기 위하여 알칼리활성 결합재와 합성섬유를 활용하여 고연성 무시멘트 복합재료를 개발하기 위한 연구가 수행되었다. Lee et al.(2012)은 알칼리활성 슬래그와 폴리비닐알코올 섬유를 이용하여 일반 콘크리트와 유사한 강도를 나타내면서 4% 이상의 고연성을 나타내는 복합재료를 개발하였으며, Ohno and Li(2014)는 알칼리활성 플라이애쉬 결합재와 폴리비닐알코올 섬유를 이용

* Corresponding author E-mail: bylee@jnu.ac.kr

¹전남대학교 건축학부 박사과정 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

²전남대학교 건축학부 석사과정 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

³대구대학교 건설시스템공학과 부교수 (Department of Civil Engineering, Daegu University, Daegu 38453, Republic of Korea)

⁴(재)한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터 선임연구원 (Construction Technology Research Center, Korea Conformity Laboratories, Seoul 08503, Korea)

⁵전남대학교 건축학부 부교수 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

하여 유사한 역학성능을 나타내는 복합재료를 개발하였다. Choi et al.(2016)은 알칼리활성 슬래그 결합재와 폴리에틸렌 섬유를 이용하여 압축강도는 55MPa이고, 인장강도가 13MPa이며, 인장변형능이 7.5%에 달하는 우수한 성능을 나타내는 복합재료를 개발하였다.

고연성 섬유보강 복합재료의 인장거동은 매트릭스의 특성인 강도, 탄성계수, 균열강도, 파괴인성 등과 섬유의 특성(길이, 직경, 표면특성, 탄성계수, 양 등)의 영향을 받는다. 또한 매트릭스와 섬유 사이의 계면특성에 영향을 받는다. 기존 연구를 통해 알칼리활성 결합재 기반 복합재료의 우수한 인장 특성이 확인되었지만, 기존의 연구는 결합재로 사용되는 슬래그나 플라이애쉬의 종류 또는 알칼리 활성화제의 종류 및 양에 따른 영향에 대한 것으로 제한되어 있다. 이 연구의 목적은 수산화칼슘을 단일 알칼리 활성화제로 사용한 슬래그 결합재에 대하여 폴리에틸렌 섬유의 형상비가 복합재료의 거동에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 조사하는 것이다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료

2.1.1 결합재

이 연구에서는 고로슬래그와 수산화칼슘을 결합재로 사용하였다. 고로슬래그는 KS F 2563에 규정된 고로슬래그 미분말 3종 분말도(4,320cm²/g)를 사용하였으며, 밀도는 2.92cm³/g이다. XRF (X-ray fluorescence) 분석을 통한 고로슬래그의 화학적 성분은 Table 1과 같다. 고로슬래그의 잠재수경성을 활성화시키기 위하여 분말형의 수산화칼슘(Ca(OH)₂)을 알칼리 활성화제로 사용하였다.

Table 1. Properties of slag

Material	Chemical composition(%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	etc.
GGBFS*	30.6	13.8	0.5	40.4	8.0	4.0	0.9	0.5	1.3

* GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag

Table 2. Properties of fiber

Name	Length (mm)	Diameter (μm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Density (g/cm ³)
PE750	12	16	750	3,030	112	0.97
PE375		32	375			

2.1.2 섬유

두께가 다른 두 종류의 폴리에틸렌 섬유를 보강섬유로 사용하였다. 두께를 제외하고 다른 물리적/화학적 성질은 모두 동일하며, 두께차이에 따라 형상비가 2배 차이가 난다. 두 섬유의 물성은 Table 2와 같다. 섬유의 형상비 차이는 섬유와 매트릭스 사이의 접촉 면적의 차이를 발생시키게 되어 복합재료의 균열간격, 균열폭, 인장변형능 및 인장강도 등에 영향을 미치게 된다. 다른 조건이 동일한 경우 이 연구에서 정한 것과 같이 섬유의 형상비가 2배 차이나게 되면 섬유와 매트릭스 사이의 계면 면적이 2배 차이 나게 되고 이로 인하여 균열면에서부터 섬유를 통해 매트릭스로 전달되는 마찰력이 2배 빨리 증가하게 된다. 이 연구에서는 이러한 영향을 조사하기 위하여 화학적 부착이 거의 없는 소수성 성질을 갖는 폴리에틸렌 섬유를 보강섬유로 선정하였다.

2.1.3 혼화제

섬유의 균질한 분산과 적절한 유동성을 확보하기 위하여 폴리 카르본산계 고성능 감수제와 증점제를 사용하였으며, 실험체 제작 과정에서 의도하지 않은 기포로 인하여 압축강도와 인장거동에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 소포제를 사용하였다.

2.2 배합 및 양생 방법

Table 3은 이 연구에서 조사한 배합을 나타낸다. 매트릭스를 이루는 재료의 종류 및 양은 모두 동일하고 Table 2에 제시된 형상비가 다른 두 종류의 폴리에틸렌 섬유를 사용한 점에 차이가 있다. PE750 배합은 형상비가 750인 섬유를 사용한 배합이고, PE375는 형상비가 375인 섬유를 사용한 배합이다. 고연성 복합재료의 경우 일반적으로 섬유를 전체 부피대비 약 2%를 사용하고 있는데(Li and Li 2013; Kim et al. 2003; Yang et al. 2009), 이 연구에서는 인장강도가 높고 형상비가 큰 폴리에틸렌 섬유를 사용하였기 때문에 두 배합 모두 1.75%를 사용하였다. 복합재료의 거동에 미치는 골재의 영향을 배제하기 위하여 골재는 사용하지 않았다.

실험체 제작을 위하여 먼저 분말형인 슬래그와 알칼리 활성화제를 혼합기에 넣고 1분 동안 건비빔하였다. 이 후 배합수를 혼합하고 바로 화학혼화제인 고성능감수제, 증점제와 소포제를 투입하

Table 3. Mixture proportion

Binder		Water	SP* (%)	VMA* (%)	AF* (%)	Fiber (Vol. %)
GGBFS	Ca(OH) ₂					
0.90	0.10	0.30	0.35	0.01	0.10	1.75

* SP: Superplasticizer, VMA: Viscosity modifying agent, AF: Anti-foamer

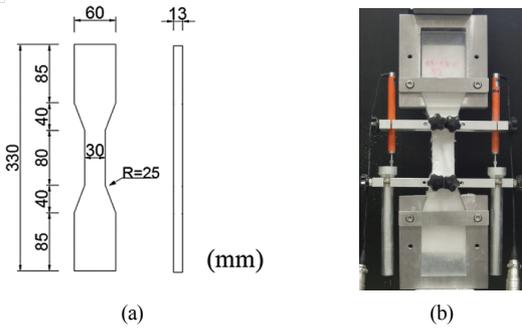


Fig. 1. (a) Dimension of specimen and (b) test setup

여 약 3분간 추가로 혼합하였다. 페이스트가 균질한 상태인 것과 균질한 섬유 분산을 위해 적절한 유동상태인 것을 확인한 후 섬유를 서서히 투입하였다. 섬유를 모두 혼합한 후 약 4분 동안 추가로 혼합을 실시하였다.

혼합이 완료된 후 압축강도 측정을 위하여 50mm 입방형 공시체를 3개 제작하였다. 일반적으로 인장거동은 압축에 비하여 편차가 크기 때문에 인장거동을 평가하기 위한 실험체는 배합별로 6개씩 제작하였다. 인장실험을 위한 실험체의 형상은 Fig. 1(a)와 같다. 실험체를 제작한 후 양생 온도 (23 ± 3)°C, 상대습도 (60 ± 5)%에서 2일 동안 기건 양생을 한 후 탈형하였다. 실험체를 탈형 후 (23 ± 2)°C의 양생 수조에서 재령 28일까지 수중양생을 실시하였다.

2.3. 실험 방법

밀도는 실험체 제작하는 과정에서 과도한 기포의 생성에 의한 역학적 성능 변화를 확인하기 위하여 압축강도용 실험체를 이용하여 압축강도 측정 전에 측정하였다. 밀도는 실험체의 공기 중 무게와 수중 무게를 측정하여 계산하였다.

압축강도는 KS L 5105에 따라 측정하였으며, 일축인장 실험은 일본토목학회에서 제안한 방법에 따라 실시하였다(JSCE 2008). 일축인장 실험은 최대용량 2톤의 인장 실험기를 이용하여 수행하였으며, 0.1mm/min 속도의 변위 제어 방식으로 실시하였다. 하중은 실험기에 부착된 로드셀로 측정하였으며, 변위를 측정하기 위하여 Fig. 1(b)와 같이 단면이 일정한 부분의 상하부에 지그를 설치한 후 변위측정기 두 개를 설치하였다. 설치된 변위측정기는 80mm 사이에 발생한 변위를 측정하게 되고, 측정된 2개의 변위값을 평균하여 각 실험체의 평균 변형량을 계산하였다. 응력은 로드셀에서 측정된 하중을 단면적(390mm²)으로 나누어 계산하였으며, 변형률은 변형량을 80mm로 나누어 계산하였다.

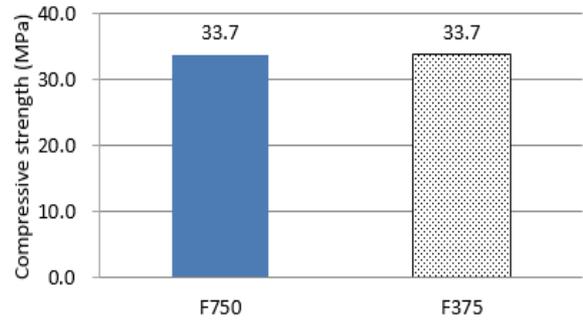


Fig. 2. Compressive strength

3. 실험 결과 및 분석

3.1. 밀도와 압축강도

Fig. 2는 이 연구에서 조사한 두 배합의 압축강도는 나타낸다. 두 배합은 동일한 압축강도 값을 나타내어 섬유 형상비에 따른 영향이 없는 것으로 나타났다. 다만, F750 배합의 표준편차 (2.40MPa)가 F350 배합의 표준편차(0.77MPa)보다 크게 나타났다. 밀도의 경우 F750 배합이 1.99g/cm³으로 측정되었고, F350 배합이 2.00g/cm³으로 측정되어 거의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 이론적 밀도인 2.00g/cm³과 일치하는 것으로 나타났다. 이론적 밀도는 재료의 혼입량과 배합을 통해 계산하였다. 이를 통해 이 연구에서 적용한 재료 및 제작 방법으로 실험체를 제작하는 경우 의도하지 않은 기포의 생성을 방지할 수 있는 것을 알 수 있으며, 기포에 의한 압축강도의 영향이 배제되었음을 알 수 있다.

3.2 일축 인장

Fig. 3은 이 연구에서 조사한 두 배합의 인장응력과 변형률의 관계를 나타내는 그래프이다. 두 배합 모두 초기 균열발생이후 일반 콘크리트나 변형연화 거동을 나타내는 섬유보강 콘크리트와 달리 다중 균열 발생 및 변형경화 거동과 연성거동을 나타내었다. 두 배합 모두 균열이 발생할 때마다 순간적인 하중 감소가 나타났는데 이는 변위제어 방식으로 하중을 가하였기 때문이며, 하중 감소는 균열이 발생할 때마다 발생한 균열의 폭이 순간적으로 증가하면서 실험체의 다른 부분에 응력 이완이 발생하기 때문이다. 따라서 하중감소가 발생하는 개수는 균열의 개수와 일치한다. 균열이 순차적으로 발생하는 이유는 실험체의 위치별로 균열강도가 다르기 때문이다. 변형경화 현상은 매트릭스의 균열 강도에 비하여 섬유가공응력이 큰 경우에 발생하며, 이 조건이 만족될 때까지 유지된다. 다중 균열과 변형경화 현상이 발생하기 위해서는 강도

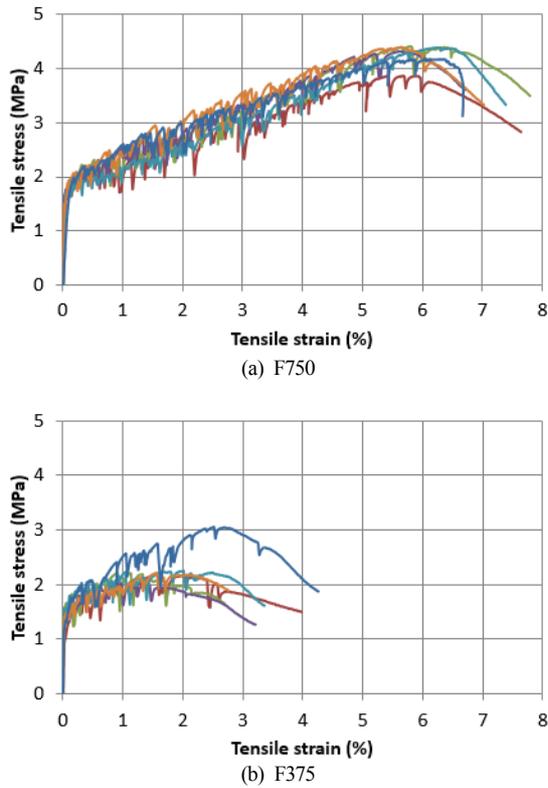


Fig. 3. Tensile stress-strain curves

조건이외에도 에너지 조건이 만족되어야 하며, 에너지 조건이 만족되면 균열 폭이 증가하는데 필요한 에너지보다 균열이 진전되는데 더 적은 에너지가 필요하기 때문에 일정한 균열폭을 갖는 안정 상태 균열이 발생할 수 있다. 섬유가교응력이 균열강도에 비하여 작거나 에너지 조건이 만족되지 않은 부분이 있게 되면 그 부분의 균열 폭이 증가하면서 국부 파괴가 발생하게 되고 변형연화거동이 시작된다.

압축강도 측정값과 달리 두 배합의 인장강도와 인장변형성능은 큰 차이를 나타내었다. 재료의 인장거동은 첫 번째 균열강도, 인장강도, 인장변형성능으로 정량적으로 나타낼 수 있다. Fig. 4는 두 배합의 첫 번째 균열강도, 인장강도, 인장변형성능, 그리고 인성을 나타낸다. 첫 번째 균열강도는 Fig. 3의 인장응력과 변형률 그래프에서 첫 번째 하중 감소가 나타났던 부분의 응력을 의미하고, 인장강도는 최대 응력을 의미한다. 인장변형성능은 인장강도에 해당하는 인장변형률을 의미한다. 인성은 응력과 변형률 곡선의 아래 면적을 나타내며, 파괴될 때까지 에너지 흡수 능력을 나타낸다. 이 연구에서는 인성을 계산할 때 변형경화거동이 나타난 부분까지만 고려하였다.

첫 번째 균열강도는 F750 배합이 F375 배합에 비하여 16.7%

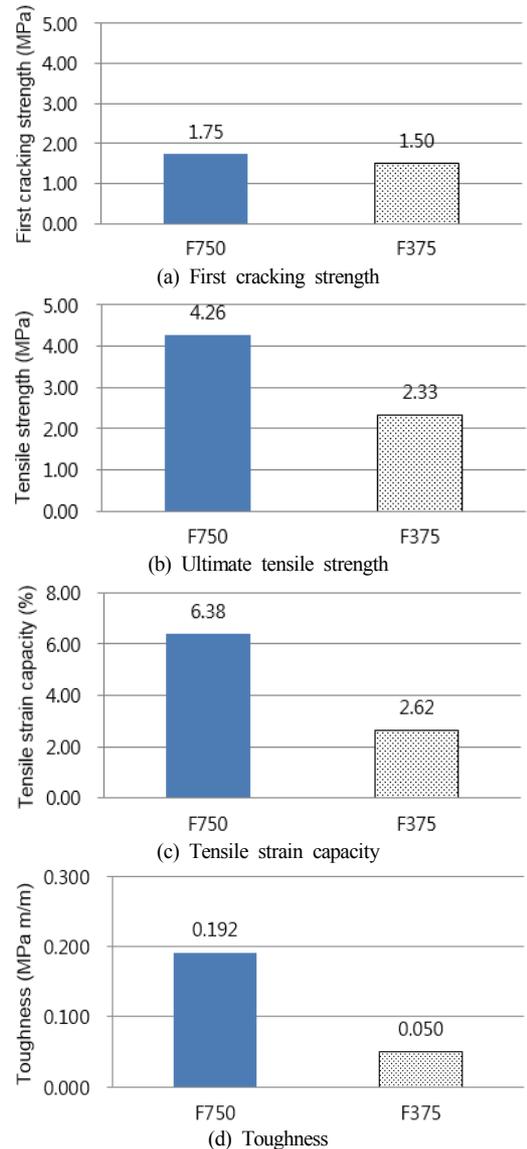


Fig. 4. Tensile behavior

높은 것으로 나타났으며, 압축강도 대비 첫 번째 균열강도는 F750 배합이 5.2%로 F375 배합의 4.4%에 비하여 0.8 percentage points 높게 나타났다.

인장강도는 F750 배합이 F375 배합에 비하여 83.2% 높게 나타났는데 이는 섬유의 형상비에 따른 영향이다. 2.1.2절에 기술된 바와 같이 F750 배합에 사용된 폴리에틸렌 섬유의 형상비는 F375 배합에 사용된 섬유의 형상비와 비교하여 2배이며, 이로 인하여 섬유와 매트릭스의 계면 면적이 2배이다. 계면 면적이 2배이면 섬유와 매트릭스 사이의 마찰부착력 등 다른 인자 특성들이 동일한 경우 균열면에서 섬유의 가교 능력이 2배가 될 수 있다. 예측된

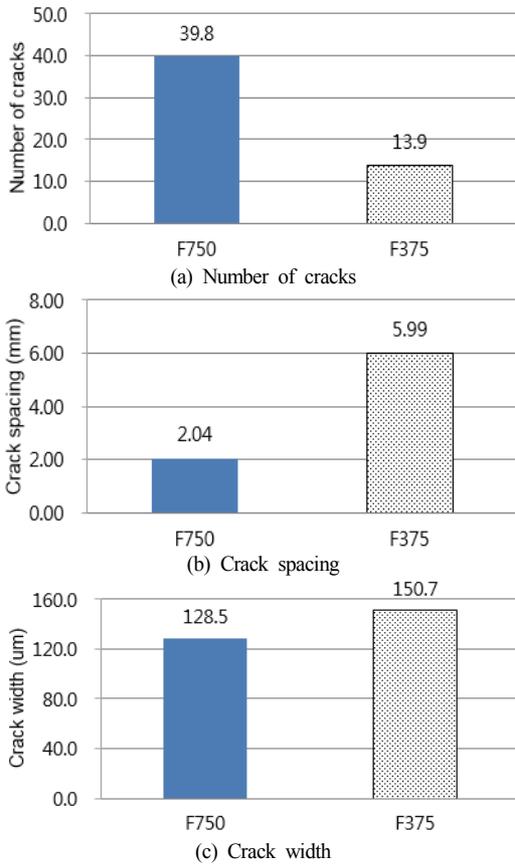


Fig. 5. Cracking pattern

인장강도를 통해 이러한 사실이 실험적으로 증명되었으며, 다른 조건이 동일한 경우 형상비가 큰 섬유를 사용하면 인장강도를 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다. 압축강도 대비 인장강도의 비는 F750 배합과 F375 배합이 각각 12.7%와 6.9%로 나타나 5.8 percentage points 차이가 있는 것으로 나타났다. 첫 번째 균열강도 대비 인장강도의 비는 F750 배합과 F375 배합이 각각 2.4와 1.6으로 나타났다. 첫 번째 균열강도 대비 인장강도의 비는 다중 균열과 변형경화현상이 나타나기 위한 이론적 조건 중의 하나인 강도 지표이며, 다중 균열과 변형경화현상이 나타나기 위해서는 이 지표 값이 최소 1보다 커야한다. 이 지표 값이 클수록 다중 균열과 변형경화현상이 나타날 확률과 인장변형능력이 크게 나타날 확률이 커지게 된다(Kanda and Li 2006).

F750 배합의 인장변형능력은 F375 배합에 비하여 2.43배 높은 것으로 나타나 기존의 연구결과와 유사하게 강도 지표가 높은 배합의 인장변형능력이 크게 나타났다. 이 연구를 통해 섬유의 형상비를 조절하면 인장강도와 인장변형능을 동시에 향상시킬 수 있다는 것을 확인하였다. F750 배합의 인성은 F375 배합에 비하여 3.8

배 높은 것으로 나타났다. 인장강도 증가나 인장변형능력의 증가에 비하여 인성의 증가량이 크게 나타난 이유는 인성은 인장강도의 증가와 인장변형능 증가가 동시에 고려되는 성능이기 때문이다.

인장변형능은 균열개수와 균열폭에 의해 결정된다. 하중을 받고 있는 상태에서 균열이 발생한 부분의 변형은 균열이 발생한 부분의 변형에 비하여 매우 작기 때문에 균열개수와 균열폭을 곱한 값이 재료의 총 변형과 대략적으로 일치한다. Fig. 5는 균열 패턴을 정량적으로 나타낼 수 있는 균열개수, 균열간격, 균열폭을 나타낸다. 균열개수는 단면적이 일정하고 변위계를 통해 변형량을 측정할 구간인 길이 80mm 내에 발생한 균열의 개수를 의미한다. 균열개수는 인장실험 종료 후 각 실험체의 양 측면의 균열을 육안으로 관찰하여 개수를 세었다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 F750 배합의 균열개수는 F375 배합에 비하여 2.9배 많은 것으로 나타났다.

균열간격은 변형 측정구간인 길이 80mm를 균열개수로 나누어 계산하였으며, 균열개수와 반비례 관계를 갖는다. F750 배합의 균열간격은 F375 배합에 비하여 66.0% 작은 것으로 나타났으며, 이는 섬유의 형상비 차이에 따른 섬유에서 매트릭스로 전달되는 마찰력의 차이 때문인 것으로 판단된다. 균열이 발생하기 전에는 섬유와 매트릭스가 일체거동을 하여 외력을 섬유와 매트릭스의 탄성계수 차이에 따라 분담하게 된다. 특정 부분에서 균열이 발생하게 되면 균열부분에서는 섬유가 균열면에서 가교작용을 하여 모든 외력에 저항하고, 균열면으로부터 섬유가 매립된 깊이까지 계면부착을 통해 섬유로부터 매트릭스로 외력이 전달된다. 매트릭스에 전달된 외력에 의해 유발되는 매트릭스의 응력이 매트릭스의 균열강도보다 크게 되면 그 부분에서 새로운 균열이 발생하게 된다. 즉, F750 배합의 균열간격이 F375 배합에 비하여 작다는 의미는 이미 발생한 균열에서 계면부착을 통해 매트릭스로 전달되는 인장응력의 증가비율이 더 크다는 것이다.

Fig. 5(c)의 균열폭은 복합재료의 변형이 모두 균열부분에서 발생하였다는 가정하에 변형 측정구간인 길이 80mm에 발생한 변형량을 균열개수로 나누어 계산한 것이다. 이때 변형량은 인장강도와 인장변형능에 해당하는 변형량을 의미한다. 이와 같이 계산할 수 있는 이유는 매트릭스의 변형이 균열부분의 변형에 비하여 매우 작기 때문이다. 이 균열폭은 복합재료가 인장강도에 도달하였을 때의 값으로 간주할 수 있는데 이는 복합재료가 인장강도에 도달한 이후 추가적인 균열이 발생하지 않기 때문이다. F750 배합의 균열폭은 F375 배합에 비하여 14.7% 작은 것으로 나타났다. 잘 알려진 바와 같이 균열폭이 작을수록 누수나 내구성 측면에서 좋으며, 특히 복합재료를 철근과 함께 사용하는 경우에 더 크게 영향을 미치게 된다.

4. 결론

이 연구에서는 섬유의 형상비가 알칼리 활성 슬래그 기반 복합 재료의 거동에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 이를 위하여 두 가지 형상비를 갖는 폴리에틸렌 섬유를 보강섬유로 사용하여 실험체를 제작하였고, 압축강도를 측정하고 인장실험을 수행하였다. 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 수산화칼슘을 전체 결합재 양 대비 10% 사용하고 물/결합재 비가 30%인 경우 압축강도가 33.7MPa로 나타났으며, 압축 강도에 미치는 섬유의 형상비의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.
- 2) 폴리에틸렌 섬유의 형상비가 750인 배합이 형상비가 350인 배합에 비하여 인장특성을 나타내는 균열강도, 인장강도, 인장변형성능, 인성, 균열개수, 균열간격, 균열폭에서 우수한 것으로 조사되었다. 형상비가 750인 F750 배합은 인장변형 성능이 6.4%로 나타나 일반 콘크리트나 변형연화거동을 나타내는 섬유보강 콘크리트에 비하여 매우 높은 성능을 나타내었다.
- 3) 다른 조건이 동일한 경우, 섬유의 형상비에 비례하여 인장강도, 인장변형성능, 균열개수, 균열간격 등의 인장성능이 나타나는 것으로 확인되었으며, 균열폭은 형상비가 큰 경우 더 작게 나타나 내구성 측면에서 유리해 질 수 있는 것으로 확인되었다.

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부 글로벌전문기술개발사업 셀프힐링(자가치유)형 토목·건축용 하이브리드 초고강도 보수·보강 섬유제품 및 시공법 개발(10062951)의 지원과 국토교통부 건설기술 연구사업의 연구비지원(17SCIP-B103706-03)에 의해 수행되었습니다.

References

ACI Committee 544, Report on Fiber Reinforced Concrete, 544, 1R-96, American Concrete Institute.

Choi, J.I., Lee, B.Y., Ranade, R., Li, V.C., Lee, Y. (2016). Ultra-high-ductile behavior of a polyethylene fiber-reinforced

alkali-activated slag-based composite, *Cement and Concrete Composites*, **70**, 153-158.

JSCE (2008). Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), *Concrete Engineering Series*.

Kanda, T., Li, V.C. (2006). Practical design criteria for saturated pseudo strain hardening behavior in ECC, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **4(1)**, 59-72.

Kim, Y.Y., Kong, H.J., Li, V.C. (2003). Design of engineered cementitious composite(ECC) suitable for wet-mix shotcreting, *ACI Materials Journal*, **100(6)**, 511-518.

Lee, B.Y., Cho, C.G., Lim, H.J., Song, J.K., Yang, K.H., Li, V.C. (2012). Strain hardening fiber reinforced alkali-activated mortar-A feasibility study, *Construction and Building Materials*, **37**, 15-20.

Li, M., Li, V.C. (2013). Rheology, fiber dispersion, and robust properties of engineered cementitious composites, *Materials and Structure*, **46(3)**, 405-420.

Maalej, M., Li, V.C. (1994). Flexural/tensile-strength ratio in engineered cementitious composites, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, **6(4)**, 513-528.

Malhotra, V.M. (2001). Introduction: sustainable development and concrete technology, *Concrete International*, **24(7)**, 22.

Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. (2003). *Concrete*, Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 317.

Ohno, M., Li, V.C. (2014). A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites, *Construction and Building Materials*, **57**, 163-168.

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S. (2008). Alkali-Activated Binders: A Review, Part 2, about Materials and Binder Manufacture, *Journal of the Construction and Building Materials*, **22(7)**, 1315-1322.

Roy, D.M. (1999) Alkali-activated cements: opportunities and challenges, *Cement and Concrete Research*, **29(2)**, 249-254.

Shi, C., Roy, D., Krivenko, P.V. (2006). *Alkali-Activated Cements and Concrete*, Taylor and Francis.

Van Damme, H. (2018). Concrete material science: past, present, and future innovations, *Cement and Concrete Research*, **112**, 5-24.

Yang, E.H., Sahmaran, M., Yang, Y., Li, V.C. (2009). Rheological control in the production of engineered cementitious composites, *ACI Materials Journal*, **106(4)**, 357-366.

섬유의 형상비에 따른 고연성 무시멘트 복합재료의 인장특성

이 연구의 목적은 폴리에틸렌 섬유의 형상비에 따른 알칼리활성 무시멘트 복합재료의 압축강도와 인장거동을 실험적으로 조사하는 것이다. 이를 위하여 섬유의 형상비에 따라 두 가지 배합을 결정하였고, 압축강도를 측정하고 인장실험을 수행하였다. 실험결과 섬유의 형상비에 따른 압축강도의 영향은 거의 나타나지 않은 반면 인장거동은 큰 차이가 발생하였다. 형상비가 높은 섬유를 사용한 배합은 형상비가 낮은 섬유를 사용한 배합에 비하여 강도, 변형성능, 균열개수가 크게 나타났다. 반면에 균열간격과 균열폭은 높은 형상비를 갖는 섬유를 함유한 배합에서 작게 나타났다.