

## 높은 연성을 갖는 고강도 시멘트계 복합체의 재료강도 및 변형성능

최정일<sup>1</sup>, 이방연<sup>2</sup>, 김윤용<sup>3\*</sup>

# Material Strength and Deformation Performance of Highly Ductile High-Strength Cement Composite

Jeong-Il Choi<sup>1</sup>, Bang Yeon Lee<sup>2</sup>, Yun Yong Kim<sup>3\*</sup>

**Abstract:** The purpose of this study is to investigate experimentally the material strength and tensile deformation behavior of highly ductile high-strength cement composites reinforced by synthetic fibers. Materials and mixture proportions were designed to make composites with a strength level of 80 MPa in compression. Two kinds of polyethylene fibers with different properties were employed as reinforcing fibers. A series of experiments on density, compressive strength, and deformation performance was performed. Experimental results showed that the tensile behavior and cracking patterns of cement composite strongly depends on the types of reinforcing fibers. It was also demonstrated that the cement composite with a compressive strength of 77.7 MPa and a tensile strain capacity of 7.9% can be manufactured by using a proper polyethylene fiber.

**Keywords:** Cement Composite, Material Strength, Deformation Performance, Reinforcing Fiber

## 1. 서론

다양한 건설재료 중에서 콘크리트는 경제적이며 상대적으로 자원이 풍부하고 내구성과 내화성이 우수한 장점을 갖고 있다. 이러한 장점으로 인하여 콘크리트는 지구에서 가장 많이 생산/소비되고 있으며, 그 양은 콘크리트를 제외한 모든 산업용 건설재료의 양보다 약 2배이다(Van Damme, 2018). 그러나 콘크리트는 압축강도 대비 인장강도가 10% 수준으로 낮으며, 태생적으로 취성적 거동을 하기 때문에 에너지 흡수 능력이 낮은 단점을 갖고 있다(Mindess et al. 2002).

자연 및 인간에 의해 재해의 횟수 및 규모는 점차 증가하고 있으며, 이에 따라 구조물의 성능 향상 또한 요구되고 있다. 구조물을 이루는 재료의 역학성능을 향상시키는 방법은 구조물의 성능을 향상시킬 수 있는 가장 직접적인 방법이다. 따라서 건설재료로서 가장 많은 양이 사용되고 있는 콘크리트의 성능을 향상시키게 되면 건설산업에 가장 큰 기여를 할 수 있다. 이를 위하여 콘크리트의 단점 즉 취성적 거동과 인장성능

을 향상시키고 콘크리트의 압축강도를 높이기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. 인장하에서 높은 변형성능을 나타내는 ECC(Engineered Cementitious Composites)와 높은 압축강도를 나타내는 UHPC(Ultra-High Performance Concrete)가 콘크리트의 단점을 획기적으로 개선한 대표적인 재료들이다(Maalej and Li, 1994; Li et al. 2001; AFGC, 2002; Russel and Graybeal, 2013).

ECC는 형상비가 큰 고성능 합성섬유를 부피비로 2% 이내로 혼입하고 미시역학 이론과 안정상태균열이론에 기반하여 설계되어 인장하에서 다중균열과 변형경화현상이 나타나며 2% 이상의 높은 인장변형성능을 나타내는 특징을 갖고 있다. 이러한 성능은 최대 섬유가교응력이 균열강도보다 커야 한다는 강도조건과 균열면에서 균열폭이 증가하기 위해 필요한 에너지가 균열의 진전을 위해 필요한 에너지보다 커야 한다는 에너지조건을 만족할 때 나타난다(Kanda and Li, 2006).

UHPC는 최적 입도와 유변학에 기반하여 150 MPa 이상의 압축강도와 슬럼프 플로 600 mm 이상의 높은 유동성을 나타내는 특징을 갖고 있다. 또한 일반적으로 부피비로 1.5%에서 2.0%의 강섬유를 혼입하여 압축하에서 취성적인 파괴를 방지하고 1% 이내의 인장변형성능을 나타낸다(Choi et al. 2017; Choi et al. 2018). UHPC의 인장성능을 향상시키기 위하여 강섬유와 합성섬유를 하이브리드로 혼합하는 연구도 수행되고 있다(Kang et al. 2016; Yoo and Kim, 2019).

이와 같이 콘크리트의 성능 향상에 섬유는 중요한 역할을

<sup>1</sup>정희원, 전남대학교 바이오하우징연구소 박사후연구원

<sup>2</sup>정희원, 전남대학교 건축학부 교수

<sup>3</sup>정희원, 충남대학교 토목공학과 교수

\*Corresponding author: yunkim@cnu.ac.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2020년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

**Table 1** Materials and mixture proportions

Mixture	Binder		Silica sand	Water	HRWRA <sup>b</sup>	VMA <sup>c</sup>	Defoamer	Fiber [vol.%]	
	Cement	GGBFS <sup>a</sup>						12 mm	18 mm
F12-35	0.75	0.25	0.5	0.35	0.002	0.001	0.001	1.75	-
F18-35	0.75	0.25	0.5	0.35	0.005	0.002	0.001	-	1.75
F12-30	0.75	0.25	0.5	0.30	0.009	0.001	0.001	1.75	-

<sup>a</sup> Ground granulated blast furnace slag

<sup>b</sup> High range water reduction agent

<sup>c</sup> Viscosity modifying agent

하며 목표로 하는 성능을 확보하기 위해서는 적절한 섬유를 선정하고 적정 섬유 혼입량을 결정하여야 한다. 또한 균질한 섬유의 분산을 위하여 페이스트 또는 모르타르의 점성을 적절하게 조절하여야 한다. 특히 섬유의 종류 및 표면특성은 섬유보강 복합재료의 성능을 결정하는 가장 중요한 요인들이다. 초기의 ECC는 고강도 및 소수성을 갖는 폴리에틸렌 (polyethylene: PE) 섬유를 사용하여 제조하였으며, PE-ECC는 인장강도 5.5 MPa와 인장변형성능 약 5%의 성능을 나타내었다(Maalej and Li, 1994). 이후 폴리에틸렌 섬유와 비교하여 강도는 낮지만 저가의 폴리비닐알코올(polyvinyl alcohol: PVA) 섬유를 ECC에 적용하기 위한 연구가 수행되었고, 폴리비닐알코올 섬유 표면을 오일코팅 처리하여 매트릭스와의 화학적 부착을 줄임으로써 4% 이상의 고연성이 나타나는 PVA-ECC가 개발되었다(Li et al. 2001). 이후 표면오일 코팅된 폴리비닐알코올 섬유가 ECC 연구에 대부분 사용되어왔다. 최근 높은 연성을 갖는 고강도 등 강도와 연성을 동시에 향상시키거나 기존 고연성 재료의 성능을 향상시키기 위하여 폴리에틸렌 섬유를 이용하는 연구가 활발히 진행되었다(Ravi et al. 2013; Yu et al. 2018; Yu et al. 2019).

이와 같이 최근 폴리에틸렌 섬유를 사용하여 섬유보강 시멘트계 복합체의 성능을 향상시킨 연구가 수행되었지만 폴리에틸렌 섬유 종류에 따른 영향에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 이에 이 연구에서는 압축강도 80 MPa 정도를 나타내는 시멘트계 복합체의 성능에 미치는 폴리에틸렌 섬유 종류에 대한 영향을 조사하고자 한다.

**Table 2** Properties of fibers

Fiber	Diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Length [mm]	Tensile strength [MPa]	Density [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	Elastic modulus [GPa]
PE12	16	12	3,030	0.97	112
PE18	12	18	2,700	0.97	88

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1 실험 재료 및 배합

Table 1은 이 연구에서 사용한 재료와 배합을 나타낸다. 결합재는 시멘트와 고로슬래그를 중량비의 0.75대 0.25로 조합하여 구성하였다. 시멘트는 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 고로슬래그는 비표면적과 밀도가 각각  $4,030 \text{ cm}^2/\text{g}$  과  $2.91 \text{ g}/\text{cm}^3$ 인 미분말을 사용하였다. 물-결합재비에 따른 특성을 평가하기 위하여 30%와 35% 두 가지 물-결합재비를 결정하였다. 수축을 줄이고 강성을 향상시키기 위하여 규사 7호를 잔골재로 사용하였으며, 그 양은 모든 배합에 무게비로 결합재 대비 50%로 고정하였다. 고성능감수제와 증점제는 매트릭스의 유변특성을 최적화하여 섬유의 균질한 분산성 확보가 가능하도록 배합별로 적정수준을 혼입하였다. 소포제는 혼합과정에서 의도치 않은 기포가 생성되는 것을 억제하기 위하여 혼입하였다.

보강섬유는 폴리에틸렌 섬유의 특성에 따른 압축 및 인장 특성을 평가하기 위하여 2종류의 폴리에틸렌 섬유를 부피비로 1.75% 혼입하였다. PE12 섬유는 길이, 직경 및 인장강도가 각각 12 mm, 16  $\mu\text{m}$  및 3,030 MPa이고, PE18 섬유는 길이, 직경 및 인장강도가 각각 18 mm, 12  $\mu\text{m}$  및 2,700 MPa이다. Table 2는 보강 섬유의 특성을 나타낸다.

### 2.2 혼합 방법 및 양생

높은 연성을 갖는 고강도 섬유보강 시멘트계 복합체를 제조하기 위해서 분말형 재료인 결합재를 넣고 1분 동안 건비빔을 실시하였다. 건비빔이 완료되면, 배합수를 혼입하고, 고성능 감수제와 증점제를 혼입하여, 섬유 분산성이 최적화될 수 있는 유동상태가 확보될 때까지 혼합하였다. 유동상태가 최적화된 것을 확인한 후, 폴리에틸렌 섬유를 순차적으로 혼입하고, 약 5분간 혼합하여 섬유가 균질하게 분산된 것을 확인하였다. 섬유가 균질하게 분산된 후, 소포제를 혼입하고 약 1분간 저속으로 혼합하여 충분히 기포가 제거될 수 있도록 하였다.

혼합이 완료된 후 밀도, 압축강도 및 일축인장 실험을 수행하기 위한 실험체를 제작하였다. 제작된 실험체는  $23 \pm 3$  °C와 상대습도  $60 \pm 10$  % 조건에서 양생하고, 타설 2일 후 탈형하여 재령 28일까지 양생온도  $23 \pm 3$  °C의 양생 수조에서 수중양생을 실시하였다.

### 2.3 실험 방법

밀도 실험은 혼합과정에서 의도하지 않은 기포 생성에 따른 성능저하가 발생하였는지를 판단하기 위하여 실시하였다. 각 배합별로 3개씩 제작한 50 mm 입방 실험체를 이용하여 공기 중 무게와 수중 무게를 측정하였으며, 식(1)과 같이 계산하였다.

$$\rho = \frac{W_{air}}{W_{air} - W_{water}} \times \rho_w \quad (1)$$

여기서,  $\rho_w$ 는 물의 밀도이고,  $W_{air}$ 와  $W_{water}$ 는 각각 입방 실험체의 공기 중과 수중에서의 무게를 나타낸다.

압축강도는 각 배합별로 3개의 50 mm 입방 실험체를 제작하여 KS L 5105에 규정된 방법에 따라 측정하였다. 실험체 단면의 길이는 각각 3회씩 측정한 후, 평균값을 이용하여 단면적을 계산함으로써 측정값에 대한 오차를 최소화하였다.

일축 인장 실험은 폴리에틸렌 섬유를 혼입한 높은 연성을 갖는 고강도 시멘트계 복합체의 인장성능을 평가하기 위하여 일본토목학회에서 제안한 방법에 따라 실시하였다(JSCE, 2008). 인장실험은 압축강도에 비하여 결과의 편차가 일반적으로 크기 때문에 각 배합별로 5개의 실험체에 대하여 실시하였다. Fig. 1(a)와 같은 형태의 실험체를 제작하여 28일 재령 후 일축 인장 실험을 실시하였고, 그에 따른 인장 특성을 평가하였다. Fig.1(b)는 일축 인장 실험 모습을 나타낸다. 일축 인장 실험은 최대용량 2톤을 갖는 전기식 압축 및 인장 실험기를 이용하여, 0.1 mm/min. 속도의 변위 제어 방식으로 수행하

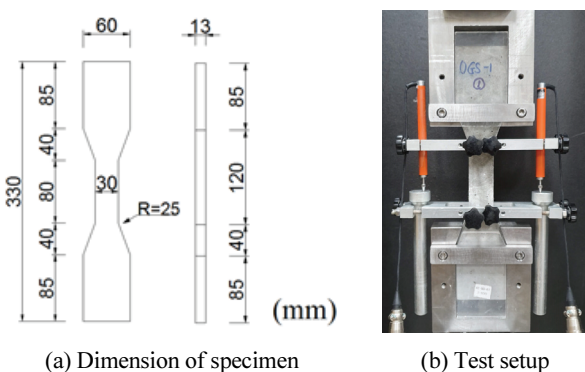


Fig. 1 Dimension of specimen and test setup

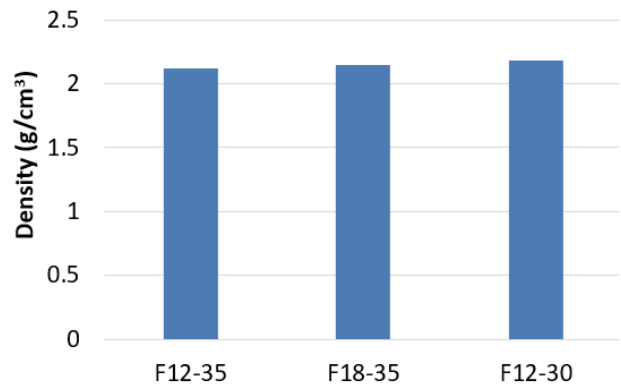


Fig. 2 Density

였다. 하중은 실험기에 설치된 로드셀로 측정하였으며, 실험체의 변위 측정은 실험체의 좌우 측면에 25 mm 용량을 갖는 변위계를 부착하여 변형량을 측정하였다. 변형량은 실험체 중간 부분에 위치한 80 mm 구간의 변형량을 측정하여 변형률로 환산하였다. 실험체의 측정구간 내 단면의 크기는 30 mm × 13 mm이다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 밀도

각 배합의 밀도는 Fig. 2와 같다. 물-결합재비가 가장 낮은 F12-30 배합의 밀도가 2.18 g/cm³으로 가장 높게 측정되었으며, F12-35와 F18-35 배합의 밀도는 각각 2.12 g/cm³과 2.15 g/cm³로 나타났다. 각 재료의 밀도와 배합비를 이용하여 이론적으로 측정된 밀도는 각각 2.11 g/cm³, 2.10 g/cm³, 그리고 2.17 g/cm³으로 계측한 값과 최대 2.4% 차이가 나타났다. 이론적 밀도와 계측한 밀도의 차이가 크지 않았기 때문에 실험체 제조 과정에서 과도한 기포가 생성되지 않았음을 알 수 있다.

### 3.2 압축강도

측정한 압축강도는 Fig. 3과 같다. 압축강도는 물-결합재비가 낮은 F12-30 배합이 86.3 MPa로 가장 크게 측정되었으며, 이는 동일한 섬유가 사용된 F12-35 배합에 비하여 11% 높은 것이다. F12-35 배합과 물-결합재비가 같지만 섬유의 형상비가 2배인 섬유가 사용된 F18-35 배합의 압축강도는 79.1 MPa로 이는 F12-35 배합의 압축강도에 비하여 1.8% 높은 것이다. 이를 통해 섬유의 종류보다는 물-결합재비의 영향이 더 큰 것을 알 수 있다.

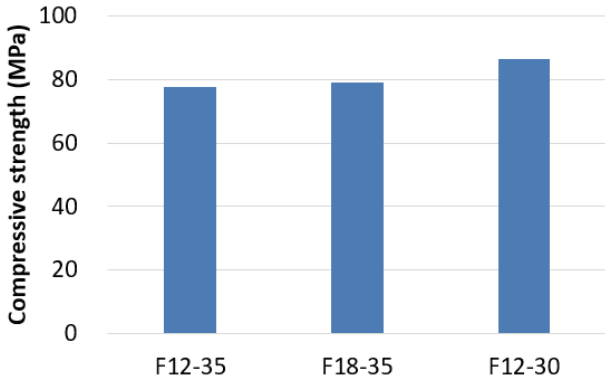


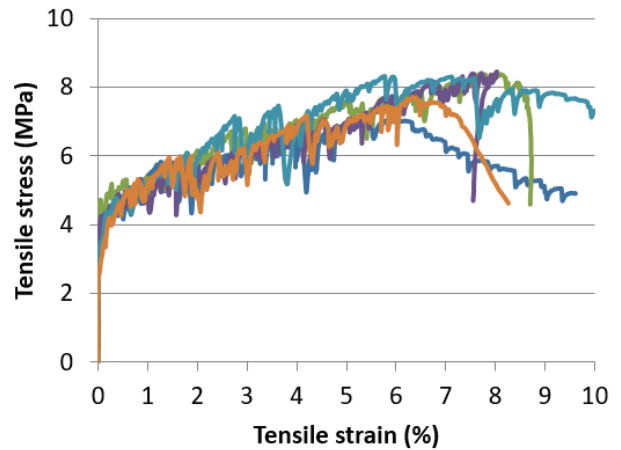
Fig. 3 Compressive strength

### 3.3 인장거동

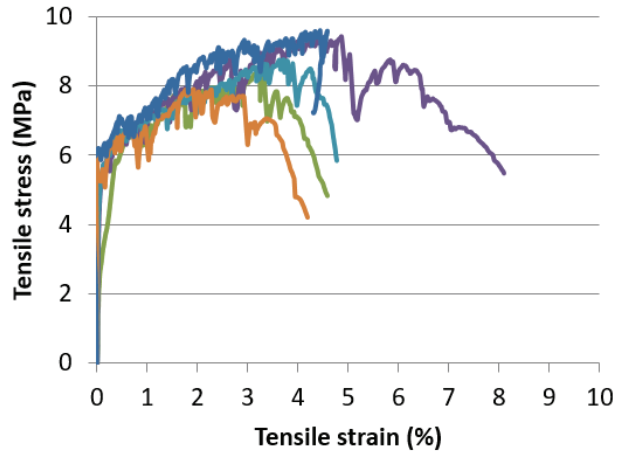
각 배합의 인장거동을 나타내는 인장응력과 인장변형률 그래프는 Fig. 4에 나타나 있다. 3가지 배합 모두 첫 번째 균열 발생 이후 급격한 응력 저하가 발생하지 않고 변형률이 증가하면서 인장응력이 증가하는 변형경화현상이 나타났다. 모든 배합에서 변형경화현상이 나타나는 과정에서 작은 응력저하들이 보이는데 이는 균열이 발생하였기 때문이다. 변위제어 방식으로 하중을 가할 경우 균열이 발생하게 되면 균열폭이 균열이 발생하지 않은 부분의 탄성변형에 비하여 매우 크기 때문에 순간적으로 새로 발생한 균열 이외의 부분에 응력이 완이 발생하기 때문이다. 따라서 응력저하가 발생한 개수와 균열의 개수는 일치하게 되며, 응력저하가 많이 발생하였다는 것은 그에 비례하여 많은 균열이 발생하였다는 것을 의미한다. 전체적으로 형상비가 짧은 PE12 섬유를 사용한 F12 배합이 더 큰 인장변형성능을 나타내고 있다.

Fig. 5는 인장거동을 정량적으로 나타낼 수 있는 첫 번째 균열강도, 인장강도, 인장변형성능, 그리고 인성을 나타낸다. 첫 번째 균열강도는 응력저하가 생기는 첫 번째 인장응력으로 정의하였으며, 인장강도는 최대 인장응력으로 정의하였다. 인장변형성능은 인장강도에 해당하는 변형률로 정의하였으며, 인성은 인장응력과 인장변형률 그래프에서 인장변형성능까지의 면적으로 정의하였다. 인성을 계산할 때 인장응력과 인장변형률 곡선은 Bilinear 모델로 가정하였다.

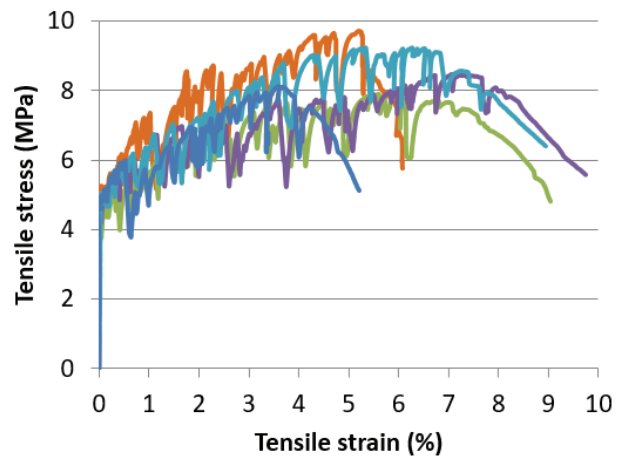
첫 번째 균열강도는 형상비가 큰 PE18 섬유를 사용한 F18-35 배합이 가장 크게 나타났으며, 이는 기준 배합인 F12-35 배합에 비하여 55% 큰 값이다. 형상비가 동일하지만 압축강도가 큰 F12-30 배합의 첫 번째 균열강도가 F12-35 배합에 비하여 29% 큰 것으로 나타났다. Li and Leung (1992)는 파괴역학이론에 근거하여 매트릭스의 파괴인성과 결함의 크기의 함수로 균열강도를 계산할 수 있는 식을 유도하였다. 이 식에 따르면 균열강도는 섬유의 형상비와 강도가 증가할수록 증가하며, 이러한 결과는 이 연구의 실험 결과와 잘 일치하는



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Tensile stress and strain curves: (a) F12-35, (b) F18-35, and (c) F12-30

것이다.

인장강도는 매트릭스의 강도보다는 균열면에서 섬유의 거동에 더 큰 영향을 받게 된다. 이 연구에서 조사한 배합의 경우 인장강도의 경향은 압축강도와 다른 경향을 나타내었으

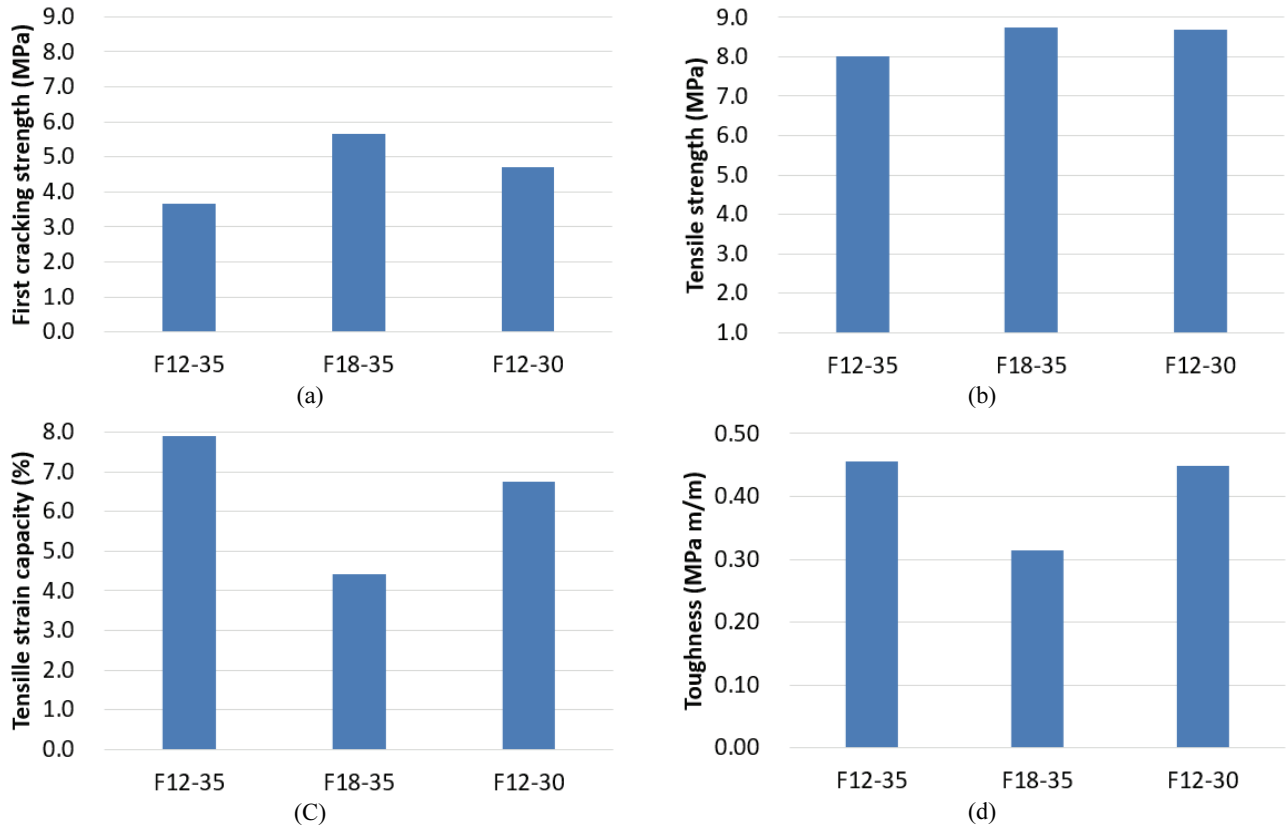


Fig. 5 Tensile behavior: (a) first cracking strength, (b) tensile strength, (c) tensile strain capacity, and (d) toughness

며, 첫 번째 균열강도와 유사하게 폴리에틸렌 섬유 종류에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. F18-35 배합의 인장강도는 8.75 MPa로 기준 배합인 F12-35에 비하여 9.4% 높게 나타났으며, F12-30 배합은 F12-35 배합에 비하여 인장강도가 8.4% 높게 나타났으며, 인장강도는 최대 섬유가교 응력과 같이 때문에 PE18 섬유의 최대 섬유가교응력이 PE12 섬유에 비하여 크다는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 PE12 섬유를 사용한 F12-35와 F12-30 배합의 인장강도 비교를 통하여 물-결합재비 30%까지는 PE12 섬유의 섬유가교응력이 증가하는 것을 알 수 있다.

인장변형성은 기준 배합인 F12-35 배합이 7.90%로 가장 크게 나타났다. 일반적인 콘크리트의 인장변형성은 0.01% 이고, ECC의 변형성은 2%에서 6% 정도임을 고려하면 이 연구에서 조사한 섬유보강 복합재료의 인장변형성은 매우 우수함을 알 수 있다. 형상비가 두 배 큰 PE18 섬유를 사용한 F18-35 배합의 인장변형성은 F12-35 배합의 인장변형성에 비하여 44% 낮게 나타났으며, 일반적으로 다른 성능이 동일하고 형상비만 차이가 나는 섬유를 사용하는 경우, 형상비가 높은 섬유를 사용하면 인장변형성이 높게 나타나는 데 이 연구에서 조사한 배합의 경우 반대의 결과가 나타났다. 이는 섬유가교거동은 섬유의 형상비 뿐만 아니라 섬유와 매트릭스 사이의 계면특성과 섬유의 특성에도 영향을 받기 때문이다.

기준 배합과 동일한 섬유를 사용한 F12-30 배합의 인장변형성은 14% 낮게 나타났으며, Fig. 6은 첫 번째 균열강도 대비 인장강도의 비를 나타내며, 이 값은 다중 균열과 변형경화현상이 나타나기 위한 이론적 조건 중의 하나인 강도성능지표와 같다. 이 값이 클수록 다중 균열이 발생할 확률이 높아지며, 인장변형성이 증가할 확률이 높아진다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 인장변형성은 강도성능지표와 비례하여 나타났다.

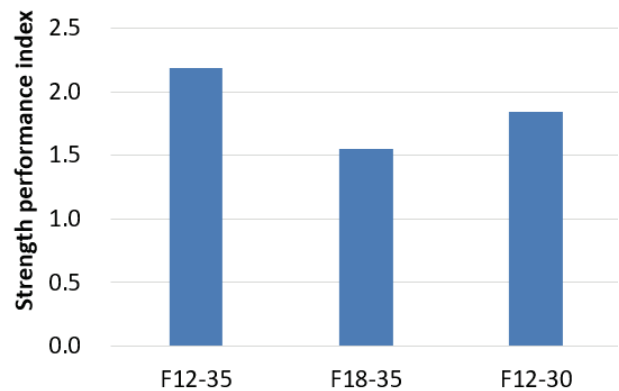


Fig. 6 Ratio of the tensile strength to the first cracking strength



인성은 인장변형성능과 유사한 경향을 나타내었으며, 이는 배합별 첫 번째 균열강도와 인장강도에 비하여 인장변형성능의 차이가 더 크게 나타났기 때문이다. 기준 배합인 F12-35의 인성은 0.46 MPa m/m로 나타났다. F18-35와 F12-30 배합의 인성은 F12-35 배합에 비하여 각각 31%, 1.8% 낮은 것을 나타냈다.

종합적으로 80 MPa급 고강도 복합재료의 인장거동은 폴리에틸렌 섬유 종류에 따라 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, 섬유의 종류에 따라 인장강도와 인장변형성능에서 상반되는 결과가 나타날 수 있음을 확인하였다. 이를 통하여 강도 수준과 목표 성능의 복합재료를 제조하기 위해서는 적합한 폴리에틸렌 섬유를 선택하여야 함을 확인하였다.

Fig. 7은 균열의 패턴을 정량적으로 나타내는 균열 개수, 균열 간격, 균열폭을 배합별로 나타낸 것이다. 균열 개수는 인장 변형률의 측정 구간인 80 mm 내에 발생한 균열의 개수를 의미하며, 시험이 종료된 이후 실험체 양면에 발생한 균열을 육안으로 관찰하여 각 실험체별로 평균한 값이다. 균열 간격은 측정 구간 80 mm를 균열의 개수로 나누어 구하였다. 균열폭은 측정 구간의 변형량을 균열의 개수로 나누어 구하였다. 측정 구간의 변형량은 균열폭과 균열이 발생하지 않은 부분의 탄성 변형량의 합으로 나타나지만 탄성변형량의 크기가 균열폭에 비하여 매우 작기 때문에 탄성변형량을 고려하지 않고 균열폭을 계산하였다. 이와 같은 균열의 패턴은 실험체가 인장강도와 인장변형성능에 도달하였을 때의 것과 같으며, 이는 인장강도나 인장변형성능에 도달한 이후에는 새로운 균열이 발생하지 않기 때문이다.

기준 배합인 F12-35의 균열 개수가 가장 큰 것으로 나타났으며, F18-35 배합의 균열 개수는 21%, F12-30 배합의 균열 개수는 43% 낮은 것으로 나타났다. 균열 개수는 균열강도와 섬유와 매트릭스 사이의 계면 마찰 및 섬유의 비표면적에 의해 결정되며, 균열강도가 작고 계면 마찰이 크면서 형상비가 클수록 증가하게 된다. 동일한 폴리에틸렌 섬유를 사용한 F12-35 배합과 F12-30 배합을 보면 F12-30 배합의 강도가 더 크기 때문에 마찰 부착도 더 크지만 균열 개수가 더 작은 이유는 F12-30 배합의 균열 강도가 더 크기 때문이다. 균열 간격은 균열폭과 반비례 관계를 갖기 때문에 균열폭과 반대의 결과가 나타났다. F12-35 배합의 평균 균열폭은 124  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. F18-35 배합의 평균 균열폭은 F12-35 배합에 비하여 32% 작으며, F12-30 배합의 평균 균열폭은 F12-35 배합에 비하여 44% 높은 것으로 나타났다. 평균 균열폭은 섬유가교곡선에서 최대 섬유가교응력에 해당하는 균열개구변위를 나타내기 때문에 인장강도와 함께 고려하면 F12-30 배합의 상보에너지가 가장 크고, F18-35 배합의 상보에너지가 가장 작다고 예측할 수 있다. 강도성능지표와 더불어 다중 균열과 변형경화현

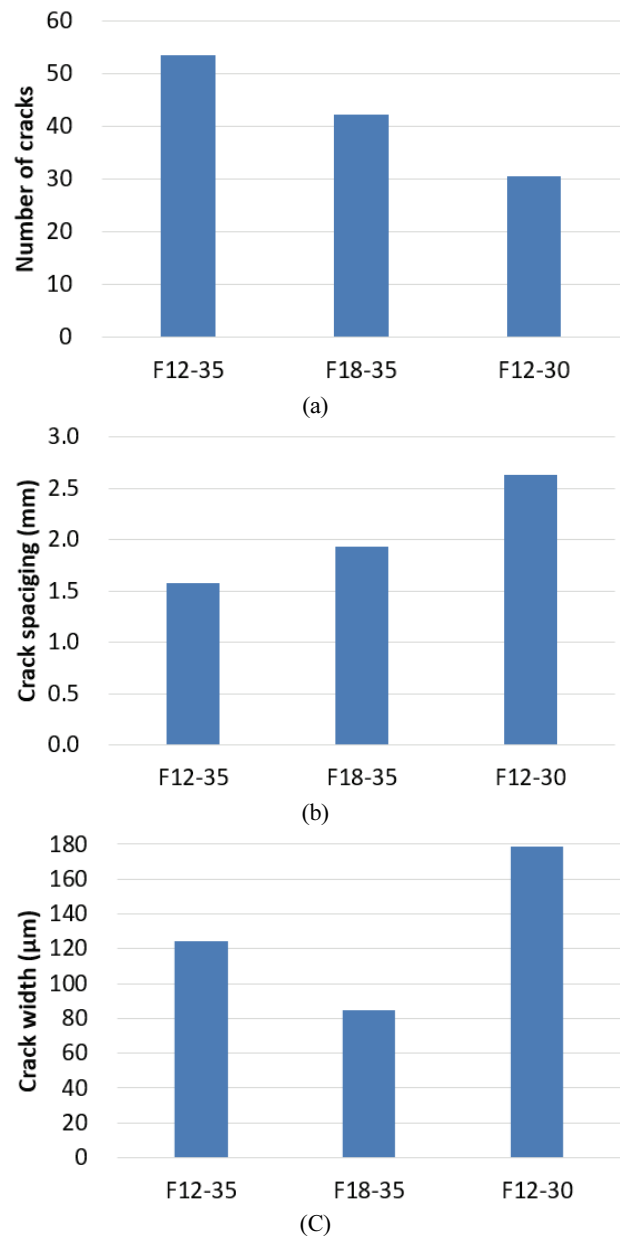


Fig. 7 Cracking pattern: (a) number of cracks, (b) crack spacing, and (c) crack width

상이 나타나기 위한 이론적 조건 중의 하나인 에너지성능지표는 상보에너지를 매트릭스 파괴에너지로 나눈 값이다. 따라서 동일한 매트릭스를 사용한 F12-35 배합의 에너지성능지표는 F18-35 배합의 에너지성능지표보다 크며, 이 결과는 인장변형성능의 실험결과에 부합한다.

#### 4. 결론

이 연구의 목적은 약 80 MPa 압축강도를 갖는 높은 연성을

갖는 고강도 시멘트계 복합체의 성능에 미치는 폴리에틸렌 섬유유의 영향을 조사하는 것이다. 이를 위하여 밀도, 압축강도, 인장거동, 인성을 측정하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 폴리에틸렌 섬유를 부피비로 1.75% 보강하여 압축강도 77.7 MPa, 인장강도 8.0 MPa, 인장변형성능 7.9%, 인성 0.46 MPa m/m인 시멘트계 복합체를 제조할 수 있는 것으로 확인되었다.
- 2) 폴리에틸렌 섬유유의 종류는 시멘트계 복합체의 인장성능에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 섬유의 형상비가 두 배 더 큰 섬유를 사용하더라도 인장변형성능 및 인성이 더 작게 나타날 수 있음을 확인하였다. 이를 통하여 목표 강도와 인장 성능을 만족하는 복합재료를 제조하기 위해서는 적합한 폴리에틸렌 섬유를 선택하여야 함을 확인하였다.
- 3) 다중 균열과 변형경화현상이 나타나기 위한 강도성능지표와 에너지성능지표를 통하여 이 연구에서 조사한 배합의 인장성능을 합리적으로 설명할 수 있는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2015R1A5A1037548). 또한 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(19CTAP-C151882-01)에 의해 수행되었음.

## References

1. Van Damme, H. (2018), Concrete material science: Past, present, and future innovations. *Cement and Concrete Research*, 112, 5-24.
2. Mindess, S., Young, J. F., and Darwin, D. (2002). Concrete (Second Edition ed.).
3. Maalej, M., and Li, V. C. (1994), Flexural/tensile-strength ratio in engineered cementitious composites, *Journal of Materials in Civil*

*Engineering, ASCE*, 6(4), 513-528.

4. Li, V. C., Wang, S., and Wu, C. (2001), Tensile Strain-Hardening Behavior of PVA-ECC, *ACI Materials Journal*, 98(6), 483-492.
5. Association Française de Génie Civil (2002), Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes-Interim Recommendations, Paris, France.
6. Russel, H. G., and Graybeal, B. A. (2013), Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community, Federal Highway Administration, McLean.
7. Kanda, T., Li, V. C. (2006), Practical design criteria for saturated pseudo strain hardening behavior in ECC, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4, 59-72.
8. Choi, J.-I., Park, S. E., and Lee, B. Y. (2017), Compressive Strength and Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete and High-Ductile Cementless Composite. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 21(3), 69-75.
9. Choi, J.-I., Park, S.-E., Lee, B. Y., and Kim, Y. Y. (2018), Tensile Properties of Polyethylene Fiber-Reinforced Highly Ductile Composite with Compressive Strength of 100 MPa Class. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 30(5), 497-503.
10. Kang, S.-T., Choi, J.-I., Koh, K.-T., Lee, K. S., and Lee, B. Y. (2016), Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete. *Composite Structures*, 145, 37-42.
11. Yoo, D.-Y., and Kim, M.-J. (2019), High energy absorbent ultra-high-performance concrete with hybrid steel and polyethylene fibers. *Construction and Building Materials*, 209, 354-363.
12. Ranade, R., Li, V. C., Stults, M. D., Heard, W. F., and Rushing, T. S. (2013), Composite properties of high-strength, high-ductility concrete. *ACI Materials Journal*, 110(4), 413-422.
13. Yu, K.-Q., Yu, J.-T., Dai, J.-G., Lu, Z.-D., & Shah, S. P. (2018), Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers. *Construction and Building Materials*, 158, 217-227.
14. Yu, K.-Q., Zhu, W.-J., Ding, Y., Lu, Z.-D., Yu, J.-t., and Xiao, J.-Z. (2019), Micro-structural and mechanical properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) incorporation of recycled fine powder (RFP). *Cement and Concrete Research*, 124, 105813.
15. Li, V. C., and Leung, C. K. (1992), Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites, *Journal of Engineering Mechanics*, 118(11), 2246-2264.

Received : 11/30/2019

Revised : 12/28/2019

Accepted : 01/06/2020

---

**요 지:** 이 논문의 목적은 다른 종류의 폴리에틸렌 섬유로 보강한 높은 연성을 갖는 고강도 시멘트계 복합체의 재료강도와 인장변형거동을 실험적으로 연구하는 것이다. 이를 위하여 압축강도 80 MPa 수준의 재료 및 배합을 결정하였고, 보강 섬유로서 2 종류의 폴리에틸렌 섬유를 사용하였다. 그리고 밀도, 압축강도, 1축 인장변형에 대한 일련의 실험을 수행하였다. 실험결과 시멘트계 복합체의 인장거동과 균열 패턴은 보강 섬유의 특성에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 적절한 폴리에틸렌 섬유를 사용함으로써 재료의 압축강도가 77.7 MPa 이고, 인장변형성능이 7.9% 변형률인 시멘트계 복합체의 제조가 가능하다는 것을 확인하였다.

**핵심용어:** 시멘트계 복합체, 재료강도, 변형 성능, 보강섬유

---