

# 폴리에틸렌 섬유 종류에 따른 고로슬래그 기반 무시멘트 복합재료의 역학특성

## Mechanical Properties of Slag-Based Cementless Composites According to Types of Polyethylene Fibers

진정연<sup>1</sup> · 최정일<sup>2</sup> · 박세연<sup>3</sup> · 이방연<sup>4\*</sup>

Jeong-Eon Jin<sup>1</sup> · Jeong-Il Choi<sup>2</sup> · Se-Eon Park<sup>3</sup> · Bang Yeon Lee<sup>4\*</sup>

(Received August 30, 2022 / Revised September 21, 2022 / Accepted September 22, 2022)

The purpose of this study is to investigate experimentally the effect of polyethylene fibers with different tensile strength and aspect ratio on the properties of cementless composite. Three types of mixtures according to the types of polyethylene fibers and water-to-binder ratio were prepared and density, compressive strength and tension tests were performed. Test results showed that the mixture reinforced by polyethylene fiber with a low tensile strength by 10 % and a high aspect ratio by 8.3 % had a high tensile strain capacity by 11.7 %, a high toughness by 12.4 %, and a low crack width by 9.1 %. It was also observed that high tensile strain capacity and better cracking pattern could be achieved by increasing the water-to-binder ratio of composite although its strength is low.

**키워드** : 형상비, 인장강도, 무시멘트 복합재료, 섬유, 인장거동

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

### 1. 서론

현재 건설산업에서 사용하고 있는 가장 대표적인 건설재료들은 콘크리트, 철, 나무, 유리 등이 있다. 콘크리트는 콘크리트를 제외한 모든 산업용 건설재료를 합한 사용량보다 약 2배 정도 많이 생산 및 소비되고 있는데 이는 콘크리트의 충분한 강도, 높은 경제성, 우수한 내구성 및 내화성 때문이다(Van Damme 2018). 그러나 취성적인 거동과 낮은 인장강도는 콘크리트의 단점으로 인식되고 있다(Mindess et al. 2003).

섬유보강 콘크리트는 콘크리트에 짧은 길이의 단섬유를 혼입하여 인성과 균열제어를 목적으로 개발되었으며, 1960년대에 미국을 중심으로 본격적으로 연구가 수행되었다(ACI Committee 544, 1996). 다만 일반적인 섬유보강 콘크리트는 일반 콘크리트에 비하여 인성이 크지만 첫 번째 균열이 발생한 이후 변형연화거동을

하여 인장강도 및 연성의 증진이 거의 없는 특징을 갖고 있다. 1990년대 초에 개발된 ECC(Engineered Cementitious Composite)는 페이스트나 모르타르에 고성능 합성섬유를 2 % 이내로 혼입하여 인장강도와 연성을 향상시킨 고성능 섬유보강 콘크리트 중의 하나이다. 이는 파괴역학과 안정상태 균열이론을 도입하여 다중균열과 변형경화 현상이 나타나도록 함으로써 구현한 것이다(Maalej and Li 1994).

콘크리트의 또 다른 문제점은 콘크리트의 주 재료인 시멘트를 생산하는 과정에서 다량의 이산화탄소를 배출한다는 것이다(Malhotra 2001). 이러한 문제점을 해결하기 위하여 시멘트의 사용량을 줄이거나, 시멘트를 대체할 수 있는 건설재료를 개발하기 위한 연구도 진행 중에 있다. 특히, 포졸란 반응이나 잠재수경성을 가지고 있는 슬래그, 플라이 애쉬 등을 모재료로 사용하여 결합재를 구성함으로써 시멘트를 대체하는 건설재료 개발에 대한 연구가

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

<sup>1</sup>전남대학교 건축토목공학과 박사과정 (Department of Architecture and Civil Engineering, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea)

<sup>2</sup>전남대학교 바이오하우징연구소 박사후 연구원 (Biohousing Research Center, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea)

<sup>3</sup>전남대학교 건축토목공학과 박사과정 (Department of Architecture and Civil Engineering, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea)

<sup>4</sup>전남대학교 건축학부 교수 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea)

활발히 진행 중에 있다(Roy 1999; Pacheco-Torgal et al, 2008; Shi et al, 2006).

고연성 무시멘트 복합재료는 섬유를 혼입하여 콘크리트의 취성적 성질을 개선하고, 산업부산물을 활용하여 결합재를 구성함으로써 콘크리트가 가지고 있는 취성적 성질과 이산화탄소 배출 문제를 모두 해결한 고연성·친환경 건설재료로서 활발히 연구되고 있다. Lee et al.(2012)은 고로슬래그와 알칼리 활성화제를 결합재로 구성하고 폴리비닐알코올 섬유를 혼입하여 압축강도 30.6 MPa, 인장강도 4.7 MPa 및 인장변형성능 4.5 %를 나타내는 섬유보강 복합재료를 개발하였다. Ohno and Li(2014)는 플라이애쉬와 알칼리 활성화제를 결합재로 구성하고 폴리비닐알코올 섬유를 이용하여 압축강도 27.6 MPa, 인장강도 3.4 MPa 및 인장변형성능 4.3 %를 나타내는 섬유보강 복합재료를 개발하였다. Choi et al.(2016)은 고로슬래그와 알칼리 활성화제를 결합재로 구성하고 폴리에틸렌 섬유를 사용하여 압축강도 54.8 MPa, 인장강도 13.1 MPa 및 인장변형성능 7.50 %에 달하는 고연성 무시멘트 복합재료 제조 방법을 보고하였다. 최근에 Park et al.(2021)은 양생 조건이 알칼리 활성화 슬래그 기반 섬유보강 복합재료의 압축강도와 인장거동에 미치는 영향을 조사하였다.

고연성 무시멘트 복합재료는 앞서 전술한 바와 같이 섬유가교 거동에 의한 다중균열 발생, 각각의 균열폭에서의 균열폭 제어 및 변형경화 거동을 통하여 고연성을 달성한다. 또한, 섬유가교거동은 매트릭스와 섬유 사이의 계면특성(화학적 부착강도, 마찰 부착 강도, 미끄럼 경화 특성 등), 매트릭스의 특성(강도, 탄성계수, 균열 강도, 파괴인성 등), 섬유의 특성(길이, 직경, 탄성계수, 인장강도, 혼입량 등)에 의하여 결정되며, 이를 최적화함에 따라 고연성 구현이 가능하다. 섬유를 혼입하고 무시멘트를 사용함으로써 고연성·친환경성을 확보한 복합재료에 대한 연구가 많이 보고되고 있지만, 모재료(고로슬래그, 플라이 애쉬 등)와 알칼리 활성화제의 종류 및 혼입량을 달리한 결합재 구성방법에 대한 연구나 보강섬유의 종류를 폴리에틸렌 섬유, 폴리비닐알코올 섬유 등으로 달리하여 인장거동을 평가한 연구가 대부분이다. 이에 이 연구에서는 고로슬래그와 수산화칼슘으로 구성된 동일한 무시멘트 결합재에 인장강도 및 형상비가 다른 두 종류의 폴리에틸렌 섬유를 보강섬유

로 사용함으로써 무시멘트 복합재료의 인장거동에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 조사하는 것이다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1 실험 재료

#### 2.1.1 결합재

이 연구에서는 KS F 2563에 규정된 고로슬래그 미분말 3종 분말도(4320 cm<sup>2</sup>/g)를 갖는 고로슬래그를 모재료로 사용하였다. 고로슬래그의 밀도는 2.92 cm<sup>3</sup>/g이며, XRF(X-ray fluorescence) 분석을 통한 화학적 성분은 Table 10에 나타내었다. 고로슬래그는 잠재수경성을 갖기 때문에 이를 활성화할 수 있는 자극제인 알칼리 활성화제를 필요로 한다. 이 연구에서는 분말형태의 수산화칼슘을 알칼리 활성화제로 사용하였으며, 화학적 성분은 수산화칼슘이 95 % 이상이다.

#### 2.1.2 섬유

보강섬유는 길이와 직경이 각각 18 mm 및 12 μm이며 형상비와 인장강도가 각각 1500 및 2700 MPa인 PE1 섬유와 길이와 직경이 각각 18 mm 및 13 μm이며 형상비와 인장강도가 각각 1385 및 3000 MPa인 PE2 섬유를 사용하였다. 두 종류의 섬유는 길이와 밀도는 같으나 PE1 섬유가 PE2 섬유보다 형상비는 8.3 % 높으며, 인장강도는 10.9 % 낮다. 형상비 차이에 따른 섬유와 매트릭스 사이의 측면의 계면 비표면적은 PE1 섬유가 PE2 섬유에 비하여 8.3 % 높다. 두 종류의 섬유 물성은 Table 2와 같다. 섬유의 형상비와 인장강도는 섬유보강 복합재료의 섬유가교거동에 영향을 미치는 매우 중요한 요인이다. 일반적으로 다른 모든 조건이 동일한 경우,

Table 2. Properties of fiber

Name	Length (mm)	Diameter (μm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
PE1	18	12	1500	2700	88	0.97
PE2		13	1385	3030	111	

Table 1. Chemical properties of GGBFS

Material	Chemical composition (%)								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	etc.
GGBFS*	35.0	13.6	0.5	42.9	3.6	2.5	0.6	0.6	0.7

\* GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag

섬유의 형상비가 높을수록 섬유와 매트릭스 사이의 계면 면적이 넓어지고, 이로 인하여 균열면에서부터 섬유를 통해 매트릭스로 전달되는 마찰력이 빨리 증가하게 된다. 또한 다른 모든 조건이 동일한 경우, 인장강도가 높을수록 섬유가교거동에서 최대섬유가 교응력이 높아지게 된다. 이 연구에서는 이러한 영향을 조사하기 위하여 길이, 밀도 및 섬유 혼입량이 동일하지만 형상비와 인장강도가 다른 두 종류의 폴리에틸렌 섬유를 보강섬유로 선정하였다.

### 2.1.3 혼화제

섬유보강 복합재료가 고연성을 달성하기 위해서는 매트릭스와 섬유 사이의 계면특성, 매트릭스의 특성, 섬유의 특성 뿐만 아니라 섬유의 분산 역시 최적화되어야 한다(Li and Li 2013). 섬유의 분산이 최적화될 수 있는 매트릭스의 점성 및 유동성을 확보하기 위하여 폴리카본산계 고성능 감수제와 하이드록시프로필메틸셀룰로스 증점제를 사용하였다. 또한 실험체 제작과정에서 의도하지 않게 생성되는 기포는 압축강도 및 인장거동에 영향을 줄 수 있다. 따라서 이를 제거하기 위하여 소포제를 사용하였다.

## 2.2 배합 및 실험체 제작 방법

이 연구에서 조사한 배합은 Table 3과 같다. 모든 배합은 모재로인 고로슬래그에 알칼리 활성화제인 수산화칼슘을 10 % 대체하여 결합재를 구성하였다. 또한, 고성능 감수제, 증점제 및 소포제는 각 배합의 섬유 분산성이 최적화되는 점성 및 유동상태를 확보할 수 있도록 각각의 혼입량을 달리하였다. M1 배합은 물-결합재비 0.25에 PE1 섬유를 보강섬유로 사용하였고, M2 배합은 물-결합재비 0.25에 PE2 섬유를 보강섬유로 사용하였다. 이를 통하여 형상비와 인장강도가 다른 두 종류의 폴리에틸렌 섬유를 보강섬유로 사용한 무시멘트 섬유보강 복합재료의 역학특성을 비교하였다. M3 배합은 물-결합재비 0.30에 PE2 섬유를 보강섬유로 사용하여 동일한 종류의 폴리에틸렌 섬유를 사용한 무시멘트 섬유보강 복합재료의 물-결합재비에 따른 역학특성을 비교하였다. 일반적으로 고연성 섬유보강 복합재료의 경우 보강섬유를 전체 부피대비 약

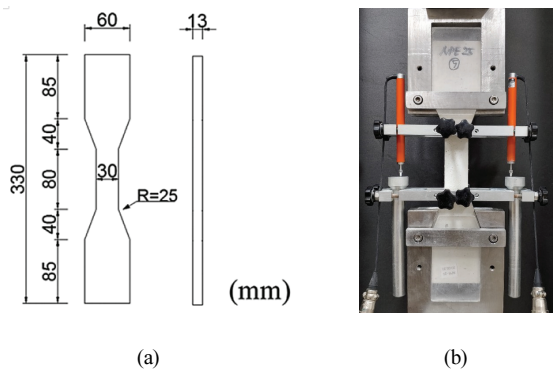


Fig. 1. (a) Dimension of tensile specimen and (b) tension test setup

2 % 수준으로 사용한다(Li and Li 2013; Kim et al. 2003; Yang et al. 2009). 그러나 이 연구에서는 보강섬유로 선정된 두 종류의 폴리에틸렌 섬유가 모두 형상비와 인장강도가 높기 때문에 섬유 혼입량을 전체 부피대비 1.75 %로 결정하였다.

실험체 제작을 위하여 결합재(고로슬래그와 수산화칼슘)를 혼합기에 넣고 약 1분 동안 건비빔하였다. 건비빔이 종료된 후, 배합수를 혼입하였으며, 매트릭스가 섬유 분산성을 최적화할 수 있는 점성과 유동성을 확보할 수 있도록 고성능 감수제와 증점제를 혼입하였다. 이 후, 보강섬유를 혼입하고, 섬유가 매트릭스 전체에 고르게 분포될 수 있도록 고속으로 약 4분 동안 혼합하였다. 섬유의 분산성이 최적화된 것을 확인하고 마지막으로 소포제를 혼입하고 약 1분 동안 저속으로 혼합하여 기포제거 및 안정화를 실시하였다.

배합별로 3개의 압축강도 실험체(50 mm 입방체)와 5개의 일축 인장 실험체(Fig. 1(a) 형상 실험체)는 혼합이 완료된 직후 제작하였으며, 모든 실험체는 양생 온도 (23 ± 3) °C, 상대습도 (60 ± 5) %에서 48시간 동안 기건 양생을 실시하였다. 탈형 후, 재령 28일 까지 (23 ± 2) °C의 수조에서 양생하였다.

## 2.3 실험 방법

밀도는 고로슬래그 기반 무시멘트 복합재료에 형상비가 높은 폴리에틸렌 섬유를 혼입하여 실험체를 제조하였을 경우, 의도치

Table 3. Mixture proportion

Mixture ID	Binder		Water	Superplasticizer (%)	Viscosity modifying agent (%)	Anti-foamer (%)	Fiber	
	GGBFS	Ca(OH) <sub>2</sub>					Type	Vol.%
M1	0.90	0.10	0.25	0.009	0.0001	0.001	PE1	1.75
M2	0.90	0.10	0.25	0.008	0.0006	0.001	PE2	1.75
M3	0.90	0.10	0.30	0.003	0.0007	0.001	PE2	1.75

\* GGBFS : ground granulated blast furnace slag

얇은 기포 생성에 따른 역학 성능 저하가 발생하였는지를 판단하기 위하여 실시하였다. 밀도는 50 mm 입방형의 실험체를 이용하여 공기중 무게와 수중 무게를 측정하였으며, 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$p = \frac{W_{air}}{W_{air} - W_{water}} \times p_w \quad (1)$$

여기에서  $W_{air}$ 는 공기중 무게,  $W_{water}$ 는 수중 무게,  $p_w$ 는 물의 밀도를 의미한다.

압축강도는 KS L 5105에 따라 측정하였고, 실험체가 받은 최대 하중을 실험체의 단면적으로 나누어 계산하였다. 실험체의 단면 길이는 버니어 캘리퍼스를 이용하여 각각 3회씩 측정한 후, 평균 값을 이용하여 측정값에 대한 오차를 최소화하였다.

일축인장 실험은 일본토목학회에서 제안한 방법에 따라 실시하였다(JSCE, 2008). 일축인장 실험은 최대용량 2톤의 인장 실험기를 이용하여 0.1 mm/min 속도의 변위 제어 방식으로 실시하였다. 하중은 실험기에 부착된 로드셀로 측정하였으며, 변위는 Fig. 1(b)와 같이 실험체의 좌·우 측면에 25 mm 용량을 갖는 변위계를 부착하여 측정하였다. 실험체의 변위를 측정하는 구간은 80 mm이며, 변형률은 변위계를 통하여 측정된 총 변형량을 측정구간인 80 mm로 나누어 계산하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 밀도

Fig. 2는 이 연구에서 실시한 각 배합들의 밀도 실험 결과를 나타낸다. M1 배합과 M2 배합의 밀도는 각각 2.06 g/cm<sup>3</sup> 및 2.05 g/cm<sup>3</sup>로서 매우 유사한 것으로 나타났다. 또한 물-결합재비가 상대적으로 높은 M3 배합은 1.97 g/cm<sup>3</sup>로서 다른 배합들보다 낮게 나타났다. 각 배합들의 이론적 밀도값은 각 배합재료들의 혼입량과 밀도를 이용하여 계산하였다. 모든 배합들의 실험값과 이론적 밀도값의 차이는 최대 1.1 %로서 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 이 연구에서 실시한 배합과 제조 방법으로 형상비가 높은 폴리에틸렌 섬유로 보강한 고로슬래그 기반 섬유보강 복합재료를 제조할 경우, 의도치 않은 기포 생성에 따른 역학특성 저하는 없을 것으로 판단된다.

#### 3.2 압축강도

Fig. 3은 이 연구에서 실시한 각 배합들의 압축강도 실험 결과를 나타낸다. 압축강도는 상대적으로 형상비가 높고 인장강도가 낮은 PE1 섬유를 혼입한 M1 배합이 44.8 MPa로 가장 높게 나타났고, PE2 섬유를 보강섬유로 사용한 M2 배합보다 7.05 % 높게 나타났다. 물-결합재비에 따른 영향은 상대적으로 물-결합재비가 낮은 M2 배합이 M3 배합보다 15.8 % 높게 나타났다.

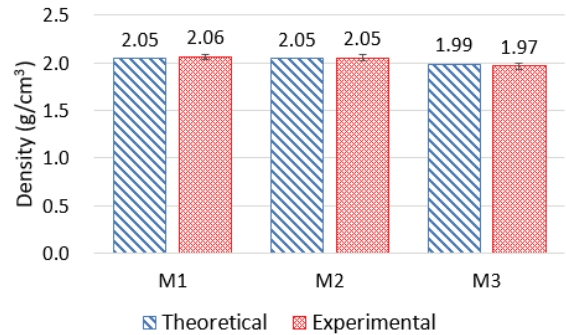


Fig. 2. Density

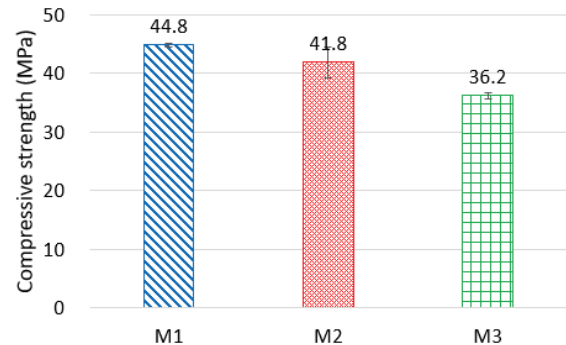


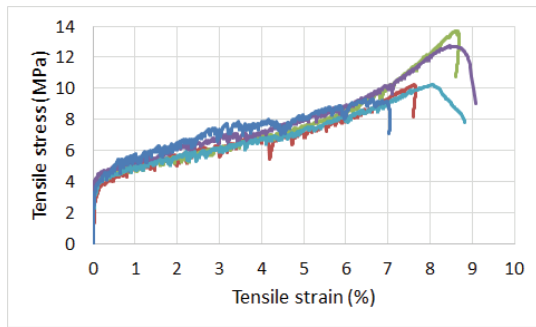
Fig. 3. Compressive strength

#### 3.3 일축인장

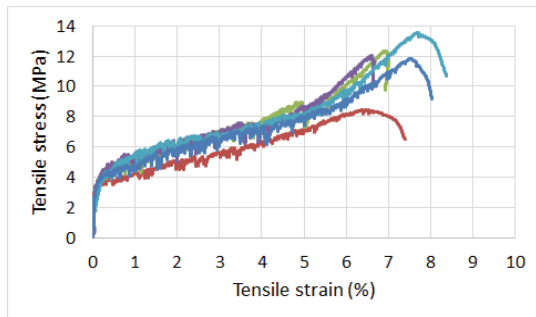
Fig. 4는 이 연구에서 실시한 각 배합들의 인장응력과 변형률의 관계를 나타낸다. 모든 배합이 첫 번째 균열이 발생한 이후 다중균열 발생을 통하여 인장강도에 도달할 때까지 인장응력과 인장변형률이 함께 증가하는 변형경화거동을 명확하게 나타냈다. 인장강도 도달 후에는 인장강도가 감소하고 특정 균열 부위의 균열폭이 증가함으로써 실험체가 파괴되었다. 모든 배합에서 새로운 균열이 발생할 때마다 일시적으로 하중이 감소하였다가 다시 증가하는 현상이 나타났는데, 이는 하중재하 방식을 변위제어 방식으로 실

시하였기 때문이다. 새로운 균열이 발생하게 되면 새로운 균열부  
 분에서 균열폭이 순간적으로 증가하게 되고 이에 따라 실험체의  
 다른 부분에서는 응력 이완이 발생하게 된다. 이러한 이유로 하중  
 감소 현상이 나타나게 되며 하중 감소가 발생한 횟수와 균열개수  
 는 이론적으로 같다.

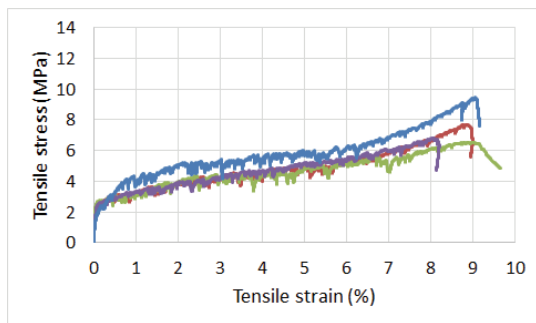
동일한 종류인 폴리에틸렌 섬유를 사용하였음에도 형상비가  
 8.3 % 높지만 인장강도가 10.9 % 낮은 PE1 섬유를 사용한 M1 배합  
 이 인장강도는 유사하고 변형능력이 더 높은 것으로 나타났다. 또  
 한 예상된 바와 같이 물-결합재비에 따라서도 인장성능에 차이가



(a) M1

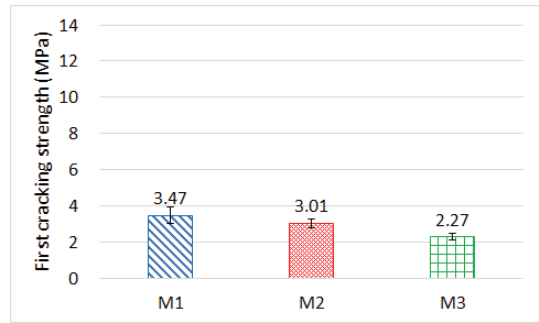


(b) M2

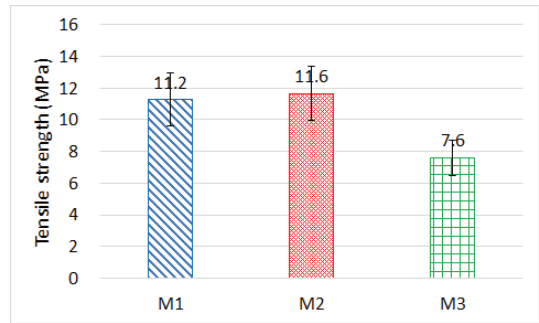


(c) M3

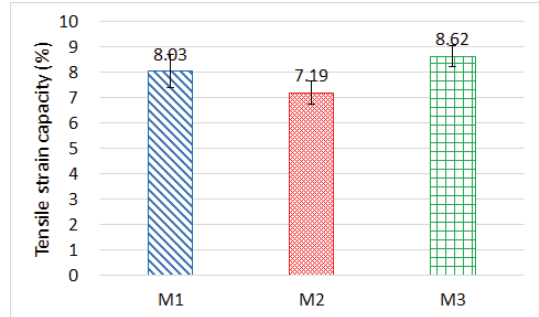
Fig. 4. Tensile stress-strain curves



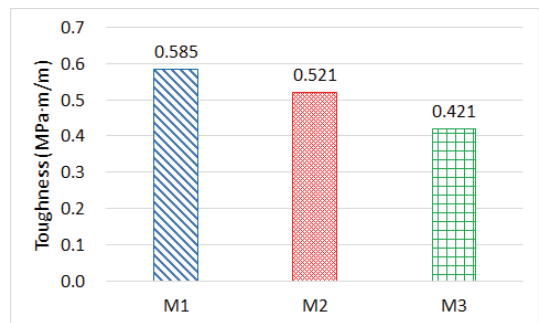
(a) First cracking strength



(b) Tensile strength



(c) Tensile strain capacity



(d) Toughness

Fig. 5. Tensile behavior

크게 발생하는 것을 확인하였다. 섬유보강 복합재료의 인장거동은 첫 번째 균열강도, 인장강도, 인장변형성능으로 정량적으로 나타낼 수 있으며, 이를 이용하여 인성까지 계산할 수 있다. Fig. 5는 이 연구에서 실시한 각 배합들의 첫 번째 균열강도, 인장강도, 인장변형성능 및 인성을 나타낸다.

첫 번째 균열강도는 실험체가 첫 번째 균열이 발생한 시점에서의 응력을 의미하며, 실험체 변형 측정 구간에서 가장 낮은 균열강도를 의미한다. 첫 번째 균열강도는 PE1 섬유를 혼입한 M1 배합이 3.47 MPa로서 가장 높게 나타났으며, PE2 섬유를 혼입한 M2 배합보다 15.4 % 높은 것으로 나타났다. 또한, 물-결합재비가 낮은 M2 배합이 M3 배합보다 32.9 % 높게 나타났다. 섬유보강 복합재료는 매트릭스에서 균열이 발생한 이후, 균열부위에서의 균열폭 제어 및 변형경화거동을 하기 때문에 첫 번째 균열강도는 매트릭스의 강도와 밀접한 관계를 가진다. 이 연구에서 실시한 각 배합들의 초기균열강도 역시 압축강도 실험 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 또한 압축강도 대비 첫 번째 균열강도는 모든 배합이 6.27 %부터 7.75 %까지 나타났다.

섬유가교거동은 섬유의 분산성과 방향성에 따라 달라지기 때문에 위치마다 차이가 있는데 인장강도는 측정 구간내에서 가장 작은 섬유가교능력을 의미하며, 섬유가교곡선에서는 가장 큰 응력을 의미한다. 인장강도는 상대적으로 형상비는 낮으나 인장강도가 높은 PE2 섬유를 혼입한 M2 배합이 11.6 MPa로서 M1 배합보다 3.47 % 높게 나타났다. 이는 이 연구에서 사용한 결합재에 높은 수준의 형상비를 갖는 폴리에틸렌 섬유를 보강섬유로 사용하면 상대적으로 형상비가 낮더라도 섬유의 인장강도가 높으면 인장강도를 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다. 다만 재료의 물성차이에 비하여 인장강도 증진 효과는 크지 않았다. 압축강도 대비 인장강도는 M2 배합이 27.8 %로서 가장 높게 나타났고, M1 배합은 25.1 %로 나타났다. 또한 상대적으로 물-결합재비가 낮은 M3 배합도 21.0 %로 나타났다. 이러한 결과는 이 연구에서 실시한 모든 배합이 인장강도가 압축강도의 10 % 수준인 일반 콘크리트보다 약 2.1배 향상된 결과이며, 압축강도 대비 우수한 인장강도를 갖는 건설재료로서 활용 가능성이 있다는 것을 의미한다. 섬유보강 복합재료가 다중 균열 발생, 각각의 균열폭에서의 균열폭 제어 및 변형경화거동을 통하여 고연성을 달성하기 위해서는 강도조건과 에너지 조건이라는 이론적 조건을 만족하여야 한다. 이 중 강도조건은 강도성능지수로 확인할 수 있으며, 강도성능지수는 첫 번째 균열강도 대비 인장강도의 비로 구할 수 있다. 섬유보강 복합재료가 다중균열 발생 및 변형경화거동이 나타나기 위해서는 강도성능지수가 1보다 커야하며, 이 값이 클수록 다중균열 발생과 변형경화거동이 발생

할 확률이 높아지게 된다(Kanda and Li 2006). M1 배합, M2 배합 및 M3 배합의 강도성능지수는 각각 3.24, 3.87 및 3.35로 나타났고, 1보다 크게 나타나 강도조건을 만족하는 것으로 나타났다.

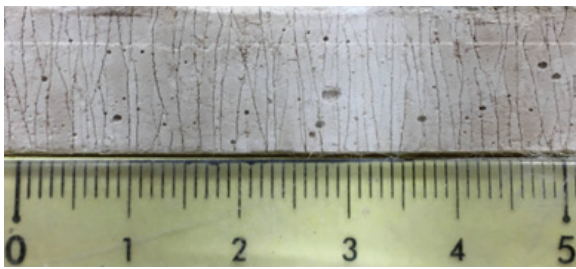
인장변형성능은 Fig. 4의 인장응력과 변형을 관계 곡선에서 인장강도에 해당하는 변형률을 의미한다. 인장강도 실험 결과와는 반대로 PE1 섬유를 혼입한 M1 배합의 인장변형성능이 8.03 %로서 PE2 섬유를 혼입한 M2 배합보다 11.7 % 높게 나타났다. 이는 섬유의 인장강도가 낮더라도 형상비가 상대적으로 높으면 이 연구에서 사용한 섬유보강 복합재료의 경우 인장변형성능을 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다. 이는 M1 배합이 M2 배합에 비하여 평균 균열폭이 크거나 균열의 개수가 더 많다는 것을 의미한다. 물-결합재비에 따른 영향은 상대적으로 물-결합재비가 높은 M3 배합의 인장변형성능이 8.62 %로서 M2 배합보다 19.9 % 높게 나타났다. PE2 섬유를 보강섬유로 사용할 경우 물-결합재비를 낮추면 강도적인 측면을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났고, 물-결합재비를 높이면 인장변형성능 측면을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

인성은 외부에서 가해진 에너지를 소산시킬 수 있는 능력을 의미하는 지표이다. 인성은 M1 배합이 M2 배합보다 12.4 % 높게 나타났고, M2 배합은 M3 배합보다 23.7 % 높게 나타났다. 인장강도는 M2 배합이 M1 배합보다 높고, 인장변형성능은 M3 배합이 M2 배합보다 높은데 이러한 결과가 나온 이유는 인성이 인장강도와 인장변형성능을 동시에 고려하는 성능지표이기 때문이다. 에너지 흡수 능력 측면에서는 섬유의 인장강도가 낮더라도 형상비가 상대적으로 높은 폴리에틸렌 섬유를 사용하는 것이 유리한 것으로 나타났고, 동일한 섬유를 사용할 경우 물-결합재비를 낮추면 유리한 것으로 나타났다.

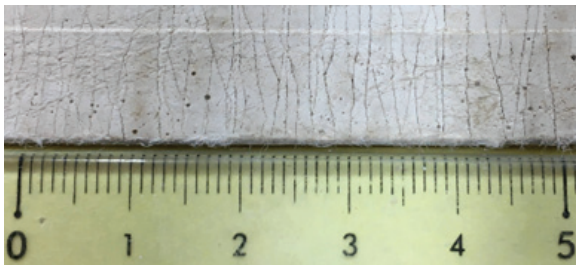
Fig. 6은 이 연구에서 실시한 각 배합들의 대표적인 균열패턴을 나타낸다. 모든 배합에서 다중 균열이 발생하였고, 균열들이 특정 구간에서 집중적으로 발생하지 않고, 실험체의 변위를 측정하는 전체 구간에서 고르게 발생한 것을 확인하였다. 이는 섬유가 실험체 전체적으로 고르게 분산되었다는 것을 의미한다. 섬유보강 복합재료는 다중균열이 발생한 후, 각각의 균열부위에서 균열폭이 제어되는데 이때 각각의 균열폭의 총합이 변형량이 되며, 이를 측정구간으로 나누어 인장변형성능을 계산한다. 따라서 균열개수와 균열간격, 균열폭을 계산하여 섬유보강 복합재료의 인장거동에 따른 균열패턴을 정량적으로 파악할 수 있다.

Fig. 7은 이 연구에서 실시한 각 배합들의 균열패턴을 나타낸다. 균열개수는 변형측정 구간 내에 발생한 균열의 개수를 의미한다. M1 배합의 균열개수는 M2 배합보다 22.7 % 높게 나타났다. 복합재료에서 새로운 균열은 균열면의 섬유로부터 마찰에 의하여 비균열

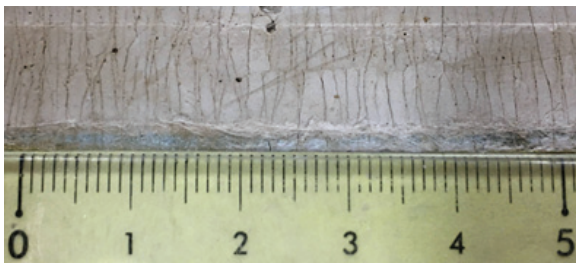




(a) M1



(b) M2

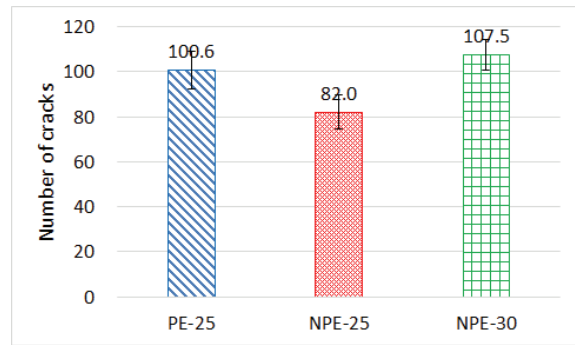


(c) M3

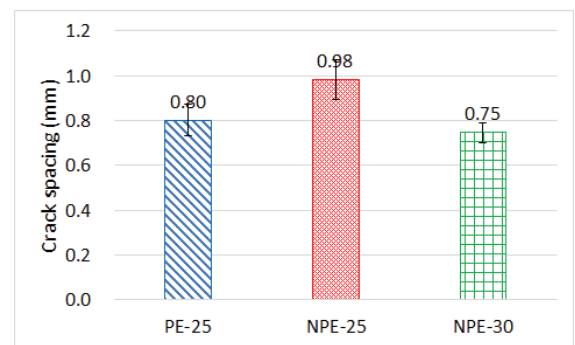
Fig. 6. Photos of representative cracking patterns

부분의 매트릭스로 응력이 전달되면서 발생하게 되기 때문에 비표면적과 계면 마찰력에 의해 결정된다. 형상비 차이(8.3%)에 비하여 균열개수 차이(22.7%)가 크다는 것은 유사한 화학 물질로 이루어진 폴리에틸렌 섬유라도 계면 마찰력에 차이가 있다는 것을 의미하며, PE1 섬유가 PE2 섬유에 비하여 계면 마찰력이 더 크다는 것을 의미한다. M3 배합의 균열개수는 M2 배합보다 31.1% 높게 나타났는데 이는 M3 배합의 균열강도가 M2 배합에 비하여 낮기 때문이며, 실제로 M3 배합의 균열강도는 M2 배합에 비하여 24.6% 낮았다.

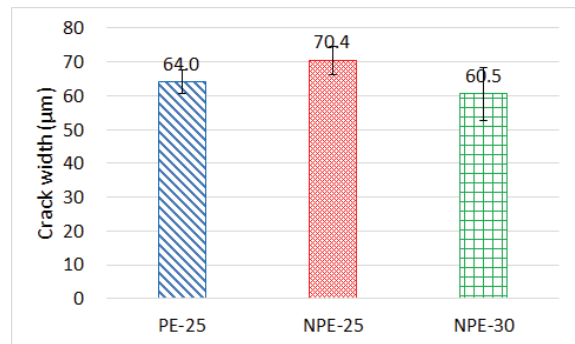
균열간격은 균열개수 결과와 반비례하며, M1 배합의 균열간격이 M2 배합보다 작은 것으로 나타났다. 마찬가지로 M3 배합의 균열간격 역시 M2 배합보다 작은 것으로 나타났다. 섬유의 인장강도가 낮더라도 형상비가 상대적으로 높은 M1 배합이 M2 배합보다



(a) Number of cracks



(b) Crack spacing



(c) Crack width

Fig. 7. Cracking pattern

균열간격이 작게 나타난 이유는 균열 개수 차이에 따른 이유와 동일한 이유 때문이다.

마지막으로 모든 배합의 평균 균열폭은 60.5 μm에서 70.4 μm 수준으로 균열폭 제어가 가능한 것으로 나타났다. Lepech and Li(2009)는 균열폭이 약 60 μm인 콘크리트는 균열이 없는 콘크리트와 유사한 수분 침투성을 나타낸다고 보고하였다. 따라서 이 연구에서 사용한 재료 및 제조방법을 이용하여 섬유보강 무시멘트

복합재료를 제조할 경우 균열부위의 수분 침투에 의한 성능저하는 크지 않을 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 인장강도 및 형상비가 다른 두 종류의 폴리에틸렌 섬유가 무시멘트 복합재료의 인장거동에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 조사하였다. 이를 위하여 섬유 종류 및 물-결합재비를 달리하여 실험체를 제작하였고, 밀도 실험, 압축강도 실험 및 일축 인장 실험을 수행하였다. 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 형상비가 높은 폴리에틸렌 섬유를 보강섬유로 사용하고, 고로 슬래그에 수산화칼슘을 10 % 대체 사용하여 결합재를 구성하며, 물-결합재비를 25 %로 하여 실험체를 제조하는 경우 압축 강도 45 MPa, 인장강도 11 MPa, 인장변형성능 8 %, 균열폭 64  $\mu\text{m}$  수준을 갖는 고연성 무시멘트 복합재료를 제조할 수 있는 것으로 나타났다.
2. 유사한 화학 구성을 갖는 폴리에틸렌 섬유이지만 인장강도가 10.9 % 낮은 반면 직경이 1 mm 작아 형상비가 8.3 % 큰 섬유를 사용한 배합은 다른 배합에 비하여 인장변형성능은 11.7 % 높고 인성은 12.4 % 높으며, 평균 균열폭은 9.1 % 작은 것으로 나타났다.
3. 물-결합재비가 증가하면 매트릭스의 강도가 저하되어 복합재료의 역학적 성능이 저하될 것으로 예상되지만 섬유보강 복합재료에서는 인장강도가 낮을 수 있지만 인장변형성능과 균열 패턴이 향상될 수 있는 것으로 나타났다.

#### Conflicts of interest

None.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 22CTAP-C163852-02)과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A4A1033838).

#### References

- ACI Committee 544 (1996). 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, *Journal of the 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.
- Lepech, M.D., Li, V.C. (2009). Water permeability of engineered cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*, **31(10)**, 744-753.
- Li, M., Li, V.C. (2013). Rheology, fiber dispersion, and robust properties of engineered cementitious composites, *Journal of the 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.
- Park, S.Y., Choi, J.I., Lee, B.Y. (2021). Effects of curing conditions on compressive strength and tensile behavior of alkali-active



slag-based fiber reinforced composites, Journal of the Korean Recycled Constuction Resources Institute, **9(3)**, 260-267 [in Korean].

Roy, D.M. (1999). Alkali-activated cements: opportunities and challenges, Journal of the 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.

**폴리에틸렌 섬유 종류에 따른 고로슬래그 기반 무시멘트 복합재료의 역학특성**

이 연구의 목적은 인장강도 및 형상비가 다른 폴리에틸렌 섬유가 무시멘트 복합재료의 인장거동에 미치는 영향을 실험적으로 조사하는 것이다. 이를 위하여 섬유 종류 및 물-결합재비를 달리한 세 가지 배합을 준비하였고, 밀도 실험, 압축강도 실험 및 일축인장 실험을 수행하였다. 실험결과 유사한 화학구조를 갖지만 인장강도가 10 % 낮고, 형상비가 8.3 % 높은 폴리에틸렌 섬유를 사용한 경우 복합재료의 인장변형성능과 인성이 각각 11.7 %와 12.4 % 높고 균열폭은 9.1 % 작은 성능을 나타내었다. 또한 동일한 폴리에틸렌 섬유를 사용한 경우 물-결합재비가 증가하여 복합재료의 강도가 낮지만 인장변형성능과 균열패턴이 향상될 수 있는 것으로 나타났다.