

# 폴리에틸렌섬유 보강 무시멘트 복합재료의 인장 거동

이방연<sup>1</sup>, 최정일<sup>1</sup>, 김영석<sup>2\*</sup>  
<sup>1</sup>전남대학교 건축학부, <sup>2</sup>충남대학교 건축학과

## Tensile Behavior of Polyethylene Fiber-Reinforced Cementless Composite

Bang Yeon Lee<sup>1</sup>, Jeong-II Choi<sup>1</sup>, Young-Suk Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Architecture, Chonnam National University

<sup>2</sup>Department of Architecture, Chungnam National University

**요약** 본 연구의 목적은 폴리에틸렌섬유로 보강한 무시멘트 복합재료의 인장 거동을 실험적으로 조사하는 것이다. 폴리에틸렌섬유 보강 무시멘트 복합재료의 성능을 평가하기 위하여 4가지 배합을 결정하였다. 물/결합재비는 0.30에서 0.38이며, 폴리에틸렌섬유의 혼입량은 부피비로 1.75 %이다. 일축 인장 실험, 밀도 실험, 압축강도 실험 등 일련의 실험을 수행하였으며, 실험결과 본 연구에서 조사한 폴리에틸렌섬유 보강 무시멘트 복합재료는 기존 복합재료에 비하여 높은 인장강도와 높은 연성 등 전반적으로 우수한 인장 성능을 나타내었다.

**Abstract** This study investigated experimentally the tensile behavior of polyethylene fiber-reinforced cementless composite. Four types of polyethylene fiber-reinforced cementless composite were designed. The water to binder ratio was 0.30-0.38, and the amount of polyethylene fiber was 1.75 vol%. A series of experiments including uniaxial tension, density, and compression tests were performed to evaluate the performance of the composites. From the test results, it was exhibited that the composite has superior tensile performance such as high tensile strength and tensile strain capacity compared with other types of composites.

**Keywords** : Cementless Composite, Polyethylene Fiber, Tensile Behavior

### 1. 서론

21세기 들어 전 세계적으로 주요 해결되어야 할 과제는 크게 5가지로 도시화, 노후화된 사회기반시설, 기후변화, 자연 및 인간에 의한 재해, 자원 및 물의 확보이다. 이 중 도시화, 노후화된 사회기반시설, 기후변화, 자연 및 인간의 의한 재해는 특히 건설분야와 밀접한 관계를 갖고 있다. 이러한 문제들 중에서 도시화에 의한 구조물의 고성능, 노후화된 사회기반시설물의 보수/보강, 기후변화 대응, 자연 및 인간의 의한 재해 저감 및 극복을 위

해서는 친환경적이며 고성능을 갖는 건설재료를 개발함으로써 어느 정도 기여할 수 있다.

잘 알려진 바와 같이 1 톤의 시멘트를 생산할 때 0.8 톤의 이산화탄소가 발생된다[1]. 최근 시멘트를 고로슬래그나 플라이애쉬와 같은 산업부산물로 대체하여 친환경성을 높이는 연구가 진행되고 있으며, 시멘트를 전혀 사용하지 않는 지오폐리머나 고로슬래그 기반 알칼리 활성 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[2-5].

산업 부산물을 이용하여 친환경성을 높이는 이러한 접근방법 이외에 재료의 연성과 내구성을 증진시키기 위

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(15RDRP-B076564-02)에 의해 수행되었으며, 또한 2012년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었음.

\*Corresponding Author : Young-Suk Kim(Chungnam National Univ.)

Tel: +82-42-821-5624 email: kys3810@cnu.ac.kr

Received May 13, 2015

Revised July 14, 2015

Accepted August 6, 2015

Published August 31, 2015

Table 1. Properties of GGBS (ground granulated blast furnace slag)

Material	Specific surface area [cm <sup>2</sup> /g]	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	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.
GGBS	4,320	2.92	31.5	13.0	0.5	44.6	4.9	3.4	0.8	0.5	0.9

한 연구가 진행되고 있으며, ECC(Engineered Cementitious Composite)로 알려진 고연성/고내구성 섬유 복합재료에 대한 연구가 국내에서도 활발히 진행되고 있다.

최근에 친환경성과 고연성을 동시에 확보하기 위하여 알칼리 활성 슬래그를 결합재로 사용한 무시멘트 모르타르에 부피비 2 %의 폴리비닐알코올섬유를 혼입하여 압축강도 30 MPa, 인장강도 4 MPa, 인장변형 4 %의 성능을 나타내는 고연성 섬유 보강 복합재료에 관한 연구가 진행되었다[6]. 이외에 플라이애쉬 기반 지오폴리머를 이용한 고연성 섬유 보강 복합재료에 관한 연구가 제한적으로 수행되었다[7-9].

본 연구의 목적은 기존 알칼리 활성 슬래그 기반 고연성 복합재료의 인장 성능을 향상시키기 위하여 폴리에틸렌섬유를 혼입한 복합재료의 성능을 실험적으로 조사하고 동시에 골재 혼입에 따른 영향을 조사하는 것이다.

## 2. 재료 및 실험 방법

### 2.1 사용 재료

#### 2.1.1 고로슬래그

본 연구에서 사용된 고로슬래그는 KS F 2563에 규정되어 있는 3종 분말도(4,320 cm<sup>2</sup>/g)인 콘크리트용 고로슬래그이며, 비중과 염기도는 각각 2.92와 1.80이다. Table 1은 XRF(x-ray fluorescence) 분석을 통해 구한 본 연구에서 사용한 고로슬래그의 화학 성분을 나타낸다.

#### 2.1.2 알칼리 활성화제

알칼리 활성화제는 6가지 즉, 수산화 계열의 가성 알칼리 계열, 비규산계 약산염, 규산염, 알루미늄산염, 알루미늄 규산염, 비규산계 강산염 등으로 분류할 수 있으며 [10], 본 연구에서는 가격이 비교적 저렴하면서 성능이 우수한 것으로 나타난 분말형의 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)과 황산나트륨(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)을 알칼리 활성화제로 사용하였다 [6].

### 2.1.3 골재

콘크리트의 파괴인성은 골재의 크기가 증가함에 따라 커진다[11]. 그러나 섬유 보강 콘크리트에서는 매트릭스의 파괴인성이 작을수록 복합체에서 안정상태 균열 (steady state crack)이 발생할 확률이 커지기 때문에 골재를 사용하지 않아서 매트릭스의 파괴인성을 줄이거나 크기가 작은 골재를 사용하여야 한다. 본 연구에서 사용한 골재는 평균 직경이 100 μm이고 비중이 2.65인 규사 (silica sand) 7호를 잔골재로 사용하였다.

### 2.1.4 혼화제 및 폴리에틸렌섬유

유동성을 향상시키고 균일한 섬유 분산성을 얻기 위하여 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용하였고, 보강 섬유로는 직경이 12 μm이고, 길이가 18 mm이면서 단면이 원형인 직선형 폴리에틸렌섬유를 사용하였다. Table 2는 폴리에틸렌섬유의 물성을 나타낸다.

Table 2. Properties of fiber

Type of fiber	Diameter [μm]	Length [mm]	Tensile strength [MPa]	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Elastic modulus [GPa]
PE	12	18	2,700	0.91	6

## 2.2 배합, 양생 및 실험 방법

### 2.2.1 배합 및 양생

본 연구에서는 4가지 배합을 검토하였다(Table 3). 결합재의 주요 재료는 고로슬래그이며, 알칼리 활성화제의 종류와 비율은 한 가지로 통일하였으며, 매트릭스 강도별 영향을 검토하기 위해 물/결합재비를 30 %, 34 %, 40 %로 설정하였다.

Table 3. Mix proportion of composite (ratio in weight except fiber)

Mixture	Binder			Water	Sand	HRWRA <sup>a</sup>	Fiber (by vol.%)
	GGBS	Ca(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>				
M30	0.895	0.075	0.03	0.30	-	0.005	1.75
M34	0.895	0.075	0.03	0.34	-	0.003	1.75
M38	0.895	0.075	0.03	0.38	-	0.002	1.75
M34-S	0.895	0.075	0.03	0.34	0.4	0.012	1.75

<sup>a</sup> High-range water-reducing admixture

38 % 3수준으로 결정하였고, 골재의 영향을 검토하기 위해 중간 강도를 갖는 물/결합재비 34 %에 대해 결합재 무게 대비 40 %의 잔골재를 혼입한 배합을 추가하였다. 고성능 감수제의 양은 섬유유 침투 현상이 발생하지 않고 균일한 분산성을 확보하기 위하여 매트릭스의 점성이 충분하도록 배합에 따라 적정 수준을 혼입하였다[12].

섬유유 양은 섬유유 가교 작용과 매트릭스의 파괴 인성에 대한 미시역학 변수 값 들을 알게 되면 이론적으로 계산할 수 있다[6]. 일반적으로 고연성 섬유 보강 복합재료를 제조하는데 부피비로 2 %의 합성섬유유를 혼입하고 있는데 본 연구에서는 인장강도가 높고 단면적이 작은 폴리에틸렌섬유유를 사용하였기 때문에 혼입량을 부피비 1.75 %로 정하였다.

각 재료는 중량 비로 계량한 후, 분말형 재료인 결합재와 규사를 넣고 1분 동안 건비빔을 실시하고, 배합수를 혼입한 후 1분 동안 혼합하면서 고성능 감수제를 첨가하였다. 매트릭스가 균일하게 혼합된 후 폴리에틸렌섬유유를 1분에 걸쳐 조금씩 넣고 4분 동안 혼합하였다. 혼합이 완료된 후 압축강도와 일축 인장 실험을 위한 시편을 제작하여 (23 ± 3) °C와 상대습도 (50 ± 5) % 조건에서 양생하고, 타설 2일 후 탈형하여 재령 28일까지 양생 온도 (23 ± 2) °C의 양생 수조에서 수중양생을 실시하였다.

2.2.2 실험 방법

직접인장 실험을 통해 섬유 보강 복합재료의 인장성능을 평가하였다. 일본토목학회에서 제안한 방법[13]에 따라 Fig. 1(a)와 같은 형태의 실험체를 제작한 후, 28일 재령에서 인장성능을 평가하였다. 실험체는 각 배합별로 3개씩 제작하였고, 직접인장 실험은 최대용량 2톤의 인장강도 시험기에서 0.1 mm/min. 속도의 변위 제어 방식으로 수행하였다. 변위 측정 방법은 실험체의 좌우 측면에 100 mm의 변위계를 부착하여 측정하였으며, 변형률 환산을 위한 측정길이는 80 mm이며 측정구간 내의 단면은 30 mm × 13 mm로 일정하다. Fig. 1(b)는 직접인장 실험 모습을 나타낸다.

밀도는 혼합과정에서 의도하지 않은 과도한 기포가 생성되는가를 확인하기 위하여 각 배합별로 3개씩 제작한 50 mm 입방 실험체를 이용하여 공기 중 무게와 수중 무게를 측정하여 다음 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$\rho = \frac{W_{air}}{W_{air} - W_{water}} \times \rho_w \tag{1}$$

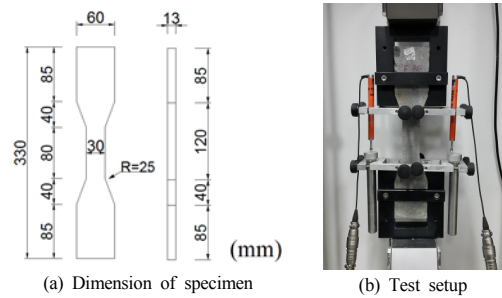


Fig. 1. Dimension of specimen and test setup

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

압축강도는 밀도를 측정할 시편체를 이용하여 KS L 5105에 규정된 방법에 따라 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 인장성능

Fig. 2는 배합별 직접인장 응력-변형률 곡선을 나타낸다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 모든 실험체에서 일반 콘크리트와 달리 첫 번째 균열이 발생한 이후 변형 경화 거동이 뚜렷이 나타났다. 최대 응력에 해당하는 인장강도에 도달한 후 변형이 증가하면서 응력이 감소하는 변형 연화 거동이 나타났으며, 변형 연화 거동 중에는 하나의 균열 폭이 지속적으로 커지면서 최종적으로 실험체가 파괴되는 양상을 나타내었다.

M30의 인장성능은 3개의 실험체에 대하여 평균적으로 첫 번째 균열강도, 인장강도, 인장변형이 각각 4.8 MPa, 12.9 MPa, 6.6 %로 나타났다. 최초의 PE-ECC가 첫 번째 균열 강도 약 3 MPa, 인장강도 약 5.5 MPa, 인장변형 약 6 % 정도를 나타내었는데, 이와 비교하면 인장강도 측면에서 2배가 넘는 성능이다[14]. 보강섬유유 종류가 다른 최초의 PVA-ECC는 인장강도 4.5 MPa, 인장변형은 약 4 %를 나타내었는데 이와 비교하면 강도와 변형성능 측면에서 이 복합재료의 성능이 뛰어난을 알 수 있다[15]. 또한 최근 활발히 연구되고 있는 150 MPa 이상의 압축강도를 갖는 초고성능 콘크리트(Ultra-high performance Concrete)와 비교하면 인장성능은 매우 차이가 있다. Ranade 등[16]은 첫 번째 균열강도 8.3 MPa, 인장강도 14.5 MPa, 인장변형 3.4 %을 갖는 고강도 고

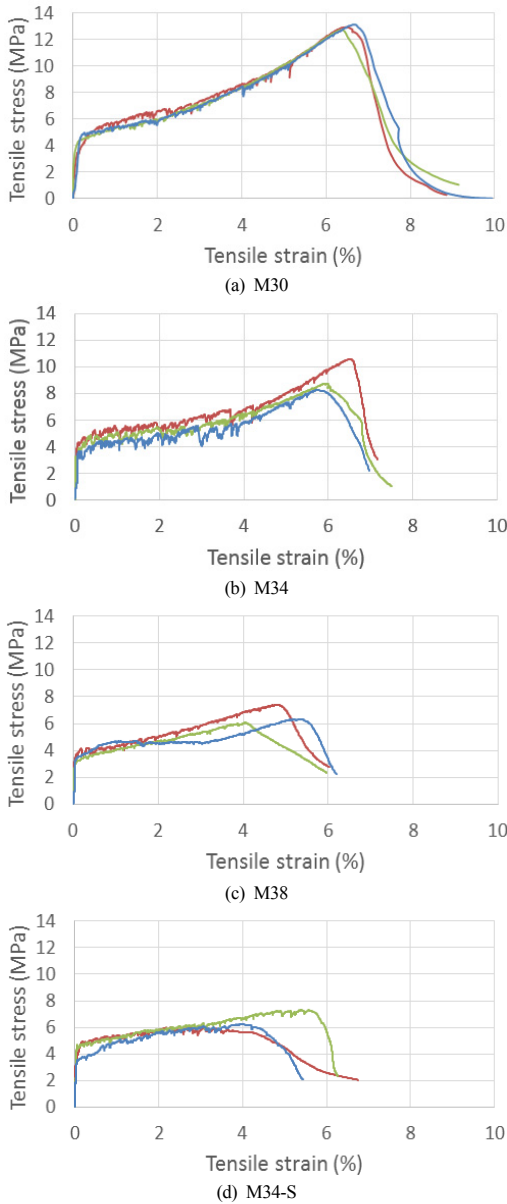


Fig. 2. Tensile stress and strain curves

연성 콘크리트에 대한 연구 결과를 발표하였는데 이 콘크리트의 경우 압축강도 166 MPa을 발휘시키기 위하여 일반 콘크리트와 달리 특수한 재료 및 배합을 갖는다. 또한 높은 강도를 갖는 콘크리트의 경우 보통 강도 콘크리트에 비하여 품질관리가 어렵다는 측면을 갖고 있다. Lee 등[6]에 의해 연구된 최초의 무시멘트 섬유 보강 복합재료의 경우 첫 번째 균열강도 3.9 MPa, 인장강도 4.7

MPa, 인장변형 4.5 %를 나타내는데 이와 비교하여도 매우 높은 인장 성능이다. 따라서 기존의 대표적인 고연성 섬유 보강 복합재료와 비교하여 본 연구에서 구현한 섬유 보강 복합재료는 압축강도를 높이기 위하여 특별한 재료 및 배합 설계 없이 우수한 인장 성능을 갖고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 첫 번째 균열이 발생하는 균열강도이며, 예상할 수 있듯이 물/결합재비가 증가함에 따라 균열강도는 감소하였다. 골재를 혼입한 M34-S를 M34와 비교하면 균열강도는 큰 차이가 발생하지 않았다.

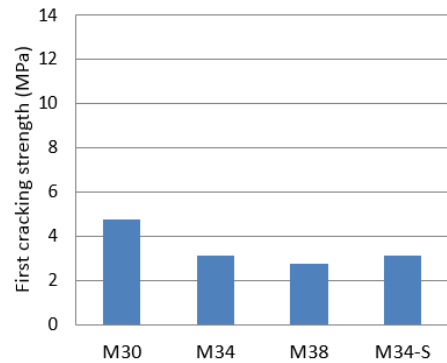


Fig. 3. First cracking strength

Fig. 4는 측정된 인장강도로서 복합재료의 최대 인장 응력을 의미하며, 동시에 각 실험체의 균열면에서 섬유가 저항하는 최소 섬유가교응력에 해당된다. M34와 M38은 M30에 비하여 인장강도가 각각 29 %, 49 % 감소하는 것으로 나타났다. 이는 물/결합재비의 감소에 따라 섬유와 매트릭스 사이의 부착 특성이 감소하였기 때문인 것으로 판단된다. 골재혼입에 따른 영향은 골재 혼입에 따라 인장강도가 29 % 감소하는 것으로 나타났다.

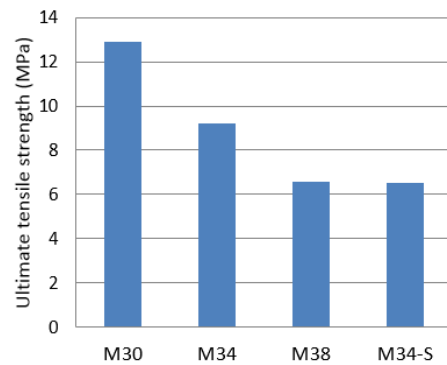


Fig. 4. Ultimate tensile strength

Fig. 5는 물/결합재비와 골재혼입에 따라 복합재료의 인장변형 성능, 즉 인장강도에 도달했을 때 변형률을 의미하는 극한 인장변형률을 나타낸다. M34와 M38은 M30에 비하여 각각 6.2 %, 27 % 감소되는 것으로 나타났다. 또한 골재혼입에 따라 극한 인장변형률이 감소되는 것으로 나타났다. 이는 골재 혼입에 따라 매트릭스의 파괴인성이 증가하였기 때문이다.

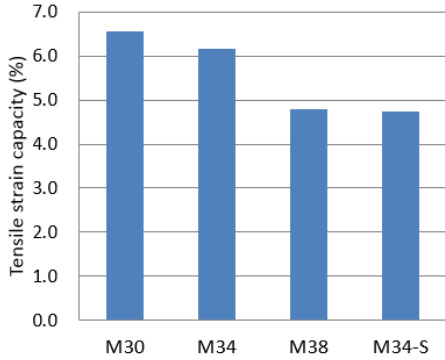
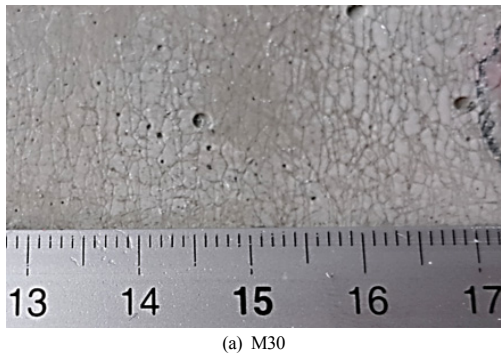
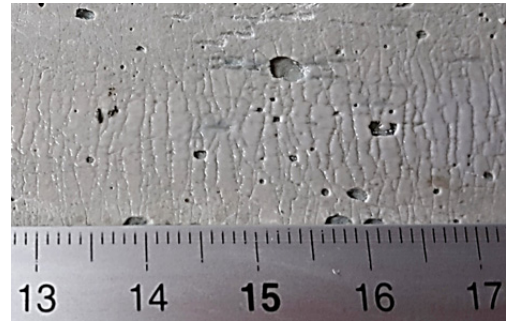


Fig. 5. Tensile strain capacity in terms of ultimate strain

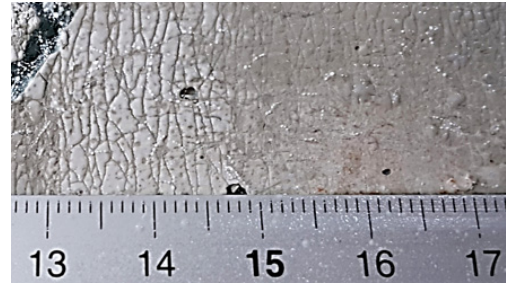
Fig. 6은 균열 패턴을 나타낸다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 모든 실험체에서 미세한 다중 균열이 발생한 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 매크로 수준에서 복합재료의 성능을 평가하여 인장 성능이 매우 우수함을 보였다. 그러나 이와 같이 인장하중 하에서 고강도와 고연성이 나오는 이유를 정량적으로 분석하기 위해서는 섬유 인발 실험 및 섬유 가교 거동에 대한 실험 및 분석을 위한 추가 연구가 필요하다.



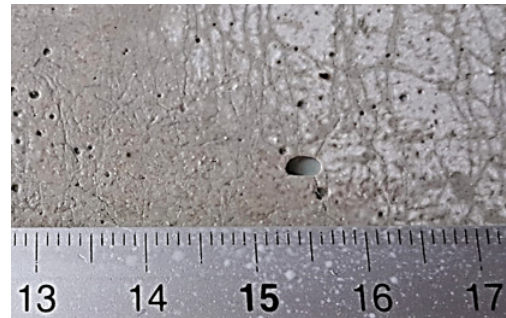
(a) M30



(b) M34



(c) M38



(d) M34-S

Fig. 6. Cracking patterns (Unit of number is cm)

### 3.2 밀도

Fig. 7은 배합별 밀도를 나타낸다. M30 실험체의 밀도는 평균  $2.00 \text{ g/cm}^3$ 을 나타내었다. M34와 M38의 밀도는 M30 대비 각각 3.0 %와 4.0 % 낮은 것으로 나타났으며, 이는 물/결합재비 증가에 따른 영향이다. 이와 반대로 M34-S의 밀도는 M30와 M34 대비 각각 3.5 %, 6.7 % 높은 것으로 나타났는데 이는 상대적으로 밀도가 큰 골재가 함유되었기 때문이다. 이론적으로 계산한 밀도와 오차는 각각 0.30 %, 0.05 %, 1.87 %, 1.22 %로 나타났다. 이 실험을 통하여 본 연구에서 적용한 방법을 통해 제조할 경우 의도하지 않은 과도한 기포가 생성되지 않은 것을 확인할 수 있다.

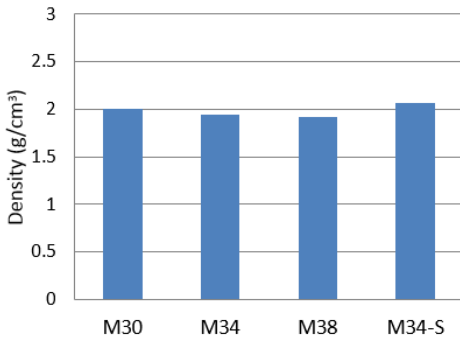


Fig. 7. Density

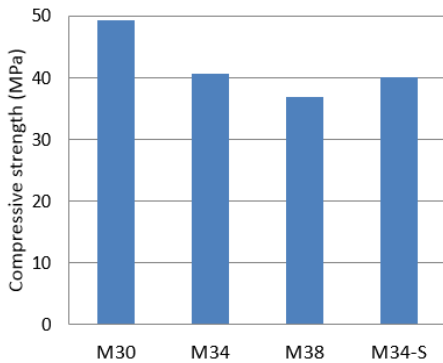


Fig. 8. Compressive strength

### 3.3 압축강도

Fig. 8은 배합별 압축강도를 나타낸다. 물/결합재비가 가장 낮은 M30이 가장 높은 압축강도를 나타내었으며, 물/결합재비가 높아질수록 비례하여 압축강도가 감소하였다. M34와 M34-S를 비교해 보면 골재 혼입에 따른 압축강도의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다.

압축강도 대비 첫 번째 균열강도의 경우 평균 8.10 %로 나타났고, 배합별로 각각 9.62 %, 7.64 %, 7.40 %, 7.75 %로 나타났다. 이 비율은 일반 콘크리트와 유사한 것으로 나타났다. 이에 반하여 압축강도 대비 인장강도의 경우 평균 20.7 %로 나타났고, 배합별로 각각 26.2 %, 22.6 %, 17.9 %, 16.3 %로 나타났다. 강도설계법을 이용하여 철근콘크리트 구조물을 설계할 때 균열 발생 이후에 콘크리트의 인장력은 없는 것으로 가정하고 있는데, 이는 콘크리트의 인장강도가 압축강도에 비해 작고 부재에서 하중 저항에 기여하는바가 크지 않기 때문에 보수적으로 설계하기 위해서이다. 그러나 본 연구에서 구현한 복합재료의 경우 압축강도 대비 인장강도가 평균 20 % 수준으로 일반 콘크리트에 비하여 2배 이상이며,

연성 또한 매우 높기 때문에 새로운 고성능 건설재료로서 활용도가 매우 높을 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 알칼리 활성 슬래그를 결합재로 사용한 모르타르에 폴리에틸렌섬유를 혼입한 복합재료의 역학 성능을 실험적으로 조사하고자 하였다. 이를 위하여 수산화칼슘과 황산나트륨을 활성화제로 사용한 고로슬래그 기반 모르타르에 부피비로 1.75 %의 폴리에틸렌섬유를 혼입하여 실험체를 제작한 후 직접 인장 실험, 밀도 및 압축강도 등 일련의 실험을 수행하였고, 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 물/결합재비가 30 %에서 38 %인 알칼리 활성 슬래그 기반 모르타르에 폴리에틸렌섬유를 부피비로 1.75 % 혼입하여 재령 28일에 밀도 1.9 g/cm<sup>3</sup> - 2.1 g/cm<sup>3</sup>, 압축강도 36.9 MPa - 49.4 MPa, 첫 번째 균열강도 2.7 MPa - 4.8 MPa, 인장강도 6.5 MPa - 12.9 MPa, 인장변형 4.7 % - 6.6 %의 성능을 갖는 복합재료를 제조하였다.
- 2) 물/결합재비 30 %인 배합의 경우, 압축강도 49.4 MPa, 첫 번째 균열 강도 4.8 MPa, 인장강도 12.9 MPa, 인장변형 6.6 %의 성능을 나타내었다. 이러한 성능은 기존에 보고된 복합재료에 비하여 우수한 성능이며, 특히 일반 콘크리트의 압축강도 대비 인장강도가 약 10 % 정도인 반면 이 복합재료는 압축강도 대비 인장강도가 26 %로 나타났다.
- 3) 본 연구에서 사용한 결합재의 경우 물/결합재비가 감소함에 따라 압축강도, 첫 번째 균열강도, 인장강도, 인장변형 측면에서 성능이 향상되는 것으로 나타났으나, 골재를 혼입함에 따라 성능이 떨어지는 것으로 나타났다.
- 4) 밀도 실험을 통해 본 연구에서 적용한 혼합 방법에 의해 의도하지 않은 과도한 기포가 생성되지 않는 것을 확인하였다.

향후 성능 안정화와 거동에 대한 정량적 분석을 위하여 고로슬래그 기반 알칼리 활성 모르타르의 역학 특성과 섬유와 모르타르 사이의 계면 특성에 관한 추가 연구

가 필요할 것으로 판단되며, 균일한 성능만 확보할 수 있다면 새로운 고성능 건설재료로서 활용도가 매우 높을 것으로 판단된다.

## References

- [1] V. M. Malhotra, "Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology", Concrete International, 24(7), 22, 2001.
- [2] A. Bilodeau, V. M. Malhotra, "High-Volume Fly Ash System: Concrete Solution for Sustainable Development", ACI Materials Journal, 97(1), 41-48, 2000.
- [3] F. G. Collins, J. G. Sanjayan, "Workability and Mechanical Properties of Alkali Activated Slag Concrete", Cement and Concrete Research, 29(3), 455-458, 1999.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00236-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00236-1)
- [4] K. H. Yang, J. K. Song, A. F. Ashour, E. T. Lee, "Properties of Cementless Mortars Activated by Sodium Silicate", Construction and Building Materials, 22(9), 1981-1989, 2008.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.003>
- [5] K. H. Yang, A. R. Cho, J. K. Song, "Properties of Cementless Mortars Activated by Sodium Silicate", Construction and Building Materials, 29, 504-511, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.062>
- [6] B. Y. Lee, C. G. Cho, H. J. Lim, J. K. Song, K. H. Yang, V. C. Li, "Strain Hardening Fiber Reinforced Alkali-Activated Mortar - A Feasibility Study", Construction and Building Materials, 37, 15-20, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.007>
- [7] M. Ohno, V. C. Li, "A Feasibility Study of Strain Hardening Fiber Reinforced Fly Ash-Based Geopolymer Composites", Construction and Building Materials, 57, 163-168, 2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.005>
- [8] B. Nematollahi, J. Sanjayan, F. U. A. Shakh, "Tensile Strain Hardening Behavior of PVA Fiber-Reinforced Engineered Geopolymer Composite, Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE), 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001242 , 04015001.
- [9] B. Nematollahi, J. Sanjayan, F. U. A. Shakh, "Strain Hardening Behavior of Engineered Geopolymer Composites: Effects of the Activator Combination", Journal of The Australian Ceramic Society, 51(1), 54-60, 2015.
- [10] C. Shi, D. Roy, P. V. Krivenko, Alkali-Activated Cements and Concrete, Taylor and Francis, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4324/9780203390672>
- [11] B. Chen, J. Liu, "Effect of Aggregate on the Fracture Behavior of High Strength Concrete", Construction and Building Materials, 18, 585-590, 2004.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.013>
- [12] M. Li, V. C. Li, "Rheology, Fiber Dispersion, and Robust Properties of Engineered Cementitious Composites", Materials and Structures, 46(3), 405-420, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-012-9909-z>
- [13] Japan Society of Civil Engineers, Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), Concrete Engineering Series, 2008.
- [14] M. Maalej, V. C. Li, "Flexural/Tensile-Strength Ratio in Engineered Cementitious Composites, Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE), 6(4), 513-528, 1994.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1994\)6:4\(513\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1994)6:4(513))
- [15] V. C. Li, S. Wang, C. Wu, "Tensile Strain-Hardening Behavior of PVA-ECC", ACI Materials Journal, 98(6), 483-492, 2001.
- [16] R. Ranade, V. C. Li, M. D. Stults, W. F. Heard, T. S. Rushing, "Composite Properties of High-Strength, High-Ductility Concrete", ACI Materials Journal, 110(4), 413-422, 2013.

## 이 방 연(Bang Yeon Lee)

[정회원]



- 2002년 2월 : KAIST 건설및환경 공학과 (공학사)
- 2004년 2월 : KAIST 건설및환경 공학과 (공학석사)
- 2009년 1월 : KAIST 건설및환경 공학과 (공학박사)
- 2011년 2월 ~ 현재 : 전남대학교 건축학부 교수

<관심분야>

섬유보강 복합재료, 고성능 콘크리트, 친환경 건축재료

---

**최 정 일**(Jeong-II Choi)

[정회원]



- 2012년 2월 : 전남대학교 건축학부 (공학사)
- 2014년 2월 : 전남대학교 건축학부 (공학석사)
- 2015년 2월 : 전남대학교 바이오하우징
- 2015년 3월 ~ 현재 : 전남대학교 건축학부 박사과정

<관심분야>

건축재료, 초고성능 콘크리트

---

**김 영 석**(Young-Suk Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 건축학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 서울대학교 대학원 건축학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 서울대학교 대학원 건축학과 (공학박사수료)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 건축학과 교수

<관심분야>

건축계획, 주거론, 생태건축