

# 물-결합재 비율과 섬유 종류에 따른 고연성 복합재료의 압축 및 인장특성

## Compressive and Tensile Properties of Highly Ductile Composites According to Water-binder Ratio and Fiber Type

박세연<sup>1</sup> · 이방연<sup>2\*</sup>Se-Eon Park<sup>1</sup> · Bang Yeon Lee<sup>2\*</sup>

(Received March 30, 2024 / Revised May 10, 2024 / Accepted May 16, 2024)

The purpose of this study is to experimentally investigate the effect of water-binder ratio and fiber type on the compressive strength and tensile performance of fiber reinforced highly ductile composites. To achieve this, four different mixtures were prepared by varying the water-binder ratio and fiber type, and compression and tension tests were conducted. The test results showed that the influence of fiber type on compressive strength was minimal, however, the WB50 series mixture exhibited a 29 % lower strength compared to the WB40 series mixture, indicating a significant effect of the water-binder ratio. On the other hand, the effect of fiber type on tensile properties was found to be more significant than that of the water-binder ratio. Tensile strain capacity ranged from 2.9 % to 6.2 %, with PE series mixtures showing 1.63 to 2.14 times higher performance compared to PVA series mixtures. Additionally, the crack patterns of the PE series mixtures were superior than those of the PVA series mixtures.

**키워드** : 고연성, 섬유, 하이볼륨 슬래그 복합재료**Keywords** : High ductility, Fiber, High volume slag composites

### 1. 서론

다양한 건설 재료 중에서 콘크리트는 경제적이며 상대적으로 자원이 풍부할 뿐만 아니라, 자유로운 성형이 가능하며 내구성과 내화성이 우수하기 때문에 널리 사용되고 있다. 그러나 콘크리트는 취성적인 거동을 나타내며, 압축강도에 비해 낮은 인장강도를 가지는 단점과 콘크리트의 주재료인 시멘트를 1 톤을 생산하기 위해 원료 2.5 톤을 소비하며, 다량의 이산화탄소를 배출한다는 단점이 있다(Gholampour and Ozbakkalogl 2017; Malhotra 2002).

이러한 단점 중 취성적인 거동을 극복하고 연성을 부여할 수 있는 섬유보강 기술을 적용하는 연구가 적극적으로 이루어지고 있다. 대표적으로 인장하중 하에서 일반 콘크리트의 수백 배에 달하는 인장변형능을 나타내는 고연성 섬유보강 시멘트 기반 복합재료(ECC: Engineered Cementitious Composites)가 있다(Maalej and Li 1994; Li et al. 2001).

ECC는 파괴역학과 안정상태균열이론을 바탕으로 페이스트 또는 모르타르에 고성능 합성섬유를 전체 부피의 2 % 이내로 혼입하여 다중균열과 변형을 경화 거동을 나타나게 함으로써 인장강도와 연성을 향상한 섬유보강 복합재료이다(Maalej and Li 1994). 특히 고연성은 섬유가교 거동에 의한 다중균열 발생 및 각각의 균열에서 균열폭 제어를 통하여 나타난다. 이때 섬유가교거동은 매트릭스의 특성(강도, 탄성계수, 균열강도, 파괴인성 등), 매트릭스와 섬유 사이의 계면특성(화학적 부착강도, 마찰 부착 강도, 미끌림 경화 특성 등), 섬유의 특성(길이, 직경, 탄성계수, 인장강도, 혼입량 등)에 의하여 결정되며, 이를 최적화함에 따라 고연성 구현이 가능하다. 따라서 매트릭스 특성과 매트릭스와 섬유 사이의 계면특성에 영향을 미치는 물결합재비와 매트릭스와 섬유 사이의 계면특성과 섬유특성에 영향을 미치는 섬유의 종류에 따른 성능에 영향을 미치게 된다.

\* Corresponding author E-mail: [bylee@jnu.ac.kr](mailto:bylee@jnu.ac.kr)<sup>1</sup>전남대학교 건축토목공학과 박사과정 (Department of Architecture and Civil Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)<sup>2</sup>전남대학교 건축학부 교수 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

Copyright © 2024 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

그러나 이러한 역학성능 개선에도 불구하고 환경 측면에서 콘 크리트에 비해 ECC가 더 많은 이산화탄소를 배출하며, 높은 내재 에너지를 필요로 하는 한계가 있다. 이는 이론적으로 연성을 확보 하기 위해서 매트릭스 파괴인성을 낮춰야 하기 때문에 단위 골재 량은 감소하고 단위 시멘트량이 증가함에 따라 이산화탄소 배출량 이 많고, 합성섬유 제작 시 종량 대비 많은 이산화탄소 배출량과 내재 에너지를 필요로 하기 때문이다(Zhong and Zhang 2021).

이에 시멘트 사용량을 줄이거나 시멘트를 대체할 수 있는 건설 재료를 개발하기 위한 연구도 진행 중이다. 특히 잠재 수경성을 가지고 있는 고로 슬래그 미분말(GGBS:ground granulated blast furnace slag), 포졸란 재료인 플라이 애시(Fly ash)등을 모 재료로 사용하여 시멘트를 대체하는 하이볼륨 복합재료(High-volume composites)에 대한 연구가 활발히 진행 중이다(Kwon et al. 2014; Lao et al. 2023). 그 중 슬래그는 콘크리트의 장기강도 개선, 수화 발열량 감소, 유동성과 수밀성 증대, 염해 및 동결융해 저항성 등 이 향상되는 장점을 갖고, 최대 60 %~80 %까지 시멘트를 대체할 수 있다. 반면 플라이 애시는 슬래그와 유사한 특성을 가지면서도 포졸란반응을 위하여 수산화칼슘이 소비되기 때문에 10 %~30 % 수준으로 대체 가능하다. 이에 철강산업이 발달한 나라에서는 하 이볼륨 복합재료의 결합재로 시멘트 대체율이 높으면서 우수한 역학성능을 나타내는 슬래그가 많이 사용된다(Shi et al. 2003; Kang et al. 2020; Elahi et al. 2020).

기존의 연구를 고려하여 설정한 이 연구의 목적은 섬유를 혼입 하여 콘크리트의 취성적인 성질을 개선하고, 산업부산물인 GGBS 를 활용하여 시멘트를 일부 대체함으로써 콘크리트가 가지고 있는 취성적 성질과 이산화탄소 배출 문제를 모두 해결한 고연성 · 친환경 건설 재료인 하이볼륨 슬래그 섬유보강 복합재료에서 물결합재

비와 섬유 종류가 압축강도와 인장성능에 미치는 영향을 실험적으 로 조사하는 것이다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1 실험 재료 및 배합

Table 1은 이 연구에서 조사한 배합을 나타내며, 섬유를 제외하 고 결합재 대비 질량비이다. 결합재는 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 고로 슬래그 미분말을 사용하였으며, 각각 혼입 비율은 전체 결합 재의 50 %에 해당한다. 고로슬래그 미분말은 밀도는 2.91 g/cm<sup>3</sup>, 분말도 4030 cm<sup>2</sup>/g으로 KS F 2563 기준 1종을 사용하였다. 물결 합재비에 대한 영향을 알아보기 위해 물결합재비(W/B)를 결합재 질량을 1(100 %)로 기준하여 각각 0.4(40 %), 0.5(50 %)로 다르게 설정하였다. XRF(X-ray fluorescence) 분석에 의해 측정된 시멘 트와 슬래그의 화학 성분 비율은 Table 2와 같다. 페타이어 고무 분말(CR: crumb rubber)은 수명이 지난 자동차 타이어를 분쇄한 것으로 이 연구에서는 40 mesh 체에 걸러 포집한 미분말을 사용 하였다. 이는 여러 연구에서 고무 분말을 사용하면 압축강도가 감 소하지만 매트릭스의 균열 강도를 감소시켜 미세 다중 균열 발생 에 도움을 주어서 변형성능 증진하는 데 도움이 되기 때문이다 (Khaloo et al. 2008; Abdulkadir et al. 2020). 수축 저감과 강성 확보를 위해 평균 크기가 100 μm인 규사(SS : silica sand) 7호를 잔골재로 사용하였다. 굵은 골재는 매트릭스의 파괴인성을 증가시 키기 때문에 사용하지 않았다. 복합재료의 수축을 줄이기 위해 팽 창제(EA: expansive admixture)를 사용하였으며, 균질한 섬유 분 산과 유동성 확보를 위하여 폴리 카르보산계 고성능 감수제(SP: superplasticizer)와 메틸셀룰로오스 계열 증점제(VMA: viscosity

Table 1. Mixture proportion of matrix

Mixture	Binder		Water	CR	SS	EA	SP	VMA	DF	Fiber vol.%	
	Cement	GGBS								PE	PVA
WB40-PVA	0.5	0.5	0.4	0.1	0.5	0.05	0.0022	0.0006	0.001	0	1.5
WB50-PVA			0.5				0.0007	0.0011	0.001		
WB40-PE			0.4				0.002	0.0005	0.001	1.5	0
WB50-PE			0.5				0.001	0.001	0.001		

Table 2. Chemical composition of cement and GGBS

Materials	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	Na <sub>2</sub> O	Other
Cement	8.2	2.7	5.02	66.4	0.6	2.8	0.21	-	9.1	4.97
GGBS	34.95	13.58	0.53	42.88	3.58	2.52	0.63	0.61	0.26	0.46

Table 3. Physical properties of PE and PVA fibers

Fiber	Length (mm)	Diameter (μm)	Tensile strength (MPa)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Elastic modulus (GPa)
PE	12	16	2700	0.97	88
PVA	8	40	1560	1.3	41

modifying admixture)를 사용하였다. 실험체 제작 과정에서 의도하지 않은 기포로 인하여 압축강도와 인장거동에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 소포제(DF: defoamer)를 사용하였다. 보강 섬유로는 대표적인 친수성 섬유인 폴리비닐알코올(PVA: polyvinyl alcohol)과 소수성 섬유인 폴리에틸렌(PE: polyethylene) 섬유를 사용하였으며, 물리적 특성은 Table 3과 같다. 섬유 혼입량은 전체 부피의 1.5 %이다.

### 2.2 실험체 제작 및 실험 방법

재료의 혼합은 2개의 회전축을 가진 혼합기를 사용하였으며, 결합재, 팽창제, 규사, 고무 분말을 넣고 약 1분간 건비빔 하였다. 다음으로 배합수와 고성능 감수제, 증점제를 넣어 적절한 유동 상태를 만든 후, 섬유를 투입하고 혼합기에서 고속으로 약 5분간 혼합하였다. 각 배합에서 매트릭스 내에 섬유가 균질하게 분포된 것을 확인한 후, 마지막으로 소포제를 투입하고 혼합기에서 저속으로 2분간 혼합하여 안정화하였다.

혼합이 완료된 후 밀도 측정과 압축강도 측정을 위하여 배합별로 3개의 50 mm 입방형 시험체를 제작하였다. 인장거동 실험을 위하여 일본토목학회에서 제안한 실험체 형상(Fig. 1(a))에 따라 아령 형상의 인장 실험체를 배합별로 4~5개씩 제작하였다. 인장 실험체의 형상은 Fig. 1(a)와 같다. 금형에 혼합물을 넣은 후 수분 증발을 방지하기 위하여 플라스틱 필름을 표면에 씌운 후 양생 온도 23 °C ± 3 °C, 상대습도 60 % ± 5 %에서 2일 동안 기중 양생을 한 후 실험체를 탈형 하였다. 탈형 후 23 °C ± 2 °C의 수조에서 재령 28일까지 수중 양생을 하였다.

밀도 측정은 아르키메데스 법에 따라 실시하였으며, 식 (1)과 같이 계산하였다.

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

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

압축강도 측정은 KS L 5105(수경성 시멘트 모르타르의 압축

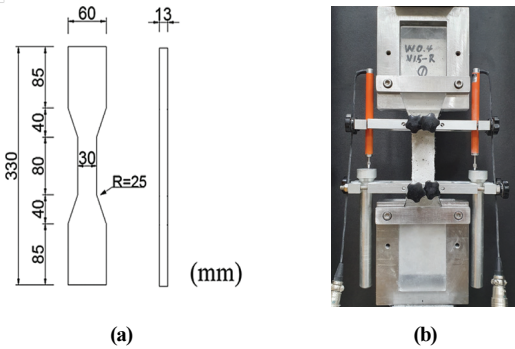


Fig. 1. (a) Dimension of specimen for tension test (b) test setup

강도 시험방법)에 따라 수행하였으며, 30톤 용량의 압축시험기를 사용하였다. 일축인장 실험은 일본토목학회에서 제안한 방법에 따라 수행하였다(JSCE 2008). 일축인장 실험 장비는 최대 용량 2톤으로 변위 제어 방식으로 분당 0.1 mm 속도로 실험을 진행하였다. 하중은 실험기에 부착된 로드셀을 통하여 측정하였으며, 변위는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 면적이 동일한 변위 측정 구간(80 mm)의 위아래 양쪽에 지그를 설치하였고, 변위 측정기를 설치하여 측정하였다. 인장응력은 가해진 하중을 실험체의 단면적으로 나누어 계산하였으며, 인장변형률은 변위 측정 구간에 발생한 변형량을 80 mm로 나누어 계산하였다. 각 실험체의 인장실험이 끝난 후 균열 패턴을 조사하기 위하여 변형량 측정 구간인 80 mm 이내에 발생한 균열의 개수를 현미경을 이용하여 측정하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 밀도

Fig. 2는 배합별 이론적인 밀도와 측정 밀도를 나타낸다. 이론적 밀도는 배합과 각 재료의 밀도로부터 계산하였으며, 측정 밀도는 재령 28일에 50 mm 입방체의 밀도를 실제 측정된 값이다. 이론적

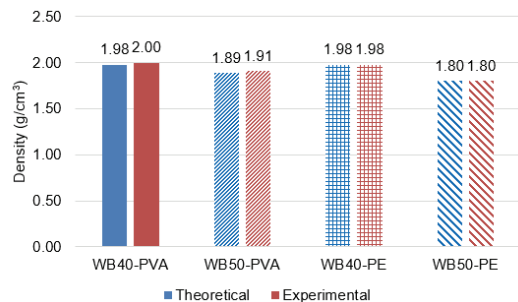


Fig. 2. Density

밀도와 측정 밀도와 차이는 1.1 % 이하로 나타났다. 이러한 결과로부터 실험체를 제작하는 과정에서 의도하지 않은 기포들이 발생하지 않고 밀실하게 제작되었음을 확인할 수 있다.

### 3.2. 압축강도

Fig. 3은 배합별 압축강도를 나타낸다. 물결합재비에 따른 압축강도 차이는 WB40 계열 배합에 비해 WB50 계열 배합이 29 % 낮은 것으로 나타났다. 이는 물결합재비가 증가함에 따라 압축강도가 낮아지기 때문이다. 섬유 종류에 따른 압축강도 차이는 PE 계열 배합들이 PVA 계열 배합들에 비해 크게 나타났다. 다만, 그 차이는 표준 편차 오차 범위 내로 나타나 영향이 미미한 것으로 나타났다. 배합별 압축강도의 변동계수는 1.4 % ~ 5.5 % 범위 나타났으며, 이는 일반적인 콘크리트의 값 범위로 실험이 적절히 수행되었다는 것을 의미한다.

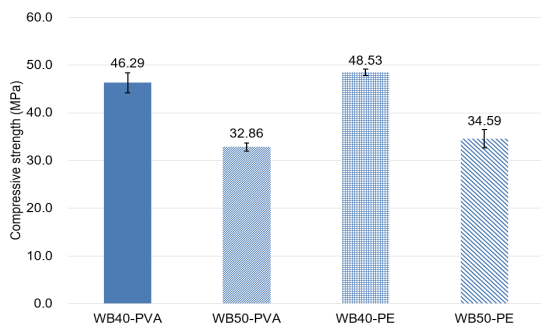


Fig. 3. Compressive strength

### 3.3 일축인장

Fig. 4는 각 배합별 인장응력과 인장변형률 그래프를 나타낸다. 모든 배합 및 실험체에서 전형적인 변형률 경화 거동이 나타났으며, 특히 폴리에틸렌 섬유로 보강한 PE 배합들이 더 명확하게 나타났다. 그래프에서 변형 경화 현상과 함께 변형률이 증가하면서 급격한 응력 저하가 나타나는데 이는 변위제어 방식으로 하중을 가할 경우 새로운 균열이 발생하게 되면 균열폭에 의한 급격한 변형 증가로 인하여 적합 조건과 힘의 평균조건에 의해 응력 저하가 발생하기 때문이다.

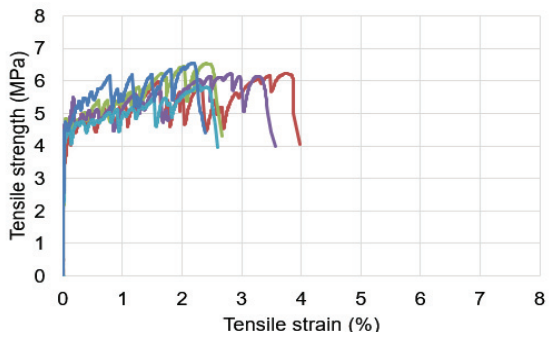
Fig. 5는 인장성능을 정량적으로 나타낼 수 있는 첫 번째 균열강도, 인장강도, 인장변형능, 그리고 인성을 나타낸다. 첫 번째 균열강도는 일축인장 실험 중 첫 번째 균열이 발생했을 때의 응력을 의미하며, 인장강도는 최대 인장응력을 의미한다. 인장변형능은 인장강도일 때 인장변형률을 의미하며, 인성은 인장강도와 인장변

형능까지의 인장응력과 인장변형 곡선의 면적을 의미한다. 인성은 재료가 파괴될 때까지 에너지 흡수 능력을 의미한다.

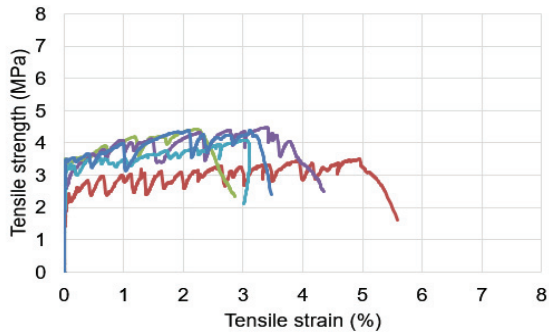
첫 번째 균열강도는 일반적으로 섬유보강 콘크리트나 시멘트 기반 복합재료에서 압축강도에 비례해서 나타난다. 이는 균열강도는 매트릭스의 특성에 의해 주로 결정되기 때문이다. 이 연구에서도 배합별 첫 번째 균열강도가 압축강도와 유사하게 물결합재비에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나 섬유의 영향은 다르게 나타났다. 동일한 물결합재비에서 압축강도는 폴리에틸렌 섬유로 보강한 배합이 폴리비닐알코올 섬유로 보강한 배합에 비하여 크게 나타났으나 첫 번째 균열강도는 반대로 나타났다. 이는 압축강도의 경우 파괴 시 2000  $\mu\epsilon$  이상의 큰 변형이 발생한 상태이기 때문에 섬유 가교능력이 더 큰 폴리에틸렌 섬유가 폴리비닐알코올 섬유에 비하여 압축강도 증가에 더 크게 기여를 한 반면, 첫 번째 균열강도는 100  $\mu\epsilon$  정도의 작은 변형 상태일 뿐만 아니라 친수성 섬유인 폴리비닐알코올 섬유는 매트릭스와 화학적 부착을 하기 때문이다. 변동계수는 6.0 %에서 18.2 %로 압축강도에 비하여 크게 나타났는데, 이는 직접인장 실험 결과가 시멘트기반 복합재료의 불확실성에 더 크게 영향을 받고, 실험 오차 자체도 더 크기 때문이다.

인장강도의 경우 압축강도와 첫 번째 균열강도와 달리 물결합재비와 섬유 종류에 따라 일정한 경향이 나타나지 않았다. 폴리비닐알코올 섬유보강 배합의 경우 물결합재비가 증가하여 강도가 낮아지며 동시에 섬유와 매트릭스 사이 부착력도 감소한 WB50 배합의 인장강도가 WB40 배합에 비해 낮게 나타났지만, 폴리에틸렌 섬유로 보강한 배합은 물결합재비의 영향이 거의 나타나지 않았다.

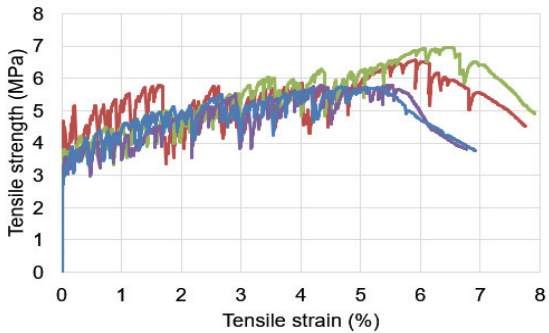
전체적으로 모든 실험체의 인장변형능이 고연성 복합재료의 특징으로 알려진 2 % 이상을 나타내었으며, 이는 고연성 복합재료로 분류될 수 있는 수준이다. 인장변형능은 폴리에틸렌 섬유로 보강한 배합이 폴리비닐알코올 섬유로 보강한 배합에 비하여 크게 나타났다. 이는 폴리에틸렌 섬유의 인장강도가 폴리비닐알코올 섬유의 인장강도에 비하여 약 2배 크기 때문에 섬유가교 작용 동안 섬유가 끊길 확률이 낮고 결과적으로 섬유가교능력이 더 크기 때문이다. 또한 폴리에틸렌 섬유의 직경이 폴리비닐알코올 섬유에 비하여 더 작아 동일한 섬유량이라도 섬유 개수가 더 많아 섬유와 매트릭스 사이 부착면적이 더 크기 때문이다. 또한 폴리에틸렌 섬유는 소수성을 나타내기 때문에 최대섬유가교 응력에 해당하는 균열개구변위가 친수성 섬유에 비하여 더 크기 때문에 균열개수가 동일하다면 인장변형능이 더 크게 나타낸다.



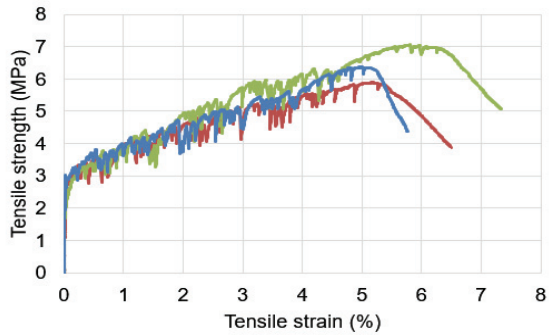
(a) WB40-PVA



(b) WB50-PVA

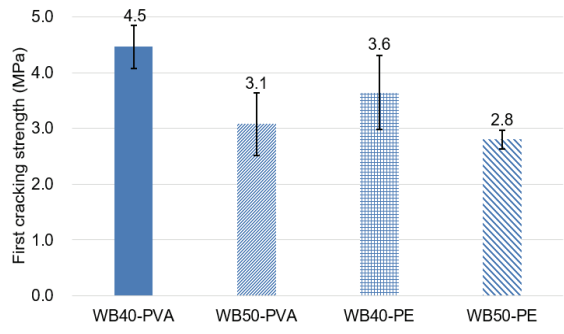


(c) WB40-PE

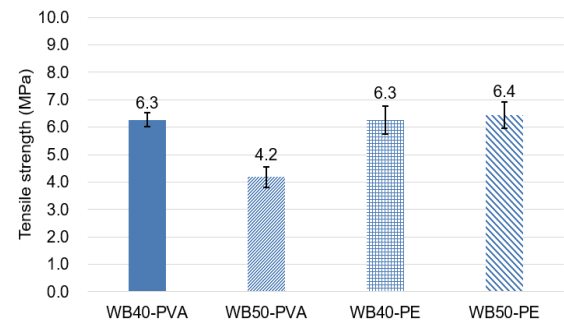


(d) WB50-PE

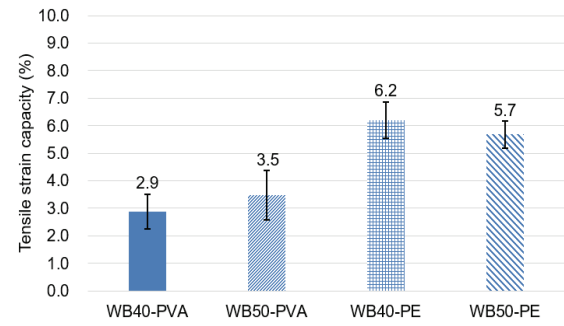
Fig. 4. Tensile stress-strain curves



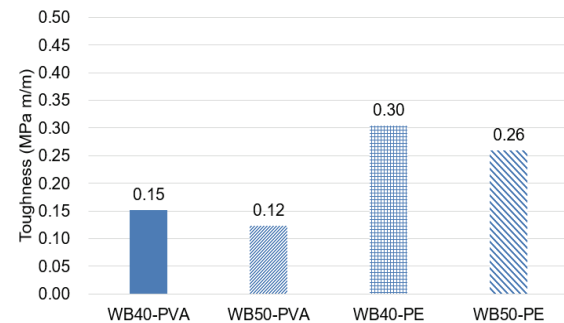
(a) First cracking strength



(b) Tensile strength



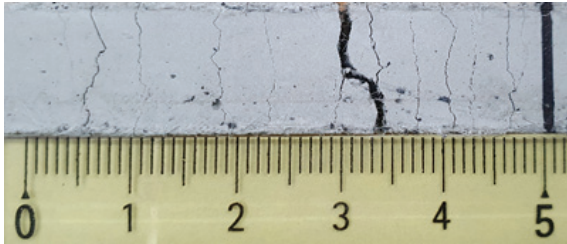
(c) Tensile strain capacity



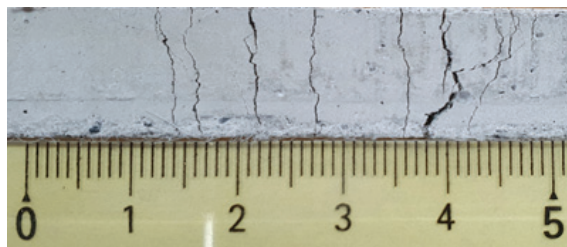
(d) Toughness

Fig. 5. Tensile behavior

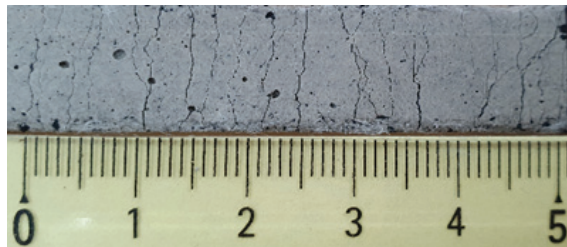
종합적으로 폴리에틸렌 섬유는 폴리비닐알코올 섬유에 비하여 복합재료의 변형성을 향상시키는데 유리하다. 변형경화 및 다중 균열에 의한 높은 인장변형성은 이론적으로 강도조건과 에너지 조건을 만족해야 한다(Kanda and Li 2006). 두 가지 조건 중에서 강도조건은 균열강도 대비 인장강도의 비가 최소 1보다 커야 한다는 조건이며, 이 비(강도지수)가 클수록 인장변형능이 크게 나타날 확률이 높다.



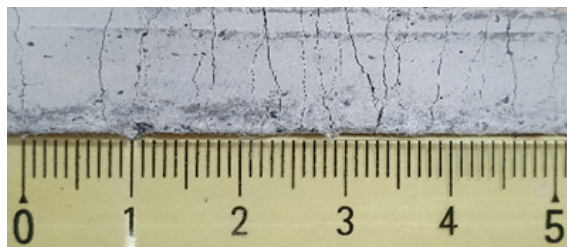
(a) WB40-PVA



(b) WB50-PVA



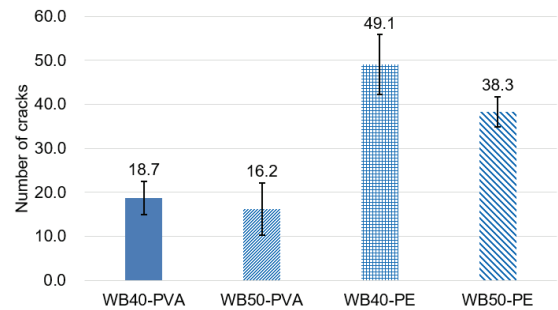
(c) WB40-PE



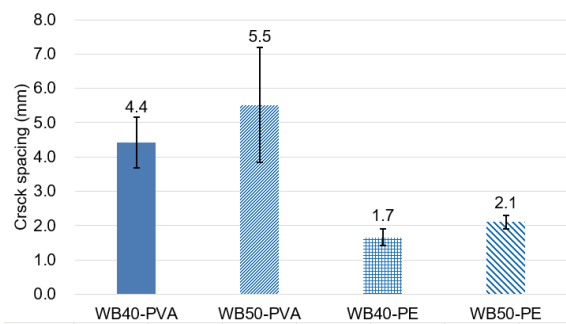
(d) WB50-PE

Fig. 6. Photos of representative cracking patterns

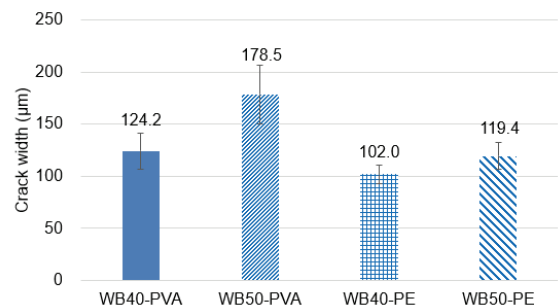
각 배합별 강도지수는 WB40-PVA 배합은 1.4, WB50-PVA 배합은 1.4, WB40-PE 배합은 1.7, WB50-PVA 배합은 2.3으로 나타났으며, 대체로 강도지수 클수록 인장변형능이 크게 나타나 기존의 이론을 따르는 것으로 나타났다. 인성은 강도와 변형성을 모두 반영한 것이기 때문에 인장강도가 크고 인장변형능이 크게 나타난 폴리에틸렌 섬유보강 배합들이 크게 나타났다. 물결합재비의 영향은 물결합재비가 높아질수록 인성은 14% ~ 20% 감소하는 것으로 나타났으며, 섬유 종류가 폴리에틸렌 섬유가 폴리비닐알코올 섬유에 비하여 약 2 배 정도 높은 것으로 나타났다. 종합적으로 인장성은 물결합재비보다는 섬유의 종류에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.



(a) Number of cracks



(b) Crack spacing



(c) Crack width

Fig. 7. Cracking pattern

Fig. 6은 각 배합별 대표 균열패턴을 나타낸다. 모든 배합에서 다중 균열이 발생한 것을 확인할 수 있으며, 균열들이 특정 구간에 집중해서 나타나지 않고 실험체의 전체 길이에 걸쳐 발생하였다. Fig. 7은 변위 측정 구간인 80 mm 내의 평균 균열개수, 균열간격, 균열폭을 정량적으로 나타낸다. 균열개수는 일축인장 실험 종료 후 실험체 양 옆면에서 현미경을 통해 발생한 균열개수를 세었으며, 균열간격은 변위 측정 구간을 균열개수로 나눈 값이다. 균열폭은 변위 측정 구간 내에서 발생한 변형량을 균열개수로 나눈 값이다. 인장성능이 가장 우수한 WB40-PE 배합의 평균 균열개수는 49개이며, 인장성능이 가장 낮은 WB50-PVA 배합은 평균 균열개수는 15개로 나타났다. 이는 폴리비닐알코올 섬유는 폴리에틸렌 섬유에 비하여 강도가 50 % 수준이고 화학적 부착이 있으며 섬유 직경이 크기 때문에 판단되며, 그 정도는 매트릭스에 따라 달라질 수 있다. 역학적 성능이나 내구성 측면에서 균열개수가 많아 균열간격이 작고, 균열폭은 작을수록 좋기 때문에 폴리에틸렌 섬유보강이 폴리비닐알코올 섬유보강에 비하여 더 좋을 것으로 나타났다. 또한 전반적으로 물결합재비가 증가할수록 균열개수는 감소하며, 균열간격과 균열폭은 증가하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 물결합재비와 섬유 종류에 따른 하이볼륨 슬래그 복합재료의 압축강도와 인장성능을 실험적으로 조사하였다. 물결합재비와 섬유 종류를 변수로 설정하여 총 4가지 배합의 실험체를 제작하였고, 압축 및 인장실험을 수행하였다. 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 폴리비닐알코올 섬유 및 폴리에틸렌 섬유를 이용하여 변형경화 현상 및 다중균열 발생에 기반한 2.9 % 이상의 고연성이 나타나는 하이볼륨 슬래그 복합재료를 제조할 수 있는 것으로 나타났다.
2. 압축강도와 첫 번째 균열강도는 물결합재비가 섬유 종류보다 더 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 인장강도와 인장변형성능은 섬유의 종류에 더 크게 영향을 미친 것으로 나타났다. 폴리에틸렌 섬유보강 복합재료의 인성은 폴리비닐알코올 섬유보강 복합재료의 2 배 이상을 나타냈으며, 이는 에너지 흡수 능력 차이가 2 배 이상임을 의미한다. 이는 섬유의 인장강도와 직경, 화학적 특성 차이 때문이며, 폴리에틸렌 섬유가 종합적으로 복합재료 성능 향상에 유리한 것으로 나타났다.

3. 모든 배합에서 다중 균열 패턴이 발생하였으며, 균열패턴은 물결합재비에 대한 영향보다는 섬유의 특성 더 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 이 연구에서 조사한 배합에서 소수성 특성을 갖는 폴리에틸렌 섬유보강 복합재료의 평균 균열폭이 폴리비닐알코올 섬유보강 복합재료의 평균 균열폭보다 작게 나타나 역학적 성능뿐만 아니라 내구성 측면에서도 우수한 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A4A1033838).

#### References

- Abdulkadir, I., Mohammed, B.S., Liew, M.S., Wahab, M.M.B.A., Zawawi, N.A.W.A., As'ad, S. (2020). A review of the effect of waste tire rubber on the properties of ECC, *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, **7(8)**, 105–116.
- Elahi, M.M.A., Hossain, M.M., Karim, M.R., Zain, M.F.M., Shearer, C. (2020). A review on alkali-activated binders: materials composition and fresh properties of concrete, *Construction and Building Materials*, **260**, 119788.
- Felekoglu, B., Tosun-Felekoglu, K., Ranade, R., Zhang, Q., Li, V.C. (2014). Influence of matrix flowability, fiber mixing procedure, and curing conditions on the mechanical performance of HTPP-ECC, *Composites Part B: Engineering*, **60**, 359–370.
- Gholampour, A., Ozbakkaloglu, T. (2017). Performance of sustainable concretes containing very high volume Class-F fly ash and ground granulated blast furnace slag, *Journal of Cleaner Production*, **162**, 1407–1417.
- JSCE. (2008). *Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks(HPFRCC)*, Japan: Japan Society of Civil Engineers.
- 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.
- Kang, S.T., Choi, J.I., Lee, B.Y. (2020). Compressive strength and tensile properties of high volume slag cement composite incorporating phase change material, *Journal of the Korean*

- Recycled Construction Resources Institute, **8(2)**, 183–189.
- Khaloo, A.R., Dehestani, M., Rahmatabadi, P. (2008). Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles, *Waste Management*, **28(12)**, 2472–2482.
- Kwon, S.O., Bae, S.H., Lee, H.J., Jung, S.H. (2014). Characteristics for reinforcement corrosion and chloride ion diffusion of high volume fly ash concrete, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **2(1)**, 34–39.
- Lao, J.C., Huang, B.T., Fang, Y., Xu, L.Y., Dai, J.G., Shah, S.P. (2023). Strain-hardening alkali-activated fly ash/slag composites with ultra-high compressive strength and ultra-high tensile ductility, *Cement and Concrete Research*, **165**, 107075.
- Li, V.C., Wang, S., Wu, C. (2001). Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC, *Materials Journal*, **98(6)**, 483–492.
- Maalej, M., Li, V.C. (1994). Flexural/tensile-strength ratio in engineered cementitious composites, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **6(4)**, 513–528.
- Malhotra, V.M. (2002). Introduction: sustainable development and concrete technology, *Concrete International*, **24(7)**, 22.
- Özbay, E., Erdemir, M., Durmuş, H.İ. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties—a review, *Construction and Building Materials*, **105**, 423–434.
- Shi, C., Roy, D., Krivenko, P. (2003). *Alkali-Activated Cements and Concretes*, CRC press.
- Wu, M., Zhang, Y., Jia, Y., She, W., Liu, G. (2020). Study on the role of activators to the autogenous and drying shrinkage of lime-based low carbon cementitious materials, *Journal of Cleaner Production*, **257**, 120522.
- Yu, J., Yao, J., Lin, X., Li, H., Lam, J.Y., Leung, C.K., Sham, I.M., Shih, K. (2018). Tensile performance of sustainable strain-hardening cementitious composites with hybrid PVA and recycled PET fibers, *Cement and Concrete Research*, **107**, 110–123.
- Zhang, D., Yu, J., Wu, H., Jaworska, B., Ellis, B.R., Li, V.C. (2020). Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile engineered cementitious composites (ECC), *Composites Part B: Engineering*, **184**, 107741.
- Zhong, H., Zhang, M. (2021). Effect of recycled tyre polymer fibre on engineering properties of sustainable strain hardening geopolymer composites, *Cement and Concrete Composites*, **122**, 104167.

### 물-결합재 비율과 섬유 종류에 따른 고연성 복합재료의 압축 및 인장특성

이 연구의 목적은 고연성·친환경 건설 재료인 하이볼륨 슬래그 섬유보강 복합재료에서 물결합재비와 섬유 종류가 압축강도와 인장성능에 미치는 영향을 실험적으로 조사하는 것이다. 이를 위하여 물결합재비와 섬유의 종류를 다르게 혼입하여 4가지 배합의 실험체를 제작하였고, 압축 및 인장실험을 수행하였다. 실험 결과, 압축강도는 섬유 종류에 따른 영향은 미미하였으나, WB40 계열 배합에 비해 WB50 계열 배합이 29 % 낮은 것으로 나타나 물결합재비에 따른 영향이 큰 것으로 나타났다. 반면 인장특성에는 물결합재비 영향보다 섬유의 종류에 따른 영향이 큰 것으로 나타났다. 인장변형성능은 2.9 %에서 6.2 %로 측정되었으며, PVA 계열 배합에 비해 PE 계열 배합이 1.63 배~2.14 배 높은 것으로 나타났다. 또한 PE 계열 배합의 균열패턴도 더 우수한 것으로 나타났다.