

# 고성능 감수제 종류에 따른 섬유보강 무시멘트 복합재료의 인장거동 및 균열 패턴

## Tensile Behavior and Cracking Patterns of Fiber-Reinforced Cementless Composites According to Types of Superplasticizers

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

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

(Received April 23, 2021 / Revised May 12, 2021 / Accepted May 14, 2021)

The purpose of this study is to investigate experimentally the effects of type of superplasticizer on tensile behavior and cracking pattern of alkali-activated slag-based cementless composite. Three mixtures were prepared according to type of superplasticizer, and the compressive strength and tension tests were performed. Test results showed that differences of tensile strength, tensile strain capacity, and toughness of composites were up to 28.1%, 39.1%, and 66.2%, respectively, according to type of superplasticizer, although fiber balling or poor dispersion of fibers in fresh composites was not observed. It was also observed that the type of superplasticizer influenced number of cracks and maximum fiber bridging stress.

**키워드** : 고성능 감수제, 균열패턴, 복합재료, 섬유, 인장거동

**Keywords** : Superplasticizer, Crack pattern, Composite, Fiber, Tensile behavior

### 1. 서론

콘크리트는 다른 재료에 비하여 자원이 풍부하고 경제적이며, 높은 압축강도와 내구성을 갖고 있기 때문에 현대 사회의 사회 기반 시설물에 사용되는 가장 중요한 건설재료이다. Van Damme (2018)의 보고에 따르면 콘크리트는 나무, 철, 알루미늄, 플라스틱을 포함한 모든 건설재료보다 약 2배 정도 많은 양이 사용되었다. 그러나 콘크리트는 인장강도가 작고, 다른 건설재료에 비하여 취성적인 거동을 하며, 생산과정에서 많은 양의 이산화탄소가 배출된다는 단점이 있다(Mindess et al. 2003; Malhotra 2001).

섬유보강 콘크리트는 취성적 거동을 개선하기 위해 개발된 것으로 강섬유와 합성섬유가 일반적으로 사용된다. ECC(Engineered Cementitious Composites)로 알려진 고연성 섬유보강 시멘트계

복합재료는 일반 콘크리트와 달리 인장하중 하에서 첫 번째 균열 발생 이후 변형 연화 현상이 나타나지 않고 지속적인 미세한 균열이 발생하면서 변형이 증가하며 저항력이 증가하는 변형경화 현상이 나타나는 재료이다. 균열폭이 100 $\mu$ m 이하로 제어되어 높은 내구성을 나타내는 것도 ECC의 특징 중의 하나이다.

ECC의 미세 다중 균열과 변형경화 현상은 매트릭스의 파괴인성을 줄이고 섬유와 매트릭스 사이의 계면 부착력은 향상시켜 매트릭스에 균열이 발생하면 섬유가 균열면에서 가교 작용을 통해 다중 균열이 발생하여 나타나는 것이다. 이와 같은 다중 균열, 변형경화 현상, 균열폭 제어는 미시역학 이론에 의한 섬유가교거동 모델과 파괴역학 이론에 기반한 안정상태 균열이론에 기반을 두고 있으며, 이러한 이론들은 ECC 재료 설계 및 거동 규명에 활용되고 있다(Li and Leung 1992; Maalej and Li 1994; Li et al. 2001;

\* 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>충남대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea)

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

Kanda and Li 2006). 골재의 크기가 증가할수록 콘크리트의 파괴 인성이 증가하기 때문에 ECC에는 굵은골재가 사용되지 않고, 잔 골재도 일반적으로 직경이 200 $\mu$ m 이하인 골재를 사용한다(Chen and Liu 2004). 따라서 ECC에는 단위 시멘트량이 콘크리트나 일반 섬유보강 콘크리트보다 많게 된다. 따라서 시멘트 사용량의 증가는 ECC를 제조하는데 있어 이산화탄소 배출량이 콘크리트에 비하여 크다는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하고자 Lee et al.(2012)은 분말형 알칼리 활성화제와 잠재수경성이 있는 고로슬래그를 결합재로 사용하고 폴리비닐알코올 섬유로 보강한 무시멘트 복합재료를 개발하였다. 개발된 복합재료는 활성화제와 배합에 따라 차이가 있지만 ECC와 유사한 4% 이상의 인장변형능력이 나타났다. 이후 다양한 연구자들에 의해 슬래그, 플라이 애쉬 등 다양한 산업부산물을 결합재로 사용한 고연성 복합재료를 개발하기 위한 연구가 수행되었다. 특히 Choi et al.(2016)은 폴리비닐알코올 섬유 대신 인장강도가 높고 소수성을 갖는 폴리에틸렌 섬유를 사용하여 복합재료의 인장변형능력이 7% 이상 나타날 수 있음을 보고하였다.

ECC나 슬래그 또는 플라이 애쉬 기반 무시멘트 복합재료의 인장성능은 크게 매트릭스, 섬유, 매트릭스와 섬유의 계면 특성에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다. 매트릭스의 성질은 인장강도, 탄성계수, 피괴인성 등이며, 섬유는 형상비, 인장강도, 탄성계수, 섬유 혼입량 등이다. 계면 특성은 매트릭스 배합과 섬유의 특징에 따라 결정되는 것으로 마찰특성이다. 이외에 매트릭스 스폰링, 슬립경화, 스너빙, 배향각에 따른 섬유 강도 감소 등의 영향이 복합재료의 인장거동에 미치는 영향인자들이다(Lee et al. 2010). 물리/화학적 인자 이외에 섬유의 분포 특성 또한 복합재료의 인장거동에 미치는 영향이 큰 것으로 조사되었다. 이론적으로 섬유 배향각 분포와 관련하여 단섬유의 섬유 분포가 1차원이라고 가정하면 3차원으로 가정한 것과 비교하여 복합재료의 균열면에서 최대 섬유가 교응력이 2배이다. 섬유의 분포와 관련하여 섬유의 분포가 균질할수록 복합재료의 인장성능이 향상되는 것으로 나타났다. Li and Li(2013)의 연구 결과에 따르면 섬유의 분포가 균질하여 연성이 높게 나타나기 위해서는 모르타르의 점성이 7 Pa·s 이상이 되어야 하는 것으로 나타났다. 즉, 점성 이외에 다른 성질이 동일할 때 모르타르의 점성이 7 Pa·s보다 작은 경우 인장변형능력이 작

게 나타났다. 따라서 페이스트나 모르타르의 유변특성 역시 복합재료의 인장성능을 결정하는 중요한 인자이다. 기존 연구에서 시멘트 기반 ECC의 점성이 인장성능에 미치는 영향이 조사되었지만, 알칼리활성 슬래그 기반 섬유보강 복합재료의 인장성능에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 이에 이 연구에서는 알칼리활성 슬래그 기반 무시멘트 복합재료에서 페이스트의 유변특성이 복합재료의 인장특성에 미치는 영향에 대한 기초 연구로서 페이스트의 유변특성에 가장 큰 영향을 미치는 고성능 감수제의 종류에 따른 복합재료의 인장거동 및 균열패턴에 대하여 실험적으로 조사하고자 한다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1 실험 재료

결합재로 사용한 고로슬래그의 화학 성분은 Table 1과 같다. 알칼리 활성화제는 수산화칼슘을 사용하였으며, 총 결합재량의 10%로 하였다. 고로슬래그는 KS F 2563에 규정된 3종 분말도를 갖는 것을 사용하였으며, 비중은 2.92이다. 물은 수돗물을 사용하였다. 고성능 감수제는 3종류를 사용하였으며, 각각 SP1, SP2, SP3로 명명하였다. SP1과 SP2는 액상형으로 고형분이 30%이며, SP3는 분말형으로 3종류 모두 폴리카르보산계이다. 증점제는 한 종류만 사용하였다. 소포제는 혼합과 제조과정에서 의도하지 않았던 기포의 생성을 방지하기 위해 사용하였다. 보강 섬유로는 소수성의 성질을 갖으며 다른 섬유에 비하여 인장강도가 큰 폴리에틸렌 섬유를 사용하였으며, 물리적 성질은 길이 18mm, 직경 12 $\mu$ m, 인장강도 2,700MPa, 비중 0.97, 탄성계수 88GPa이다.

### 2.2 배합 및 양생 방법

Table 2는 고성능 감수제 종류에 따른 3가지 배합을 나타낸다. 섬유량을 제외하고 다른 재료의 양은 결합재량 대비 질량비이며, 배합명은 고성능 감수제와 동일하게 명명하였다. 페이스트의 유변특성을 결정하는 고성능 감수제와 증점제는 섬유가 균질한 분포를 갖을 수 있도록 양을 최적화하였다. 골재는 매트릭스 파괴인성을 낮추기 위하여 사용하지 않았으며, 섬유량은 부피비로 1.75%로 결

Table 1. Properties of ground granulated blast furnace slag(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

Table 2. Mixture proportions

Mixture	Binder		Water	SP*	VMA**	AF***	Fiber (vol.%)
	GGBFS	Ca(OH) <sub>2</sub>					
SP1	0.9	0.1	0.3	0.0028	0.0004	0.001	1.75
SP2	0.9	0.1	0.3	0.0030	0.0004	0.001	1.75
SP3	0.9	0.1	0.3	0.0023	0.0004	0.001	1.75

\*SP: superplasticizer, \*\*VMA: viscosity modifying agent, \*\*\*AF: antifoamer

정하였다.

재료의 혼합은 호박 혼합기를 사용하였으며, 먼저 분말형의 결합재를 약 1분간 건비빔한 후 배합수와 고성능 감수제, 증점제, 소포제를 넣고 추가로 약 5분간 혼합하였다. 각 배합에서 섬유의 균질한 분포가 가능할 정도의 매트릭스 유변특성이 나타남을 확인한 후 섬유를 혼입하고 약 3분간 추가로 혼합하였으며, 마지막으로 낮은 속도의 혼합기에서 1분간 혼합 후 종료하였다. 혼합이 완료된 후 육안관찰과 혼합물 내부를 만져본 결과 3개 배합 모두에서 섬유 뭉침이나 섬유의 쓸림이 발생하지 않았다.

혼합이 완료된 후 압축강도 측정을 위하여 배합별로 3개의 50mm 입방형 몰드를 사용하여 압축강도 측정용 시험체를 제작하였다. 인장거동 실험을 위하여 일본토목학회에서 제안한 실험체 형상에 따라 아령 형상의 인장 실험체를 배합별로 5개씩 제작하였다. 인장 실험체의 형상은 Fig. 1(a)와 같다. 몰드에 혼합물은 넣은 후 수분의 증발을 방지하기 위하여 플라스틱 필름을 표면에 씌운 후 양생 온도 23°C ± 3°C, 상대습도 60% ± 5%에서 2일 동안 기건 양생을 한 후 실험체를 탈형하였다. 탈형 후 바로 23°C ± 2°C의 수조에서 재령 28일까지 수중 양생을 하였다.

### 2.3. 실험 방법

압축강도 측정은 KS L 5105(수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법)에 따라 실시하였으며, 인장거동은 일본토목학회에서 제안한 방법에 따라 측정하였다. 하중은 최대 2톤의 하중을 가할 수 있는 인장 실험기를 사용하여 변위 제어 방식으로 가하였으며, 속도는 분당 0.1mm이다. 하중은 실험기에 부착된 로드셀을 통하여 측정하였으며, 변위는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 면적이 동일한 변위 측정 구간(80mm)의 위아래 양쪽에 지그를 설치하였고, 실험체 양쪽에 변위측정기를 설치하여 측정하였다. 인장응력은 가해진 하중을 실험체의 단면적으로 나누어 계산하였으며, 인장변형률은 변위 측정 구간에 발생한 변형량을 80mm로 나누어 계산하였다. 페이스트의 유변특성인 점성과 항복강도는 각각 흐름

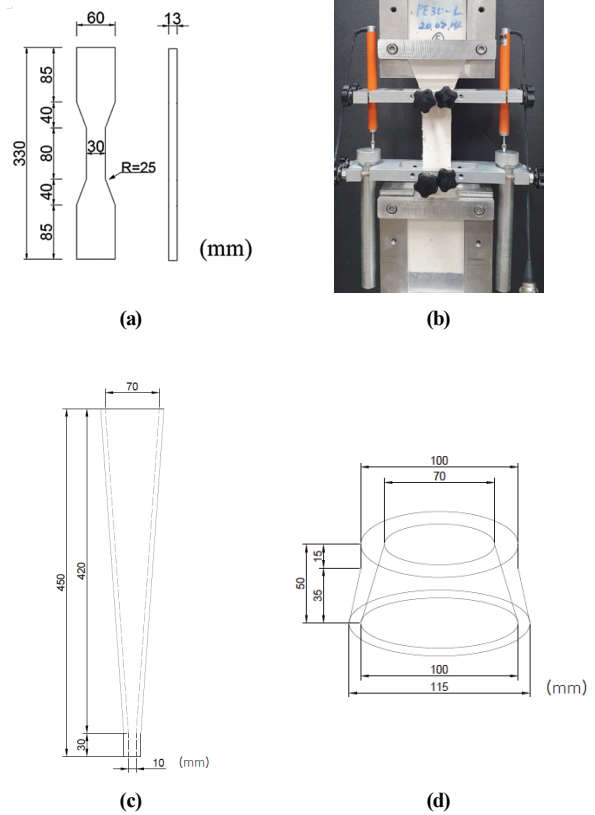


Fig. 1. (a) Dimension of specimen for tension test, (b) test setup, (c) funnel, and (d) mini-slump flow cone

시간과 플로를 측정하여 배합별로 간접적으로 비교하였다. 점성은 유체의 흐름에 대한 저항 정도를 나타내는 성질로서 점성이 낮으면 유체의 흐름이 빠르고 반대로 높으면 유체의 흐름이 느리다. 따라서 흐름 시간을 비교하면 상대적인 점성의 차이를 비교할 수 있다. 이 연구에서는 KS F 2432(주입 모르타르의 컨시스턴시 시험방법)에 규정된 장비로 흐름 시간을 측정하였다(Fig. 1(c)). 항복강도는 유체가 유동을 시작하는 힘으로서 항복강도가 낮으면 동일조건에서 멀리 흘러가고 높으면 작게 흘러간다. 이 연구에서는 KS L 5111(수경성 시멘트 시험용 플로 테이블)에 규정된 장비로 플로를 측정하였다(Fig. 1(d)).

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1. 압축강도

Fig. 2는 3가지 배합에 대한 압축강도를 나타낸다. 액상형 고성능 감수제를 사용한 SP1과 SP2 배합의 압축강도는 분말형 고성능 감수제를 사용한 SP3 배합의 압축강도에 비하여 각각 8.5%와

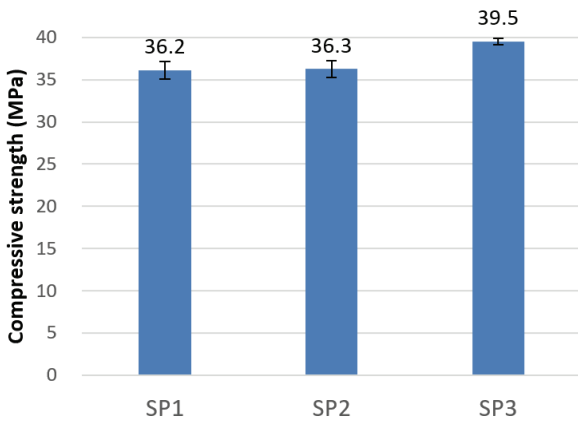


Fig. 2. Compressive strength

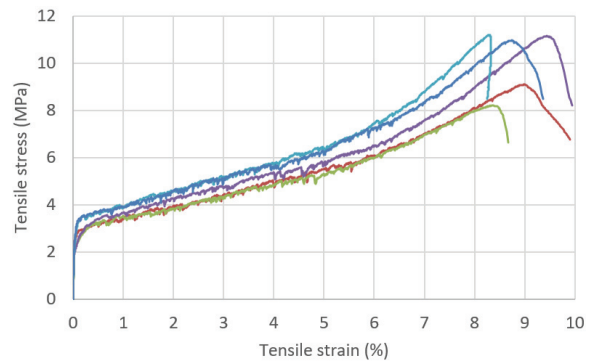
8.3% 낮은 것으로 나타났다. 액상형 고성능 감수제의 경우 고품분 비율은 30%로 고성능 감수제 내에 포함되어 있는 물의 양을 고려하면 물-결합재비가 약 30.2%가 되어 0.2%p 차이가 발생하게 되는데 압축강도의 차이는 다소 큰 것으로 판단된다. 3개 배합의 표준편차는 1.04MPa 이내로 변동계수(CV)는 2.9% 이내로 나타나 실험체별 변동성은 크지 않은 것으로 나타났다.

### 3.2 일축인장과 페이스트 유변특성

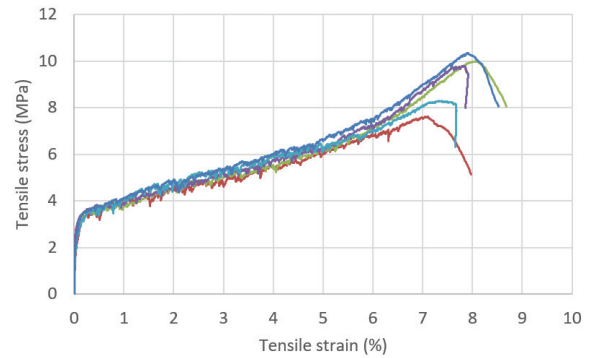
Fig. 3은 각 배합별 인장응력과 인장변형률 그래프를 나타낸다. 3개 배합 모두 탄성 변형을 하다가 강성이 급격히 감소하고 금속의 변형경화 현상과 같이 변형률이 증가하면서 응력이 증가하는 변형경화 현상이 나타났다. 변형경화 현상 중 발생하는 응력하락은 균열발생을 의미한다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 다른 조건이 동일한 경우 고성능 감수제의 종류와 양에 따라 인장거동에 차이가 발생할 함을 알 수 있다.

Fig. 4는 인장거동을 정량적으로 나타낼 수 있는 대표적인 값인 첫 번째 균열강도(첫 번째 균열이 발생했을 때 응력), 인장강도(최대 인장응력), 그리고 인장변형성능(인장강도일 때 변형률)을 나타낸다. 첫 번째 균열강도는 3개 배합 모두 그 차이가 최대 3.1%로 압축강도에 비하여 크지 않았고, 고성능 감수제에 따른 영향도 크게 나타나지 않았다. 첫 번째 균열강도의 변동계수는 최대 16%로 크게 나타났으며, 이는 일반적인 현상으로 일축인장 실험에서는 실험결과가 하중의 편심 등의 영향을 크게 받기 때문이다. 압축강도 대비 첫 번째 균열강도는 7.9%에서 8.7% 범위로 나타나 일반적인 시멘트계 재료의 범위로 나타났다.

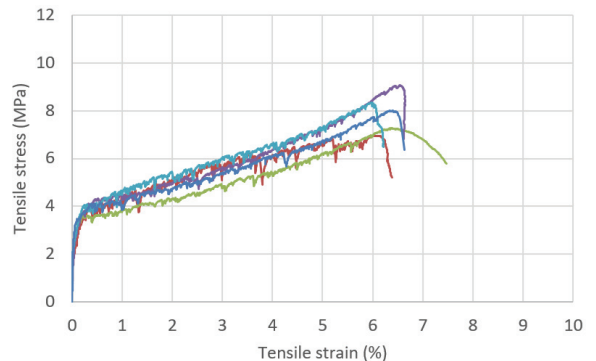
첫 번째 균열강도와 달리 인장강도는 고성능 감수제의 종류와 양에 따라 차이가 크게 나타났다. SP1 배합의 인장강도는 SP2 배



(a) SP1



(b) SP2



(c) SP3

Fig. 3. Tensile stress-strain curves

합과 SP3 배합에 비하여 각각 10.2%와 27.9% 큰 것으로 나타났다. 이는 압축강도나 첫 번째 균열강도에서 나타난 차이보다 큰 것으로 고성능 감수제의 종류가 매트릭스 보다는 섬유가 거동에 큰 영향을 끼쳤다는 것을 의미한다. 압축강도와 첫 번째 균열강도가 매트릭스의 성능에 의해 주로 결정되는 반면, 섬유보강 복합재료에서 인장강도는 균열면에서 섬유가 거동에 의해 결정되기 때문이다. SP3 배합의 압축강도가 가장 크게 측정되었지만 인장강도는 반대로 SP1 배합이 10.14MPa로 가장 크게 나타났고, 압축강도 대비 인장강도는 28.1%로 일반 콘크리트 대비 약 2.8배 높게 나타

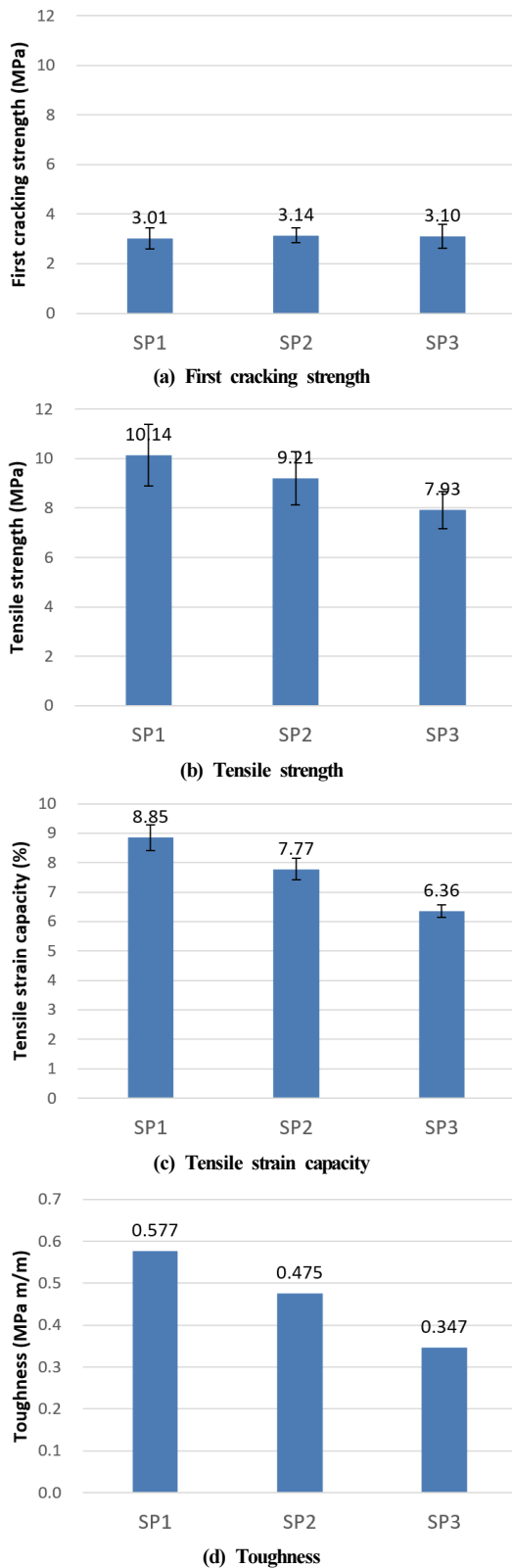


Fig. 4. Tensile behavior

났다. 인장강도의 변동계수는 SP1 배합이 12.2%로 가장 크게 나타났으며, SP3 배합이 9.5%로 가장 낮게 나타났다. 인장강도의 변동계수는 평균적으로 압축강도보다는 크고 첫 번째 균열강도보다는 작은 것으로 나타났다.

SP1 배합의 인장변형성능은 8.85%로 이는 SP2 배합보다 13.8% 높고, SP3 배합보다 39.1% 큰 것이다. 인장변형성능은 압축강도나 인장강도보다 고성능 감수제에 따른 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났으며, 고성능 감수제의 영향이 인장변형성능에 40%에 이를 정도로 큰 차이가 날 수 있다는 것은 이 연구를 통해서 새롭게 관찰된 것이다. 다중균열과 변형경화 현상이 나타나기 위한 필요조건 중의 하나인 강도지표는 균열강도 대비 최대 섬유가 교응력의 비로서 복합재료의 성능에서 첫 번째 균열강도 대비 인장강도와 같다. SP1 배합의 강도지표는 3.37로서 SP2 배합에 비하여 15.1% 크고 SP3 배합과 비교하면 32.0% 큰 것으로 나타났다. 전반적으로 이 비율은 인장강도와 인장변형성능과 유사한 것으로 나타났다. SP1 배합의 인장변형성능은 Choi et al.(2016)에 의해 보고된 알칼리활성 슬래그 기반 복합재료의 인장성능인 7.50%보다도 1.35%p 높다. 인장변형성능의 변동계수는 3.3%에서 4.9%의 범위로 압축강도보다는 크게 나타났지만 다른 인장성능의 변동계수보다는 작게 나타났다.

고성능 감수제의 종류에 따라 인장강도와 인장변형성능에 차이가 발생하였고, 이러한 차이는 재료의 에너지 흡수 능력을 나타내는 인성(Fig. 4(d))에 더 큰 차이를 유발하였다. 인성은 인장응력과 인장변형을 그래프에서 원점부터 인장변형성능까지 아랫부분의 면적으로 계산하였다. SP1 배합의 인성은 SP2 배합에 비하여 21.3% 높았으며, SP3 배합과 비교하면 66.2% 높은 것으로 나타났다. 즉, 고성능 감수제 선택과 양에 따라 균기 전의 혼합물에서 섬유뭉침이나 섬유의 쓸림이 발생하지 않고 균질한 섬유 분산이 된 것으로 확인이 되더라도 인장강도와 인장변형성능에는 큰 차이가 발생할 수 있으며, 이 연구에서 조사한 3개 배합에서는 인성이 최대 66.2%까지 발생할 수 있는 것으로 나타났다.

인장성능에서 차이가 크게 발생한 SP1과 SP3 페이스트의 흐름 시간과 플로는 Table 3과 같다. 서론에 기술한 바와 같이 Li and Li(2013) 연구에서는 다른 요인이 동일한 상황에서 모르타르의 점성이 증가할수록 섬유의 분산성이 좋아지고 그에 따라 인장변형성

Table 3. Flow time and flow

Mixture	Flow time(s)	Flow(mm)
SP1 paste	68	367
SP3 paste	173	258

능이 증가하는 것으로 나타났으며, 점성이 어느 값 이상이 되면 인장변형성능에는 차이가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이 연구에서 주목할 점은 인장성능이 더 우수하게 나온 SP1 배합 페이스트의 점성과 항복강도가 SP3 배합 페이스트의 점성과 항복강도보다 더 작다는 것이다. 기존 연구와 이 연구의 실험 결과를 보면 이 연구에서 조사한 배합들의 페이스트 점성은 균질한 섬유 분산에 필요한 충분한 점성보다 큰 것으로 판단되며, 고성능 감수제의 종류가 섬유 분산성과 매트릭스 계면 특성에 동시에 영향을 준 것으로 판단된다. 이 연구에서 조사한 배합의 성능에 대한 규명은

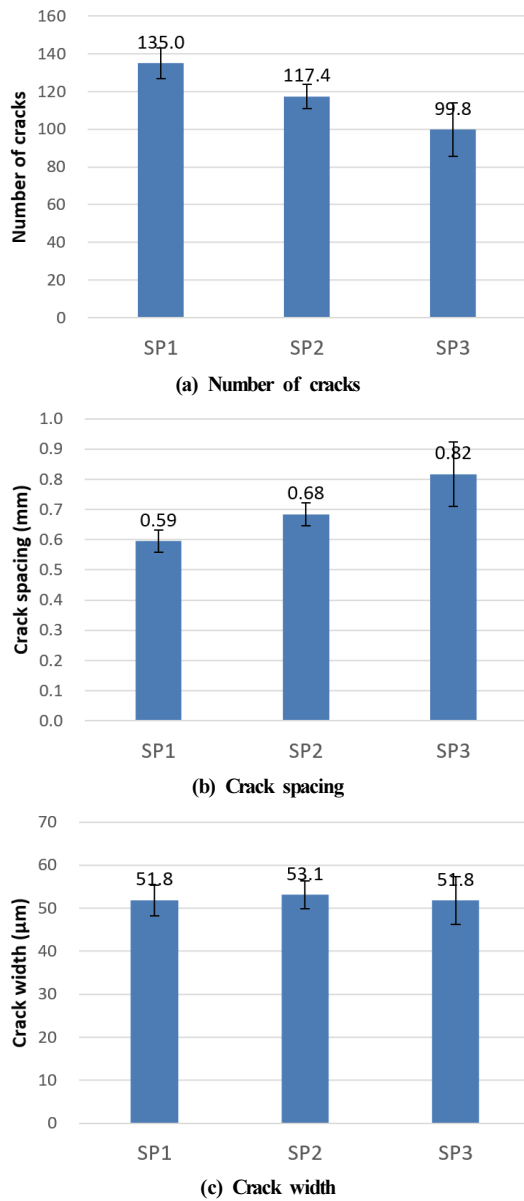


Fig. 5. Cracking pattern

정량적 섬유 분산성 평가와 섬유인발 실험 등이 필요할 것으로 생각된다.

Fig. 5와 6은 3개 배합에 대한 균열패턴이며, 변위 측정 구간인 80mm 내에 발생한 균열개수, 균열간격, 균열폭으로 정량적으로 나타내었다. 3개의 배합 모두 미세한 다중 균열이 발생한 것을 볼 수 있으며, 인장성능이 우수한 SP1 배합에서 더 많은 균열이 발생한 것을 관찰할 수 있다. 균열개수는 실험 종료 후 실험체 양 쪽 면에서 현미경을 통해 관찰하면서 발생한 균열의 개수를 세었으며, 균열간격은 80mm를 균열개수로 나누어 계산하였다. 균열폭은 측정 구간 내에 발생한 변형량을 균열개수로 나누어 계산하였다. 인장강도와 인장변형성능이 가장 크게 나타난 SP1 배합의 균열개수는 135개로 SP2 배합에 비하여 15.0% 높고, SP1 배합과 비교하면 35.3% 높다. 이는 인장강도와 인장변형성능의 차이 사이 정도이다. 균열간격은 균열폭과 반대의 비율로 나타났으며, 균열폭은 상대적으로 배합별로 차이가 발생하지 않았다. 이러한 관찰을 통하여 고성능 감수제가 섬유 분산 특성이나 섬유와 매트릭스 사이 계면 특성에 영향을 주어 결과적으로 섬유가교거동 특성에 영향을 준 것으로 판단된다. 특히 균열폭의 변화 없이 균열 개수에 차이가 발생한 것으로부터 배합별로 섬유가교곡선에서 최대 섬유

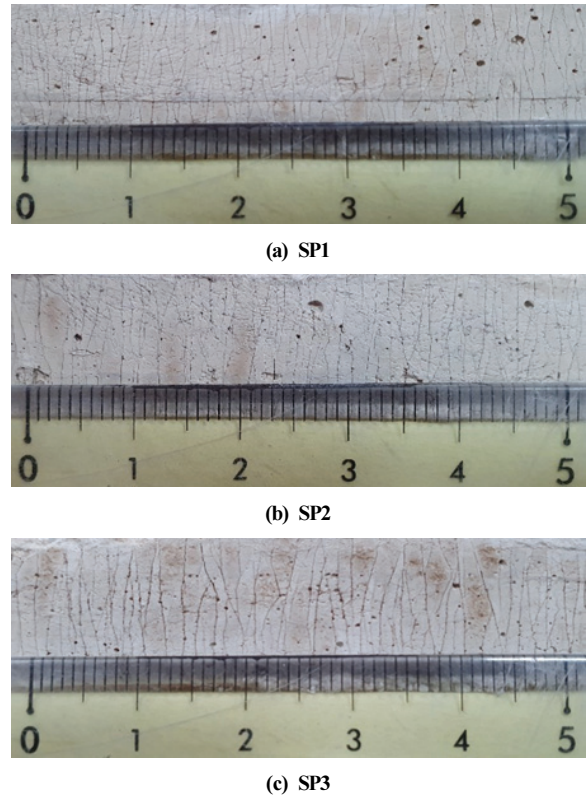


Fig. 6. Saturated multiple microcracks

가교응력에만 영향을 주고 이에 해당하는 균열 개구변위에는 영향을 주지 않은 것으로 유추할 수 있다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 고성능 감수제의 종류가 알칼리활성 슬래그 기반 복합재료의 성능에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 이를 위하여 3종류의 폴리카르보산계 고성능 감수제를 사용하여 3가지 배합에 대한 실험체를 제작하였고, 압축 및 인장실험과 페이스트의 유동특성을 측정하였다. 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 알칼리활성 슬래그 기반 섬유보강 복합재료의 인장성능은 굳기 전에 섬유침이나 섬유의 쓸림이 발생하지 않았더라도 고성능 감수제의 종류에 크게 영향을 받을 수 있는 것으로 나타났다.
- (2) 3종류의 폴리카르보산계 고성능 감수제를 적용한 결과 인장강도는 최대 28.1% 차이가 발생하고, 인장변형성능은 최대 39.1% 차이가 발생하였다. 그리고 인장강도가 높은 배합에서 인장변형성능도 가장 높게 나타났다. 또한 인성은 최대 66.2%까지 차이가 발생하였다.
- (3) 인장강도와 인장변형성능이 가장 우수한 SP1 배합의 페이스트 점성과 항복응력은 가장 낮은 성능을 나타낸 SP3 배합의 페이스트 점성과 항복강도보다 낮은 것으로 나타나 점성과 항복강도가 복합재료의 성능과 반대의 결과가 나타날 수 있는 것을 확인하였다.
- (4) 균열패턴 분석 결과 고성능 감수제는 균열폭의 변화없이 균열개수와 최대 섬유가교응력에만 영향을 주는 것으로 나타났다.

#### Conflicts of interest

None.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21SCIP-C159060-02).

#### References

Chen, B., Liu, J. (2004). Effect of aggregate on the fracture behavior of high strength concrete, *Construction and Building Materials*, **18**, 585–590.

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.

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.

Lee, B.Y., Lee, Y., Kim, J.K., Kim, Y.Y. (2010). Micromechanics-based fiber-bridging analysis of strain-hardening cementitious composite accounting for fiber distribution, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, **61(2)**, 111–132.

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

Li, V.C., Leung, C.K. (1992). Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites, *Journal of Engineering Mechanics*, **118(11)**, 2246–2264.

Li, V.C., Wang, S., Wu, C. (2001). Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC, *ACI 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. (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

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

### 고성능 감수제 종류에 따른 섬유보강 무시멘트 복합재료의 인장거동 및 균열패턴

이 연구의 목적은 고성능 감수제의 종류가 알칼리활성 슬래그 기반 무시멘트 복합재료의 인장거동과 균열패턴에 미치는 영향을 실험적으로 조사하는 것이다. 이를 위하여 고성능 감수제 종류에 따라 3종류의 배합을 준비하였고, 압축강도 및 인장 실험을 수행하였다. 실험결과 혼합 후 굳기 전에 섬유뭉침이나 섬유의 쓸림이 없었지만 고성능 감수제의 종류에 따라 복합재료의 인장강도, 인장변형성능, 그리고 인성은 최대 28.1%, 39.1%, 66.2% 차이가 나는 것으로 나타났다. 또한 고성능 감수제는 균열개수와 최대 섬유 가교 응력에 영향을 주는 것으로 나타났다.