

## 일반모래를 잔골재로 사용한 고연성 시멘트 복합체의 인장거동

이방연<sup>1</sup>, 강수태<sup>2\*</sup>

### Tensile Behavior of Highly Ductile Cementitious Composites Using Normal Sand as Fine Aggregate

Bang Yeon Lee<sup>1</sup>, Su-Tae Kang<sup>2\*</sup>

**Abstract:** This study was aimed to investigate the tensile behaviors of PE(Polyethylene) fiber-reinforced highly ductile cementitious composites with different combinations of micro silica sand and normal sand(river sand) with maximum particle size of 4.75 mm. Flow test result indicated the increase of flowability with higher replacement ratio of river sand. There was no noticeable difference in the mean compressive strength with different replacement ratio of river sand, but the variation in the compressive strength increased as higher amount of river sand was adopted for the replacement. The difference in the uniaxial tensile strength was negligible, but the tensile strain capacity was significantly influenced by the replacement ratio of river sand. It is thought that increased density of multiple cracks induced improved tensile strain capacity when higher percentage of river sand was adopted for fine aggregate. The deviation in the strain capacity increased as the replacement ratio of river sand was higher, as in the compressive strength. This study presented the feasibility of using normal sand instead of micro silica sand for highly ductile cementitious composites with equivalent or better uniaxial tensile performance, even though it might increase the deviation in the performance.

**Keywords:** Highly ductile cementitious composite, Fine aggregate, Flowability, Uniaxial tensile behavior, Tensile strain capacity

## 1. 서 론

1990년대 Victor C. Li 교수는 마이크로역학 이론을 기반으로 하여 ECC(Engineered Cementitious Composites)라고 명명되는 고연성 시멘트 복합체를 개발하였다(Li, 1998, 2006; Li et al., 2001). ECC는 일축인장 하에서 균열폭을 일정값 이내로 제어하면서 다중 미세균열(Multiple micro-cracking)을 유도하여 변형률 경화거동(strain hardening behavior)을 나타낸다. 따라서 파괴인성이 일반콘크리트와 비교하지 못할 만큼 매우 크며 알루미늄 함급에 버금가는 정도이다(Maalej et al., 1995). 일반적인 ECC는 폴리비닐알코올(Polyvinyl alcohol, PVA) 섬유를 부피비 2% 내외로 혼입하며 일축인장 거동에서 인장변형률 성능이 3%에서 5% 정도이다. 이는 일반 콘크리트 또는 섬유보강 콘크리트의 300배에서 500배에 해당한다.

ECC는 우리나라, 일본, 유럽 여러 나라 등에서도 활발하게 개

발 및 적용이 되고 있으며, 경우에 따라서는 부분적으로 약간 차별화된 재료 구성 및 배합을 적용하기도 한다(Lee, 2012; Kanakubo et al., 2013, Wang and Li, 2003). 현재 ECC와 같은 또는 유사한 역학적 거동 특성을 나타내는 고연성 시멘트 복합체들을 DFRCC (Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites), HPRCC (High Performance Cementitious Fiber Reinforced Cementitious Composites), SHCC(Strain Hardening Cementitious Composites), SHFRCC(Strain-hardening Fiber-Reinforced Cementitious Composites) 등의 명칭으로 부르고 있다(Lee, 2012; Shin et al., 2007; JCI-DFRCC Committee, 2013; Mechtcherine et al., 2011).

고연성 시멘트 복합체에 사용되는 섬유로는 폴리비닐알코올(PVA) 섬유가 가장 일반적으로 사용되며, 폴리프로필렌(Polypropylene, PP) 섬유 및 폴리에틸렌(Polyethylene, PE) 섬유를 사용하기도 한다(Lee et al., 2013; Kwon et al., 2016). PP 섬유는 저가이지만 인장강도가 낮아 고강도 매트릭스에 사용하기에는 적합하지 않으며, PE 섬유는 인장강도가 높기 때문에 고강도 매트릭스에 적합한 반면 가격이 상대적으로 비싸다. PVA 섬유는 PP 섬유와 PE 섬유의 중간 정도의 가격과 인장강도를 가지고 있어서 가장 일반적으로 사용되고 있다. 최근 고강도와 고연성을 동시에 만족하는 시멘트 복합체의 개발 노력과 함께 고강도 매트릭스에 적합한 PE 섬유의 활용이 점차 증가할 것으로 예상

<sup>1</sup>정회원, 전남대학교 건축학부 부교수

<sup>2</sup>정회원, 대구대학교 건설시스템공학과 부교수, 교신저자

\*Corresponding author: stkang@daegu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan, 38453, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

된다.

한편, ECC와 같은 고연성 시멘트 복합체에서는 굵은골재를 거의 사용하지 않는다. 마이크로 역학적 관점에서 볼 때, 변형을 경화 거동을 나타내기 위해서는 작용 인장응력이 최대 섬유가교 응력(fiber bridging stress)에 도달하기 전에 정상상태 균열이 발생해야 하며, 그러기 위해서는 매트릭스의 파괴인성(fracture toughness)이 크지 않아야 한다. 골재의 크기는 매트릭스의 파괴 특성에 영향을 크게 미치며, 골재 크기가 클수록 파괴경로가 길어 지게 되어 파괴인성을 증가시키는 결과를 나타낸다(Nallthambi et al., 1984). 따라서 고연성 시멘트 복합체에서는 굵은 골재를 사용하지 않는 것이 일반적이다. 또한 골재의 크기가 증가할수록 섬유 분산성이 떨어지는 문제점 등도 있다(De Koker and van Zijl, 2004). 그러나 골재는 일반적으로 콘크리트 전체 부피에서 가장 많은 부피를 차지하고 다른 구성재료에 비해 가격이 저렴하기 때문에 경제성 관점에서 많이 사용할수록 콘크리트의 제조 비용을 줄일 수 있는 효과가 있으며, 또한 골재입자의 강성이 크기 때문에 콘크리트의 체적 안정성을 높이는 역할을 한다(Fuller and Thompson, 1907). 따라서 고연성의 특성을 얻을 수 있는 범위 내에서 가능한 한 크기가 큰 골재를 사용하는 것은 경제성 및 체적 안정성 관점에서 효과적일 수 있다.

고연성 시멘트 복합체에서는 평균입경 수 백  $\mu\text{m}$ 의 규사를 사용하는 것이 일반적이지만, 아직까지 다양한 섬유들의 가교 저항 특성에 따른 사용가능한 골재 최대입경 및 입도분포, 또는 골재 사용량 등에 대한 많은 실험적 연구가 이루어지지 않았다. 따라서 이 연구에서는 PE 섬유를 사용한 고연성 시멘트 복합체에 대해 최대입경 4.75 mm의 일반모래를 규사와 서로 다른 비율로 혼합하여 사용하였을 때, 그에 따른 고연성 시멘트 복합체의 인장거동 변화를 살펴보고자 한다.

## 2. 실험

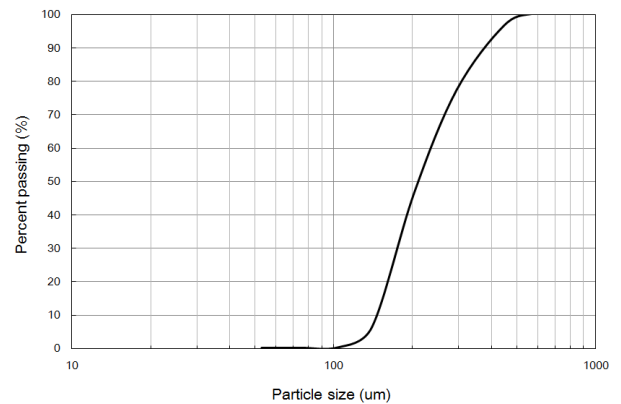
### 2.1 사용재료 및 배합

실험에서 적용한 고연성 시멘트 복합체의 배합은 Table 1과 같다. 물시멘트비는 0.35로 하였으며, 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다. 굵은골재는 사용하지 않았으며, 잔골재로 규사 및 일반모래를 사용하였다. 규사는 밀도  $2.62 \text{ g/cm}^3$ , 평균입경 약  $290 \mu\text{m}$ 의 7호사를 사용하였으며, 일반모래는 밀도  $2.63 \text{ g/cm}^3$ , 조립률 2.55, 흡수율 1.65를 나타내는 강모래를 사용하였다. 규사 및 일반모래의 입도분포는 Fig. 1과 같다. 섬유는 폴리에틸렌(Polyethelene, PE) 섬유를 사용하였으며, 물리적 성질은 직경  $12 \mu\text{m}$ , 길이 18 mm, 인장강도 2,700 MPa, 밀도  $0.97 \text{ g/cm}^3$ , 탄성계수 88 GPa이다. PE 섬유의 혼입량은 전체 부피의

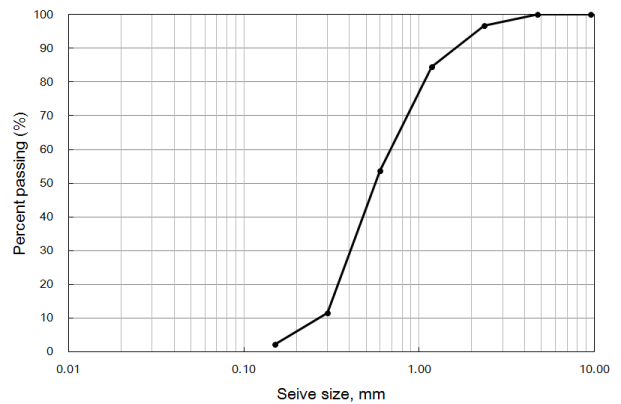
Table 1 Mix proportion

Mixture	W/C	Water	Cement	Fine Agg.		PE fiber	SP(%)
				MS	RS		
RS25				362	121		
RS50	0.35	426	1217	242	242	14.55	0.07
RS75				121	362		
RS100				-	483		

MS : Micro silica sand, RS : River sand



(a)



(b)

Fig. 1 Particle size distributions of (a) micro-silica sand and (b) normal sand

1.5%로 하였다. 고성능감수제는 폴리칼폰산계로 시멘트 중량의 0.07%를 사용하였다. 균일한 섬유 분산성 확보를 위한 매트릭스 점성 조절을 목적으로 소량의 증점제를 사용하였으며, 또한 기포 발생에 따른 영향을 줄이기 위해 소포제도 소량 첨가하였다.

일반적으로 잔골재로 사용하고 있는 규사 대신에 일반모래를 일부 또는 전부 사용했을 때 고연성 시멘트 복합체의 인장거동 변화를 살펴보기 위하여 잔골재 중 일반모래의 비율을 25%, 50%, 75%, 100%로 다르게 하여 실험배합을 구성하였다.

## 2.2 실험체 제작 및 실험방법

시멘트 복합체의 혼합은 먼저 분말 형태의 시멘트와 규사를 건비빔한 후, 배합수와 고성능감수제를 섞어서 넣고, 균질한 매트릭스가 확보되도록 충분한 시간 동안 혼합을 한 후에 저속상태에서 PE섬유를 투입하고 섬유가 고르게 분산될 때까지 다시 혼합 과정으로 실시하였다.

혼합 후 굳지 않은 상태에서의 유동성 평가를 KS L 5105에 따른 플로우 시험으로 먼저 실시하고, 압축 및 인장실험을 위한 실험체를 제작하였다. 압축강도 평가를 위한 압축공시체는 KS L 5105에 따라 50 mm × 50 mm × 50 mm 크기의 정육면체로 제작하였으며, 직접인장 실험체는 Fig. 2(a)와 같은 형상으로 제작하였다.

모든 실험체는 재령 28일까지 20°C ± 3°C 양생수조에서 수중양생을 실시하였으며, 재령 28일에서 실험을 실시하였다. 압축강도는 1,000 kN 용량의 만능재료시험기를 사용하여 측정하였고, 일축인장시험은 재하용량 100 kN의 만능재료시험기를 사용하여 실험을 실시하였다. 재하속도 0.003 mm/sec이고, 변형률계산을 위한 변형 측정 구간은 30 mm × 30 mm 정사각형 면적을 갖는 길이 80 mm이다. 하중을 가하는 동안 변형은 Fig. 2(b)와 같이 길이 변화량을 측정할 수 있는 센서를 지그에 설치하여 측정하였으며, 동시에 로드셀로 하중을 측정하였다.

## 3. 결과 및 분석

### 3.1 유동성

Fig. 3은 규사에 대한 강모래 치환율 변화에 따른 플로우 측정값의 변화를 나타낸 것으로, 강모래 치환율이 증가함에 따라 유

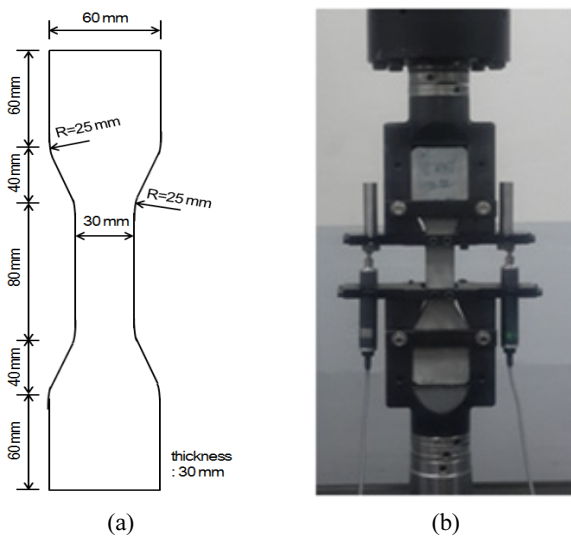


Fig. 2 (a) Geometry of specimen and (b) Test setup

동성이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 입도분포에 따른 영향으로 판단된다. 약 100 μm에서 500 μm 입경 크기의 좁은 범위에서 입도분포를 가지는 규사에 비해 강모래는 100 μm 내외에서 4,750 μm까지 상대적으로 넓은 입경범위를 가지고 있기 때문에, 다양한 크기의 입자들의 적절한 구성으로 골재입자들의 충전밀도가 상대적으로 크게 나타났을 것으로 추측할 수 있다. 강모래를 규사의 일부로 치환하여 사용한 경우에도 강모래의 상대적으로 양호한 입도분포가 규사와 혼합되면서 충전밀도가 점진적으로 증가하게 되고, 동일한 배합수량에 대해 향상된 충전밀도가 Fig. 3과 같은 유동성 향상으로 나타난 것으로 판단된다. 충전밀도에 대한 정량적 근거를 도출하기 위하여, 고체 입자들로 구성된 배합에 대한 선형충전밀도 모델(de Larrard and Sedran, 1994)을 이용하여 충전밀도를 계산해 보았다. 이 연구에서 고려한 시멘트, 규사 및 강모래로 구성된 배합에 대해 충전밀도를 계산해 본 결과, 규사만을 사용한 경우에는 충전밀도가 0.708인 반면 강모래 치환율이 25%에서 100%까지 증가함에 따라 충전밀도가 0.711에서 0.719까지 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 플로우 값의 변화와 밀접한 연관성을 보이고 있다.

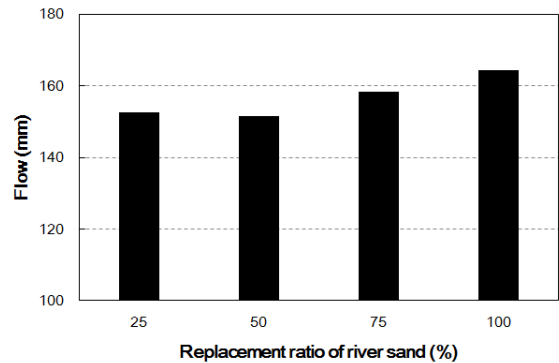


Fig. 3 Flow test results with different replacement ratio of river sand for micro-silica sand

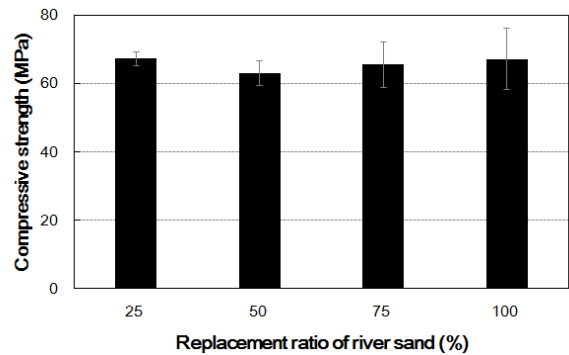


Fig. 4 Compressive strengths with different replacement ratio of river sand for micro-silica sand

### 3.2 압축강도

규사 대신 일부 강모래를 사용함에 따른 고연성 시멘트 복합체의 압축강도 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. Fig. 4는 강모래 치환율에 따른 압축강도 변화를 나타낸 것이다. 강모래 치환율이 50%인 경우 압축강도가 다소 떨어지는 결과를 나타내었지만, 25%, 75% 및 100%에서는 거의 유사한 압축강도 결과를 나타내었다. 한편 Fig. 4에서 강모래 치환율 변화에 따른 압축강도 결과값의 편차를 살펴보면, 표준편차로 나타낸 오차막대의 크기가 강모래 치환율이 증가할수록 증가하는 경향을 볼 수 있다. 작은 입자크기와 상대적으로 좁은 입경 범위를 가지는 규사를 사용하면 재료의 균질성을 향상시킬 수 있기 때문에 최근 다양한 고성능 시멘트 복합체에서 많이 사용하고 있는데, 입경이 크고 입도분포 범위가 넓은 강모래를 많이 사용할수록 재료의 비균질성이 증가하여 압축강도의 편차가 커지는 결과로 나타난 것으로 판단된다.

### 3.3 일축인장거동

Fig. 5는 일축인장실험을 통해 얻은 일축인장 응력-변형률 관계를 강모래 치환율별로 나타낸 것이다. 모든 실험체에서 첫 번째 균열발생 이후 변형률 증가와 함께 인장응력이 계속적으로

증가하는 고연성 시멘트 복합체의 전형적인 변형률경화 거동이 나타났다. 강모래의 치환율이 증가함에 따라 최대응력에 도달하는 시점에서의 인장변형률이 대체적으로 증가하는 것으로 나타났다. 인장변형률 성능 관점에서 볼 때, SR25에 비해 SR50은 인장거동이 크게 향상된 것으로 보이며, SR50, SR75, SR100 사이에서는 직관적으로 관찰했을 때 인장거동에 큰 차이는 없지만 전체적으로 인장거동이 유사하거나 약간 향상되는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 강모래 치환율에 따른 일축인장강도를 비교하여 나타낸 것이다. 압축강도와 마찬가지로 일축인장강도에서도 강모래 치환율 변화에 따른 강도 변화는 크지 않은 것으로 나타났으며, 강모래 치환율에 따른 일정한 변화 경향을 보이지 않았다.

Fig. 7은 강모래 치환율에 따른 일축인장변형률 성능을 비교하여 나타낸 것으로, 인장변형률 성능은 인장응력의 최고점에 도달한 이후에 인장강도의 90% 응력에 도달할 때까지 발생한 인장변형률로 정의하였다. 인장강도의 변화와는 달리 인장변형률 성능에서는 강모래 치환율이 증가함에 따라 인장변형률 성능이 크게 향상되는 경향을 확인할 수 있었다. 반면, 인장변형률 성능의 편차를 살펴보면, 강모래 치환율이 증가할수록 편차도 크게 증가하는 결과를 나타내었는데, 이와 같은 결과는 압축강도 결과에서와 동일한 경향을 보이는 것이다. 강모래 사용량이 증

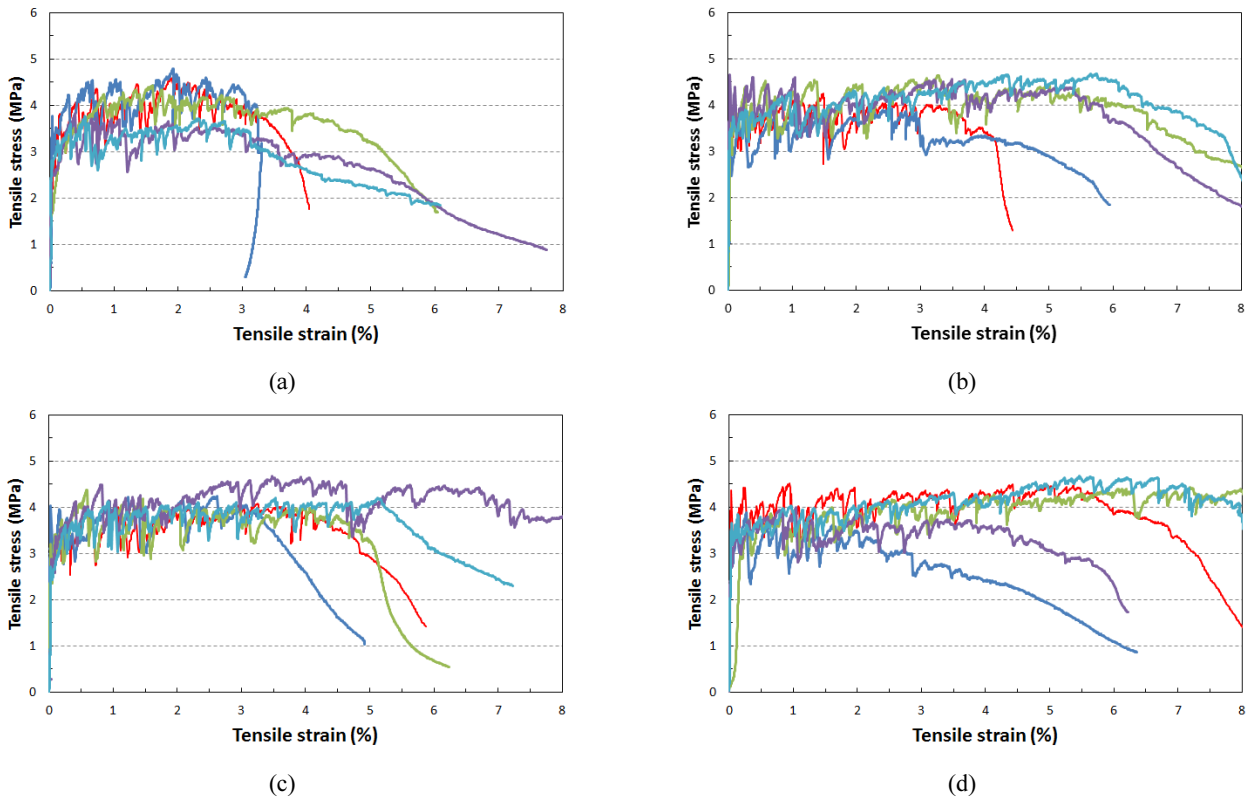


Fig. 5 Uniaxial tensile behaviors with different replacement ratio of river sand for micro-silica sand: (a) RS25, (b) RS50, (c) RS75, and (d) RS100

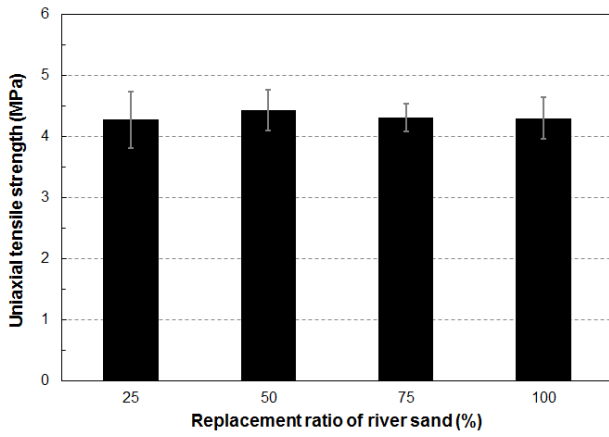


Fig. 6 Uniaxial tensile strength with different replacement ratio of river sand for micro-silica sand

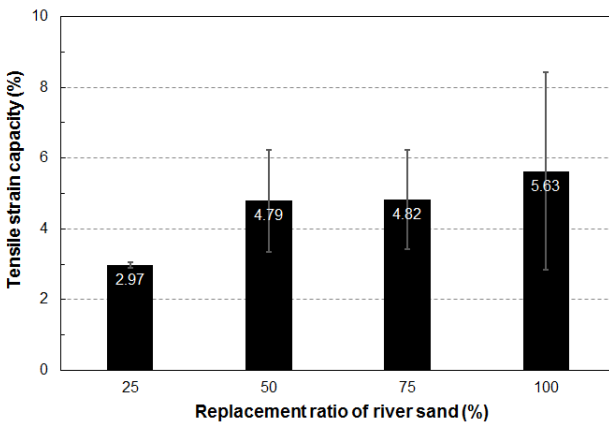
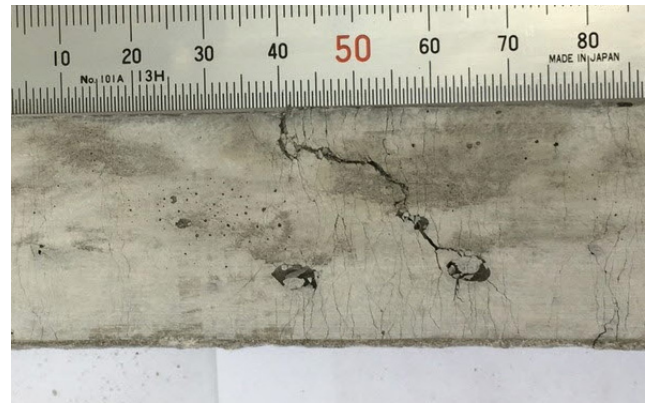


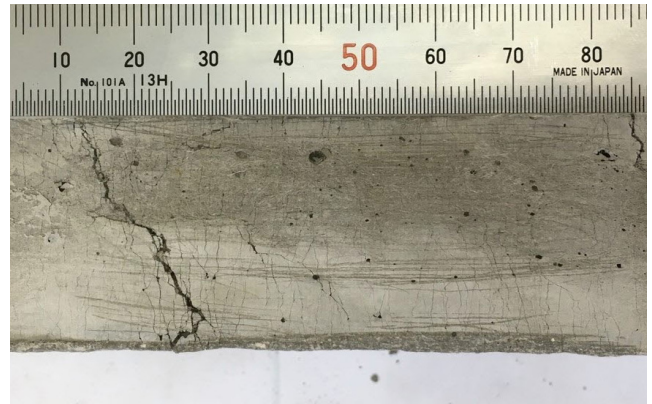
Fig. 7 Tensile strain capacity with different replacement ratio of river sand for micro-silica sand

가함에 따라 압축강도와 인장강도에는 의미있는 차이가 나타나지 않았지만 인장변형률 성능에 차이가 나타나는 주 이유는 발생한 균열 개수의 차이에 의한 것으로 판단된다. Fig. 8은 SR25 및 SR100 실험체에서 일축인장실험 종료 후 비재하상태에서 실험체에 형성된 균열발생 양상을 비교하여 나타낸 것이다. 두 실험체에서 변형률 측정 범위 내에서 관찰된 균열 개수를 비교했을 때 SR25에 비해 SR100에서 더 많은 균열이 전단면에 걸쳐 더 고르게 관찰되었으며, 형성된 균열 분포밀도의 차이가 인장변형률 성능의 큰 차이로 나타난 것으로 판단된다. 다만, 인장변형률 성능에서 편차로 나타난 오차막대의 최저점을 기준으로 비교할 경우에는 강모래 치환율별 인장변형률 성능의 차이가 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다.

종합적으로 고연성 섬유보강 복합체에서 강모래 사용량이 압축강도와 인장강도보다는 인장변형률 성능에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 강모래 사용량이 증가함에 따라 압축강도 및 인장변형률 성능의 편차를 증가시키는 것으로 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 8 Comparison of crack distribution of (a) RS25 and (b) RS100

이 연구에서 실험적으로 검토한 강모래 사용에 따른 고연성 섬유보강 복합체의 인장성능 원리를 규명하기 위해서는 섬유인발 실험, 매트릭스 파괴인성 실험, 섬유 분산성 평가 실험 등 추가적인 연구가 필요하지만, 기존에 사용되지 않았던 강모래를 고연성 섬유보강 복합체에 적용하여 5.6% 이상의 높은 인장변형률 성능을 확보할 수 있다는 것을 이 연구를 통해 확인하였다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 PE 섬유를 사용한 고연성 시멘트 복합체에 대해 최대입경 4.75 mm의 일반모래(강모래)를 규사와 서로 다른 비율로 혼합하여 사용하였을 때, 그에 따른 고연성 시멘트 복합체의 인장거동 변화를 실험을 통해 살펴보고자 하였다.

유동성 평가 실험에서는 강모래 치환율이 증가함에 따라 유동성이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 입도분포에 따른 영향으로, 선형충전밀도 모델을 이용하여 계산한 충전밀도와 밀접한 연관성을 확인할 수 있었다.

강모래 치환율 변화에 따른 압축강도 결과에서는 평균압축강

도에는 큰 차이가 없었으나, 편차의 크기가 강모래 치환율이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 입경이 크고 입도 분포 범위가 넓은 강모래를 많이 사용할수록 재료의 비균질성이 증가한 결과로 판단된다.

일축인장시험 결과에서는 강모래 치환율에 따른 인장강도의 변화는 거의 없는 것으로 나타났으며, 인장변형률 성능에서는 강모래 치환율이 증가함에 따라 향상되는 결과를 나타내었다. 강모래 치환율이 증가함에 따라 다중균열의 분포밀도가 증가하면서 인장변형률 성능의 향상된 것으로 보인다. 한편, 인장변형률 성능의 편차는 압축강도에서와 마찬가지로 강모래 치환율이 증가함에 따라 커지는 양상을 나타내었다.

이 연구를 통해 규사 대신 일반모래를 사용한 경우에도 고연성 시멘트 복합체의 인장거동의 변동성은 증가하지만, 규사를 사용한 고연성 시멘트 복합체와 비교할 때 등가 이상의 인장성능을 나타낼 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업의 연구비지원(17RDRP-B076277-04)에 의해 수행되었습니다.

## References

De Koker, D. and van Zijl, G. (2004), Extrusion of Engineered Cement-Based Composite Material, Proceedings of BEFIB, Varenna, Lake Como, Italy, Sept, 1301-1310.

de Larrard, F. and Sedran, T. (1994), Optimization of Ultra-High Performance Concrete by the Use of A Packing Model, *Cement and Concrete Research*, 24(6), 997-1009.

Fuller, W. B. and Thompson, S. E. (1907), The Laws of Proportioning Concrete, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 59, 67-143.

JCI-DFRCC Committee (2003), DFRCC Terminology and Application Concepts, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 335-340.

Kanakubo, T., Kabele, P., Fukuyama, H., Uchida, Y., Suwada, H., and Slowik, V. (2013), in Strain Hardening Cement Composites: Structural Design and Performance, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 208-HFC, SC3.

Kwon, S. J., Kang, S. T., Choi, J. I., and Lee, B. Y. (2016), Compressive and Tensile Behavior of Polyethylene Fiber Reinforced Composite According to Silica Sand and Fly Ash, *Journal of Recycled Construction Resources*, 4(1), 25-30.

Lee, B. Y. (2012), Strain-Hardening Cementitious Composites with Low Viscosity Suitable for Grouting Application, *Journal of Korea Institute of Structural Maintenance and Inspection*, 16(1), 55-63.

Lee, B. Y., Li, V. C., and Kim, Y. Y. (2013), Polypropylene Fiber-Based Strain-Hardening Cementitious Composites, Proceedings of the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13), Jeju, Korea, September, 8-12, 444-457.

Li, V. C. (1998), ECC-Tailored Composites through Micromechanical Modeling, *Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future*, N. Banthia et al., eds., CSCE, Montreal, QC, Canada, 64-97.

Li, V. C. (2003), On Engineered Cementitious Composites (ECC) - A Review of the Materials and its Applications, *Advanced Concrete Technology*, 1(3), 215-230.

Li, V. C., Wang, S., and Wu, C. (2001), Tensile Strain-Hardening Behavior of PVA-ECC, *ACI Materials Journal*, 98(6), 483-492.

Maalej, M., Hashida, T., and Li, V. C. (1995) Effect of Fiber Volume Fraction on the Off-Crack Plane Energy in Strain-hardening Engineered Cementitious Composites, *Journal of American Ceramic Society*, 78(12), 3369-3375.

Matsumoto, T., Suthiwarapirak, P., and Kanda, T. (2003), Mechanisms of Multiple Cracking and Fracture of DFRCC under Fatigue Flexure, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 299-306.

Mechtcherine, V., de Andrade Silva, F., Butler, M., Zhu, D., Mobasher, B., Gao, S., and Mader, E. (2011), Behavior of Strain-Hardening Cement-Based Composites Under High Strain Rates, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 9(3), 51-62.

Nallthambi, P., Karihaloo, B., and Heaton, B. (1984), Effect of Specimen and Crack Sizes, Water/Cement Ratio and Coarse Aggregate Texture upon Fracture Toughness of Concrete, *Magazine of Concrete Research*, 36(129), 227-236.

Shin, S. K., Kim, J. J. H., and Lim, Y. M. (2007), Investigation of the strengthening effect of DFRCC applied to plain concrete beams, *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 465-473.

Wang, S. and Li, V. C. (2003), Lightweight Engineered Cementitious Composites(ECC), Proceedings of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites(HPFRCC4), Ann Arbor, USA, 379-390.

Received : 09/28/2017

Revised : 10/03/2017

Accepted : 10/10/2017

---

**요 지** : 이 연구에서는 PE 섬유를 사용한 고연성 시멘트 복합체에 대해 최대입경 4.75 mm의 일반모래(강모래)를 규사와 서로 다른 비율로 혼합하여 사용하였을 때, 그에 따른 고연성 시멘트 복합체의 인장거동 변화를 실험을 통해 살펴보고자 하였다. 유동성 평가 실험에서는 강모래 치환율이 증가함에 따라 유동성이 증가하는 것으로 나타났다. 압축강도는 평균압축강도에는 큰 차이가 없었으나, 편차의 크기가 강모래 치환율이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 일축인장시험 결과에서는 강모래 치환율에 따른 인장강도의 변화는 거의 없는 것으로 나타났으며, 인장변형률 성능에서는 강모래 치환율이 증가함에 따라 향상되는 결과를 나타내었다. 강모래 치환율이 증가함에 따라 다중균열의 분포밀도가 증가하면서 인장변형률 성능의 향상된 것으로 보인다. 한편, 인장변형률 성능의 편차는 압축강도에서와 마찬가지로 강모래 치환율이 증가함에 따라 커지는 양상을 나타내었다. 이 연구를 통해 규사 대신 일반모래를 사용한 경우에도 고연성 시멘트 복합체의 인장거동의 변동성은 증가하지만, 규사를 사용한 고연성 시멘트 복합체와 비교할 때 등가 이상의 인장성능을 나타낼 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 고연성 시멘트 복합체, 잔골재, 유동성, 일축인장거동, 인장변형률 성능

---