

골재의 입도분포 변화에 따른 PE 섬유보강 고연성 시멘트 복합체의 인장성능

이방연¹, 강수태^{2*}

Tensile Performance of PE Fiber-Reinforced Highly Ductile Cementitious Composite including Coarse Aggregate

Bang Yeon Lee¹, Su-Tae Kang^{2*}

Abstract: For the purpose of developing a PE fiber-reinforced highly ductile cementitious composite having high tensile strain capacity more than 2% under the condition of containing aggregates with large particle size, this study investigated the tensile behavior of composites according to the particle size and distribution of aggregates in the composite. Compared with the mixture containing silica sand of which particle size is less than 0.6 mm, mixtures containing river sand and/or gravel with the maximum particle size of 2.36 mm, 4.75 mm, 5.6 mm, 6.7 mm were considered in the experimental design. The particle size distributions of aggregates were adjusted for the optimized distribution curves obtained from modified A&A model by blending different sizes of aggregates. All the mixtures presented clear strain-hardening behavior in the direct tensile tests. The mixtures with the blended aggregates to meet the optimum curves of aggregate size distributions showed higher tensile strain capacity than the mixture with silica sand. It was also found that the tensile strain capacity was improved as the maximum size of aggregate increased which resulted in wider particle size distribution. The mixtures with the maximum size of 5.6 mm and 6.7 mm presented very high tensile strain capacities of 4.83% and 5.89%, respectively. This study demonstrated that it was possible to use coarse aggregates in manufacturing highly ductile fiber-reinforced cementitious composite by adjusting the particle size distribution.

Keywords: Fiber Reinforced, Strain hardening, Aggregate size, Particle size distribution, Tensile strain capacity

1. 서 론

90년대 후반 마이크로역학 이론을 토대로 개발된 고연성 시멘트 복합체는 균일한 인장응력이 작용하는 구간에서 수많은 미세균열들이 형성되도록 유도하여 최대응력에 도달하기까지 큰 인장변형능을 나타내는 특징이 있다(Li, 1998; Li and Leung, 1992; Li et al., 2001). 재료 및 배합과 사용되는 섬유의 특성에 따라 성능에 차이가 있지만 일반적으로 변형률 경화 거동과 함께 2% 이상의 인장변형률 성능을 나타낸다(Lee, 2012; Rokugo and Kanda, 2013; Wang and Li, 2003). 고연성 시멘트 복합체에서 충분한 인장변형률 성능을 확보하기 위해서는 매트릭스의 파괴역학적 특성과 섬유-매트릭스 계면의 역학적 특성의 적절한 설계를 통해 일정 크기 이하의 균열들이 지속적으로 새롭게 형성될 수 있는 조건을 만족하여야 한다. 마이크로역학 관점에서 살펴볼 때, 변형률 경화 거동을 나타내기 위해서는

작용 인장응력이 최대 섬유가교응력(Maximum fiber-bridging stress)에 도달하기 전에 매트릭스에 정상상태 균열(steady state cracking)이 발생해야 하며, 균열 생성 이후 섬유의 인발거동에 따른 최대 섬유가교응력까지의 상보에너지가 매트릭스의 파괴에너지보다 커야 정상상태 균열이 지속적으로 생성될 수 있다. 따라서 매트릭스의 파괴인성(fracture toughness)이 커지게 되면 고연성 시멘트 복합체의 인장변형률 성능을 확보하는데 불리하게 작용한다(Li et al., 1995).

골재의 크기는 매트릭스의 파괴특성에 크게 영향을 미친다. 골재 크기가 클수록 파괴경로가 길어지게 되어 파괴인성이 증가하여 정상상태 균열을 유도하는 데 불리하게 작용한다(Nallthambi et al., 1984). 따라서 고연성 시멘트 복합체에서는 굵은 골재를 사용하지 않는 것이 일반적이다. 또한 골재의 크기가 증가할수록 섬유의 분산성에도 좋지 않은 영향을 미쳐 결과적으로 섬유보강 시멘트 복합체의 균질성도 저하하게 된다(De Koker and van Zijl, 2004). 한편, 잘 알려진 바와 같이 골재는 일반적으로 콘크리트 전체 부피에서 가장 많은 부피를 차지하고 다른 구성재료에 비해 가격이 저렴하기 때문에 경제성 관점에서 많이 사용할수록 콘크리트의 제조비용을 줄일 수 있는 효과가 있으며, 또한 골재입자의 강성이 크기 때

¹정희원, 전남대학교 건축학부 교수

²정희원, 대구대학교 건설시스템공학과 부교수

*Corresponding author: stkang@daegu.ac.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2020년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2020년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

문에 콘크리트의 체적 안정성을 높이는 역할을 한다(Fuller and Thompson, 1907). 이러한 관점에서 볼 때 고연성의 특성을 얻을 수 있는 범위 내에서 가능한 한 크기가 큰 골재를 사용하는 것은 경제성 및 체적 안정성 관점에서 효과적이다.

현재까지 굵은 골재를 포함하는 고연성 시멘트 복합체에 관한 연구는 많이 수행되지 않았다. Liao et al.(2006)은 최대 치수 12 mm의 굵은 골재를 전체 골재부피 대비 35%~40% 사용하고 강섬유를 1.5 vol.% 혼입한 배합에서 인장변형률 성능을 최대 0.5% 정도 얻었으며, Moreno et al.(2012)는 강섬유와 폴리비닐알코올(Polyvinyl alcohol) 섬유를 1.5 vol.% 혼합하고 최대치수 9.5 mm의 굵은 골재를 전체골재 부피의 절반 정도로 사용한 고연성 시멘트 복합체에서 0.6%~1.0% 범위의 인장변형률 성능을 얻었다. Sial and Khan(2018)은 최대치수 10 mm 굵은 골재를 전체 골재부피의 60%까지 사용하여 인장변형률 성능 1.5% 정도를 얻은 바 있다. Sahmaran et al.(2009)는 굵은 골재는 아니지만 입자가 큰 잔골재(최대입경 1.19mm 및 2.38mm)를 사용하여 인장변형률 성능 2%~3%의 고연성 시멘트 복합체를 제조하였다. 그동안 굵은 골재를 사용한 고연성 시멘트 복합체의 연구결과에서 볼 때, 인장변형률 성능은 최대 1.5% 정도로 잔골재만을 사용한 일반적인 고연성 시멘트 복합체에 비해 인장변형률이 떨어지는 것을 알 수 있다.

이 연구에서는 인장변형률 성능 2% 이상의 고연성 시멘트 복합체 배합에 굵은 골재의 사용가능성을 검토하기 위하여 골재의 크기와 입도분포에 따른 고연성 섬유보강 시멘트 복합체의 인장거동 특성을 조사하고자 한다.

2. 실험

2.1 사용재료 및 배합

시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 잔골재로는 규사 또는 강모래를 사용하였다. 규사(Silica Sand, SS)

는 밀도 2.62 g/cm³, 대부분의 입경이 0.6 mm 이하로 평균입경이 0.46 mm인 것을 사용하였다. 강모래(River Sand, RS)는 밀도 2.63 g/cm³, 조립률 2.55, 흡수율 1.65%의 물리적 성질을 나타내었다. 굵은 골재로는 강자갈을 사용하였으며, 밀도 2.64 g/cm³, 조립률 6.89, 흡수율 1.41%를 나타내었다. 규사, 강모래 및 굵은 골재의 함수상태는 동일하게 절건상태로 사용하였으며, 강모래와 자갈은 크기와 입도분포의 영향을 평가하기 위하여 체가름을 통해 보다 세분화된 크기 범위로 분류하여 사용하였다. 규사, 강모래 및 강자갈의 입도분포곡선은 Fig. 1과 같다. 강모래는 1.18 mm, 2.36 mm, 4.75 mm 체를 기준으로 나누어 사용하였으며, 강자갈은 5.6 mm이하와 6.7 mm 이하로 세분화하여 사용하였다. 인장성능 향상을 목적으로 사용된 보강섬유는 직경 12 μm, 길이 18 mm의 폴리에틸렌(Polyethylene, PE) 섬유이며, 인장강도 2 700 MPa, 밀도 0.97 g/cm³, 탄성계수 88 GPa의 물리적 특성값을 가진다. PE 섬유의 혼입량은 전체 부피 대비 1.5%로 하였다. 섬유혼입 상태에서의 충분한 유동성을 확보하기 위하여 고성능감수제를 사용하였으며, 폴리칼폰산계로 시멘트 중량의 0.07%를 사용하였

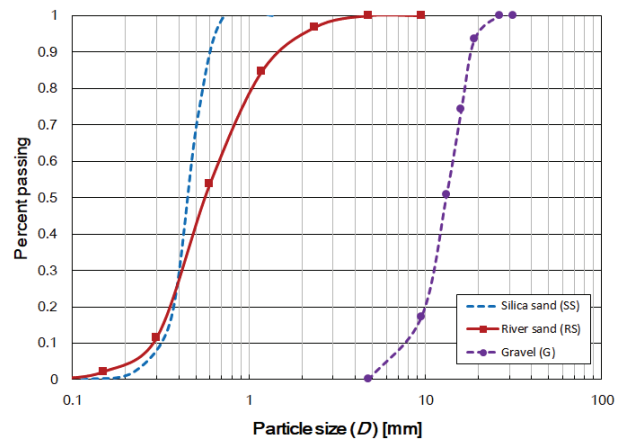


Fig. 1 Particle size distributions of Silica Sand(SS), River sand(RS) and Gravel(G)

Table 1 Mix proportions of the composite mixtures for this study

Mix No.	W/C	Unit mass (kg/m ³)							PE fiber	Remark
		water	cement	sand (S)			gravel			
				SS or RS	RS <1.18 mm	RS 1.18~2.36 mm	RS 1.18~4.75 mm			
1	0.35	428	1222	489	-	-	-	-	SS	
2	0.35	428	1222	489	-	-	-	-	RS	
3	0.35	428	1222	-	367	122	-	-	14.55	
4	0.35	428	1222	-	269	-	220	-		
5	0.35	428	1222	-	242	-	198	49		
6	0.35	428	1222	-	229	-	187	73		

다. 또한 균일한 섬유 분산성을 확보하기 위해서는 적절한 점성을 확보하는 것이 중요하기 때문에 소량의 증점제를 이용하였으며, 기포발생에 따른 영향을 줄이기 위하여 소포제도 소량 첨가하였다.

골재의 크기와 입도분포 변화에 따른 고연성 시멘트 복합체의 인장거동을 살펴보기 위한 Table 1에 나타난 바와 같이 6 가지 배합을 설계하였다. 모든 배합에 대해 물-시멘트비는 0.35를 적용하였다. Mix 1은 규사를 사용한 일반적인 고연성 시멘트 복합체의 배합이고, Mix 2는 규사 대신 4.75 mm 이하의 강모래를 사용한 경우의 배합이다. Mix 3은 강모래를 1.18 mm 이하와 1.18~2.36 mm 입경의 강모래로 채가름으로 나누어 3:1의 비율로 혼합하여 사용한 배합이고, Mix 4는 1.18 mm 이하와 1.18 mm~4.75 mm 입경의 강모래로 나누어 0.55:0.45의 비율로 혼합하여 사용한 배합이다. Mix 5는 굵은 골재까지 포함하는 배합으로 1.18 mm 이하와 1.18 mm~4.75 mm 입경의 강모래, 그리고 5.6 mm 이하의 굵은 골재를 0.5:0.4:0.1의 비율로 혼합하여 사용한 배합이며, Mix. 6은 1.18 mm 이하와 1.18 mm~4.75 mm 입경의 강모래, 그리고 6.7 mm 이하의 굵은 골재를 0.47:0.38:0.15의 비율로 혼합한 배합이다. Mix 3~6의 배합에서의 골재 입경별 비율은 혼합되는 모든 골재들의 최대입경 및 최소입경을 이용한 최적 입도분포모델 곡선에 가능한 근사한 입도분포 곡선이 되도록 결정하였다. 최적입도분포 모델은 Andreasen and Anderson(1930)의 모델을 토대로 Funk and Dinger(1994)가 제안한 수정 A&A 모델(Modified Andreasen and Andersen model)을 사용하였으며, 다음 식과 같이 표현된다.

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad (1)$$

여기서, $P(D)$ 는 입자의 입경 D 를 통과하는 고체입자들의 부피비를 나타내며, D_{\min} 과 D_{\max} 는 최소입경과 최대입경을 의미한다.

다. 지수 q 는 입도분포특성에 따라 $P(D)$ 로 나타내어지는 입도분포곡선의 형상을 나타내는 분포계수로 일반적으로 0~0.5 사이의 값을 가지며 미세 입자가 많은 배합에서는 0.25 이하의 값을 가진다. 자기충전 콘크리트(Self-Compacting Concrete, SCC)의 최적배합의 경우 0.22~0.30 사이의 분포계수 값을 가지는 것으로 알려져 있으며(Brouwers, 2005; Hunger, 2010), 0.5 mm 이하의 입자들로 구성된 초고성능 콘크리트(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)의 경우에는 일반적으로 0.25보다 작은 값을 가진다(Yu et al., 2014). 기존 연구결과를 토대로 이 연구에서는 q 의 값으로 0.25를 적용하였다.

De Larrard and Tondat(1993)는 충전밀도와 콘크리트 압축강도 사이의 관계를 시멘트 페이스트의 두께의 개념을 이용하여 설명하였다. 시멘트 페이스트의 두께는 골재의 최대입경이 클수록, 골재의 충전밀도가 높을수록 증가한다. 동일한 양의 시멘트 페이스트로 골재 사이를 채운다고 할 때, 골재가 잘 충전되면 골재 사이 공간을 채우고 남은 시멘트 페이스트가 골재 사이를 이격시키게 된다는 것이다. 이 연구에서는 골재를 최적입도분포에 가깝게 조정함으로써 시멘트 페이스트의 두께를 증가시켜 섬유의 인발성능을 향상시키고자 하였다. 큰 입경의 골재를 사용함에 따른 파괴인성 증가의 불리함을 섬유의 인발저항성능 향상으로 상쇄시킬 수 있으며, 전체 단면에서의 균질한 최대 섬유가교응력과 인발저항성능 확보가 가능하기 때문에 지속적인 정상상태 균열 형성을 유도하여 높은 인장변형률 성능을 얻을 수 있을 것으로 판단하였다.

Fig. 2는 각 배합에 사용된 혼합골재의 입도분포를 수정 A&A 모델에 의한 최적입도분포곡선과 비교하여 나타낸 것이다. Mix 1과 Mix 2의 비교에서 규사를 사용한 경우에 비해 일반적인 입도분포의 강모래를 사용하는 경우 최적입도분포 곡선에서 많이 이격되는 것을 볼 수 있다. 한편 골재의 입경별 혼합비율을 조정한 Mix 3~6의 경우 별도의 입도조정을 하지 않은 Mix 1과 2와 비교했을 때, 입도조정을 통해 수정 A&A 모델 곡선에 더 가까워졌음을 확인할 수 있다.

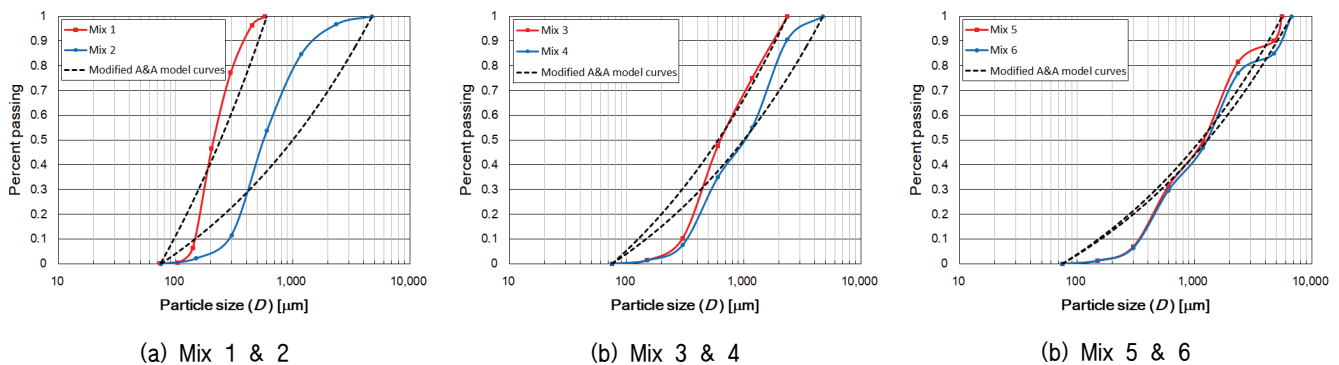


Fig. 2 Particle size distributions of aggregates for the mixes and comparison with modified A&A model curves

2.2 실험체 제작 및 실험방법

PE 섬유보강 고연성 시멘트 복합체의 제조과정은 다음과 같다. 먼저 시멘트와 골재를 교반기에 투입하여 건비빔을 실시한 다음, 배합수와 고성능감수제를 미리 혼합한 용액을 건비빔한 재료에 넣고 균질한 매트릭스 상태가 될 때까지 충분한 시간 동안 혼합을 한다. 이후 PE 섬유를 천천히 나누어 투입하고 섬유가 고르게 분산될 때까지 다시 추가적인 혼합을 한다. PE 섬유를 투입한 후 혼합 중에 순차적으로 증점제와 소포제를 투입한다.

제조된 고연성 PE 섬유보강 시멘트 복합체에 대해서 먼저 굳지 않은 상태에서 유동성 평가를 KSL 5105에 따른 플로 시험 방법에 따라 실시하였으며, 실험체를 제작하고 표준양생을 실시한 후에 압축강도 및 인장거동 평가 실험을 실시하였다. 압축강도 실험을 위한 실험체는 50 mm 크기의 정육면체로 제작하였으며, 인장거동 평가를 위해서는 Fig. 3과 같은 형상과 치수의 일축 인장 실험체를 제작하였다. 배합별로 압축강도 실험체 3개, 일축 인장 실험체 6개를 각각 제작하였다.

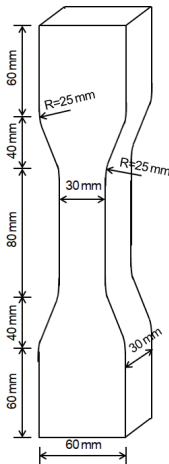


Fig. 3 Geometry of specimen for tensile test

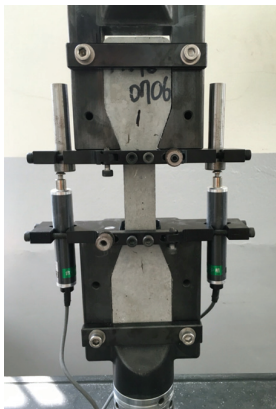


Fig. 4 Setup for uniaxial tensile test

압축 및 인장 실험을 위하여 제작된 실험체는 재령 28일까지 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 양생수조에서 수중양생을 실시한 후에 실험을 실시하였다.

압축강도 실험은 1 000 kN 용량의 만능재료시험기를 이용하여 수행하였으며, 일축 인장 실험은 재하용량 100 kN의 만능재료시험기를 이용하여 실시하였다. 이 때 재하속도는 0.003 mm/s 를 적용하였으며, 응력에 따른 인장변형률 측정을 위하여 폭 30 mm를 가지는 중앙부에 80 mm의 표점거리 구간에 대해 두 개의 LVDT를 설치하여 변위를 측정하였다. Fig. 4는 일축 인장 실험 모습을 나타낸 것이다.

3. 결과 및 분석

3.1 유동성

Fig. 5는 플로 시험을 통해 측정된 유동성 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 배합별 플로 값은 155 mm에서 165 mm 사이로 값의 변화가 크게 나타나지는 않았지만, 규사를 사용한 배합에 비해 강모래를 사용한 배합이 플로 값이 약간 증가하는

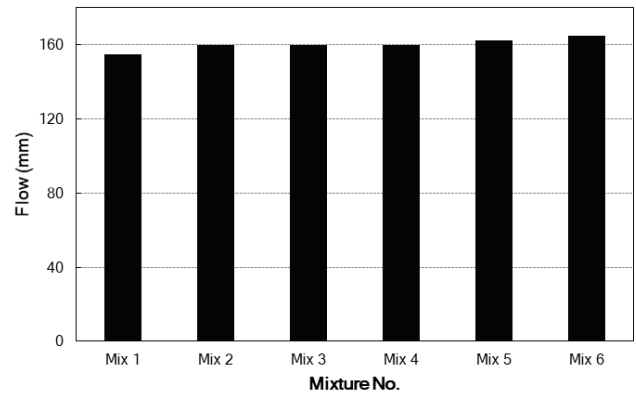


Fig. 5 Flow test results with different mixtures

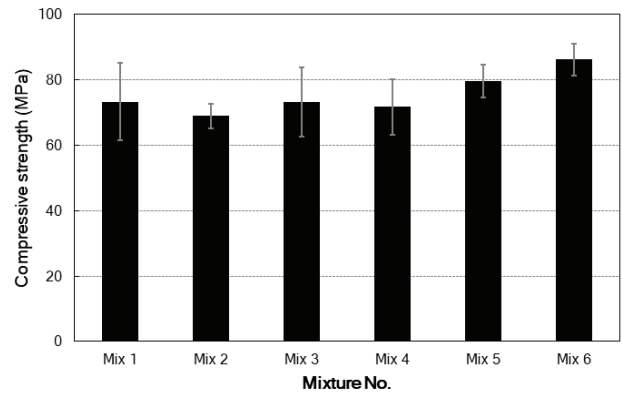


Fig. 6 Compressive strengths with different mixtures

것으로 나타났으며, 굵은 골재를 사용한 Mix 5와 6에서는 플로 값이 더 크게 나타났다. 잔골재의 입경이 작고 입도분포 범위가 좁은 Mix 1에 비해 잔골재의 최대입경이 크고 분포 범위가 넓은 Mix 2-4에서 골재의 충전밀도가 증가함에 따라 단위수량의 유동성 향상에 대한 기여가 높아져서 플로 값이 증가한 것임을 쉽게 알 수 있다. 또한 최적 입도분포곡선에 최대한 근접하면서 골재의 최대입경을 5.6 mm, 6.7 mm로 증가시키면, 일반 콘크리트의 배합에서 굵은 골재 최대치수가 증가함

에 따라 동일한 슬럼프 값을 얻기 위한 단위수량이 감소하는 것과 같이 동일한 단위수량에 대해 플로 값이 증가하는 결과로 나타났다.

3.2 압축강도

골재의 크기와 입도분포 변화에 따른 PE 섬유보강 고연성 시멘트 복합체의 압축강도 결과는 Fig. 6에 제시된 바와 같다. 규사를 사용한 Mix 1의 압축강도는 73 MPa를 나타내었으며,

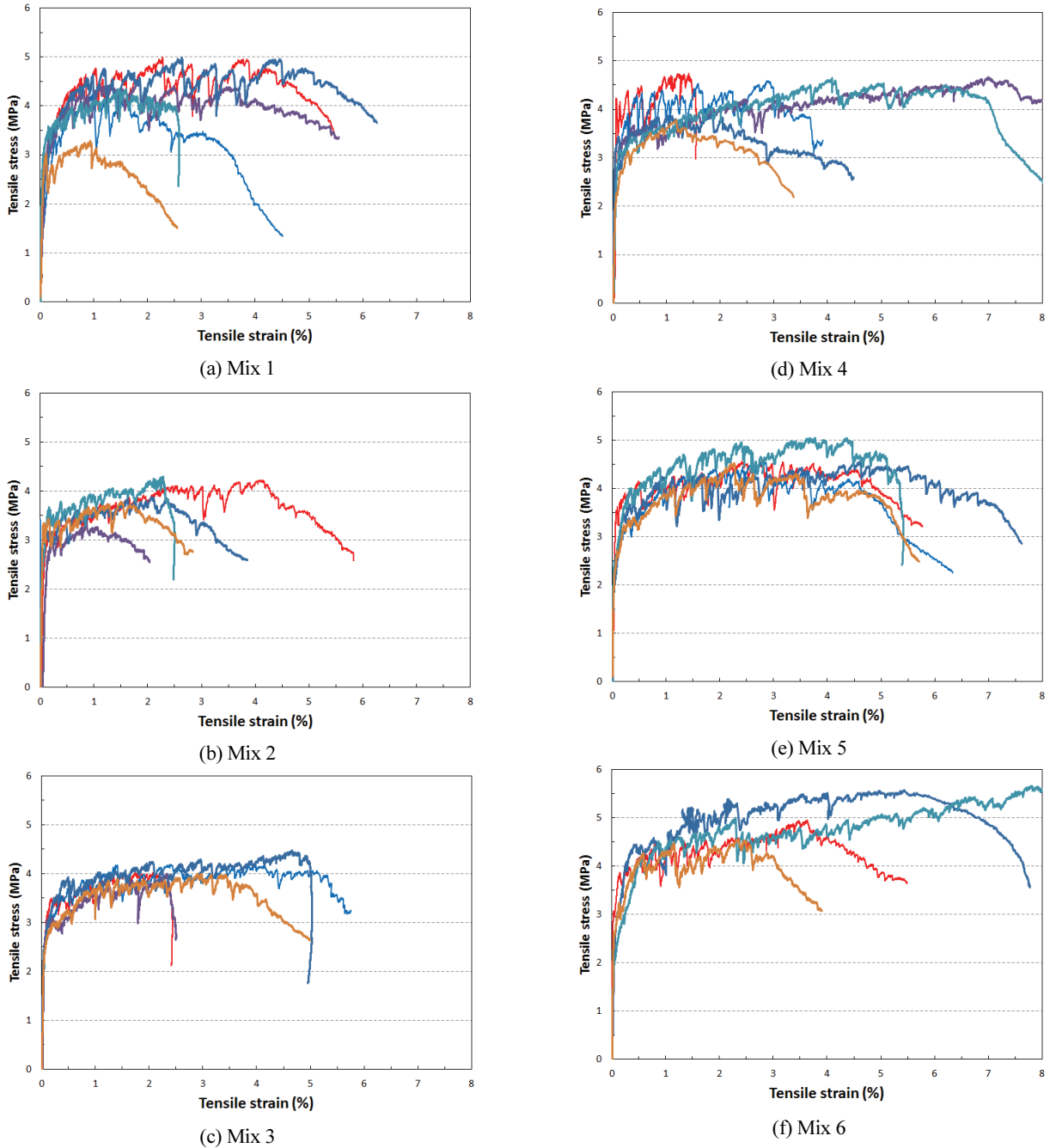


Fig. 7 Uniaxial tensile behaviors with different mixtures

4.75 mm 이하의 강모래를 입도비율 조정 없이 사용한 Mix 2의 경우는 69 MPa로 강도가 조금 낮게 나타났으며, 강모래를 최대입경과 분포를 달리하여 사용한 Mix 3과 4의 압축강도는 각각 73 MPa와 72 MPa의 값으로 규사를 사용한 시멘트 복합체와 유사한 강도를 나타내었다. 한편, 최대입경 5.6 mm와 6.7 mm의 굵은 골재를 포함하고 최적 입도분포곡선에 근사하게 골재 입경별 비율을 조절하여 사용한 Mix 5와 6은 압축강도가 각각 80, 86 MPa로 다른 배합에 비해 높은 압축강도를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

3.3 직접인장거동

골재의 크기와 입도분포 특성에 따른 고연성 시멘트 복합체의 역학적 성질에 대한 평가 항목 중 가장 중요한 것은 다른 재료들과 차별화되는 본연의 성질인 직접 인장 거동에서의 고연성을 나타내는지의 여부이다. Fig. 7은 배합별로 직접인장실험을 통해 얻은 인장 응력-변형률 관계 곡선을 나타낸 것이다. 모든 배합에서 초기 균열이 발생한 이후에 다수의 균열이 발생하면서 변형률 증가와 함께 인장응력이 증가하는 변형률 경화 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 규사를 사용한 일반적인 고연성 시멘트 복합체의 배합을 나타내는 Mix 1의 경우 실험체별 인장거동의 편차가 다소 크게 나타났으며, 최대 인장응력에 도달하는 시점의 인장변형률을 인장변형률 성능이라고 정의할 때, 최소 1%에서 최대 5% 정도까지의 인장변형률 성능을 보였으며 평균 3% 이상을 나타내었다. 일반적인 입도분포의 강모래를 규사 대신 사용한 Mix 2의 경우, 하나의 실험체를 제외하고는 2.5% 이하의 인장변형률 성능을 보였으며 인장거동의 편차는 역시 크게 나타났다. 2.36 mm 이하의 강모래를 적절한 입도구성으로 조절하여 사용한 Mix 3의 경우에는 변형률 경화거동이 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 인장변형률 성능은 2.5%에서 5% 사이의 값을 나타내었다. 4.75 mm까지의 강모래를 최적입도분포 곡선에 가깝도록 큰 입경과 작은 입경의 골재 비율을 조절하여 사용한 Mix 4는 최대 인장변형률 성능 6%~7%를 나타내는 경우도 있었으며, 인장거동의 편차는 매우 크게 나타났다. 5.6 mm 크기의 굵은 골재까지 사용한 Mix 5의 경우에는 인장변형률 성능이 5% 내외로 큰 편차 없이 나타났다. 6.7 mm 크기의 굵은 골재까지 사용한 Mix 6은 일부 8%에 가까운 인장변형률 성능을 보이는 것도 있었으나 개체별 편차가 크게 나타났으며, 대부분 3% 이상의 인장변형률 성능을 나타내었다. 일반적인 강모래를 사용한 경우나 5.6 mm 또는 6.7 mm 크기의 굵은 골재를 포함하면서도 인장 변형률 경화 거동과 2% 이상의 인장변형률 성능을 보이는 것은 골재의 입도분포 조절을 통해 재료의 균질성 저하를 최소화하면서 섬유보강 시멘트 복합체가 고연성을 구현하기 위한 매트릭스와 섬유의 인발거동에 대한 강도 및 에

너지 조건을 모두 만족함을 의미한다고 볼 수 있다.

Fig. 8은 직접인장실험에서 측정된 초기균열발생강도와 인장강도를 배합에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 초기균열발생강도는 매트릭스의 강도와 직접 관련이 있는 것으로, 1.92 MPa에서 2.03 MPa 사이의 값으로 큰 차이를 보이지 않았다. Mix 1과 비교했을 때 나머지 배합에서의 강도가 조금 증가하기는 했지만 가장 크게 나타난 Mix 4에서도 인장강도 증가가 5.7% 정도밖에 되지 않았으며, 5.6 mm 및 6.7 mm 최대크기의 골재를 포함하는 Mix 5와 6의 배합에서는 Mix 1과 큰 차이가 나지 않는 강도를 보였다. 시멘트 복합체의 인장강도는 Mix 2의 경우 Mix 1과 비교했을 때 저하되는 것으로 나타났으며, 최적입도분포곡선에 근사하도록 골재 입경별 비율을 조절하여 배합한 Mix 3~6에서는 골재 최대입경이 증가할수록 인장강도가 증가하는 것으로 나타났다. 골재의 크기가 고연성 시멘트 복합체의 균열간격을 제한하는 요인으로 작용하는 점을 감안하면 골재 최대입경이 커짐에 따라 인장강도가 향상되는 경향을 일반화할 수는 없지만, 실험에서 고려한 골재입경의 범위 내에서는 그러한 경향을 나타내었다.

Fig. 9는 배합별 인장변형률 성능을 비교하여 나타낸 것이

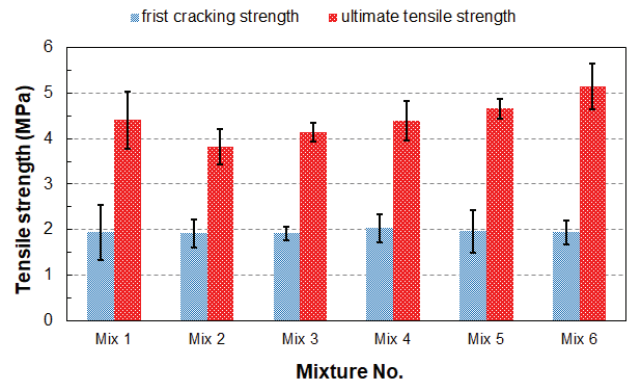


Fig. 8 Comparison of first cracking strengths and ultimate tensile strengths

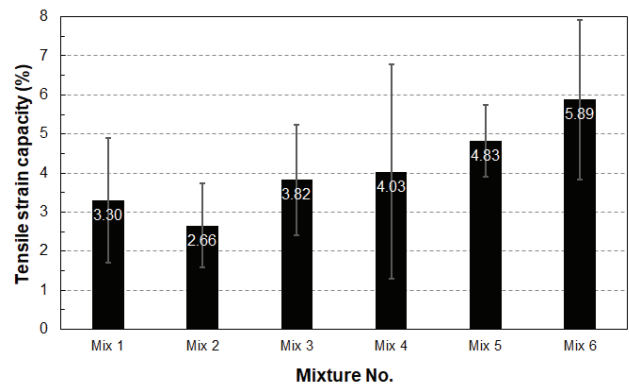


Fig. 9 Comparison of tensile strain capacities



Fig. 10 Crack patterns formed on a specimen with Mix 6

다. 강모래를 인위적인 입도분포 조정없이 사용한 Mix 2만이 규사를 사용한 Mix 1보다 인장변형률 성능이 작게 나왔으며, 사용한 입경범위 내에서 최적입도분포에 가깝도록 입도분포 조정을 실시한 Mix 2~ 6 배합에서 모두 Mix 1보다 높은 인장 변형률 성능을 얻을 수 있었다. 또한 골재 최대입경 크기가 증가할수록 인장변형률 성능이 향상되는 결과를 보였다. 최대 입경 6.7 mm 골재를 포함하는 경우에는 평균 인장변형률 성능 5.89%를 나타내었다. Fig. 10은 Mix 6 배합으로 제작된 고연성 섬유보강 시멘트 복합체 직접인장 실험에서 실험체에 생성된 균열양상을 보여주는 것으로, 전단면에 걸쳐 다수의 균열들이 촘촘하게 형성된 것을 알 수 있으며, 이러한 과정을 통해 높은 인장변형률 성능을 확보할 수 있었다.

4. 결 론

이 연구에서는 입경이 큰 골재를 사용하면서 2% 이상의 인장변형률 성능을 나타내는 고연성 PE 섬유보강 시멘트 복합체 개발을 목적으로 골재의 크기와 입도분포에 따른 고연성 섬유보강 시멘트 복합체의 인장거동 특성을 살펴보고자 하였다. 0.6 mm 이하의 입경들로 구성된 규사를 사용한 배합을 기준으로 최대입경 2.36 mm, 4.75 mm, 5.6 mm, 6.7 mm의 강모래 및 강자갈을 사용한 배합을 비교하여 유동성, 압축강도 및 인장성능을 평가하였다. 골재의 입도분포는 수정 A&A 모델에 기반한 최적입도분포곡선에 가깝도록 세분화된 입경별 혼합비율을 조절하였다. 최적에 가까운 입도분포를 통해 시멘트 복합체의 균질성을 확보하고, 향상된 충전밀도로 시멘트 페이스트의 두께를 증가시켜 섬유의 인발성능이 향상되도록 하였다. 이를 통해 입경이 큰 골재의 사용으로 인한 매트릭스 파괴인성의 증가를 상쇄하여 변형률 경화 거동을 유도하고 높은 인장변형률 성능을 얻고자 하였다.

직접인장실험을 통해 구한 인장거동은 모든 배합에서 뚜렷

한 인장변형률 경화 거동을 보였다. 인장변형률 성능은 모두 평균 2% 이상을 나타내었으며, 골재 입경별 혼합비율을 조절하여 입도분포가 최적곡선에 가깝도록 경우에는 최대입경 2.36 mm, 4.75 mm, 5.6 mm, 6.7 mm를 사용한 모든 경우에서 규사를 사용한 경우보다 높은 인장변형률 성능을 나타내었다. 또한 골재의 최대입경이 커서 입도분포가 넓을수록 높은 인장변형률 성능을 보였으며, 최대입경 5.6 mm, 6.7 mm의 굵은 골재를 포함하는 경우 각각 4.83%와 5.89%의 매우 높은 인장변형률 성능을 나타내었다.

이 연구를 통해 적절한 입도분포 조절을 통해 굵은 골재를 사용하면서도 고연성 섬유보강 시멘트 복합체의 제조가 가능함을 보였다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1F1A104969511).

References

1. Andreassen, A. H. M. and Andersen, J. (1930), About the relationship between grain and gradation gap in products of loose grains (with a few experiments), *Kolloid-Zeitschrift*, 50(3), 217-228. (In German)
2. De Koker, D. and van Zijl, G. (2004), Extrusion of Engineered Cement-Based Composite Material, *Proceedings of BEFIB*, Varenna, Lake Como, Italy, 1301-1310.
3. De Larrard, F. and Tondat, P. (1993), Sur la contribution de la topologie du squelette granulaire a la resistance en compression du beton, *Materials and Structures*, 26, 505-516. (In French)
4. Fuller, W. B. and Thompson, S. E. (1907), The Laws of Proportioning Concrete, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 59, 67-143.
5. Funk, J. E. and Dinger, D. R. (1994), Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspension, Applied to Ceramic Manufacturing, Kluwer Academic Press, 75-84.
6. 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. (In Korean)
7. Li, V. C. (1998), ECC-Tailored Composites through Micromechanical Modeling, *Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future*, CSCE, Montreal, QC, Canada, 64-97.
8. Li, V. C. and Leung, C. K. Y. (1992), Steady state and multiple cracking of short random fiber composites, *Journal of Engineering Mechanics*, 118(11), 2246-2264.

9. Li, V. C., Mishra, D. K., and Wu, H. C. (1995), Matrix design for pseudo strain-hardening fiber reinforced cementitious composites, *Materials and Structures*, 28(10), 586-595.
10. Li, V. C., Wang, S., and Wu, C. (2001), Tensile Strain-Hardening Behavior of PVA-ECC", *ACI Materials Journal*, 98(6), 483-492.
11. Liao, W. C., Chao, S. H., Park, S. Y., and Naaman, A. E. (2006), Self-Consolidating High Performance Fiber Reinforced Concrete (SCHPFRC) - Preliminary Investigation, Report No. UMCEE 06-02, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 68 pp.
12. Moreno, D. M., Trono, W., Jen, G., Ostertag, C., and Billington, S. L. (2012), Tension-Stiffening in Reinforced High Performance Fiber-Reinforced Cement-Based Composites under Direct Tension, *Proceedings of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites(HPFRCC6)*, Ann Arbor, USA, 263-270.
13. 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.
14. Rokugo, K. and Kanda, K. (2013), Strain Hardening Cement Composites: Structural Design and Performance, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 208-HFC, SC3, Springer, 59-66.
15. Sahmaran, M., Lachemi, M., Hossain, K. M. A., and Ranade, R. (2009), Influence of Aggregate Type and Size on Ductility and Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites, *ACI Materials Journal*, 106(3), 308-316.
16. Sial, S. U. and Khan, M. I. (2018), Performance of Strain hardening cementitious composite as strengthening and protective overlay in flexural members, *MATEC Web of Conferences -ICCRRR 2018*, 199, Article No. 09005.
17. 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 : 08/31/2020
 Revised : 10/14/2020
 Accepted : 10/14/2020

요 지 : 이 연구에서는 입경이 큰 골재를 사용하면서 2% 이상의 인장변형률 성능을 나타내는 고연성 PE 섬유보강 시멘트 복합체 개발을 목적으로 골재의 크기와 입도분포에 따른 고연성 섬유보강 시멘트 복합체의 인장거동 특성을 살펴보고자 하였다. 0.6 mm 이하의 입경들로 구성된 규사를 사용한 배합을 기준으로 최대입경 2.36 mm, 4.75 mm, 5.6 mm, 6.7 mm의 강모래 및 강자갈을 사용한 배합을 비교하여 성능평가를 실시하였다. 골재의 입도분포는 수정 A&A 모델에 기반한 최적입도분포곡선에 가깝도록 세분화된 입경별 혼합비율을 조절하였다. 직접인장 실험을 통해 구한 인장거동은 모든 배합에서 뚜렷한 인장변형률 경화 거동을 보였다. 골재 입경별 혼합비율을 조절하여 입도분포가 최적곡선에 가깝도록 한 경우에는 모든 배합에서 규사를 사용한 경우보다 높은 인장변형률 성능을 나타내었다. 또한 골재의 최대입경이 커서 입도분포가 넓을수록 높은 인장변형률 성능을 보였으며, 최대입경 5.6 mm, 6.7 mm의 굵은 골재를 포함하는 경우 각각 4.83%와 5.89%의 매우 높은 인장변형률 성능을 나타내었다. 이 연구를 통해 적절한 입도분포 조절을 통해 굵은 골재를 사용하면서도 고연성 섬유보강 시멘트 복합체의 제조가 가능함을 보였다.

핵심용어: 섬유보강, 변형률 경화, 골재 크기, 입도분포, 인장변형률 성능
