

규사 혼입과 플라이애쉬 혼입에 따른 폴리에틸렌 섬유보강 복합재료의 압축 및 인장거동

Compressive and Tensile Behavior of Polyethylene Fiber Reinforced Composite According to Silica Sand and Fly Ash

권성준¹ · 강수태² · 최정일³ · 이방연^{3*}

Seung-Jun Kwon¹ · Su-Tae Kang² · Jeong-Il Choi³ · Bang-Yeon Lee^{3*}

(Received March 9, 2016 / Revised March 21, 2016 / Accepted March 23, 2016)

The purpose of this study is to investigate experimentally the effect of reinforcement of polyethylene fiber, inclusion of silica sand, and replacement of cement with fly ash on the compressive and tensile behavior of fiber reinforced composite. Five types of mixture proportions were determined and compressive strength and uniaxial tension tests were performed. Test results showed that strength, ductility, and control of cracking were improved by the reinforcement of fiber. Although the strength was improved by the inclusion of dried silica sand, the ductility was reduced and the crack width was increased. On the other hand, the increase of ductility, the decrease of crack width, and the decrease of strength were observed by the replacement of cement with fly ash.

키워드 : 복합재료, 폴리에틸렌 섬유, 규사, 인장거동, 플라이애쉬

Keywords : Composite, Polyethylene fiber, Silica sand, Tensile behavior, Fly ash

1. 서론

콘크리트는 타 건설재료에 비하여 제조 비용 대비 높은 압축강도, 탄성계수 등 역학적인 성능이 우수할 뿐만 아니라 내구성도 높은 재료이다. 그러나 인장강도가 압축강도의 1/10 정도로 낮고 취성적인 거동은 콘크리트의 단점이고, 많은 연구자들이 콘크리트 내에 섬유를 혼입하여 균열 발생을 지연시키고 발생한 균열의 폭을 제어함으로써 이러한 단점을 개선하고 있다.

특히 부피비로 2% 이내의 합성섬유를 혼입하여 인장하중 하에서 균열 발생이후에도 변형경화현상이 나타나며 2% 이상의 높은 연성을 나타내는 고연성 섬유보강 복합재료에 관한 연구가 국내외에서 많이 수행되고 있다(Li et al, 2001; Won et al, 2005; Kim et al, 2007; Cho et al, 2012; Lee et al, 2013). 보강섬유로는 주로 폴리프로필렌 섬유, 폴리비닐알코올 섬유, 폴리에틸렌 섬유 등이

사용되고 있는데 각 섬유는 물리화학적 성질이 다르다. 폴리프로필렌 섬유는 저가이지만 인장강도가 낮아 고강도 매트릭스에 사용이 적합하지 않다. 폴리비닐알코올 섬유는 폴리프로필렌 섬유와 폴리에틸렌 섬유의 중간 정도의 가격과 인장강도를 갖고 있으며, 두 섬유와 달리 친수성 성질을 갖고 있다. 따라서 적절한 표면 처리를 통해서 우수한 인장성능을 확보할 수 있다. 마지막으로 폴리에틸렌 섬유는 고가이지만 인장강도가 높은 특징을 갖고 있기 때문에 고강도 매트릭스에 적용하기에 적절하다.

현재 고연성 섬유보강 복합재료에는 폴리비닐알코올 섬유가 주로 사용되고 있는데 최근 매트릭스의 강도가 높아지고 있기 때문에 향후 폴리에틸렌 섬유의 활용이 증가할 것으로 예상된다. 그러나 폴리에틸렌 섬유를 혼입하여 제조한 섬유보강 복합재료의 특성, 특히 골재나 시멘트 대체재의 영향에 대한 연구가 상대적으로 미흡한 실정이다. 이에 이 연구에서는 시멘트 기반 매트릭스에서

* Corresponding author E-mail: bylee@jnu.ac.kr

¹한남대학교 건설시스템공학과 (Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

²대구대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongbuk, 38453, Korea)

³전남대학교 건축학부 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea)

폴리에틸렌 섬유보강에 따른 압축 및 인장거동에 대해 조사하고, 나아가 규사 혼입과 시멘트를 플라이애쉬로 일부 치환하였을 때 압축강도와 인장거동 및 균열특성에 대하여 실험적으로 조사하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료 및 배합

Table 1은 이 연구에서 조사한 배합을 나타낸다. 결합재는 시멘트와 플라이애쉬를 사용하였으며, 시멘트는 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 플라이애쉬를 시멘트 대체재로 사용하였다. 물/결합재비는 40%로 고정하였으며, 골재는 평균 직경이 약 100 μ m이며, 밀도가 2.65g/cm³인 규사 7호를 사용하였다. 이 연구에서 보강 섬유로 사용한 섬유는 합성섬유 중 소수성 성질을 갖고 있는 폴리에틸렌 섬유이다. 폴리에틸렌 섬유의 직경, 길이, 인장강도, 밀도, 탄성계수는 각각 12 μ m, 18mm, 2,700MPa, 0.97g/cm³, 88GPa이다. 폴리카르본산계 고성능 감수제와 증점제는 매트릭스의 점성을 조절하기 위하여 사용하였는데 이를 통해 균일한 섬유 분산성을 확보할 수 있다. 소포제는 기포 발생에 의한 영향을 최소화하기 위하여 사용하였다. 각 재료는 결합재의 질량비로 혼입하였다.

2.2 혼합 방법 및 양생

혼합은 분말형 재료인 결합재와 규사를 건비빔 후, 혼합수 및 고성능 감수제를 넣고 섬유를 혼입하는 3단계로 진행하였다. 균일한 섬유 분산성을 얻기 위하여 증점제 및 고성능 감수제는 매트릭스 상태에 따라 혼입량을 조절하였다. 실험체 제작 후, 압축강도 및 일축 인장 성능을 평가하기 위하여 양생온도 (23 \pm 2) $^{\circ}$ C의 항온 조건에서 28일 동안 양생을 실시하였다.

Table 1. Mixture proportion

Mixture	Binder		Water	Sand	SP (%)	VMA (%)	AF (%)	Fiber (Vol %)
	Cement	Fly ash						
C	1		0.4		0.1	0.1	0.1	
C-PE	1		0.4		0.16	0.06	0.1	1.75
C-PE-S	1		0.4	0.4	0.1	0.1	0.1	1.75
C-PE-F3	0.7	0.3	0.4		0.07	0.06	0.1	1.75
C-PE-F6	0.4	0.6	0.4		0.1	0.04	0.1	1.75

* SP: Superplasticizer, VMA: Viscosity modifying agent, AF: Anti-foamer

2.3 실험 방법

2.3.1 골재의 함수율 및 흡수율

실험에 사용되는 규사 7호는 건조사이기 때문에 골재의 함수 상태에 따라 물/결합재비에 영향을 미치게 된다. 따라서 잔골재의 함수율을 측정하여 골재의 함수 상태를 파악하였으며, 그에 따른 흡수율을 검토하였다. 함수율은 KS F 2550에 따라 측정하였으며, 식 (1)을 이용하여 계산하였다. Z는 함수율(%)을 나타내며, W₁은 건조하기 전 시료의 질량(g), W₂는 건조한 후 시료의 질량(g)을 나타낸다.

$$Z = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 (\%) \quad (1)$$

흡수율은 KS F 2504에 따라 측정하였으며, 식 (2)를 이용하여 계산하였다. Q는 흡수율을 나타내며, W₃은 표면 건조 포화 상태 시료의 질량(g)을 나타낸다.

$$Q = \frac{W_3 - W_2}{W_2} \times 100 (\%) \quad (2)$$

2.3.2 압축강도

압축강도 실험을 통해 섬유보강 복합재료의 골재량과 물/결합재비에 따른 압축강도를 평가하였다. 압축강도는 KS L 5105에 따라 50mm 입방 시험체를 배합별로 3개씩 제작하여 실험을 실시하였다.

2.3.3 일축 인장

일축 인장 실험은 일본 토목학회에서 제안한 방법(JSCE 2008)에 따라 Fig. 1(a)와 같은 형태의 실험체를 제작한 후, 재령 28일에

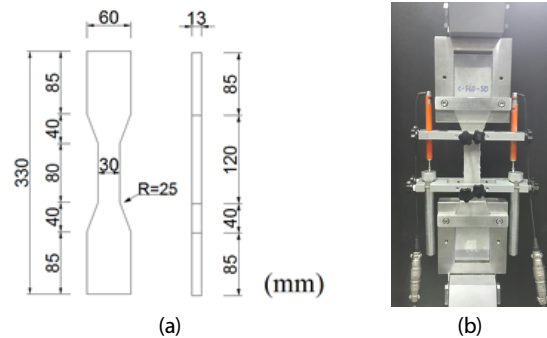


Fig. 1. (a) Specimen geometry and (b) Test setup

실시하였다. 실험은 최대용량 2톤의 인장강도 실험기에서 0.1mm/min, 속도의 변위 제어 방식으로 수행하였으며, 변위 측정을 위하여 실험체의 좌우 측면에 100mm의 LVDT를 부착하여 측정하였다. Fig. 1(b)는 일축 인장 실험 모습을 나타내며, 각 배합별로 4개씩 제작하여 실험을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 함수율 및 흡수율

함수율 실험 결과, 골재의 함수율은 0으로써 절대 건조 상태의 골재인 것으로 나타났으며, 흡수율은 2.04%로 나타났다. 이는 믹싱 과정 중에 골재가 물을 흡수하여 실질적인 물/결합재비에 영향을 미친다는 결과이며, 골재량이 증가함에 따라 물/결합재비가 감소한다는 것을 의미한다. 결과적으로 C-PE-S 배합은 C와 C-PE 배합에 비하여 물/결합재비가 0.008 감소한 것이다.

3.2 압축강도

Fig. 2는 이 연구에서 조사한 배합별 압축강도를 나타낸다. 섬유를 혼입하지 않은 기본 배합 C는 52.0MPa로 측정되었으며, 섬유를 혼입한 C-PE 배합은 C 배합에 비하여 3.4% 높은 압축강도가 나타났다. 이는 축력에 의한 실험체의 횡방향 변위가 섬유로 인하여 구속되었기 때문이다. 규사를 혼입한 C-PE-S 배합은 C 배합에 비하여 13.3% 압축강도가 증가되었는데 이는 규사의 함수상태가 절대건조 상태였기 때문에 결과적으로 물/결합재비가 감소했기 때문이다. 압축강도에 미치는 섬유와 규사의 영향이 독립적이라고 가정하였을 때 규사의 효과는 9.9%이며, 이는 섬유의 효과에

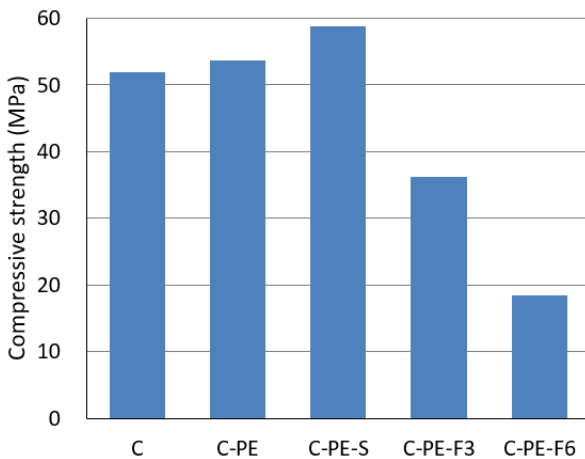


Fig. 2. Compressive strength

비하여 약 3배정도이기 때문에 규사의 함수상태가 압축강도에 상대적으로 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 일반적으로 섬유는 부피비로 2% 이내 혼입을 하고 규사는 결합재량의 40% 이상을 혼입하는 것을 고려하였을 때 압축강도를 제어하기 위해서는 골재의 함수상태나 물/결합재비를 제어하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

플라이애쉬로 시멘트를 30% 대체한 C-PE-F3 배합의 경우 C 배합에 비하여 30.4% 압축강도가 감소하였으며, 시멘트를 플라이애쉬로 60% 대체한 C-PE-F6 배합의 경우 C 배합에 비하여 64.4% 압축강도가 감소하였다. 잘 알려진 바와 같이 플라이애쉬는 수산화 칼슘과 포졸란 반응을 통해 강도가 발현되는데 시멘트와 물의 수화반응에 의해 생성되는 수산화 칼슘의 양이 CSH에 비하여 작기 때문에 플라이애쉬의 치환률이 높아지면 반응하지 못하는 플라이애쉬의 양도 그에 비례하여 증가하게 된다. 플라이애쉬를 시멘트로 일부 대체한 두 배합의 압축강도 저하의 주요 원인은 미반응 플라이애쉬인 것으로 판단되며, 시멘트 대체량이 증가한 C-PE-F6의 감소가 더 큰 것을 통해 이를 확인할 수 있다. 압축강도와 연성은 일반적으로 상반되고 미반응 플라이애쉬는 균열 발생 이후 균열자기치유 가능성을 높이기 때문에 장점으로 작용할 수 있으나 과도한 압축강도의 저하는 안전성과 경제성에 문제를 줄 수 있기 때문에 적절한 양의 플라이애쉬를 사용할 필요가 있다.

3.3 일축 인장

Fig. 3(a)는 이 연구에서 기본이 되는 시멘트 페이스트의 인장응력과 변형률의 관계를 나타낸다. 첫 번째 균열이 발생한 이후 급격한 하중 저하가 발생하는 전형적인 취성적인 파괴 형태를 볼 수 있다. C 배합에 폴리에틸렌 섬유를 부피비로 1.75% 혼입한 C-PE 배합의 인장응력과 변형률의 관계는 Fig. 3(b)에 나타나 있다. 섬유 혼입에 따라 시멘트 매트릭스와 달리 다중 균열에 의한 변형률 경화거동이 뚜렷이 나타나고 있으며, 평균적으로 3.74%의 인장 연성을 나타내고 있다. 이는 C 배합에 비하여 약 187배 높은 연성이다. Fig. 3(b)에서 변형률이 증가하면서 응력의 감소와 회복이 계속 반복되는데 이때 응력저하는 변위제어 방식으로 인장 실험을 수행할 경우, 균열이 발생하면 균열 부분에서 균열폭만큼 순간적으로 변위가 증가하여 응력이 이완되기 때문이다. 나머지 배합에서도 차이는 있지만 C-PE 배합과 같은 변형률 경화거동과 고연성이 나타났다. 인장거동에서 중요한 각 배합별 첫 번째 균열강도, 인장강도, 인장변형성능은 Fig. 4에 나타내었다.

C-PE 배합과 C 배합을 비교해 보면 압축강도에서와 달리 섬유

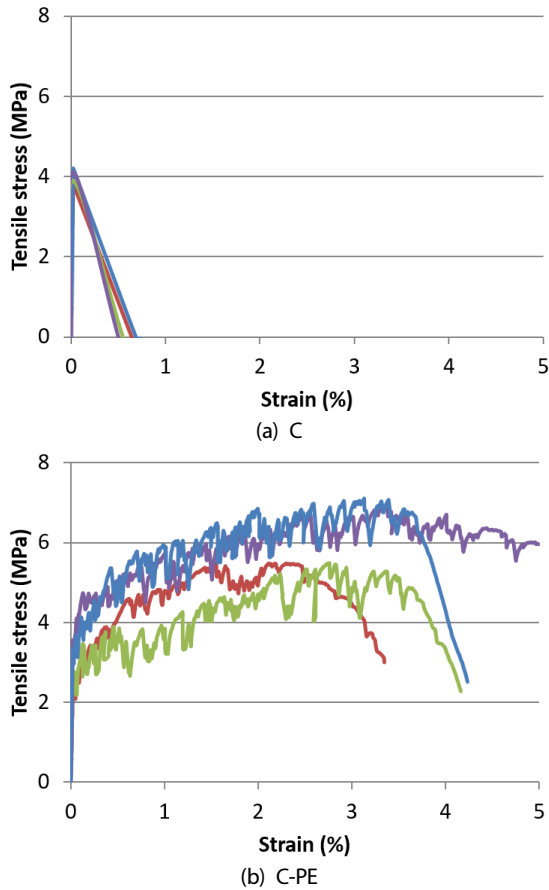
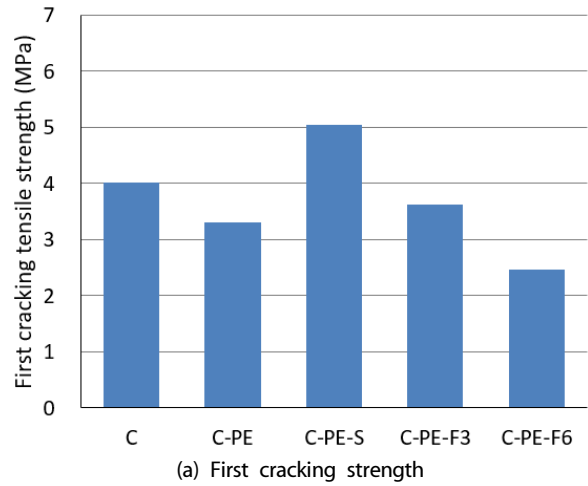


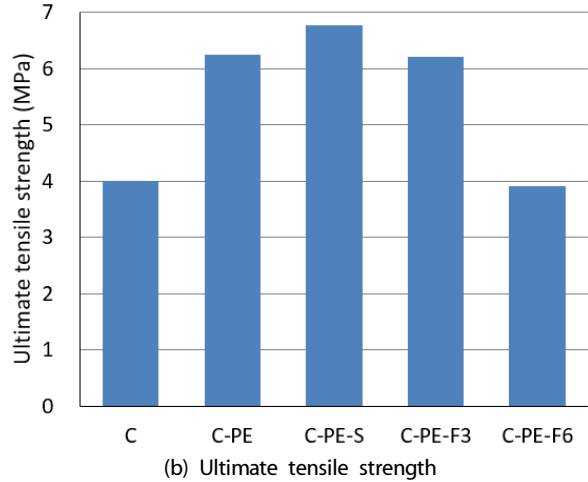
Fig. 3. Tensile stress-strain curves

혼입에 따라 첫 번째 균열강도가 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 친수성 섬유의 경우 시멘트 페이스트와 화학적 부착을 하기 때문에 균열강도가 높아질 수 있으나 이 연구에서 사용한 폴리에틸렌 섬유의 경우 소수성 특성을 갖기 때문에 시멘트 페이스트와 마찰 부착만 존재하기 때문에 섬유의 부피만큼 시멘트 페이스트의 양이 줄어들어 균열강도가 감소한 것으로 판단된다. 이에 반하여 규사가 혼입된 C-PE-S 배합의 경우 압축강도에서와 같이 규사가 물을 흡수하여 결과적으로 물/결합재비가 감소하여 균열강도가 증가한 것으로 생각된다. 시멘트를 플라이애쉬로 치환한 배합의 경우 압축강도와 같이 플라이애쉬 치환률이 증가할수록 균열강도가 감소하였다.

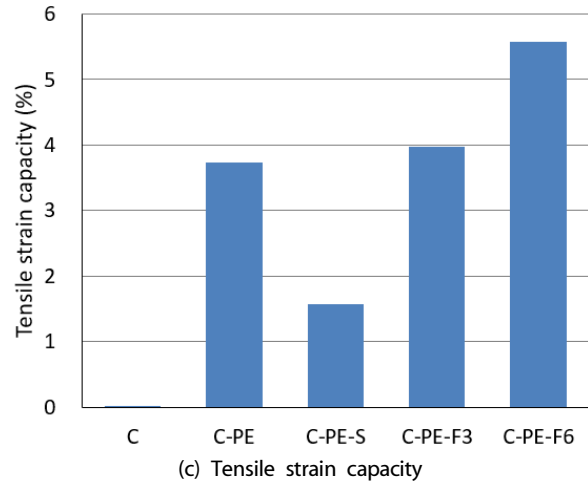
인장강도는 섬유혼입에 따라 C-PE 배합이 C 배합에 비하여 55.5% 증가하였으며, 골재를 혼입한 C-PE-S 배합은 C 배합에 비하여 68.8% 증가한 인장강도를 나타내었다. 시멘트를 플라이애쉬로 30% 치환한 C-PE-F3 배합은 C 배합에 비하여 54.7% 높은 인장강도를 나타내었으나 C-PE-F6 배합은 C 배합에 비하여



(a) First cracking strength



(b) Ultimate tensile strength



(c) Tensile strain capacity

Fig. 4. Tensile behavior

2.6% 낮은 인장강도를 나타내었다. 압축강도 대비 인장강도의 비는 C 배합의 경우 7.7%로 나타났으며, C-PE 배합과 C-PE-S 배합은 각각 11.6%와 11.5%로 나타나 C 배합에 비하여 약 50% 높은

값을 나타내었다. C-PE-F3 배합과 C-PE-F6 배합은 각각 17.1%와 21.1%의 압축강도 대비 인장강도의 비율을 나타내었는데 이는 C 배합에 비하여 각각 122%와 174% 높은 값이다. 비록 플라이애쉬 치환량이 증가함에 따라 압축강도와 인장강도는 낮아지지만 압축강도와 인장강도의 비는 치환률이 높아질수록 증가하는 현상이 나타났다. 이는 플라이애쉬를 혼입함에 따라 강도가 감소하지만 인장강도의 감소가 그 만큼 크지 않다는 것을 의미하여 플라이애쉬 혼입이 섬유와 매트릭스 사이의 계면 특성을 변화시켰다는 것을 의미한다. 기존의 연구에서도 플라이애쉬를 혼입한 경우 마찰 부착력이 증가한 것으로 나타났는데 이 연구의 결과와도 일치한다 (Yang et al, 2007).

C 배합의 인장변형성능은 0.0235%로 나타났으며, 섬유를 혼입한 C-PE 배합은 3.74%로 C 배합에 비하여 159배 높은 인장변형성능을 나타내었다. 규사를 혼입한 경우 인장변형성능이 1.58%로 나타나 규사혼입에 따라 강도가 증가하였는데 섬유와 매트릭스 사이의 계면특성은 그 만큼 증가하지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 이와는 반대로 시멘트를 플라이애쉬로 치환한 경우 치환률이 증가할수록 인장변형성능은 증가하였으며, C-PE-F6 배합의 경우 5.58%에 이르는 높은 연성을 나타냈었다. 이는 C 배합의 237% 높은 값이다. 특히, C-PE-F6 배합의 경우 압축강도 대비 인장강도의 비가 21.1%로 시멘트 페이스트에 비하여 173배 높으면서 인장변형성능도 높기 때문에 강도설계법으로 구조물을 설계할 경우에도 일반 콘크리트와 달리 인장강도를 충분히 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5는 각 배합별 평균 균열폭을 나타낸다. 균열폭은 실험이 종료된 이후 단면의 크기가 균일한 변형측정 구간내의 균열개수를 육안으로 측정된 후 복합재료의 변형이 모두 균열에 의해 발생하

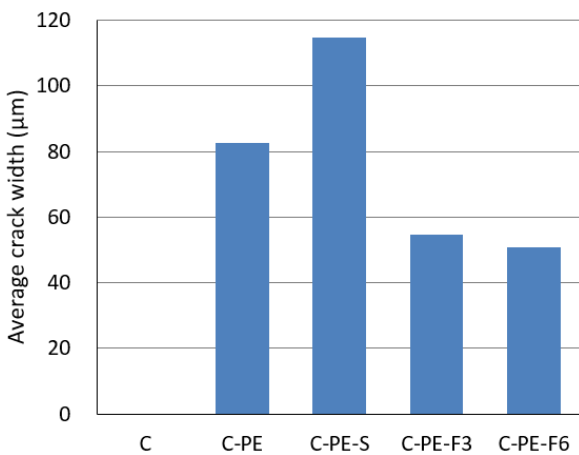


Fig. 5. Average crack width

였다는 가정 하에 총 변형량을 균열개수로 나누어 추정하였다. 복합재료는 인장강도에 도달한 이후 새로운 균열이 발생하지 않기 때문에 이 방법으로 측정된 균열폭은 인장강도에 도달했을 때의 균열폭을 의미한다. C-PE 배합의 평균 균열폭은 82.7μm로 나타났으며, 이는 폴리비닐알코올 섬유와 같은 친수성 섬유를 사용한 경우에 비하여 다소 큰 값을 나타내는데 이는 이 연구에서 사용한 폴리에틸렌 섬유는 소수성 성질을 갖고 있기 때문에 화학적 부착이 없기 때문에 최고 섬유가교응력에 해당하는 균열개구변위가 더 크기 때문이다. 규사를 혼입한 C-PE-S 배합은 C-PE 배합에 비하여 38.8% 큰 균열폭이 관찰되었으며, 플라이애쉬로 치환한 C-PE-F3과 C-PE-F6 배합은 각각 54.8μm와 50.8μm의 균열폭이 나타났으며, 이는 C-PE 배합과 비교하여 각각 33.8%, 38.6% 작은 값이다. 균열폭이 작을수록 투수계수가 작아지고, 낮은 투수계수를 갖는 재료는 철근의 부식을 지연시키기 때문에 철근과 함께 사용할 경우 내구성이 증가할 수 있다. 종합적으로 잘 알려진 바와 같이 시멘트 페이스트에 적절한 섬유를 혼입할 경우 강도와 연성 및 균열제어 측면에서 높은 성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났으며, 건조된 규사를 혼입할 경우 강도증진에는 성능향상을 기대할 수 있지만 연성과 균열제어 측면에서는 부정적인 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 다만, 수축 저감, 강성 확보, 제조비용 저감을 위해서는 규사혼입이 필요하기 때문에 성능을 확보하면서 골재의 양을 최적화할 필요가 있다. 마지막으로 시멘트를 플라이애쉬로 치환하는 경우 강도는 저하되지만 연성과 균열제어 측면에서 우수한 것으로 나타났다.

4. 결론

이 연구에서는 규사 혼입과 시멘트를 플라이애쉬로 치환에 따른 섬유보강 복합재료의 압축 및 인장거동에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 이를 위하여 압축강도 실험과 일축인장 실험을 수행하였으며, 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 섬유 혼입보다 절대건조상태의 규사 혼입에 따른 압축강도의 영향이 상대적으로 더 크게 나타났으며, 시멘트를 플라이애쉬로 60% 대체한 경우 압축강도가 64.4%까지 감소하는 것으로 나타났다.
2. 시멘트 페이스트에 섬유를 혼입하여 강도를 증가시키고 수백배에 이르는 연성을 확보하고 균열폭을 제어할 수 있는 것으로 나타났다.
3. 절대건조상태의 규사 혼입은 균열강도 및 인장강도를 증가시킬 수 있지만 연성이 감소하고 균열폭이 증가하는 것으로 나타났다.

4. 시멘트를 플라이애쉬로 치환함에 따라 강도는 저하되지만 압축 강도 대비 인장강도의 비가 21.1%까지 높아지고 연성이 증가하는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 균열폭이 감소하여 철근과 함께 사용할 경우 내구성이 증가할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업 “나노전기방사기술을 융합한 등가감쇠 10%급 다기능 건축재료 및 구조시스템 개발 (과제번호: 15CTAP-C097490-01)”과 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원 (16RDRP-B076564-03)의 연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

Cho, C.G., Lim, H.J., Yang, K.H., Song, J.K., Lee, B.Y. (2012). Basic mixing and mechanical tests on high ductile fiber reinforced cementless composites, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **24(2)**, 121-127 [in Korean].

JSCCE. (2008). Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), *Concrete Engineering*

Series.

Kim, Y.Y. (2007). Design and constructibility of an engineered cementitious composite produced with cement-based mortar matrix and synthetic fibers, *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, **20(2)**, 21-26 [in Korean].

Lee, B.Y., Bang, J.W., Kim, Y.Y. (2013). Enhancing the performance of polypropylene fiber reinforced cementitious composite produced with high volume fly ash, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **17(3)**, 118-125 [in Korean].

Li, V.C., Wang, S., Wu, C. (2001). Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC, *Journal of American Concrete Institute*, **98(6)**, 483-492.

Won, J.P., Hwang, K.S., Park, C.G. (2005). Mechanical and early shrinkage crack of hydrophilic PVA fiber reinforced concrete with fiber volume fraction and fiber length, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, **25(1)**, 133-141 [in Korean].

Yang, E.H., Yang, Y., Li, V.C. (2007). Use of high volumes of fly ash to improve ecc mechanical properties and material greenness, *ACI Materials Journal*, **104(6)**, 303-311.

규사 혼입과 플라이애쉬 혼입에 따른 폴리에틸렌 섬유보강 복합재료의 압축 및 인장거동

이 연구의 목적은 폴리에틸렌 섬유보강, 규사 혼입, 시멘트를 플라이애쉬로 치환함에 따라 나타나는 복합재료의 압축강도 및 인장거동에 대해 실험적으로 조사하는 것이다. 이를 위하여 총 5가지 배합을 결정하였고, 압축강도 실험과 일축인장 실험을 수행하였다. 실험결과 섬유보강을 통해 강도와 연성 및 균열제어 측면에서 효과적인 것으로 나타났으며, 절대건조상태의 골재를 혼입하면 강도 증진에 효과적이지만 연성과 균열제어 측면에서 성능이 떨어지는 것으로 나타났다. 또한 시멘트를 플라이애쉬로 대체하면 강도는 떨어지지만 연성이 증가하고 균열폭이 줄어드는 것으로 나타났다.