

## 폴리프로필렌 섬유로 보강된 하이볼륨 플라이애시 시멘트 복합재료의 성능 향상 기법

### Enhancing the Performance of Polypropylene Fiber Reinforced Cementitious Composite Produced with High Volume Fly Ash

이 방 연<sup>1)</sup>      방 진 옥<sup>2)</sup>      김 윤 용<sup>3)\*</sup>  
Lee, Bang Yeon      Bang, Jin Wook      Kim, Yun Yong

#### Abstract

The synthetic fibers including Polyvinyl alcohol and Polyethylene fibers have been successfully used in the manufacture of high ductile fiber reinforced cementitious composites. Polypropylene (PP) fiber has also been used in composites, not for the purpose of achieving a high level of tensile ductility but to improve the fire resistance performance of concrete exposed to high temperatures. This paper discusses the method for enhancing the performance of composites supplemented with PP fiber. Five types of mixture proportions were designed with high volume fly ash for testing the performance of composites. Type I cement and fly ash F were used as binding materials. The water-to-binder ratio was 0.23~0.25, and the amount of PP fiber used was 2 vol%. Polystyrene bead were also used to increase the tensile ductility of composites. A series of experiments including slump, density, compression and uniaxial tension tests were performed to evaluate the performance of cementitious composites supplemented with PP fiber. From the test results, it was exhibited that the performance of composites supplemented with PP fiber can be enhanced by adopting the mechanics and statistics theory.

Keywords : Polypropylene, Fiber, Composite, High ductility, High volume fly ash

#### 1. 서론

최근 도시화가 진행되고 지구 온난화와 같은 자연현상으로 인하여 자연재해의 크기 및 횟수가 증가함에 따라 전통적인 건설재료인 보통 콘크리트의 성능을 개선한 고성능 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 고성능 콘크리트 중에서 시멘트 기반 모르타르에 부피비로 2% 이내의 섬유를 혼입하여 1축 인장하에서 3% 이상의 극한 인장 변형률을 나타내는 높은 연성의 재료를 고연성 섬유보강 시멘트 복합재료로 분류하여 활발한 연구를 수행하고 있다 (Kim, 2007; Lee et al., 2009; Kim, 2010; Lee, 2013; Cho et al., 2012; Ha et al., 2010). 이러한 복합재료의 성능은 섬유 가교 거동에 의해 결정되며 섬유 가교 거동에 영향을 주는 인자들은 섬유, 매트릭스, 그리고 섬유와 매트릭스의 계면 특

성 등이 있다. 따라서 고연성 특성을 확보하기 위해서는 매트릭스의 배합 뿐만 아니라 섬유의 종류 또한 매우 중요하다.

합성 섬유 중에서는 폴리에틸렌 섬유와 폴리비닐알코올 섬유가 고연성 섬유보강 시멘트 복합재료를 만드는데 성공적으로 적용되어 왔다 (Li, 1998; Wang and Li, 2006). 이에 반하여 폴리프로필렌 섬유는 낮은 제조 가격에도 불구하고, 주로 고온에 노출된 콘크리트의 폭렬 방지용으로만 주로 사용되어 왔다 (Won et al., 2008; Han et al., 2008; Zeiml et al., 2006; Bentz, 2000). 이와 같이 폴리프로필렌 섬유가 고연성 섬유보강 시멘트 복합재료에 적용되지 않은 이유는 폴리비닐알코올 섬유에 비하여 상대적으로 낮은 인장강도를 갖고 있어 쉽게 파단이 발생하고, 소수성 섬유이기 때문에 매트릭스와의 부착력이 낮기 때문이다. 폴리에틸렌 섬유도 소수성이나, 높은 인장강도를 갖고 있기 때문에 시멘트 매트

1) 정회원, 전남대학교 건축학부 조교수  
2) 정회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정  
3) 정회원, 충남대학교 토목공학과 부교수, 교신저자

\* Corresponding author : yunkim@cnu.ac.kr  
• 본 논문에 대한 토의를 2013년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2013년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

릭스와 의 계면 마찰력을 증가시키는 방법을 이용하여 낮은 부착력 문제를 해결한 바 있다.

이 연구에서는 이러한 기존 폴리프로필렌 섬유에 비하여 강도가 약 40% 증가된 폴리프로필렌 섬유를 사용한 섬유보강 시멘트 복합재료의 성능 향상 방법과 개발된 복합재료의 성능을 평가하고자 한다.

## 2. 섬유보강 시멘트 복합재료의 설계 방법

섬유보강 시멘트 복합재료가 다중 균열에 의한 변형을 경화 거동을 나타내기 위해서는 에너지 조건과 강도 조건을 만족하여야 한다 (Leung, 1996; Li and Leung, 1992). 에너지 조건은 안정 상태 균열이 발생하기 위한 조건으로서, 외부 하중의 변화 없이 일정한 개구 변위 상태로 균열이 진전하기 위한 조건이다. 에너지 조건은 외부에서 한 일, 매트릭스 균열이 진전하는데 필요한 에너지, 그리고 섬유 가교 작용에 의하여 소산된 에너지 사이의 에너지 평형 조건에 의하여 정의되며, 응력과 개구변위의 관계를 나타내는 섬유 가교 곡선에서 상보 에너지가 매트릭스 파괴인성보다 클 때 성립한다 (Marshall and Cox, 1988). 이것을 수식으로 표현하면 다음 식 (1)과 같다.

$$J'_b = \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \geq J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_m} = \int_0^{\delta_{ss}} \sigma(\delta) d\delta \quad (1)$$

여기서,  $J'_b$ 는 상보에너지이며,  $\sigma_0$ 는 최대 섬유 가교 응력을 나타낸다.  $\delta_0$ 는  $\sigma_0$ 에서의 균열폭을 나타낸다.  $K_m$ 과  $E_m$ 은 각각 매트릭스의 파괴인성과 영계수를 나타낸다.

매트릭스의 균열 발생 및 진전과 섬유 가교 거동은 파괴역학, 마이크로역학, 그리고 통계 이론에 따라 해석적으로 나타낼 수 있다. 특히 섬유 인발 거동은 섬유와 매트릭스 사이에서 화학적 부착 파괴가 진행되는 단계와 화학적 부착 파괴가 완료된 후의 섬유 인발 단계로 구분하여 나타나게 되며, 역학이론에 따라 해석적으로 표현된다 (Lin et al., 1997). 통계이론은 균열 면에서 섬유의 방향성 및 분산성의 무작위성을 나타내기 위하여 사용된다 (Wang et al., 1990).

강도 조건은 균열 면에서 섬유에 의한 최고 가교 응력이 복합체의 균열강도보다 커야 한다는 조건으로서, 이 조건이 만족되지 못하면 균열이 발생한 후 변형을 연화거동이 나타나고 단일 균열에 의하여 파괴가 발생하게 된다. 이것을 수

식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\sigma_c < \sigma_0 \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_c$ 는  $K_m$ 과 매트릭스 내의 결함크기에 의해 결정된다. 균열이 진전하는 거동이 에너지 조건에 의해 결정되는 반면 매트릭스 내에서 결함이 있는 곳에서 균열이 시작되는 것은 강도 조건과 관련되어 있다. 따라서 이 두 조건을 모두 만족하게 되면 복합재료에서 균열강도가 작은 곳부터 순차적으로 균열이 발생하여 변형을 경화거동에 의한 고연성이 나타나게 된다.

에너지 조건이 만족될 경우 다중 균열에 의한 변형을 경화 거동이 나타나는 것은 보장되지만 변형 성능과 관련되는 균열의 개수와는 직접적으로 관련을 갖지 않는다. 최대 균열 가교 응력에 도달하기 까지 균열의 개수는 매트릭스 내의 결함 크기 분포와 매트릭스 파괴인성에 의해 결정된다. 일반적으로 매트릭스의 파괴인성은 매트릭스 강도에 비례하여 증가한다 (Kim, 2007).

최대 섬유 가교 응력은 매트릭스에 균열이 유발되는 균열 강도를 결정하는 결함 크기 ( $c_{mc}$ )의 하한 값을 결정한다. 즉, 결함의 크기가  $c_{mc}$ 보다 큰 경우만 그 곳에서 균열이 발생할 수 있으며, 최대 성능을 확보하기 위해서는 매트릭스 내의 결함 크기 분포를 최적화해야 한다. Fig. 1에 묘사되어 있는 것과 같이  $c_{mc}$ 보다 결함이 크면서 표준편차가 크지 않은 경우가 가장 이상적이다. 왜냐하면 결함의 크기가 너무 크게 되면 강도가 감소하고, 섬유 분산성도 저하되기 때문이다. 따라서 복합재료의 높은 연성을 확보하기 위해서는 에너지 조건이 만족되고 강도 조건과 연관되어 있는 결함의 분포가 적절하여야 한다.

## 3. 재료 및 실험 방법

### 3.1 사용 재료 및 배합

이 연구에 사용한 재료와 배합 (중량비)은 Table 1에 나타나 있다. 1종 보통포틀랜드시멘트와 평균 직경이 17.5  $\mu\text{m}$ 인 플라이애시 F가 결합재로 사용되었다. 매트릭스 파괴인성은 매트릭스 강도에 비례하여 증가한다. 따라서 매트릭스 파괴인성을 낮추어 고연성 다중균열 특성을 부여하기 위해서는 플라이애시의 치환율을 높여 플라이애시가 결합재와 충전재의 역할을 동시에 하게 함으로써 매트릭스 강도를 낮추는 방

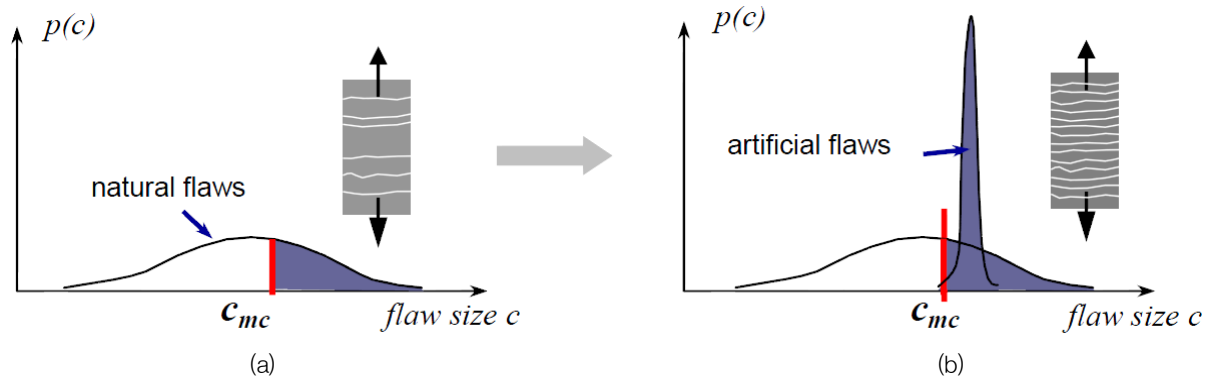


Fig. 1 Scheme of the flaw size tailoring for saturated multiple cracking in fiber reinforced brittle matrix composites: (a) natural flaw size distribution with random nature inherent from processing; (b) artificial flaws larger than critical size imposed to ensure saturation of multiple-cracking (Wang and Li 2004).

Table 1 Mix proportions of Polypropylene fiber reinforced cementitious composite

Mix #	MP 1-1	MP 1-2	MP 2-1	MP 2-2	MP 3
Cement	1	1	1	1	1
Fly ash F	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
Polystyrene bead	0	0.092	0	0.092	0.092
Water	0.88	0.88	0.88	0.88	0.95
HRWR <sup>a</sup>	0.016	0.016	0.018	0.018	0.014
Antifoamer	0	0	0.0076	0.0076	0.0076
Fiber <sup>b</sup> (by vol.)	2	2	2	2	2

<sup>a</sup> High-range water-reducing admixture

<sup>b</sup> High tenacity polypropylene fiber



Fig. 2 Polystyrene beads

법이 효과적이다. 이 연구에서는 기존 연구를 토대로 플라이 애시 치환율을 74%로 정하였다 (Kim et al., 2004). 인공결함을 만들기 위해서는 직경이 4 mm이고 밀도가 1.4 g/cm<sup>3</sup>인 폴리스티렌 비드가 사용되었다 (Fig. 2). 폴리스티렌 비드는 골재로서의 역할을 하지만 매트릭스와 화학적 반응을 거의 하지 않기 때문에 매우 약한 결합을 하게 되고, 이로 인

Table 2 Properties of Polypropylene fibers

Diameter (μm)	Length (mm)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Elastic modulus (GPa)
12	10	850	21	0.91	6

하여 인장력이 작용하였을 때 결합으로 작용한다. 그러나 압축력이 작용할 경우에는 어느 정도의 강도를 발휘하여 압축 강도는 크게 저하되지 않는다. 고성능 감수제는 균일한 섬유 분산을 확보하면서 재료 분리가 발생하지 않은 범위 내에서 유동성을 높게 확보하는 양으로 최적화하였다. 섬유는 폴리프로필렌 섬유를 사용하였고, 5가지 배합에 대하여 모두 부피비로 2%를 혼입하였다. 사용한 폴리프로필렌 섬유의 제원은 Table 2에 정리되어 있다. 기존 폴리프로필렌 섬유 (Won et al., 2008; Han et al., 2008)의 인장강도에 비하여 약 200 MPa에서 300 MPa 정도 크다. MP 1-1은 폴리프로필렌 섬유보강 시멘트 복합재료의 기본배합을 나타낸다. MP 1-2는 인공결함의 영향을 평가하기 위한 것으로서 폴리스티렌 비드가 포함된 것을 제외하면 MP 1-2와 동일한 배합을 나타낸다. MP 2-1은 MP 1-1에 다량의 기포가 생성되는 것을 막기 위해 소포제가 포함된 것을 제외하면 MP 1-1과 동일한 배합이다. 폴리프로필렌 섬유의 경우 소수성을 나타내고 직경이 폴리비닐알코올이나 폴리에틸렌 섬유에 비하여 작기 때문에 다량의 기포가 매트릭스에 발생할 수 있다. MP 2-2는 MP 2-1에 폴리스티렌 비드를 혼입한 것으로서 MP 1-2와 같이 굳은 후 성질에 미치는 인공결함의 영향을 파악하기 위한 배합이다. MP 3은 타 배합과 비교하여 복합재료의 성능에 미치는 물-결합재 비의 영향을 평가하기 위한 배합이다.

### 3.2 혼합 방법 및 양생

각 구성 재료는 모르타르 강제식 믹서로 혼합하였다. 시멘트와 플라이애시를 넣고 약 3분 동안 건비빔을 한 후, 물을 넣고 약 3분간 추가로 혼합하였다. 다음으로 고성능 감수제와 배합에 따라 필요한 경우 소포제와 폴리스틸렌을 혼입한 후 매트릭스가 균일하게 된 후, 섬유를 천천히 혼입하였다. 배합에 따라 전체 배합 과정 시간은 10분에서 15분 정도 소요되었다.

혼합이 완료되면 유동성을 측정한 후, 굳은 후 성질을 측정하기 위한 시편을 제작하였다. 시편 제작 후 플라스틱 시트로 덮은 후 1일 동안 23±3°C와 상대습도 50±5% 조건에서 1일 동안 양생하고, 탈형 후 28일 동안 동일 조건에서 기건양생을 하였다.

### 3.3 유동성 및 밀도 측정 방법

혼합이 완료된 후 즉시 KS F 2402와 KS F 2594에 따라 슬럼프와 슬럼프 플로 시험을 실시하였다. 밀도는 압축강도 측정을 위한 제작한 50 mm 입방 시험체를 이용하여 공기 중 무게와 수중 무게를 측정하여 다음 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$\rho = \frac{W_{air}}{W_{air} - W_{water}} \times \rho_w \quad (3)$$

여기서,  $\rho_w$ 는 물의 밀도이고,  $W_{air}$ 와  $W_{water}$ 는 각각 입방 시험체의 공기 중과 수중에서의 무게를 나타낸다.

### 3.4 압축 및 인장 실험 방법

압축강도는 KS L 5105에 규정된 50 mm 입방 시험체를

이용하여 측정하였고, 각 배합 당 3개의 시편을 제작하여 측정하였다. 1축 인장 하에서 복합재료의 변형 성능 및 인장강도를 평가하기 위하여 200 mm × 75 mm × 12.5 mm 실험체로 1축 인장 실험을 실시하였다. 인장 실험을 수행하기에 앞서 75 mm × 50 mm 크기의 알루미늄 판을 접착제로 부착하여 그림에 의한 실험체의 단부 손상을 방지하였으며, 인장 실험은 유압 실험기에서 0.1 mm/min. 속도로 변위 제어 방식으로 수행하였다. 변위는 2개의 LVDT (측정길이=100 mm)를 실험체의 양측에 부착하여 측정하였고, 이를 변형률로 환산하였다. 인장 실험도 각 배합 당 3개의 시편을 제작하여 수행하였다.

## 4. 결과 및 분석

### 4.1 유동성

Fig. 3과 Fig. 4는 각 배합의 슬럼프 값과 슬럼프 플로 값을 나타낸다. 슬럼프 값은 178 mm에서 267 mm였고, 슬럼프 플로값의 범위는 356 mm에서 540 mm로 나타났다. MP 1-2의 유동성은 MP 1-1에 비하여 저하되는 것으로 나타났고, MP 2-1과 MP 2-2에서도 유사한 현상이 나타났다. 이러한 실험 결과로부터 폴리스틸렌 비드를 혼입하게 되면 유동성이 떨어지게 되고 이러한 원인은 폴리스틸렌 비드가 표면에서 물을 일부 흡수하고 구형이 아닌 각형으로 인하여 마찰력이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 소포제를 넣은 MP 2 시리즈의 유동성이 MP 1 시리즈 보다 저하되는 것을 관찰할 수 있는데 이로부터 미세한 공기들이 볼 베어링 효과가 있는 것을 알 수 있다. MP 3의 유동성이 MP 2-2 보다 향상된 원인은 증가된 물-결합제 비에 의한 것으로 판단된다.

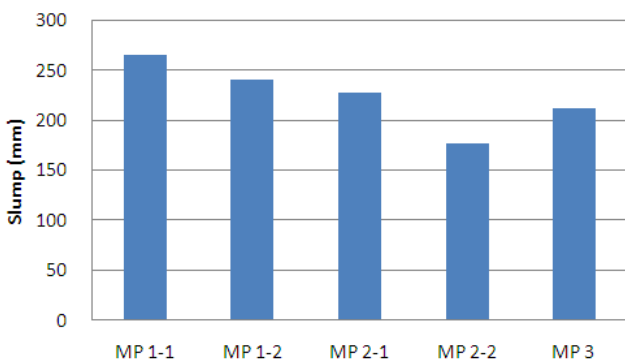


Fig. 3 Slump

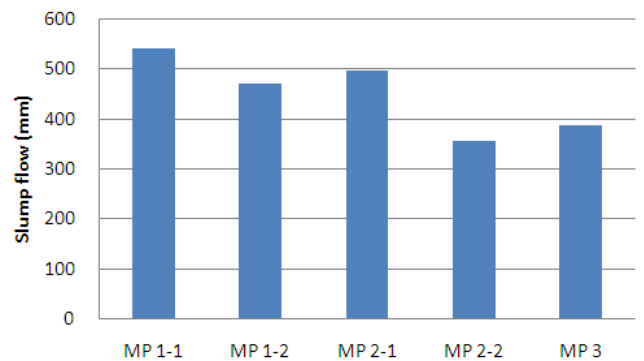


Fig. 4 Slump flow

## 4.2 밀도

Fig. 5는 다섯 가지 배합에 대한 복합재료의 굳은 후 밀도를 나타낸다. 소포제를 첨가하지 않은 MP 1 시리즈의 경우 밀도가 각각  $1.22 \text{ g/cm}^3$ 과  $1.31 \text{ g/cm}^3$ 으로 나타났다. 이 값은 배합으로부터 이론적으로 계산한 밀도 ( $1.91 \text{ g/cm}^3$ 과  $1.95 \text{ g/cm}^3$ )보다 약 34% 작은 값이다. 이러한 원인은 Fig. 6(a)에 나타난 바와 같이 M 1 시리즈의 경우 균일하게 분포된 작은 기포 때문이다. 반면에 소포제를 사용한 MP 2와 MP 3의 밀도는  $1.68 \text{ g/cm}^3$ 에서  $1.78 \text{ g/cm}^3$ 로서 이론적으로 계산한  $1.90 \text{ g/cm}^3$ 에 가까운 값을 나타내었다. Fig. 6(b)에서와 같이 MP 2 시리즈와 MP 3는 일반적인 기포를 포함하고 있다. 즉, 폴리프로필렌 섬유를 보강 섬유로 사용하는 경우 소포제를 첨가하면 의도하지 않은 기포의 생성을 막을 수 있다.

## 4.3 압축강도 특성

Fig. 7은 복합재료의 압축강도를 나타낸다. 소포제를 사용

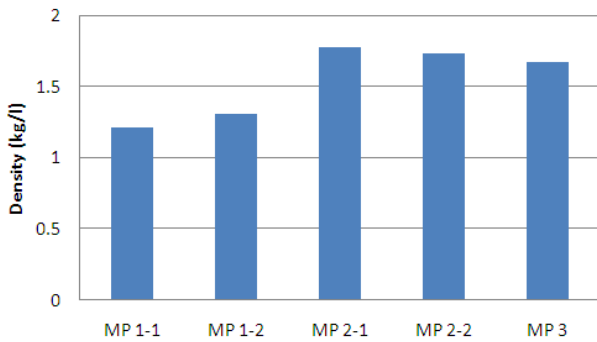
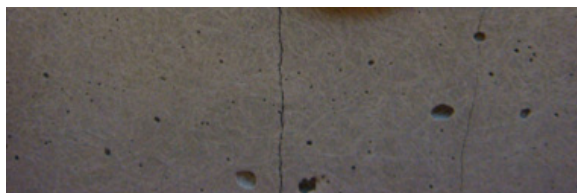


Fig. 5 Density



(a) MP 1-1



(a) MP 2-1

Fig. 6 Specimen surface

하지 않은 MP 1 시리즈의 압축강도는 15.8 MPa과 18.7 MPa로 나타났는데, 이는 구조 재료로서 적용이 어려운 수준이며 그 원인은 4.2절에서 기술한 바와 같이 의도하지 않은 기포의 생성 때문인 것으로 판단된다. 반면 소포제를 사용한 MP 2 시리즈의 강도는 MP 1 시리즈에 비하여 약 3배에 가깝게 측정되어 구조 재료로서 적합한 압축강도를 확보하는 것으로 나타났다. MP 2에 비하여 물-결합재 비가 7% 증가한 MP 3의 압축강도는 MP 2 시리즈에 비하여 16% 감소하였다.

## 4.4 인장강도 및 변형 특성

Fig. 8은 첫 번째 균열이 발생하는 균열강도로서 매트릭스의 강도에 크게 의존하는 값이다. MP 1-1과 MP 1-2 뿐만 아니라 MP 2-1과 MP 2-2를 비교하면 폴리스틸렌 비드를 첨가하면 균열강도가 약 10% 감소하였고, 소포제 첨가로 약 25% 증가하였다. MP 3의 균열강도가 MP 2-2와 유사한 것으로 볼 때, 이 연구의 한정된 실험 조건에서는 물-결합재비보다 폴리스틸렌 비드가 매트릭스의 강도에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 반면, 압축강도의 실험 결과와 마찬가지로

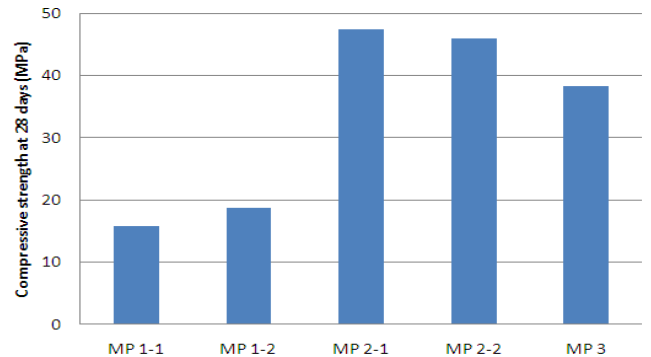


Fig. 7 Compressive strength

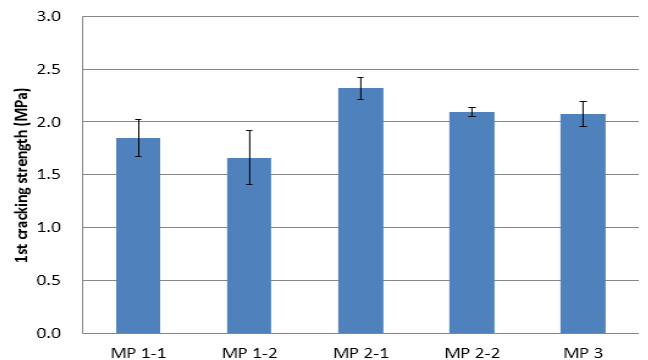


Fig. 8 First cracking tensile strength

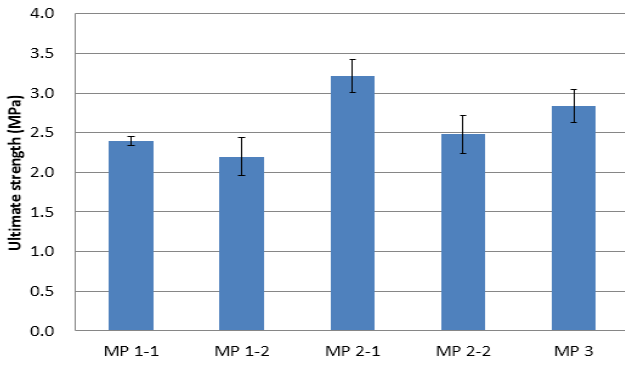


Fig. 9 Ultimate strength

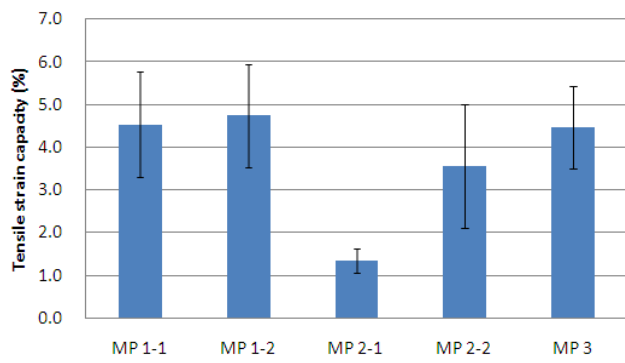
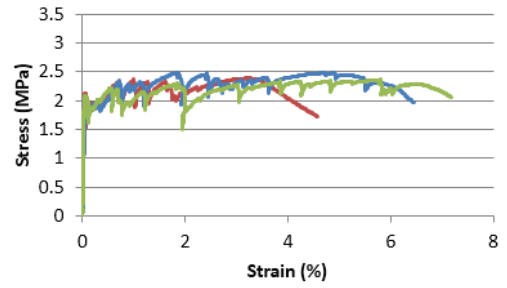


Fig. 10 Tensile strain capacity in terms of ultimate strain

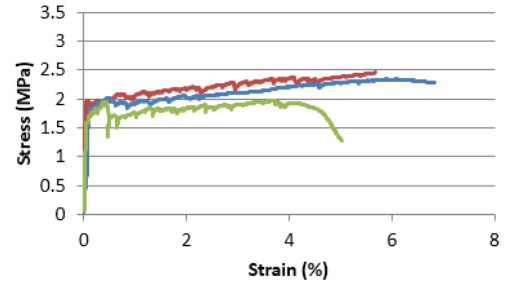
지로 소포제 사용으로 매트릭스 강도는 크게 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 측정된 인장강도로서 이론적으로는 복합재료의 최대 섬유 가교 응력에 해당된다. MP 1-2과 MP 2-2의 인장강도는 MP 1-1과 M 2-1에 비하여 각각 8.2%와 22.9% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 폴리스틸렌 비드가 최대 섬유 가교 응력을 감소시킨다는 것을 의미한다.

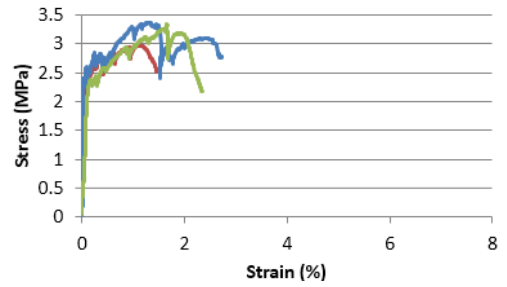
Fig. 10은 복합재료의 인장 변형 성능, 즉 극한 인장 변형률을 나타내며, Fig. 11은 각 배합별 인장응력과 변형률 관계를 나타낸다. Fig. 10과 Fig. 11에 나타난 바와 같이, MP 2-1을 제외하고는 표준편차가 크게 나타났다. 인공결함을 만듦으로써 인장 변형 성능의 편차가 감소할 것으로 예상되었던 MP 1-2의 산포가 여전히 MP 1-1과 유사한 것으로 미루어 보아 MP 1 시리즈에서는 폴리스틸렌 비드의 역할이 미미한 것으로 판단한다. 이미 많은 기포를 함유하고 있는 매트릭스에 추가로 인공결함을 넣었기 때문에 단순한 강도 감소 효과만을 나타냈기 때문이다. 반면, MP 2 시리즈에서는 폴리스틸렌 비드의 사용으로 인장 변형 성능이 약 3배 증가하였고, 그 성능 향상 효과는 인장강도의 감소 비율인 약 20%에 비하여 월등히 뚜렷하다. 즉 MP 2-2 배합은 소포제



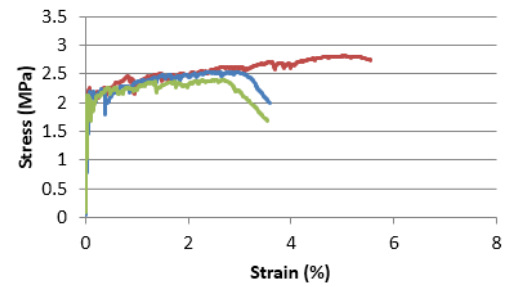
(a) MP 1-1



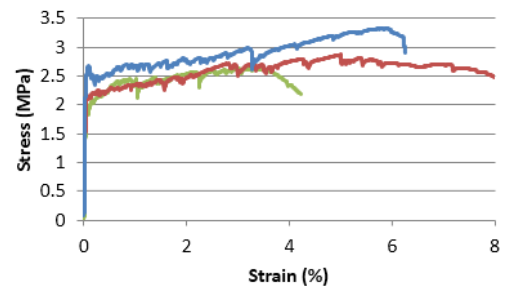
(b) MP 1-2



(c) MP 2-1



(d) MP 2-2



(e) MP 3

Fig. 11 Tensile stress and strain curves

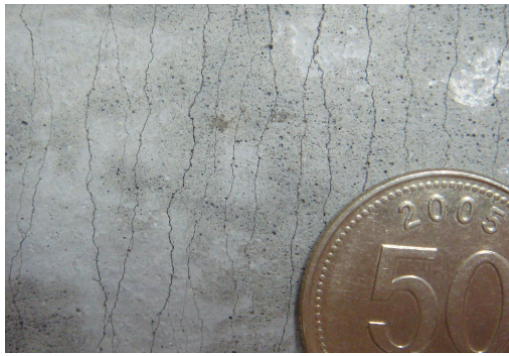


Fig. 12 Cracking pattern

효과로 증가된 매트릭스 강도를 인공결합으로 감소시키고, 시편 내에서 무작위로 존재하던 결함을 인공결합 도입으로 고르게 함으로써 위치별 매트릭스 강도 편차를 줄인 것이다. 이로 인하여 MP 1 시리즈에 비하여는 높은 압축강도를 가지면서 MP 2-1 배합에 비하여는 우수한 연성을 확보하게 된 것으로 사료된다. 한편, MP 3의 압축강도는 MP 2-2에 비하여 낮지만, 인장 변형 성능은 더욱 우수하게 나타났다. 이는 이 연구 범위 내에서 고연성이 나타날 수 있는 가장 좋은 조건인 높은 물-결합재비와 낮은 매트릭스 파괴인성을 갖고 있기 때문이다. Fig. 12는 MP 1-1 시험체에 발생한 대표적인 다중 미세균열을 나타낸다.

이 연구의 결과, 물-결합재비와 결합재 종류 등을 변화시키는 기존의 방법 이외에도 소포제와 인공결합을 함께 이용하여 섬유보강 복합재료의 강도 및 인장 변형 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 향후, 구조물 신설 및 보수보강 설계 시에 요구되는 재료 성능을 확보하는 데에 이 재료 설계 기법이 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결론

이 연구에서는 기존 폴리프로필렌 섬유에 비하여 강도가 약 40% 향상된 폴리프로필렌 섬유를 이용한 섬유보강 시멘트 복합재료의 성능 향상 방법과 개발된 복합재료의 성능을 평가하였다. 총 5가지 배합의 섬유보강 시멘트 복합재료에 대하여 유동성, 밀도, 압축강도 및 1축 인장 실험 등 일련의 실험을 수행하였고, 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 폴리비닐 알코올 섬유나 폴리에틸렌 섬유에 비하여 강도가 낮은 폴리프로필렌 섬유를 보강섬유로 사용하였고 고연성 복합재료를 설계하였다. 마이크로역학이론을 기반으로 하여 물-결합재비와 사용재료를 변화시키는 기

존의 방법 이외에도 소포제와 인공결합을 함께 적용하였으며 이를 통하여 섬유보강 시멘트 복합재료의 강도 특성 및 인장 변형 성능을 제어할 수 있음을 검증하였다.

- (2) 이 연구에서 제시한 배합으로 폴리프로필렌 섬유보강 시멘트 복합재료를 제조하는 경우, 그 성능은 슬럼프가 178 mm에서 267 mm, 슬럼프 플로가 356 mm에서 540 mm, 밀도가 1.22 g/cm<sup>3</sup>에서 1.78 g/cm<sup>3</sup>로 나타났다. 또한 극한 인장변형률이 3%에서 6%로서 높은 연성을 나타내었고 인장강도는 2.2 MPa에서 2.8 MPa 범위, 압축강도는 15 MPa에서 45 MPa 범위로 각각 나타났다.
- (3) 물-결합재비가 0.23~0.25 수준이고 플라이에서 치환율이 74%이며, 소포제와 폴리스틸렌 비드를 혼입한 배합 (MP 2-2, MP 3)의 경우에 강도 및 연성 측면에서 모두 우수한 성능을 나타내었다. 소포제의 사용으로 압축강도를 약 3배로 증가시켜 구조 재료 수준으로 향상시키면서 이와 수반되어 증가된 매트릭스의 파괴인성을 폴리스틸렌 비드가 감소시켜 높은 연성도 함께 확보하는 우수한 배합인 것으로 밝혀졌다. 특히 MP 2-2 배합의 압축강도와 인장강도는 폴리스틸렌 비드가 없는 배합 (MP 2-1)에 비하여 약 5%와 22% 감소한 반면, 인장 변형 성능 향상 효과는 약 3배에 달하는 것으로 나타났다.
- (4) 폴리스틸렌 비드와 같은 재료를 이용하여 적절히 인공결합을 만들 경우에 섬유보강 시멘트 복합재료의 연성을 확보하는데 도움이 되지만, 배합 조건 및 재료에 따라서는 인장 변형 성능의 편차를 줄이는 데에 효과를 보이지 않는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술연구사업의 연구비 지원(11기술혁신F04)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

1. Bentz, D. P., "Fibers, Percolation, and Spalling of High Performance Concrete", *ACI Materials Journal*, vol. 97, No. 3, 2000, pp.351-359.
2. Cho, C. G., Lim, H. J., Yang, K. H., Song, J. K., Lee, B. Y., "Basic Mixing and Mechanical Tests on High Ductile Fiber Reinforced Cementless Composites", *Journal of the Korea Concrete Institute*, vol. 24, No. 2, 2012, pp.121-127. (in Korean)

3. Ha, G. J., Lee, D. Y., "Improvement and Evaluation of Structural Performance of Reinforced Concrete Beam using High Ductile Fiber-Reinforced Mortar with Ground Granulated Blast Furnace Slag", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, vol. 14, No. 6, 2010, pp.142-152. (in Korean)
4. Han, C. G., Kim, S. S., Kim, S. S., Bea, J. C., "Spalling Prevention of High Strength Concrete Due to Hybrid Organic Fiber and Different Lengths of Polypropylene Fibers", Journal of the Architectural Institute of Korea, vol. 24, No. 2, 2008, pp.61-68. (in Korean)
5. Kim, D. J., "Influence of Number of Twist on Tensile Behavior of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites with Twisted Steel Fibers", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 22, No. 4, 2010, pp.577-585. (in Korean)
6. Kim, Y. Y., Fischer, G. and Li, V. C., "Performance of Bridge Deck Link Slabs Designed with Ductile Engineered Cementitious Composite (ECC)", ACI Structural Journal, vol. 101, No. 6, Nov.-Dec., 2004, pp.792-801.
7. Kim, Y. Y., "Design and Constructibility of an Engineered Cementitious Composite Produced with Cement-based Mortar Matrix and Synthetic Fibers", Journal of the Korea Society for Composite Materials, vol. 21, No. 2, 2007, pp.21-26. (in Korean)
8. Lee, B. Y., "Strain-Hardening Cementitious Composites with Low Viscosity Suitable for Grouting Application", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, vol. 16, No. 1, 2012, pp.55-63. (in Korean)
9. Lee, B. Y., Han, B. C., Cho, C. G., Kwon, Y. J., Kim, Y. Y., "Fiber Distribution Characteristics and Flexural Performance of Extruded ECC Panel", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 21, No. 5, 2009, pp.573-580. (in Korean)
10. Leung, C. K. Y., "Design criteria for pseudo ductile fiber-reinforced composites", Journal of Engineering Mechanics, vol. 122, No. 1, 1996, pp.10-14.
11. Li, V. C. and Leung, K. Y., "Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites", Journal of Engineering Mechanics, vol. 118, No. 11, 1992, pp.2246-2264.
12. Li, V. C., "Engineered Cementitious Composites - Tailored Composites through Micromechanical Modeling", in Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future, edited by N. Banthia, A. Bentur, A. and A. Mufti, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, 1998, pp.64-97.
13. Lin, Z., Kanda, T., Li, V. C., "On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites", Concrete Science and Engineering (RILEM), vol. 1, No. 3, 1999, pp.173-184.
14. Marshall, D. B. and Cox, B. N., "A J-integral method for calculating steady-state matrix cracking stressed in composites", Mechanics of Materials, vol. 7, No. 2, 1988, pp.127-133.
15. Wang, S. and Li, V. C., "Polyvinyl Alcohol Fiber Reinforced Engineered Cementitious 8 Composites: Material Design and Performances", Proceedings of International RILEM 9 Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural 10 Applications, Published by RILEM SARL, 2006, pp.65-73.
16. Wang, Y., Backer, S. and Li, V. C., "A Statistical Tensile Model of Fiber Reinforced Cementitious Composites", Journal of Composites, vol. 20, No. 3, 1990, pp.265-274.
17. Won, J. P., Jang, C. I., Kim, H. Y., Kim, W. Y., "Spalling and Internal Temperature Distribution of High Strength Column Member with Polypropylene Fiber Volume Fractions", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 20, No. 6, 2008, pp.821-826. (in Korean)
18. Zeiml, M., Leithner, D., Lackner, R. and Mang, H. A., "How Do Polypropylene Fibers Improve The Spalling Behavior of In-Situ Concrete?", Cement and Concrete Research, vol. 36, No. 5, 2006, pp.929-942.

Received : 03/22/2013  
 Revised : 04/02/2013  
 Accepted : 04/08/2013

## 요 지

폴리비닐알코올 섬유와 폴리에틸렌 섬유 등의 합성 섬유는 고연성 섬유보강 시멘트 복합재료를 제조하는데 성공적으로 사용되고 있다. 폴리프로필렌 섬유 역시 복합재료를 제조하는데 사용되고 있지만, 고연성을 구현하는 목적보다는 고온에 노출된 콘크리트의 내화 성능 향상 목적으로 사용되고 있다. 이 연구에서는 폴리프로필렌 섬유로 보강된 시멘트 복합재료의 성능을 향상시키는 방법에 대하여 논하고자 한다. 폴리프로필렌 섬유보강 시멘트 복합재료의 성능을 평가하기 위하여 5가지 배합을 결정하였다. 1종 보통포틀랜드시멘트 (OPC)와 OPC를 다량 치환한 플라이애시를 결합재로 사용하였고 물-결합재 비는 0.23~0.25이다. 또한 부피비로 2%의 폴리프로필렌 섬유가 사용되었으며, 연성을 향상시킬 목적으로 폴리스틸렌 비드가 사용되었다. 슬럼프, 밀도, 압축강도, 1축 인장 실험을 포함한 일련의 실험을 수행하였으며, 실험결과, 파괴역학, 마이크로역학, 통계이론을 이용하여 폴리프로필렌 섬유보강 시멘트 복합재료의 성능을 향상할 수 있는 것으로 나타났다.

**핵심 용어** : 폴리프로필렌, 섬유, 복합재료, 고연성, 하이볼륨 플라이애시