

하이브리드형 단섬유보강 시멘트복합재료의 개발에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Development of Hybrid Discontinuous Fiber Reinforced Cementitious Composite

○ 김 영 덕*	조 봉 석*	김 재 환**
Kim, Young-Duck	Cho, Bong-Suk	Kim, Jae-Whan
김 용 로**	윤 현 도***	김 무 한***
Kim, Yong-Ro	Yun, Hyun-Do	Kim, Moo-Han

Abstract

Generally, normal concrete has the disadvantages of low tensile strength, low ductility and volume instability. To improve its performance, fiber reinforced cementitious composite(FRCC) have been development. These composites are composed of cement, sand, water, a small amount of admixtures, and an optimal amount of fiber like synthetic fiber and steel fiber. This research investigates influence of sand, hybrid fiber and fiber volume fraction, and reports the test results of mechanical properties, fracture behavior and failure pattern of the FRCC.

Our experiment was observed that sand mixed FRCC has lower compressive strength and higher bending strength than no sand mixed FRCC, and more steel fiber mixed FRCC has higher compressive strength and bending strength. Hybrid FRCC of steel and polypropylene had superior properties than FRCC of polypropylene only in same fiber volume fraction.

키워드 : 섬유보강 시멘트복합재료, 단섬유, 하이브리드, 고인성

Keywords : Fiber Reinforced Cementitious Composite, Discontinuous Fiber, Hybrid, High Ductility

1. 서 론

일반적으로 고강도 시멘트계 재료는 높은 압축강도를 발현할 수 있는 장점을 가진 반면 최대응력 이후 급격히 파괴되는 강한 취성적인 성질을 가지고 있으며, 최근 이러한 취성적 파괴거동을 개선할 목적으로 섬유를 혼입한 섬유보강 시멘트 복합재료(이하 FRCC(Fiber Reinforced Cementitious Composite)라 함)가 다각적으로 개발되고 있다.¹⁾

이러한 FRCC는 그림 1에 나타난 바와 같이 구분할 수 있다.¹⁾ 특히 Li는 마이크로메커닉스(Micromechanic) 재료설계기법에 기초하여 ECC(Engineered Cementitious Composite)를 개발하였으며, 고인성의 ECC를 창출하기 위해 섬유와 매트릭스의 부착이 양호하고 어스펙트비가 큰 고분자계 합성섬유를 사용하였다.²⁾ 그러나 이러한 고분자계 합성섬유는 섬유의 휨강성이 작기 때문에 일반적으로 비빔 및 시공성이 모르터에 비하여 크게 저하하고, PVA, PE 등 합성섬유는 계면에 있어서 부착강도가 과도하게 높아 섬유가 파단하는 경향이 있으며,

이를 개선하기 위한 방안으로서 직경이 크고 휨강성이 높으며 부착특성이 우수한 섬유를 이용하는 것이 고려되고 있다.

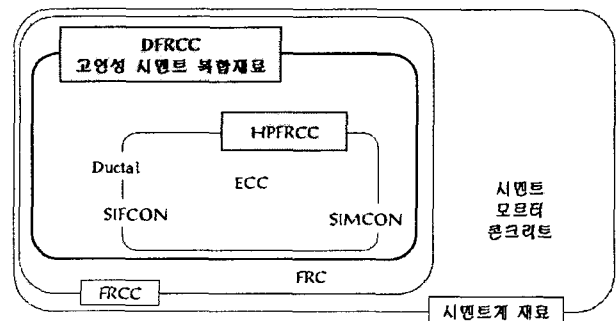


그림 1. 섬유보강 시멘트복합재료의 종류

이러한 배경에서 川又篤은 스틸코드(Steel Code)라 하는 큰 직경의 특수강섬유를 이용하여 고강도고인성 거동의 FRCC를 개발하였다.³⁾ 그러나 스틸코드를 이용한 FRCC는 휨파괴시 균열선단부가 취성적이면서 매크로한 균열이 발생하는 문제점을 가지고 있다.

* 충남대학교 대학원 건축공학과, 석사과정

** 충남대학교 대학원 건축공학과, 박사과정

*** 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사

PP섬유와 강섬유를 혼합 사용한 하이브리드형 FRCC의 경우 압축강도는 동일 섬유혼입율에서 잔골재를 사용하지 않은 것이 보다 높은 압축강도를 발현하고 있다. 또한 동일 매트릭스에서 강섬유의 혼입율이 큰 것이 높은 압축강도를 발현하고 있으며, 이는 강섬유의 혼입량 증가에 의한 가교응력 증가에 의해 매트릭스가 구속되었기 때문이라고 사료된다. 한편 PP섬유만을 사용한 경우에는 동일 섬유혼입량에 있어서 강섬유를 혼합 사용한 것보다 압축강도가 크게 저하하는 것으로 나타났다.

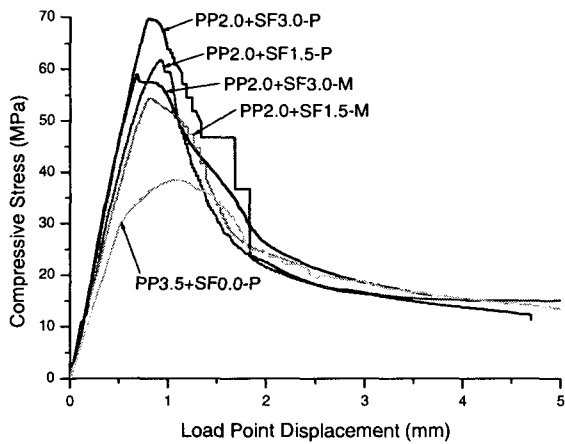
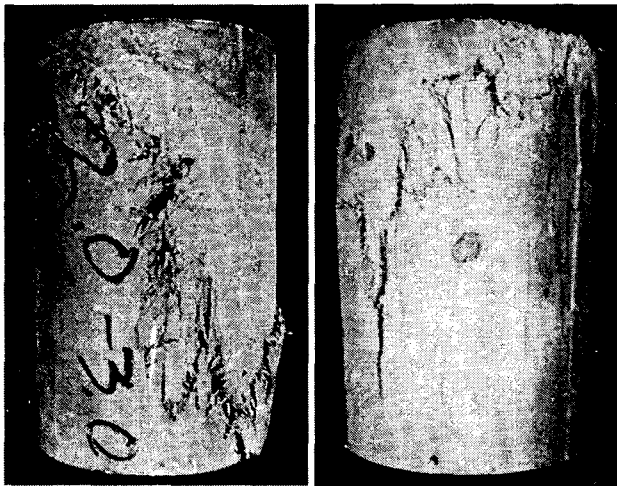


그림 2. 정적 일축압축하중 작용시 압축응력-변형 곡선



(a) PP2.0+SF3.0-P (b) PP3.5+SF0.0-P

사진 2. FRCC의 압축파괴형상

또한 정탄성계수는 PP섬유와 강섬유를 혼합 사용한 하이브리드형 FRCC의 경우 잔골재의 유무 및 강섬유 혼입량에 따른 큰 차이없이 15.1~18.2GPa 수준인 것으로 나타났다. 그러나 PP섬유만을 혼입한 경우의 정탄성계수는 하이브리드형 FRCC에 비하여 다소 저하하는 것으로 나타났다.

한편 그림 2는 정적 일축압축하중 작용시 응력-변형 곡선을 나타낸 것으로, 하이브리드형 FRCC의 경우 일반 고강도

시멘트계 재료와는 달리 최대압축응력 이후 급격히 파괴되는 취성적인 성질은 나타나지 않고 있어 섬유의 혼입에 의해 고강도영역에서의 인성이 개선되는 것으로 확인되었다. 또한 PP섬유만을 혼입한 경우 강섬유를 혼합 사용한 경우에 비하여 초기균열 이후 변형이 크게 증가하였으며, 최대압축응력에서의 변형이 가장 큰 것으로 나타났다. 사진 2에 FRCC의 대표적인 압축파괴 형상의 일례를 나타낸 것이다.

표 4. 휨실험 측정결과

시험체 기호	휨강도 (MPa)	최대휨응력시 변형 (mm)
PP2.0+SF1.5-P	7.1	1.270
PP2.0+SF1.5-M	9.9	1.130
PP2.0+SF3.0-P	9.0	2.045
PP2.0+SF3.0-M	10.3	0.620
PP3.5+SF0.0-P	6.0	2.558

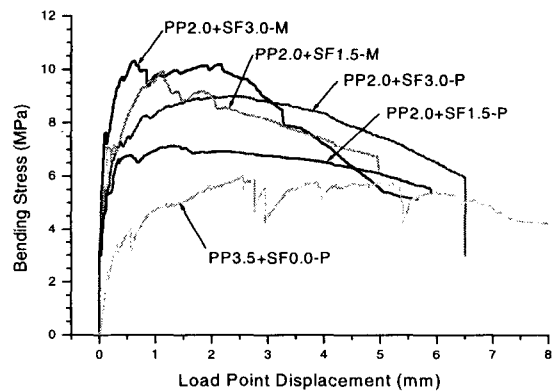


그림 3. 중앙점 재하시험에 의한 휨응력-변형 곡선

3.2 휨파괴시 특성에 대한 검토 및 분석

표 4는 중앙점 재하시험에 의한 휨강도 및 최대휨응력에서의 변형을 나타낸 것이다.

FRCC의 휨강도는 PP섬유와 강섬유를 혼합 사용한 하이브리드형 FRCC의 경우 동일 매트릭스 종류에 있어서 강섬유의 혼입율이 큰 것이 높은 휨강도를 발현하고 있다. 또한 동일 섬유혼입율에 있어서 잔골재를 혼입한 경우가 혼입하지 않은 경우보다 높은 휨강도를 발현하는 것으로 나타났으며, 이는 잔골재의 혼입에 의해 섬유표면을 감싸고 있는 매트릭스가 거칠어지고 이로 인해 매트릭스와 섬유의 마찰부착력이 증가하였기 때문으로 사료된다. 따라서 하이브리드형 FRCC의 휨강도를 향상시키기 위해서는 섬유의 혼입율을 증가시키거나 잔골재를 사용하는 것이 유효할 것으로 사료되며, 본 연구에서는 PP2.0+SF3.0-P의 경우 10.3MPa의 높은 휨강도를 발현할 수 있는 것으로 나타났다.

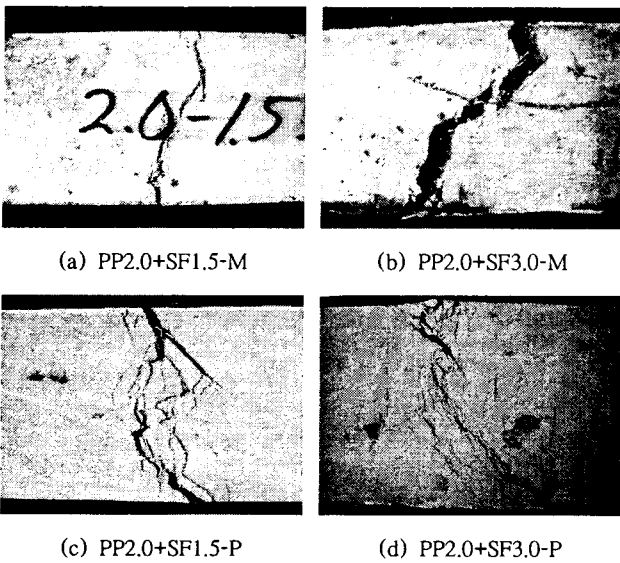


사진 3. 하이브리드형 FRCC의 균열성상 (밀면)

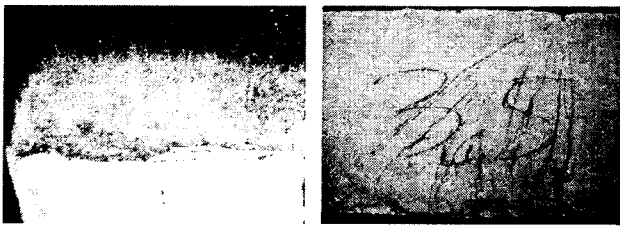


사진 4. PP만을 사용한 FRCC의 균열성상 및 파단면

또한 그림 3은 중앙점 재하시험에 의한 FRCC의 휨응력-변형 곡선, 사진 3은 하이브리드형 FRCC의 밀면 균열성상을 나타낸 것이다. 하이브리드형 FRCC의 경우 동일 매트릭스 종류에 있어서 강섬유의 혼입율이 증가할수록 최대휨응력 이후 큰 응력저하 없이 높은 변형성능을 발휘하고 있어 강섬유의 혼입율 증가에 의한 인성개선에 유효한 것으로 사료된다. 또한 동일 섬유혼입량에 있어서 잔골재를 혼입하지 않은 경우가 혼입한 경우에 비하여 최대휨응력 이후 큰 응력저하 없이 높은 변형성능을 발휘하고 있어 매트릭스로서 페이스트의 사용이 휨인성의 향상에 유효할 것으로 사료된다. 특히 사진 3에서 알 수 있는 바와 같이 잔골재를 사용하지 않은 경우 균열이 일부에 국소화되지 않고 주변의 매트릭스로 전파되어 멀티플크랙(Multiple Crack)이 발생하는 것으로 나타났다.

또한 PP섬유만을 혼입한 FRCC의 경우 강섬유와 혼합 사용한 하이브리드형 FRCC에 비하여 휨강도가 크게 저하하는 것으로 나타났다. 이는 PP섬유가 소수성을 지니고 있어 섬유 표면에서 매트릭스와의 화학적 부착력 및 마찰부착력이 강섬유에 비하여 매우 낮고, 이로 인해 초기균열 발생 후 사진 4(a)에 나타낸 바와 같이 섬유인발에 의해 가교응력이 저하하기 때문이라고 사료된다.

그러나 본 연구에서는 PP섬유를 3.5% 혼입함으로써 초기 균열 이후 변형의 증대와 함께 응력이 다시 상승하는 변형경

화성상을 발현하는 것으로 나타났으며, 사진 4에 나타낸 바와 같이 중앙점 재하에 의한 휨시험시 미세한 균열이 다량으로 발생하는 멀티플크랙이 형성하고 있어 ECC재료로의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

PP섬유와 강섬유의 혼합비율 및 잔골재의 사용유무가 하이브리드형 FRCC의 기초물성에 미치는 영향을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PP섬유와 강섬유의 하이브리드형 FRCC의 압축강도는 강섬유 혼입율이 증가할수록, 또한 잔골재를 사용하지 않은 경우가 높게 발현되었다.
- 2) 하이브리드형 FRCC의 휨강도는 강섬유 혼입율이 증가할수록, 또한 잔골재를 사용한 경우가 높게 발현되었다.
- 3) 하이브리드형 FRCC에 있어서 잔골재를 사용하지 않은 경우가 사용한 경우보다 최대휨응력 이후 급격한 응력저하 없이 큰 변형성능을 발현하는 것으로 확인되었다.

이상과 같이 본 연구를 통해 PP섬유와 강섬유의 하이브리드화에 의해 고강도·고인성을 발현할 수 있는 FRCC를 개발하였으며, 향후 섬유의 종류 및 혼입율, 매트릭스의 종류 및 물시멘트비 등에 대한 지속적인 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 社団法人 日本コンクリート工学協会, 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書, 2002.01
2. Victor C. LI, Large Volume, High-Performance Applications of Fibers in Civil Engineering, Journal of Applied Polymer Science, Vol.83, pp.660~686, 2002
3. 川又 篤, 하이브리드형 섬유보강 콘크리트 복합재료의靱성능에 관한 연구, 콘크리트工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.235~240, 2001