

PP섬유와 PE섬유를 혼입한 고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Properties of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite with PP and PE Fiber

변장배* 이원석* 전에스더** 김선우** 윤현도***
Byun, Jang-Bae Lee, Won-Suk Jeon, Esther Kim, Sun-Woo Yun, Hyun-Do

ABSTRACT

Fibers are increasingly being used for the reinforcement of cementitious matrix to enhance the toughness and energy absorption capacity and to reduce the cracking sensitivity of the matrix. In the past decade, high performance fiber reinforced cementitious composite(HPFRCC) have evolved with intensified research. HPFRCC for structural applications has been developed under the performance driven design approach.

It is the aim of this study to obtain development of hybrid-HPFRCC using polypropylene fibers and polyethylene fibers. It was targeted the requirement of economical mixing and application to structure member.

1. 서론

콘크리트계 구조물에 대한 사회적 요구는 사회 및 경제의 발전에 따라 항상 변화하지만 최근에 있어서 생활패턴이나 사회적 활동의 급속한 다양화에 비례하여 그 항목이나 수준도 점점 다양화되고 있다. 최근 연구의 이슈가 되고 있는 성능규정화, 성능평가, 성능표시라 하는 「성능」을 키워드로 한 활동은 이와 같은 사회적인 요구의 변화에 대응한 것이라 말할 수 있다. 이에 많은 연구가 이루어지고 있는 고인성 섬유보강 시멘트 복합체(High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite, HPFRCC)는 일반적인 콘크리트의 취성적 성질을 극복하고 있기 때문에 콘크리트계 구조요소로서 사용되어 질 경우 그 구조성능이나 내구성의 향상이 기대되며 앞서 서술한 사회적 요구에 맞는 콘크리트계 구조물에 대한 성능을 향상시킬 것으로 평가된다. HPFRCC의 성능은 동일 섬유종류 및 혼입량에 있어서도 매트릭스의 배합특성, 즉 물-시멘트비, 혼화제의 종류 및 혼입량, 잔골재의 종류 및 혼입량 등에 따라 다르며, 매트릭스 자체의 물성(탄성계수, 파괴인성 및 인장강도)에 영향을 미칠 뿐만 아니라 섬유/매트릭스의 계면특성(마찰부착력 및 화학부착력)에도 영향을 미치기 때문인 것으로 보고되고 있다¹⁾. 하지만 성능에만 국한되어 경제성 및 시공성이 결여된다면 콘크리트계 구조물의 재료로서 적용 가능성이 저하될 것이다. 따라서 최근의 연구 동향은 매크로 섬유와 마이크로 섬유를 혼합하여 혼입한 하이브리드 HPFRCC의 경제적인 배합조건에 맞는 제조 방법과 섬유 이외에 결합재로 사용되어지는 규사의 대체 방안, HPFRCC의 성능을 정량적으로 평가하기 위한 규준정립에 관한 연구가 이루어지고 있으며²⁾, 구조부재 적용에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만 섬유의 불규칙한 분산으로 인해 섬유의 뭉침현상이 일어나 응력의 분배가 부재의 약한 부분에만 치우치는 특성을 나타내어 배합기술 및 배합에 대한 규준을 마련하는 것도 중요한 과제 일 것이다.

본 연구의 목적은 잔골재의 종류 및 혼입량이 폴리프로필렌(Polypropylene, PP)섬유 및 폴리에틸렌(Polyethylene, PE)섬유를 혼합 사용한 하이브리드 HPFRCC의 굳지 않는 성상 및 경화성상에 미치는 영향에 따른 결과를 비교·분석함으로써 PP 및 PE 하이브리드 HPFRCC의 특성을 파악하여 실 구조체 적용에 관한 경제적 배합조건 및 성능에 대한 기초자료를 제시하고자 한다.

* 정희원, 충남대 건축공학과 석사과정

** 정희원, 충남대 건축공학과 박사과정

*** 정희원, 충남대 건축공학과 교수, 공학박사

표 1 실험계획

시험체명	혼입량(vol.%)		W/C (wt.%)	혼화재	AD/C (wt.%)	잔골재의 종류	잔골재용적비 (vol.%)
	PP	PE					
40-FA20-SP00	0.25	1.00	40	FA ¹⁾	20	SP ²⁾	0
40-FA20-SP15						SP ²⁾	15
40-FA20-NS(0.3)15						NS(0.3) ³⁾	
40-FA20-NS(1.2)15						NS(1.2) ⁴⁾	

1) FA : Fly-ash

3) NS(0.3) : 0.3mm 이하의 천연잔골재(해사)

2) SP : Silica powder

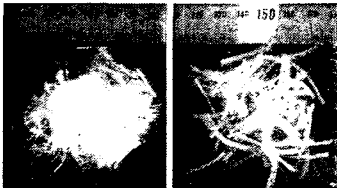
4) NS(1.2) : 1.2mm 이하의 천연잔골재(해사)

표 2 섬유 특성

종류	비중 (kg/cm ³)	길이 (mm)	직경 (μm)	형상비	인장강도 (N/mm ²)	탄성계수 (kN/mm ²)
PE	97	15	12	1250	2500	75
PP	900	15	40	375	600	5

표 3 혼화재 및 잔골재의 물리적 성질

혼화재 종류	비중	분말도 (cm ² /g)	단위수량비 (%)
플라이애쉬	2.12	2,976	101
잔골재 종류	비중	흡수율 (%)	평균입경 (mm)
규사	2.64	0.38	0.20



(a) PE 섬유 (b) PP 섬유
그림 1 섬유의 형상

표 4 굵지 않은 성상의 측정결과

배합기호	측정결과	
	플로우 (mm)	공기량 (%)
40-FA20-SP00	158.0	7.0
40-FA20-SP15	157.5	13.0
40-FA20-NS(0.3)15	160.0	13.0
40-FA20-NS(1.2)15	164.5	13.5

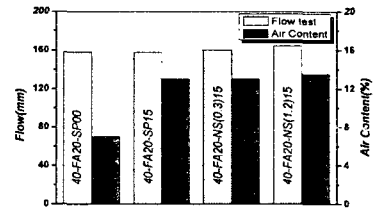


그림 2 HPFRCC의 플로우 및 공기량

2. 실험

2.1 실험 계획

표 1은 PP 및 PE를 혼합 사용한 하이브리드 HPFRCC의 특성을 평가하기 위한 실험계획을 나타낸 것으로, 동일한 PP(0.25%)+PE(1.00%), W/C 40%, FA 20%를 혼입하고, 규사 또는 천연잔골재(해사)를 혼입하지 않은 40-FA20-SP00시험체를 기준 배합으로 하여 잔골재의 종류 및 혼입률에 따른 효과를 검토하고자 하였다.

2.2 사용재료

본 연구에서 사용되어진 섬유는 PP섬유와 PE섬유로써 표 2와 그림 1에 섬유의 특성 및 형상을 나타내었다. 모르타르 제조를 위한 결합재로서 시멘트는 비중 3.15의 1종보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고 혼화재는 비중 2.12의 보령산 플라이애쉬(Fly-ash)를 사용하였으며, 잔골재로서는 규사(Silica powder, 비중 2.64, 평균입경 0.2mm)와 천연잔골재(해사, 비중 2.56, 최대치수 0.3 및 1.2mm)를 사용하였다. 표 3에는 혼화재 및 잔골재의 물리적 성질을 나타내었다.

3. 실험결과

3.1 굵지 않은 성상에 관한 검토

표 4와 그림 2에 PP섬유 및 PE섬유를 하이브리드하여 혼입한 HPFRCC의 플로우 및 공기량 측정값을 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이 플로우 값은 157.5~164.5mm로 잔골재 종류 및 사용량에 관계 없이 유사한 수준을 보이고 있어 잔골재에 따른 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다. 일반적으로 콘 크리트에 섬유를 혼입하면 섬유와 시멘트 매트릭스의 부착표면에 미세공극의 증가로 인해 공기량이 증가하는 것으로 보고³⁾되고 있다. 측정 결과에 따르면 규사나 천연잔골재를 혼입한 SP15, NS(0.3)15 및 NS(1.2)15시험체에서 SP00시험체보다 약 46.15~48.15%의 공기량 증가를 보인 것으로 나타났다. 이는 잔골재의 혼입으로 인한 갇힌공기의 생성으로 공기량이 증가했을 것으로 판단되며 SP00시험체보다 높은 공기량으로 인해 잔골재를 혼입한 시험체에서 강도의 저하를 가져올 것으로 판단된다.

3.2 경화 성상에 관한 검토

3.2.1 압축성상

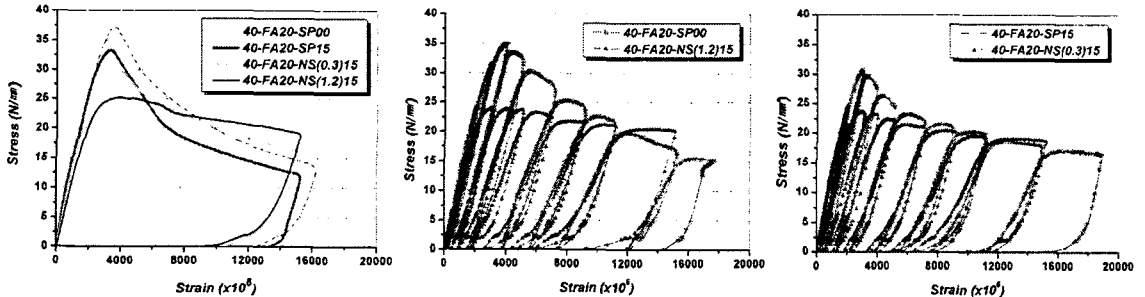
각 시험체의 압축실험에 관한 단조 및 반복가력시 측정결과를 표 5와 그림 3 나타내었다. 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 단조가력시 압축응력은 25.22~37.08N/mm²로 규사 및 천연잔골재를 혼합하지 않은 SP00시험체에서 높은 압축강도를 나타내었으며, SP15>NS(0.3)15>NS(1.2)15의 순으로 압축강도를 나타내었다. 또한 NS(1.2)15시험체에서 단조가력시 최대압축강도는 25.22N/mm²로 다소 낮게 나타났으나 최대응력시 변위량은 4005로 다른 시험체에 비해 다소 크게 나타났다. 또한 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 반복가력시 압축강도는 SP00(34.83N/mm²)>SP15(30.72N/mm²)>NS(1.2)15(23.94N/mm²)>NS(0.3)15(23.60N/mm²) 순으로 나타났다. 반복가력시 NS(0.3)15시험체에서 섬유와 모래의 뭉침현상 및 공기량의 증가로 불안정한 파괴형태를 보여 압축응력이 낮게 나타난 것으로 판단되며, 반복/단조 압축응력비에서도 다른 시험체에 비해 낮은 값을 보이고 있으며, 다른 시험체에서는 유사한 수준을 보이고 있다. 이와 같은 결과로 SP00시험체에 비해 잔골재의 혼입으로 최대압축응력이 감소한 것으로 판단된다.

표 5 압축성상 측정결과

배합기호	단조 가력		반복 가력 압축강도(N/mm ²)	반복/단조 압축응력비
	압축강도(N/mm ²)	최대응력시 변형률 (×10 ⁶)		
40-FA20-SP00	37.08	3625	34.83	0.939
40-FA20-SP15	33.27	3395	30.72	0.924
40-FA20-NS(0.3)15	30.39	3665	23.60	0.777
40-FA20-NS(1.2)15	25.22	4005	23.94	0.950

표 6 휨성상 측정결과

배합기호	초기균열응력 (N/mm ²)	초기균열시 처짐량(mm)	최대 휨응력 (N/mm ²)	최대휨응력시 처짐량(mm)	최대/초기 휨응력비
40-FA20-SP00	4.63	0.100	12.61	2.170	2.72
40-FA20-SP15	5.98	0.127	11.13	1.122	1.86
40-FA20-NS(0.3)15	5.18	0.092	12.75	1.402	2.46
40-FA20-NS(1.2)15	4.57	0.088	11.17	1.130	2.45



(a) 단조가력시 압축응력-변형률 곡선

(b) 반복가력시 압축응력-변형률 곡선

그림 3 가력 방법에 따른 HPRC의 압축 응력-변형률 곡선

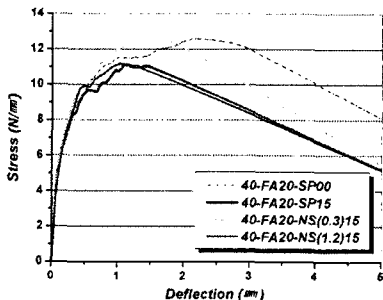
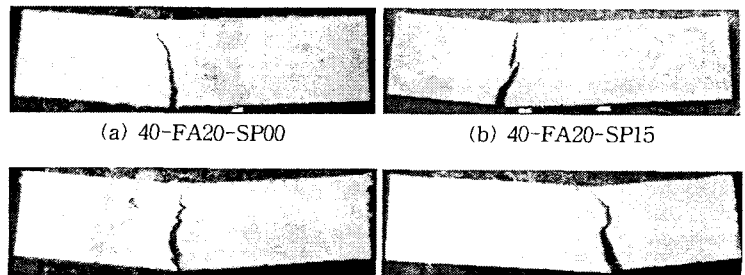


그림 4 휨응력-변형률 곡선



(a) 40-FA20-SP00

(b) 40-FA20-SP15

(c) 40-FA20-NS(0.3)15

(d) 40-FA20-NS(1.2)15

그림 5 휨 시험체의 최종파괴양상

3.2.2 휨성상

표 6과 그림 4는 각 시험체의 휨 성상 측정결과를 나타낸 것이며, 그림 5에 각 시험체의 최종 파괴양상을 나타내었다. 잔골재의 종류 및 사용량에 따른 PP 및 PE를 하이브리드 한 HPFRCC의 3등분점재하시험에 의한 초기균열 및 최대 휨응력과 처짐량을 나타낸 것이며, 초기균열시 휨응력은 4.57~5.98 N/mm², 초기균열시 처짐량은 0.088~0.127 mm의 수준으로 배합특성에 따라 다소 차이를 보이고 있다. 또한 최대 휨응력은 11.13~12.75N/mm²로 약 1.62N/mm²의 범위를 보였고, 최대응력시 변위량은 SP00시험체에서 다소 높게 나타났다. 또한 PP 및 PE를 하이브리드 한 HPFRCC의 초기균열시 휨응력에 대한 최대휨응력의 비는 PP 및 PE를 하이브리드 한 HPFRCC의 경우 최대/초기응력비는 1.86~2.72의 수준을 나타내었다. 하지만 SP15시험체에서의 파괴가 단부에서 일어나는 형상을 보여 최대휨응력 및 최대휨응력에서의 처짐량이 낮은 값을 나타냈으며, 이와 같은 결과로 최대/초기 휨응력비도 다른 시험체에 비해 낮은 값을 나타낸 것으로 판단된다.

4. 결론

잔골재의 종류 및 사용량이 PP섬유 및 PE섬유를 혼합 사용한 하이브리드 HPFRCC의 균지 않은 성상 및 경화성상에 미치는 영향을 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 잔골재의 종류 및 사용량에 따른 균지 않은 성상을 검토한 결과, 플로우 값은 157.5~164.5mm를 나타내 잔골재에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 또한 공기량 측정값을 비교한 결과 잔골재를 혼입하지 않은 SP00시험체는 7.0%의 공기량을 나타냈으나, 잔골재가 혼입된 SP15, NS(0.3)15 및 NS(1.2)15시험체에서 13.0~13.5%로 유사한 수준을 보였다. 이는 잔골재의 혼입으로 미세한 공극이 발생하여 공기량이 증가한 것으로 판단되며, 공기량 증가는 경화성상에서의 응력을 저하시키는 요인으로 판단된다.

(2) 경화성상에서의 압축 및 휨 특성을 검토한 결과, 잔골재의 입경이 커짐에 따라 최대압축응력이 감소되는 것을 알 수 있었지만, 반복가력시 섬유의 뭉침현상으로 인해 NS(0.3)15시험체에서 다소 낮은 압축응력을 나타내었다. 이에 반복/단조 압축응력비에서도 NS(0.3)15시험체를 제외하고 모두 유사한 수준을 나타내었다. 또한 휨성상에서의 최대휨응력에 대한 결과값은 최대압축응력과 유사하게 잔골재를 혼입한 시험체에서 SP00시험체보다 낮은 응력을 나타내었지만, 초기균열시 휨응력이 5.98N/mm²로 높았던 SP15시험체에서 최대휨응력에서 다소 낮은 값을 나타내었다. 이는 시험체의 불안정한 파괴, 즉 단부에서의 파괴가 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 이에 최대/초기 휨응력비에서도 SP15시험체가 낮은 값을 나타내었고, 다른 시험체에서는 2.45~2.72로 유사한 수준을 보였다. 따라서 섬유의 혼입 및 잔골재의 혼입으로 인한 높은 공기량을 감소시킨다면 압축응력 및 휨응력의 증가를 가져올 수 있을 것으로 판단되고, 구조체 적용에 대한 경제적 배합의 성립조건을 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호 03산학연A10-01)과 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 R01-2005-000-10546-0)의 연구비 지원으로 수행된 연구의 일부이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 윤현도, 양일승, 한병찬, 김선우, 전에스터, 최창식(2005), "코인 5연선강섬유를 사용한 고인성 시멘트복합체의 특성", 대한건축학회논문집, 21(9), pp.3~10
2. 윤현도, 양일승, 한병찬, Hiroshi Fukuyama, 전에스터, 문연준(2004), "복합섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 특성", 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 24(1), pp.27~30.
3. 원중필, 박찬기, 안태송(1999), "폴리프로필렌섬유보강 콘크리트의 수축균열 및 내구특성", 대한토목학회는 문집 Vol.19 No.I-5, pp.783~790
4. 전에스터, 김재환, 한병찬, Hiroshi Fukuyama, 윤현도(2004), "코인 강섬유의 매입 인발시 기계적 부착효과", 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 24(1), pp.79~82.