

강섬유와 탄소섬유를 사용한 고인성 시멘트 복합체의 비빔 및 휨강도 특성

Mixing and Flexural Strength Characteristics of HPFRCCs using Steel Cord and Carbon Fiber

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

ABSTRACT

HPFRCCs(High performance fiber reinforced cementitious composites) is a class of FRCCs(Fiber reinforced cementitious composites) exhibit multiple crack. Multiple crack lead to improvement in ductility, toughness, and deformation capacity under compressive and tensile stress. These properties of HPFRCCs are affected by type of fiber, water cement ratio, type of admixture and rate of substitution. Furthermore these influence dispersion of fiber, mixing performance and fluidity of mixture. In this paper, HPFRCCs made of steel cord and carbon fiber were tested with water cement ratio, type of admixture and rate of substitution to evaluate characteristics of mixing and flexural strength.

1. 서론

현재 건설재료로 널리 쓰이고 있는 콘크리트 등과 같은 시멘트 복합체는 일반적으로 인장응력 작용 시 매트릭스 내에 국부적인 마이크로 균열이 발생되고 이러한 마이크로 균열이 매크로 균열로 진전되어 급격한 파괴에 이르는 특성을 가지고 있다. Li 등¹⁾에 의하면 이러한 취성적인 파괴특성을 가지고 있는 시멘트 복합체 내에 섬유를 보강함으로써 시멘트 복합체의 취성적 재료특성을 유사변형경화특성(Pseudo strain-hardening)을 갖도록 개선할 수 있으며, 이러한 고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 성능을 향상시키기 위한 연구가 국내외적으로 활발하게 이루어지고 있다. 또한 직경 50 μm 이하의 마이크로 섬유와 200 μm 이상의 매크로 섬유를 하이브리드한 고인성 시멘트 복합체(HPHFRCCs, 이하 HPHFRCCs)는 균열이 국부적으로 집중되지 않게 하고 미소균열(Multiple crack)을 폭넓게 확산시킴으로서 복합체에 변형경화 특성을 부여하여 최대강도 이후에도 연성을 증진시키는 특성을 갖고 있는 것으로 알려져 있다.²⁾ 한편, HPHFRCCs의 휨강도 및 파괴인성은 직경에 따른 마이크로 및 매크로 섬유의 종류, 섬유의 인장강도 및 탄성계수 등과 같은 물리적 특성에 영향을 받으며, 이러한 섬유가 시멘트 매트릭스 내에서 소정의 인장강도 및 변형능력을 발휘하기 위해서는 적절한 시멘트 복합체의 강도 및 섬유와의 부착력이 필요하다. 그러나 이러한 시멘트 복합체의 강도 및 섬유와의 부착력은 물시멘트비(물결합재비) 및 결합재의 종류에 큰 영향을 받으며 이러한 영향요인은 섬유의 분산성능, 혼합물의 비빔성능 및 유동성 등 시공성에도 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 표면이 개질된

* 정희원, 충남대학교 대학원 석사과정

** 정희원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사

*** 정희원, 충남대학교 대학원 박사과정

표 1 실험계획 일람

시리즈	시험체명	섬유 혼입율(vol.%)		물결합재비 (wt.%)	혼화재 종류	혼화재 대체율 (wt.%)	단위 중량 (kg/m ³)					MC ³⁾ (W×%)
		탄소섬유(CF)	강섬유(SCK)				W	C	FA	SF	S	
I	50-FA20	0.50	1.25	50	FA ¹⁾	20	478	764	191	0	369	0.75
	40-FA20						433	867	217	0	369	0.25
	30-FA20						375	1000	250	0	369	0.25
II	40-Plain	0.50	1.25	40	-	0	452	1129	0	0	369	0.25
	40-FA20				FA ¹⁾	20	433	867	217	0	369	0.25
	40-FA50				FA ¹⁾	50	408	510	510	0	369	0.25
	40-SF20				SF ²⁾	20	433	865	0	219	369	0.25

1) FA : Fly-ash

2) SF : Silica fume

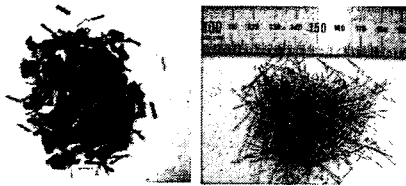
3) MC : Methyl cellulose계 증점제

표 2 섬유의 물리적 성질

종류	비중	길이 (mm)	직경 (μm)	인장강도 (MPa)	인장탄성률 (GPa)	신률 (%)
CF	1.90	6.4	7.0	3,695	239.0	1.4
SCK	7.84	30.0	300.0	2,300	-	-

표 3 혼화재의 물리적 성질

혼화재종류	비중	분말도 (cm ² /g)	강열감량 (%)	습분 (%)	단위수량비 (%)
FA	2.12	2,976	4.10	0.1	101
SF	2.10	200,000	-	-	-



(a) 탄소섬유 (b) 강섬유

그림 1 섬유의 입형

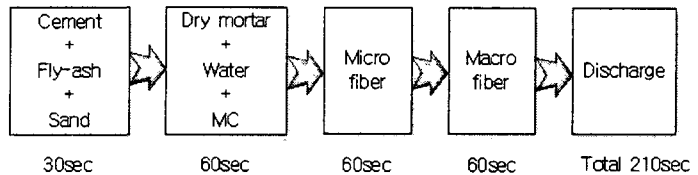


그림 2 비빔방법

탄소섬유(Carbon fiber, 이하 CF)와 휨강성이 높은 3연선 꼬인 강섬유(Steel cord, 이하 SCK)를 사용한 HPHFRCs의 비빔성능, 유동성 및 휨특성을 물결합재비, 혼화재 종류 및 대체율에 따라 평가하고자 하였다.

2. 실험

2.1 시험체 계획 및 사용재료

본 연구에서는 물결합재비, 혼화재 종류 및 대체율에 따른 HPHFRCs의 균지 않은 성상 및 경화성상에서의 특성을 평가하기 위하여 표 1과 같이 6수준의 실험을 계획하였으며, 사용된 섬유의 형상 및 물리적 성질은 그림 1, 표 2에 각각 나타내었고 혼화재의 물리적 성질은 표 3에 나타내었다.

2.2 비빔 및 실험방법

본 연구에서는 그림 2와 같은 절차에 따라 시멘트 복합체를 비빔하였으며, KS L 3136 「수경성 시멘트 모르타르의 공기량 측정방법」 및 KS F 2408 「콘크리트의 휨강도 시험방법」에 준하여 공기량 및 휨강도를 각각 측정하였다. 플로우 시험은 KS L 5111에 준하여 낙하운동 후 가장 긴 직경과 가장 짧은 직경의 값을 측정하여 산술평균값을 채택하였다.

3. 실험결과

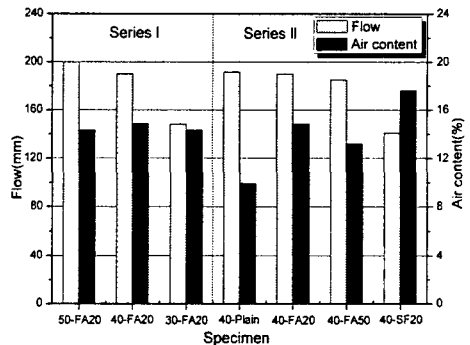


그림 3 플로우 및 공기량

3.1 유동성

그림 3은 CF 및 SCK를 혼합 사용한 HPHFRCCs의 비빔직후 플로우 측정결과를 나타낸 것으로 시리즈 I의 경우 물결합재비가 감소할수록 플로우는 저하되는 것으로 나타났으며, 특히 W/B 30%의 경우 가장 낮게 나타나 고성능 감수제의 사용이 필요한 것으로 사료되었다. 또한, 시리즈 II는 혼화재로서 플라야시(Fly ash, 이하 FA)를 사용한 경우 대체율에 관계없이 Plain과 유사한 수준을 보이고 있으나 실리카흄(Silica fume, 이하 SF)의 경우 고성능감수제의 첨가에도 불구하고 크게 저하하였다. 이는 동일 대체율에 있어서 FA에 비하여 SF의 경우 분말도가 매우 크며 비중이 작아 나타난 현상으로 사료되며, SF의 활용을 위해서는 물결합재비 및 대체율의 적정 수준을 검토해야 할 것으로 판단된다.

3.2 공기량

HPHFRCCs의 비빔직후 공기량 측정결과 그림 4에 나타낸 바와 같이 시리즈 I의 경우 W/B에 관계없이 공기량은 유사한 수준을 보이고 있으며 시리즈 II의 경우 Plain에 비하여 혼화재를 대체한 경우가 높은 공기량을 보이고 있다. 또한 FA에 비하여 SF의 공기량이 높게 나타나고 있으며, FA20의 경우 FA50보다 다소 높은 공기량을 보이고 있다.

3.3 휨거동 특성

그림 4는 각 수준별 시험체의 휨응력-변형곡선을 나타낸 것으로 그림 4(a)에 나타난 바와 같이 W/B가 증가함에 따라 휨응력은 감소하는 경향을 보이고 있으며, 특히 W/B 30% 경우 최대응력 이후 균열 개구부에서 SCK의 인발과 함께 응력이 급격히 저하하는 특성을 나타내었다. 또한 W/B 40% 경우 초기균열 발생이후 약 15MPa 까지는 W/B 30%와 유사한 거동을 보이고 있으나 최대휨응력에 도달한후 W/B 30%보다 완만한 응력저하를 보이고 있다. 한편, W/B 50%의 경우 최대휨응력까지의 거

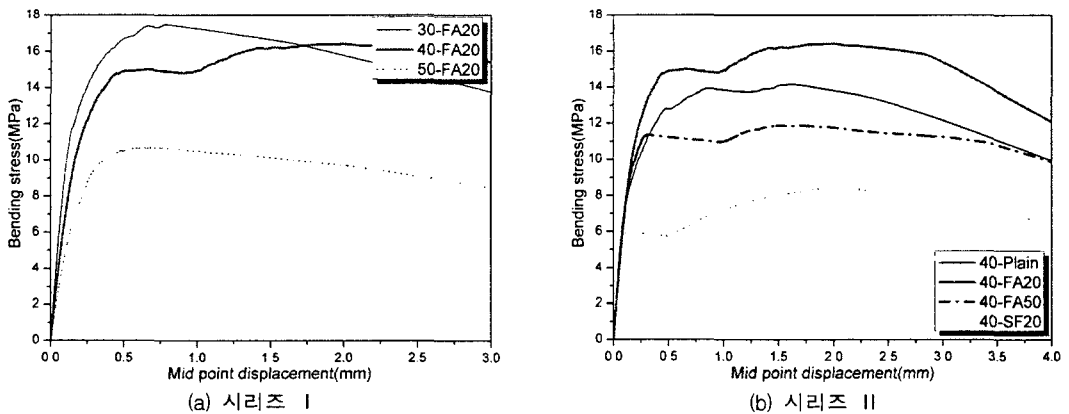


그림 4 휨응력-변형 곡선

표 4 압축강도 및 휨성상 측정결과

시리즈	시험체명	압축강도 f_{cu} (MPa)	초기균열		최대내력		휨강도비 (최대/초기)	휨변위비 (최대/초기)
			응력 (MPa)	변위량 (mm)	응력 (MPa)	변위량 (mm)		
I	50-FA20	30.77	4.85	0.100	10.66	0.619	2.200	6.190
	40-FA20	36.40	4.80	0.066	16.40	1.945	3.417	29.470
	30-FA20	63.52	9.99	0.110	17.51	0.796	1.752	7.236
II	40-Plain	36.10	6.92	0.094	14.15	1.658	2.043	17.638
	40-FA20	36.40	4.80	0.066	16.40	1.945	3.417	29.470
	40-FA50	34.96	7.00	0.100	11.87	1.479	1.697	14.790
	40-SF20	37.89	5.52	0.092	8.36	1.840	1.514	20.000

등은 W/B 30%와 유사한 경향을 보이고 있으나 최대휨응력 이후 매우 완만한 응력저하를 나타내고 있다. 그림 4(b)의 경우 40-FA20을 제외한 나머지 시험체에서 Plain보다 낮은 휨응력을 나타내었다. 표 4는 CF 및 SCK를 혼합 사용한 HPHFRCCs의 압축강도 및 휨성상에 대해 측정된 결과이다. 단조가력 조건하에서의 압축강도 측정결과 물결합재비가 감소할수록 압축강도는 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 W/B 30%에서의 압축강도 증가비율이 매우 높은 것으로 나타났다. 또한 혼화재의 종류 및 혼입율에 따른 압축강도 측정결과 FA를 20 및 50% 대체한 경우와 SF를 20%대체한 경우 모두 Plain과 유사한 수준을 보이고 있으며 SF 20%의 경우 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 3등분점 휨 재하 시험에 의한 초기균열 발생시 휨응력 및 변위량에 대한 측정결과, 시리즈 I의 경우 초기균열 발생시 휨응력은 W/B에 따라 큰 차이를 보이고 있으며, W/B 50 및 40에서는 유사하나 W/B 30에서 크게 증가한 것으로 나타났다. 시리즈 II의 경우 초기균열시 휨응력은 혼화재의 종류 및 대체율에 따라 다소 차이를 보이고 있으며, 40-FA20 및 40-SF20의 경우 Plain에 비하여 낮은 값을 나타내고 있다. 또한 초기균열시 변위량은 W/B, 혼화재의 종류 및 대체율에 관계없이 모두 유사한 값을 나타내었다. 한편, 최대휨응력 및 변위량에 대한 측정결과 시리즈 I, II의 경우 모두 최대휨응력은 W/B, 혼화재 종류 및 혼입율에 따라 큰 차이를 보이고 있으며, W/B가 감소할수록 최대휨응력은 증가하는 것으로 나타났다. 또한 최대휨응력시 중앙점 변위량 측정결과 W/B 40% 및 FA20에서 휨 변형능력이 가장 높게 나타났다. 초기균열시 휨응력에 대한 최대휨응력의 비에 대한 측정결과 W/B, 혼화재의 종류 및 혼입율에 따라 큰 차이를 보이고 있으며 40-FA20에서 가장 높게 나타나 초기균열 발생 이후 휨응력 상승이 가장 우수한 것으로 판단되었다. 또한 초기균열시 변위량에 대한 최대변위량의 비에 대한 측정결과 40-FA20의 경우 초기균열 발생 이후 가장 높은 변위량 상승을 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 물결합재비, 혼화재의 종류 및 대체율에 따른 하이브리드 HPHFRCCs의 시공성 및 휨 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 물결합재비, 혼화재의 종류 및 대체율에 따른 공기량 분석결과 물결합재비의 영향은 작은 반면, 혼화재 종류의 영향은 크게 작용하는 것으로 나타났다.
- 2) 물결합재비에 따른 플로우량을 측정된 결과 물결합재비가 감소할수록 플로우는 저하하는 것으로 나타났으며 실리카흙의 경우 고성능감수제의 첨가에도 불구하고 플로우량이 크게 저하되어 실리카흙의 활용을 위해서는 물결합재비 및 대체율의 적정 수준을 검토해야 할 것으로 사료된다.
- 3) 또한 본 연구범위내에서 휨거동특성에 대한 분석결과 물결합재비 40%, FA를 20%대체한 경우 가장 우수한 휨강도 및 휨변형특성을 나타내었다.

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.

참고문헌

1. Victor C. Li, Large Volume, High-Performance Applications of Fibers in Civil Engineering, Journal of Applied Polymer Science, Vol.83, pp660~686, 2002
2. 윤현도, 양일승, 한병찬, 전에스더, 문연준(2004), "복합섬유보강 고인성 시멘트 복합체의 특성." 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 24(1), pp 27~30.
3. Kawamata, A, Mihashi, H. and Fukuyama, H., "Flexural failure properties of hybrid fiber reinforced cementitious composites", Proceedings of AIJ Tohoku Chapter Architectural Research Meeting, No.63, pp69-72(in Japanese), 2000
4. 社團法人, 日本コンクリート工學協會, "高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う", 高靱性セメント複合材料の性能評價と構造利用研究委員會報告書, 2002.01