

섬유 혼입 비율에 따른 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 재료특성

Effect of Fiber Blending on Material Property of Hybrid Fiber Reinforced Concrete

김 학 연* 서 기 원* 이 옥 재* 김 남 호** 박 춘 근***

Kim, Hag Youn. Seo, Ki Won. Lee, Wok Jae. Kim, Nam Ho. Park, Choon Gun.

ABSTRACT

In this study, an effect of fiber blending on material property of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) was evaluated. Also, optimized association and the mixing rate of fiber for HFRC was determined.

Test result shows, in the case of mono fiber reinforced concrete, use of steel fiber in concrete caused increment in tensile and bending strength as the blended ratio increases, while use of carbon fiber and glass fiber caused increment in compressive strength.

Use of hybrid fiber reinforcement in concrete caused a significant influence on its fracture behavior; consequently, caused increase by mixing rate of steel fiber and contributed by carbon fiber, glass fiber, celluloid fiber in reinforcement effect in order.

1. 서론

콘크리트는 압축강도 강성능이 우수하여 건축 재료로써 널리 사용되어 왔으나 인장강도가 낮으며 또한 응력을 받을 때 취성적인 파괴성향을 갖고 균열을 발생 시키는 본질적인 단점을 가지고 있다. 섬유보강콘크리트(Fiber Reinforced Concrete, FRC)는 응력을 받을 때 섬유의 보강작용으로 많은 파괴에너지가 흡수되어 일반 콘크리트보다 큰 인성 및 휨강도를 갖는다. 하이브리드 섬유보강콘크리트(Hybrid Fiber Reinforced Concrete, HFRC)는 섬유종류나 형상이 다른 2종 이상의 섬유를 적당한 조합에 의해 콘크리트에 혼입시킴으로서 각기 다른 섬유가 역할을 분담하여 단일섬유 보강 시 얻을 수 없는 효과를 발휘하기 때문에, 최근 관심의 대상이 되고 있으며, 높은 인장강도와 인성을 갖는 각종 단상 섬유를 콘크리트에 분산시켜 재료 특성을 개선하려는 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 단일섬유와 하이브리드섬유 보강효과를 알아보기 위해 각 섬유의 조합과 혼입율에

* 정회원, 정회원, 한국기술교육대학교 대학원

** 정회원, 한국기술교육대학교 부교수, 공학박사

*** 정회원, 한국생산기술연구원 수석 연구원, 공학박사

따른 강도증진계수를 비교 평가하고, 휨거동 특성에서 에너지 흡수 능력과 높은 휨강도 값을 갖는 섬유 최적 조합과 섬유의 혼입율을 검토하였다.

2. 실험 계획 및 방법

본 실험에 사용된 재료는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 고밀도의 매트릭스를 구성하기 위해 분말도 $20,000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 실리카 흙, 분말도 $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 고로슬래그가 매트릭스 내부와 섬유 계면의 부착특성 개선을 위해 사용되었다. 또한 매트릭스를 보강하기 위해 강섬유, 탄소섬유, 유리섬유, 셀룰로이즈섬유가 사용되었으며, 실험에 사용된 재료 및 섬유의 특성을 Table 1, Table 2에 정리하였다. 낮은 바인더 배합비로 인해 혼합재와 섬유들이 매트릭스 내에 일정하게 분산되고 혼합 가능한 배합을 유도하기 위해 폴리카르본산계 고성능감수제 2.0%를 사용하였으며, 골재는 잔골재 비중 2.50의 자연모래, 최대치수 13mm의 굵은 골재를 사용하였다. 콘크리트 믹싱은 용량40ℓ의 회전식 믹서를 사용하였고, 시멘트, 모래, 골재, 실리카 흙, 고로슬래그를 투입한 후 60초간 건비빔을 실시하고 물과 고성능감수제를 첨가하여 60초간 비빔을 실시하였으며 소정의 유동성을 확보한 후 섬유를 혼입하고 90초간 혼합하였다. 섬유의 Table.4의 배합에 대한 각각의 압축강도, 인장강도, 휨강도의 시편을 제작하였고, 25℃에서 재령 28일까지 습윤 양생을 실시하였다. 본 연구에서 섬유 혼입율과 조합에 따른 영향을 검토하기 위해 단일섬유로 강섬유, 탄소섬유, 유리섬유, 셀룰로이즈섬유 4수준의 혼입율을 변화시켰고, 하이브리드 섬유보강 효과를 검토하기 위해 강섬유에 유리섬유, 탄소섬유, 셀룰로이즈 섬유를 혼합하였다. 섬유의 종류 및 혼입율에 따른 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 역학적 재료특성 및 섬유의 최적 조합과 섬유의 혼입율을 비교·검토하기 위한 배합표와 매트릭스는 Table 3, 4와 같다.

Table 1 Physical Properties of Used Materials

Cement	Type I ordinary portland cement Density : $3.15\text{g}/\text{cm}^3$, Specific surface area : $3,200\text{cm}^2/\text{g}$	Coarse Agg. (CA)	Gmax : 13mm, Density : $2.64\text{g}/\text{cm}^3$
Silica Fume (SF)	Density : $2.20\text{g}/\text{cm}^3$, Specific surface area : $20,000\text{cm}^2/\text{g}$	Fine Agg. (FA)	Density : $2.50\text{g}/\text{cm}^3$
Blast Furnace Slag (BFS)	Density : $2.91\text{g}/\text{cm}^3$, Specific surface area : $6,000\text{cm}^2/\text{g}$	Super-plastisizer (SF)	Polycarboxylate

Table 2 Physical Properties of Fibers

Fiber Type	Geometry(mm)			Specific gravity	Tensile strength(Mpa)	Modulus of elasticity(Gpa)
	Length	Diameter	Aspect ratio			
Steel fiber	30	0.5	60	7.85	700	205
Carbon fiber	6	0.018	333	1.63	590	30
Glass fiber	25	0.18	138	2.8	150	28
Cellulose fiber	2.92	0.015	200	1.5	510	61

Table 3 Mix Proportion

W/B	S/a (%)	Vf (kg)	Unit(%)					S.P. (g)	
			W	C	BFS	SF	FA		CA
26	46		6.8	19.6	5.23	1.31	27.13	32.46	392

Table 4 Matrix of Hybrid Fiber Reinforced Concrete

		Glass Fiber		Carbon fiber		Cellulose Fiber		
		0	0.25	0.5	0.25	0.5	0.25	0.5
Steel Fiber	0	○(No.1)	○(No.6)	○(No.7)	○(No.8)	○(No.9)	X	X
	1.0	○(No.2)	○(No.10)	○(No.11)	X	X	○(No.12)	○(No.13)
	1.25	○(No.3)	○(No.14)	X	○(No.15)	X	X	X
	1.5	○(No.4)	○(No.16)	X	○(No.17)	X	X	X
	2.0	○(No.5)	X	X	X	X	X	X

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단일섬유 보강 효과

단일섬유 보강 효과를 알아보기 위해 Fig.1의 강섬유 강도 증진율을 살펴보면, 강섬유 혼입율이 증가할수록 강도 증진율이 증가하는데, 인장강도나 휨강도의 증진율이 압축강도 증진율에 비해 약 4.5~5배 높은 것을 살펴 볼 수 있다. 강섬유는 콘크리트나 탄소섬유, 유리섬유 보다 인장강도와 탄성계수 값이 크기 때문에(Table.2) 강섬유의 혼입 비율이 증가할수록 콘크리트의 휨강도 및 인성이 증가한다고 알려져 있다. 이러한 경향은 Fig.1에서와 같이 본 연구를 통하여 확인되어, 강섬유의 혼입율이 증가할수록 인장강도 및 휨강도 증진에 매우 유의한 효과를 나타내었다. 이는 강섬유가 가지고 있는 자체의 재료특성에 기인한 것으로 판단된다. 반면 강섬유의 혼입율이 낮으면, Fig 1에서와 같이 휨강도 증진율이 강섬유혼입율 2.0%일 때 98%보다 0.5%일때 26%로 강섬유 혼입율이 낮을수록 강도 증진율이 낮아지는 것을 살펴 볼 수 있다. 이는 강섬유의 혼입량이 낮을수록 강섬유의 혼입량이 적어 강섬유의 신장과 인발에 의해 항복점 이후 응력에 대해 저항하지 못하고 서서히 감소하는 것으로 판단된다. 압축강도에 있어서 Fig 2에 나타난 바와 같이, 압축강도의 경우 강섬유의 혼입율이 2.0%이상이면 재료 비범시 섬유 혼입의 뭉침 현상, 다짐 불량 등의 시공적인 요인으로 인해 강도가 저하되는 것으로 조사되었다.

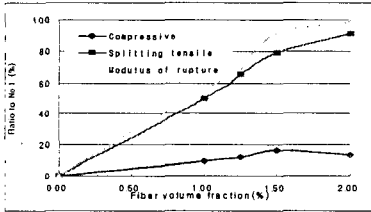


Fig.1 Steel Fiber Volume on Ratio to No 1.(%)

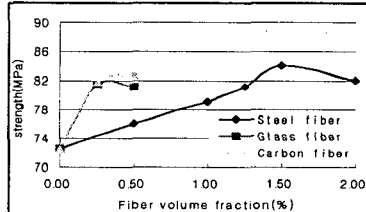


Fig.2 Effect of Mono Fiber Volume on Compressive Strength

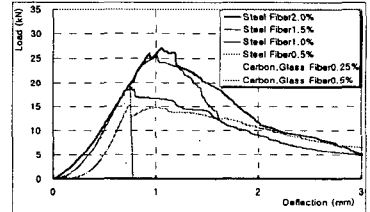


Fig.3 Effect of Mono Fiber Volume on Modulus of Rupture

유리섬유보강 콘크리트(Table.5 No.6, No.7)와 탄소섬유보강 콘크리트(Table.5 No.8, No.9)의 경우, Table.5의 섬유 혼입량 증가에 따른 강도 증진율을 살펴보면, 휨강도 및 인성 증진에는 별다른 영향을 주지는 못하는 것으로 나타났다. Fig.2의 압축강도 경우는 섬유 혼입량 증가에 따라 강도가 증가하였으며, 탄소섬유가 유리섬유에 비하여 약간 우수한 것으로 조사되었다.!

Table 5 Strength test results and strength-effectiveness on hybrid fiber reinforced concrete(28day)

Exp. No.	Compressive		Splitting Tensile		Modulus of Rupture		Exp. No.	Compressive		Splitting Tensile		Modulus of Rupture	
	Measured (MPa)	Ratio to No 1.(%)	Measured (MPa)	Ratio to No 1.(%)	Measured (MPa)	Ratio to No 1.(%)		Measured (MPa)	Ratio to No 1.(%)	Measured (MPa)	Ratio to No 1.(%)	Measured (MPa)	Ratio to No 1.(%)
No.1	72.4	-	5.7	-	6.1	-	No.10	82.4	82.4	9.3	76.93	11.2	83.61
No.2	79.0	9.12	8.5	49.12	9.5	55.74	No.11	83.4	83.4	10.1	84.21	12.4	103.28
No.3	81.1	12.02	9.4	64.91	10.4	70.49	No.12	83.6	83.6	6.5	14.04	8.2	34.43
No.4	84.1	16.16	10.2	78.95	11.7	91.80	No.13	79.4	79.4	7.8	36.84	8.9	45.90
No.5	82.0	13.26	10.9	91.23	12.1	98.36	No.14	81.8	81.8	10.2	87.72	12.6	106.56
No.6	81.5	12.57	7.4	26.82	7.7	9.84	No.15	86.6	86.6	11.1	94.74	14.1	131.65
No.7	81.2	12.15	7.5	31.58	8.7	26.23	No.16	86.2	86.2	10.8	100.00	13.9	127.87
No.8	81.7	12.85	7.7	35.09	7.7	9.84	No.17	88.4	88.4	11.9	129.82	14.8	159.02
No.9	83.9	14.50	8.1	42.11	8.7	26.23							

이러한 경향이 나타난 이유는 Fig.3의 Carbon, Glass Fiber0.25%, Carbon, Glass Fiber0.5%를 살펴볼 때, 본 실험에서 수행된 탄소섬유와 유리섬유의 혼입율이 적어 매트릭스 내에 충분하게 보강 되지 않아서, 항복점 이후 미세균열의 제어를 막지 못해 충분한 파괴에너지를 흡수하지 못하고 취성파괴를 일

으킨 것으로 판단된다. 충분한 파괴에너지의 흡수와 휨강도 값을 갖기 위해서는 충분한 섬유 혼입이 있어야 할 것으로 판단된다.

3.2 하이브리드섬유 보강 효과

하이브리드 섬유 보강 효과를 알아보기 위해, 마이크로 섬유로 탄소섬유, 유리섬유, 셀룰로이즈섬유와 매크로 섬유로 강섬유를 혼합 사용한 하이브리드배합의 휨강도증진율과 단일섬유 보강콘크리트로 강섬유의 휨강도증진율을 Fig.4를 통해 비교해보면, 셀룰로이즈섬유를 제외하고 하이브리드 배합의 경우 보강 효과가 더 높고 강섬유의 혼입량이 1.0%보다 많은 1.25%일 때 휨강도증가율이 높은 것을 살펴 볼 수 있다. 또한 Fig.5의 그래프를 살펴보면 강섬유의 혼입량이 1.25%로 많은 No17, No16번 배합이 강섬유 혼입량이 1.0%인 No16, No15 배합보다 휨강도 값이 가장 높은 것을 살펴볼 수 있다. 따라서 강섬유의 혼입율이 많고 탄소섬유가 혼입될 때, 인성 및 휨강도 증진에 매우 유의한 효과를 나타내고, 강섬유 1.5%, 탄소섬유0.25%로 치환된 No.17 배합의 경우 가장 높은 휨강도 값과 휨강도증가율을 보여주고 있다. 하이브리드 보강콘크리트의 경우, 강섬유가 탄소섬유나 유리섬유에 비해 높은 인성을 갖고, 탄소섬유, 유리섬유는 강섬유보다 우수한 파괴인성을 가지고 있어, 이들 섬유가 하이브리드 형태로 보강 되어 각 섬유의 개별특성인 고강도와 고인성 특성이 동시에 발현된 것으로 보인다.

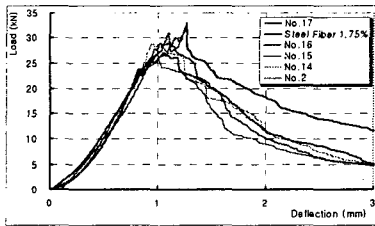


Fig.5 Effect of Hybrid Fiber Volume on Modulus of Rupture

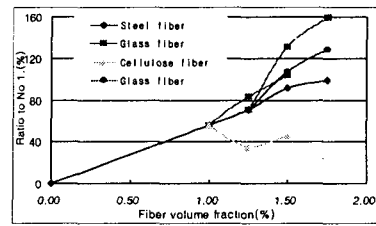


Fig.4 Hybrid Fiber Volume on Ratio to No 1.(%)

마이크로 섬유의 보강효과를 비교하기 위해 Fig.4를 살펴보면 강섬유 1.0%와 1.25%에 탄소섬유가 보강된 No15, No.17배합의 경우 섬유를 보강하지 않은 경우보다 130, 160%의 휨강도 증진율을 보이고, 그 다음 유리섬유가 보강된 No14, No.16배합이 105%, 125%의 휨강도 증진으로 보강효율에 기여하는 것으로 나타났다. 하지만 셀룰로이즈섬유의 경우 오히려 강도 증진율이 저하되었는데, 이는 섬유의 특성상 제품이 뭉쳐 있고, 배합 과정에서 섬유가 충분히 분산되지 않은 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구를 통하여 하이브리드 섬유보강에 따른 다음과 같은 보강효과가 확인되었다.

- 1) 단일 배합의 경우 탄소섬유와 유리섬유의 경우 휨강도 및 강도 증진율에는 별다른 영향을 주지는 못하지만 압축강도 증진에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.
- 2) 강섬유는 혼입율이 증가 할수록 인성 및 휨강도 증진에 매우 유의한 효과를 나타내지만, 강섬유의 혼입율이 2.0%이상이면 재료 비빔시 섬유의 뭉침 현상, 다짐 불량 등으로 인해 강도가 저하 되는 것으로 확인되었다.
- 3) 하이브리드 보강효과는 강섬유의 혼입율에 따라 강도증진율과 휨강도 값 증가에 가장 큰 영향을 미치고 탄소섬유, 유리섬유, 셀룰로이즈섬유 순으로 보강에 기여하는 것으로 나타났다.
- 4) 17개의 실험조건에서 얻어진 최적조건은 강섬유 1.5%, 탄소섬유0.25%로 치환된 경우에 가장 높은 휨강도 값과 강도증가율을 보여주고 있어, 최적조건으로 추정되었다.