

하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨성능 평가

Assessment of flexural performance of hybrid fiber reinforced concrete.

김 학 연^{*} 김 남 호^{**} 박 춘 근^{***}
Kim, Hag Youn. 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, Compare and evaluates collating and mechanical property by the mixing rate of fiber for HFRC was determine. Modulus of rupture and strength effectiveness of Hybrid Fiber Reinforced Concrete mixed with macro-fiber(steel fiber) and micro-fiber(glass fiber, carbon fiber, cellulose fiber). Test result shows, in the case of mono fiber reinforced concrete. As the steel fiber mixing rate increases to 1.5%, the strength effectiveness promotion rate rises. However, when is 2.0%, strength decreases. In the case of hybrid fiber reinforcement concrete, synergy effect of micro fiber and macro fiber happens and higher Modulus of rupture and strength effectiveness appears than mono-fiber reinforcement concrete. Use of hybrid fiber reinforcement in concrete caused a significant influence on its fracture behavior; consequently, caused increase by mixing rate of steel fiber + carbon fiber and contributed by steel fiber + glass fiber, steel fiber + celluloid fiber in reinforcement effect in order. And was expose that steel fiber(1.5%) + carbon fiber(0.5%) is most suitable association.

1. 서론

지금까지 건설재료로 가장 많이 사용되고 있는 콘크리트는 내구성 및 경제성이 우수하여 널리 사용되는 구조재료 중에 하나이지만 상대적으로 낮은 인장, 휨강도 및 낮은 파괴계수와 취약한 균열 저항성으로 인해 동적하중 하에서 급작스런 파괴를 일으키는 취성적 성질을 가지고 있다. 균열의 생성 및 성장을 억제하는 등 콘크리트의 역학적 성질의 개선을 통해 콘크리트의 단점을 보완하기 위한 방법으로 불연속적이고 단상인 섬유재료를 콘크리트 속에 불규칙하게 분산시켜 넣은 것을 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete, FRC)라 한다. 하지만 콘크리트 매트릭스와 섬유, 골재의 경계면 속에 아주 미세한 크기의 다양한 공극 및 결함이 분포하기 때문에 한 종류의 크기만을 갖는 단일 섬유 형태로는 일정 수준 이상의 섬유 보강 효과를 기대하기 어렵다. 따라서 섬유의 종류나 형상이 다른 2종 이상의 섬유를 적당한 조합에 의해 콘크리트에 혼입시킨 하이브리드 섬유보강 콘크리트(Hybrid Fiber

* 정회원, 정회원, 한국기술교육대학교 대학원

** 정회원, 한국기술교육대학교 부교수, 공학박사

*** 정회원, 한국생산기술연구원 수석 연구원, 공학박사

Reinforced Concrete, HFRC)는 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 연구가 진행되고 있다.

그러나 기존의 하이브리드 섬유보강 콘크리트 연구는 섬유를 하이브리드 형태로 혼입할 경우 단일 섬유보강 콘크리트에 비해 강도 및 인성의 증진에 효과적임을 보여주긴 하였지만, 각 섬유들 사이의 최적 혼입율과 조합에 대한 체계적 연구에 대해서는 관심을 소홀히 해왔다. 따라서 본 연구에서는 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 사용을 활성화 시키기 위한 기초적 연구로서 섬유 조합에 따른 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 거동 특성을 파악하고자 한다. 이를 위하여 각 섬유의 조합과 혼입율에 따른 강도증진계수를 비교 평가하고, 휨거동 특성에서 에너지 흡수능력과 높은 휨강도 값을 갖는 최적 조합과 혼입율을 검토하였다.

2. 실험 계획 및 방법

본 실험에 사용된 재료는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 고밀도의 매트릭스를 구성하기 위해 분말도 20,000cm²/g의 실리카 흙, 분말도 6,000cm²/g의 고로슬래그가 매트릭스 내부와 섬유 계면의 부착특성 개선을 위해 사용되었다. 또한 매트릭스를 보강하기 위해 강섬유, 탄소섬유, 유리섬유, 셀룰로이즈섬유가 사용되었으며, 실험에 사용된 섬유의 특성을 Table 1에 정리 하였다. 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 혼합 하였다.

Table.3의 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 각 섬유의 조합과 혼입율에 따른 휨거동 특성에서 에너지 흡수능력과 높은 휨강도 값을 갖는 최적 조합과 혼입율을 비교·검토하기 위한 배합표와 매트릭스는 Table 2, 3과 같다.

Table 1 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 2 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 3 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

Table 4 Toughness Index

번호	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.10	NO.11
I5	4.54	4.901	4.92	5.14	4.91	5.19
I10	7.08	8.079	8.00	8.71	8.20	9.39
I20	11.74	13.97	14.95	15.96	14.97	16.71
I30	15.95	18.31	19.74	22.19	20.56	23.55
번호	NO.12	NO.13	NO.14	NO.15	NO.16	NO.
I5	5.32	6.02	5.77	7.31	4.66	5.60
I10	8.39	8.60	9.29	9.11	7.73	9.25
I20	11.35	11.88	16.14	16.15	14.23	16.47
I30	13.73	15.28	21.80	22.04	17.86	22.07

3.1 단일섬유 보강 효과

섬유보강 콘크리트의 성능 향상은 인성의 증가로 나타난다. 표 4는 단일섬유와 하이브리드섬유 보강콘크리트의 인성지수 값을 나타내고 있다. 강섬유의 혼입량이 증가함에 따라 인성지수가 증가하는 것으로 나타났다.

그림2의 인성지수가 각 I5보다 I10, I20, I30구간에서 더 높게 증가하는 양상을 보이는데 이는 하중-처짐 곡선에서 구한 면적이 응력을 받을수록 넓어져 에너지 면적비인 인성이 증가하기 때문이다. 섬유의 혼입량이 증가 할수록 강섬유의 혼입량이 증가함에 따라 매트릭스 내에 분포하는 섬유의 절대 개수가 증가함에 따라 초기 균열발생 및 균열을 제어하여 항복점 이후 처짐 연화에 상대적으로 저항할 수 있는 에너지 흡수 능력이 증가되는 것으로 나타났다. 이는 강섬유가 매크로 균열들 사이의 응력전달 브리징(bridging) 작용을 하고 매트릭스와 섬유계면의 부착력을 통해 뽑힘(pull-out)에 우수한 작용을 하기 때문이다. 따라서 험공시체가 항복이후의 파괴거동이 연성으로 유도되고 인성이 대폭 증가 하는 것을 확인할 수 있다.

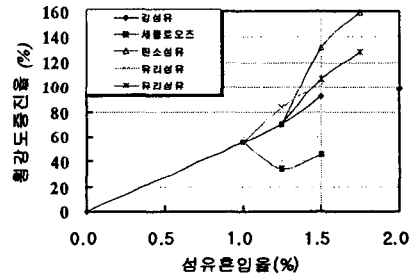
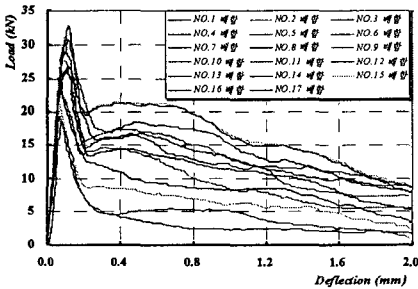


Fig.1 Effect of Hybrid Fiber Volume on Modulus of Rupture Fig.2 Hybrid Fiber Volume on Ratio to No 1.(%)

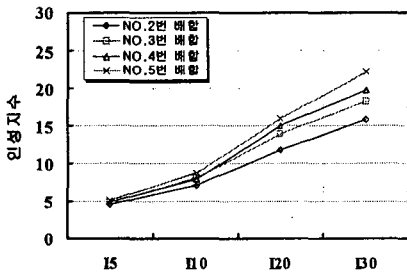


Fig.3 Toughness Index (steel fiber)

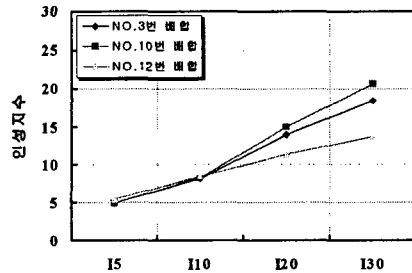


Fig.4 Toughness Index (hybrid fiber 1.25%)

3.2 하이브리드섬유 보강 효과

총 섬유 혼입율이 1.25%일 때 파괴에너지를 흡수하는 능력은 그림4와 같이 강섬유와 유리섬유의 조합인 NO.10번 배합이 가장 우수한 것으로 나타났다. 특히 I5, I10, 구간에서 보다 실험이 진행되면서 공시체에 더 많은 하중이 전가되는 I20, I30구간에서 인성의 증가가 뚜렷하게 나타난다. 그림 1을 살펴 보면 강섬유와 유리섬유의 하이브리드 조합인 NO.10 배합이 강섬유를 단일로 사용한 NO.3배합보다

휨강도 및 항복점 이후 처짐 연화에 상대적으로 저항할 수 있는 인성지수가 큰 것을 알 수 있다. 총 섬유 혼입율이 증가 할수록 인성지수의 증가폭도 커지는 것을 그림 5를 통해 확인 할 수 있다. 특히 I5, I10, 구간에서 보다 I20, I30구간에서 인성의 증가가 뚜렷하게 나타난다. 이는 초기 인성증진에는 큰 영향을 미치지 않는 반면 변위가 증가함에 따라 인성증가의 유효한 효과를 나타내는 것으로 판단된다. 탄소섬유로 보강된 하이브리드섬유보강 콘크리트의 하중-처짐 곡선은 항복점에 도달 이후 급속도로 진전되기까지 많은 마이크로 균열을 효과적으로 제어하며 항복점 이후에도 마이크로 균열을 편향시켜 매크로 균열로 진전되는 과정을 일정 수준 제어한다. 또한 마이크로 섬유는 마이크로 균열을 효과적으로 제어함으로써 매트릭스의 급속한 손상진전을 억제하며 이를 통해 주균열 발생 이후에 매크로 섬유(강섬유)의 뽑힘(Pull-out)작용에 간접적인 기여를 하게 된다. 이러한 특성으로 인해 가장 높은 인성지수를 나타내고 있다. 이론적으로 섬유의 절대 개수가 많아지면 인성지수 또한 그 만큼 증가된다. 본 실험에서도 하이브리드 조합 섬유의 혼입율이 가장 높은 NO16, 17번 배합의 인성지수 및 휨강도증진율이 가장 높게 나타났다.

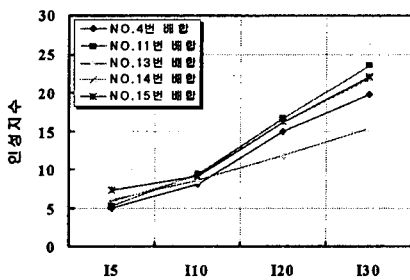


Fig.5 Toughness Index (hybrid fiber 1.5%)

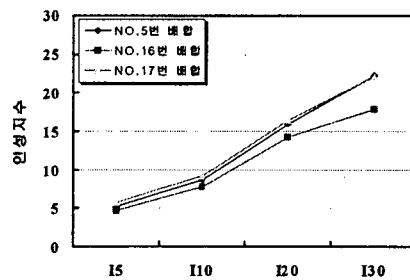


Fig.6 Toughness Index (hybrid fiber 1.75%)

4. 결론

본 연구의 범위 내에서 섬유혼입 비율에 따른 하이브리드섬유보강 콘크리트의 휨성능 특성에 대한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 단일섬유 보강의 경우 강섬유의 혼입량이 증가 함에 따라 인성지수가 증가하는 것으로 나타났다. 인성지수가 각 I5보다 I10, I20, I30구간에서 더 높게 증가하는 양상을 보이는데 이는 하중-처짐 곡선에서 구한 면적이 용력을 받을수록 넓어져 에너지 면적비인 인성이 증가하기 때문이다
- 2) 하이브리드섬유 보강의 경우 총 섬유 혼입율이 1.25%의 하이브리드 배합의 경우 파괴에너지를 흡수하는 능력은 강섬유와 유리섬유의 조합인 NO.10번 배합이 가장 우수한 것으로 나타났다. 특히 I5, I10, 구간에서 보다 실험이 진행되면서 공시체에 더 많은 하중이 전가되는 I20, I30구간에서 인성의 증가가 뚜렷하게 나타난다.
- 3) 하이브리드섬유 보강 혼입율이 증가 할수록 인성지수의 증가폭도 커지는데, 특히 I5, I10, 구간에서 보다 I20, I30구간에서 인성의 증가가 뚜렷하게 나타난다. 이는 초기 인성증진에는 큰 영향을 미치지 않는 반면 변위가 증가함에 따라 인성증가의 유효한 효과를 나타내는 것으로 판단된다.
- 4) 하이브리드 보강효과에서 마이크로 섬유의 영향을 살펴 보면, 강섬유+탄소섬유 > 강섬유+유리섬유 > 강섬유+셀룰로오즈섬유 순으로 보강효과가 확인 되었고, 강섬유(1.5%)+탄소섬유(0.25%)가 최적 조합인 것으로 나타났다.

참고 문헌

Banthia, N. and J. Sheng "Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites". Cement and Concrete Composites, Volume 18, Issue 4, 1996, Pages 251-269.