

분사식 FRP에 의한 구조물의 보강 성능 및 반발률 평가

Evaluation on Strengthening Capacities and Rebound Rate of Structures with Sprayed FRP

한 승 철* 양 준 모** 윤 영 수***
Han, Seung Chul Yang, Jun Mo Yoon, Young Soo

Abstract

This paper investigates experimentally the confining effect, strengthening capacity and rebound rate of sprayed Fiber-Reinforced-Polymer (SFRP). From the method, resin and chopped fibers are sprayed separately from the nozzle with high pressure, and then they are attached to the concrete surface, so structure could be repaired. To evaluate the strengthening effect of sprayed FRP, cylindrical specimens and beam specimens were strengthened with SFRP. As main material of FRP, glass fiber and polyester resin are used. To investigate the optimum condition of sprayed FRP, the effects of fiber length, coating thickness, fiber volume ratio and concrete strength were examined. Capacities of sprayed FRP method were also compared to the FRP sheet method. In case of the sprayed FRP, rebound rate is important parameter considering economical efficiency and constructibility, so rebound rate of was discussed. From the test results, optimum conditions of sprayed FRP were determined. SFRP method showed superior strengthening capacities than FRP sheet method.

요 지

본 논문은 분사식 FRP의 압축 구속효과와 휨 보강 효과 및 분사식 FRP의 반발률에 대한 실험적 연구이다. 분사식 FRP란 레진과 짧게 잘려진 섬유를 고압의 공기에 의해 적용면에 분사하여 보강하는 기법이다. 분사식 FRP의 구속 및 휨 보강 효과를 알아보기 위하여 원주형 공시체와 휨 공시체를 제작하여 FRP를 분사하여 보강하였고, 보강 재료로 유리섬유와 폴리에스테르 수지를 사용하였다. 최적의 보강 조건을 알기 위해 섬유 길이, 보강 두께, 섬유 혼입비, 콘크리트 강도에 따른 실험을 실시하였고, 분사식 FRP 보강법을 섬유 매트에 의한 보강법과 비교하였다. 또한, 분사식 FRP의 반발률 역시 평가하였다. 실험을 통하여 분사식 FRP의 최적 조건을 결정하였다. 본 연구의 분사식 FRP 보강은 유리 섬유 매트에 의한 보강법 이상의 성능을 발휘하였다.

Keywords : Confining effect, Flexural strengthening, Glass fiber, Sprayed FRP, Polyester, Rebound rate

핵심 용어 : 구속효과, 휨보강, 유리 섬유, 분사식 FRP, 폴리에스테르, 반발률

* 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 대학원

** 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 대학원

*** 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 교수

E-mail : ysyoon@korea.ac.kr 02-3290-3740

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2008년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

최근 들어, 기존 구조물의 고강도화 및 환경문제로 인한 내구성능 저하로 인해 구조물의 보수보강에 대한 사회적 요구가 증대되고 있다. 이에 따라 강판을 이용한 보강 및 FRP 보강 방법이 콘크리트 구조물의 보강법으로 많이 활용되고 있다. 하지만, 강판 보강은 높은 단위중량으로 인한 수송 및 작업의 어려움, 그리고 부식으로 인한 단면 감소로 인해 그 수요가 점점 줄어들고 있다. 반면에, FRP는 시공이 빠르고, 가벼우며, 수축 및 팽창이 상대적으로 작고, 유지 보수 기간이 길다는 장점 때문에 점점 활용도가 높아지고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

FRP 보강 방법 중에서, FRP sheet 부착에 의한 보강이 널리 사용되고 있으나, 이런 FRP sheet 부착 공법은 실제 몇 가지 단점을 내포하고 있다. 우선, 낮은 연성거동을 보이므로 구조물이 취성 파괴 거동을 보인다는 것과, FRP sheet가 비등방성 재질이므로 구조적 거동을 예측하기 어렵고, 시공할 때 0°, ±45°, ±90° 등의 방향으로 배열되기 때문에, 인장강도, 탄성계수 그리고 열 팽창율 등의 물성이 배열 각도에 따라 그 거동이 달라질 수가 있는 점이다.

이러한 단점을 보완하고자, 본 연구에서는 분사식 FRP에 의해 보강된 콘크리트의 거동에 대해 연구하였다. 분사식 FRP 보강 방법은 잘게 잘린 섬유와 레진을 스프레이 건(spray gun)을 통해서 보강면에 분사함으로써 보강하는 공법이다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 본 공법 특징은 다음과 같다. 섬유가 방향성이 없이 분사되어 보강면에 부착되므로 구조물이 등방성을 가지게 되고, 섬유 매트에 의해 보강된 구조물보다 연성 거동을 보이게 된다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 또한, 설계자가 보강 상황에 따라 분사두께, 섬유길이 등의 조합을 조절할 수 있게 된다. 또한, 시공성을 고려한다면, 기존 보강방법에 비해 완벽한 표면처리가 생략될 수 있기 때문에, 보강 과정이 단순화 될 수 있다. 마지막으로, 작업할 넓은 면적을 필요로 하지 않을 뿐만 아니라, 시공시 많은 인원이 필요하지 않기 때문에, 인건비를 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 분사식 FRP에 의해 보강된 콘크리트 시편의 구속효과와 휨보강 성능을 평가하였다. 또한, 본 공법의 특성상 섬유와 수지로 구성된 FRP 복

합체가 콘크리트 면 위에 분사될 때, 일부 섬유와 수지가 콘크리트 면에 달라붙지 못한 채 반발되어 떨어져 나오게 된다. 이 반발률은 시공비, 작업성뿐만 아니라 구조물의 보강 성능에도 큰 영향을 미치게 되므로, 분사식 FRP의 반발성능 또한 평가하였다.

2. 실험 장비 및 재료

본 연구에서는 매그넘비너스 사의 스프레이 장비를 사용하였다.(Fig. 1) 분사 장비는 에어 컴프레서와 연결되어야 하는데, 이는 수지 및 섬유를 스프레이 건에서 고압으로 분사하기 위함이다. 분사 장비에서 섬유 절단 장치와 분사 노즐이 매우 중요한데, 섬유 절단장치는 섬유 가닥을 요구되는 길이로 잘라 분사할 수 있어야 하고, 분사 노즐은 분사되는 레진과 경화제의 비율을 조절하고 요구되는 압력으로 분사할 수 있어야 한다.

분사 노즐은 수지와 경화제의 혼합 방식에 따라 2점 분사 노즐과 1점 분사 노즐로 구분할 수 있다. 2점 분사 노즐은 레진과 경화제가 각각 다른 노즐에서 분사되어 외부 대기중에서 혼합된 후, 콘크리트 면에 달라붙게 되는 반면에, 1점 분사 노즐은 레진과 경화제가 노즐 내부에서 먼저 혼합되어 외부로 분사되는데, 이는 경화제의 비율을 일정하게 유지시키게 된다. 본 연구에서는 1점 분사 노즐을 사용하였다.

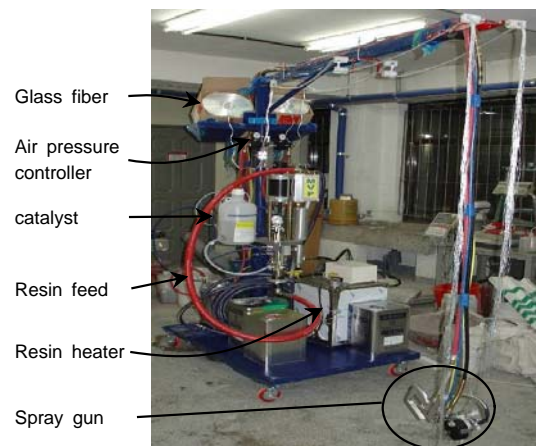


Fig. 1 분사식 FRP 장비

오늘날, 높은 기계적 물성으로 인해 탄소섬유가 FRP 보강 섬유로서 널리 사용되고 있다. 하지만, Furuta의 연구⁽⁶⁾에 따르면, 분사식 FRP에 탄소섬유와 유리섬유를 적용하는데 있어서 물성의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 기본 물성 실험 결과, 탄소섬유와 유리섬유의 인장강도는 각각 117.1 MPa, 112.9 MPa 로 비슷한 강도를 나타냈고, 파단시의 인장변형률은 각각 0.0078, 0.0148로 유리섬유가 약 2 배의 인장 변형률을 나타냈다. 그러므로 본 연구에서는 연성 거동과 보강 공법의 경제성을 고려하여, 보강 섬유로 유리섬유를 사용하였다. 그리고 모재(matrix)로 유리섬유와 최적의 조합을 이루는 폴리에스테르 수지를 사용하였고, 콘크리트와 FRP간의 접착력을 증대시키기 위한 본딩 에이전트로는 비닐에스테르 수지를 사용하였다.

3. 실험

Table 1 실험변수 상세

주 변수	변수 설명	상세	고정 변수
섬유 길이	L15	15mm	S: 26MPa
	L30	30mm	T: 2.54mm
	L40	40mm	V: 30%
FRP 보강 두께	T1	1.67mm	S: 26MPa
	T2	2.54mm	L: 30mm
	T3	4.21mm	V: 30%
섬유 혼입비	V15	15%	S: 26MPa
	V30	30%	T: 2.54mm
콘크리트 강도	S1	26MPa	L: 30mm
	S2	65MPa	T: 2.54mm
	S3	81MPa	L: 30mm
보강 방법	M1	Spraying	V: 30%
	M2	Wrapping with mat1	S: 26MPa
	M3	Wrapping with mat2	T: 2.54mm

L : 섬유 길이 (mm) T : 보강두께 (mm)
V : 섬유혼입비 (%) S : 콘크리트 강도 (MPa)

3.1 실험 변수

본 연구에 사용된 변수를 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 섬유 길이(L), FRP 보강 두께(T), 섬유 혼입비(V)에 따른 보강 성능을 비교하였고, 또한, 콘크리트 강도(S)에 따른 보강 효과와 분사식 FRP로 보강한 시편과 유리섬유 매트(M)로 보강된 시편과의 비교를 통해 분사식 FRP의 보강 성능을 알아보고자 하였다.

섬유 길이 변수는 15mm, 30mm, 40mm로 설정하였다. 예비 실험을 통하여 섬유의 길이가 40mm 이상일 경우 섬유 길이가 길어질수록, 섬유의 훔날림으로 인해 시공성이 나빠지는 현상이 관찰되어, 섬유의 최대길이는 40mm로 제한하였다.

FRP 보강 두께 변수는 T1, T2, T3이고, 여기서 각 숫자는 분사 횟수를 말하며, 이에 따른 보강 두께는 각각 1.67mm, 2.54mm, 4.21mm이다. FRP 보강의 특성상 분사 두께를 일정하게 유지하는 것이 매우 중요하므로, 분사 두께 및 섬유의 비율은 숙련된 기술자에 의해 조정되었다.

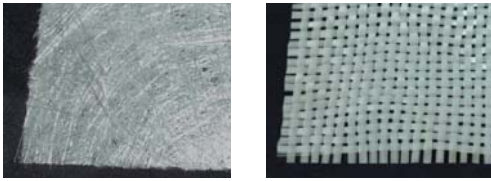
섬유 혼입비는 보강 섬유의 부피와 FRP 복합체의 부피간의 비율을 의미하며, FRP의 보강 강도를 결정하는데 있어 매우 중요하다. 본 연구에서 15%, 30% 섬유 혼입비에 따른 보강 성능을 비교하였다.

오늘날 콘크리트 구조물이 점점 고강도화 됨에 따라, 고강도 콘크리트에 대한 FRP의 보강 성능 역시 평가하고자 하였다. 콘크리트 강도는 S1, S2, S3로 설정하였으며, 이에 대한 기본 물성 및 배합비는 Table 2에 나타내었다.

분사식 FRP로 보강 시편의 거동을 유리 섬유 매트 로 보강된 시편과 비교하여 보았다. 유리섬유로는 우븐 로빙 매트(Woven roving mat), 칩드 스트랜드 매트(Chopped strand mat)를 사용하였으며, 분사식 FRP로 보강된 시편과 보강 성능을 비교하였다.

Table 2 콘크리트 강도 및 배합비

시편	압축강도 (MPa)	조깅인장강도 (MPa)	W/C (%)	S/a (%)	물 (kg/m ³)	시멘트 (kg/m ³)	잔골재 (kg/m ³)	굵은골재 (kg/m ³)
S1	26	1.98	50	42	181	362	762	1022
S2	65	3.95	40	49	175	438	853	886
S3	81	4.08	36	49	191	531	793	824



(a) 찢드 스트랜드 매트 (b) 우븐 로빙 매트
Fig. 2 유리섬유 매트

우븐 로빙 매트는 0°/90°의 방향으로 섬유가 배근된 매트(mat)이고, 찢드 스트랜드 매트는 50mm로 잘려진 단섬유들로 짜인 매트를 의미한다.

3.2 일축압축 및 휨 실험

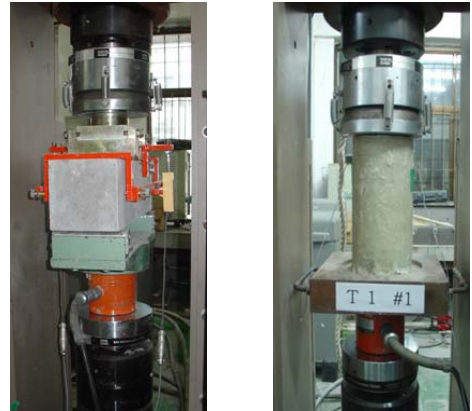
분사식 FRP의 휨 보강 성능과 압축구속 효과를 알아보기 위하여 150×150×550mm의 휨 시편과 Φ 150×300mm의 압축 시편을 제작하였다. 모든 시편은 동시에 타설 되었고, 24시간 후 공기체를 탈형하여 28일 동안 수중 양생을 실시하였다.

양생 후, 콘크리트 시편에 분사식 FRP를 적용하였다. FRP와 콘크리트와의 부착강도를 높이기 위하여 비닐에스테르를 적용면에 도포하였고, 이때 촉매제로 메틸에틸케톤과산화물(Methyl ethyl ketone peroxide : MEKP)을 사용하였다. 비닐에스테르가 충분히 굳은 상태가 된 후, 분사식 FRP를 적용면에 분사하였으며, 그 후에 골이진 알루미늄 롤러를 사용하여 FRP 표면의 공극을 제거하고, 표면을 평탄화시켰다. 분사 및 롤링 과정은 Fig. 3에 나타내었다.

콘크리트와 FRP 간의 완전한 부착 및 섬유와 레진의 완전한 부착을 위하여, 휨 실험 및 압축 실험은



(a) 분사 과정 (b) 롤링 과정
Fig. 3 휨 시편에 대한 분사식 FRP의 적용



(a) 휨 실험 (b) 일축압축 실험
Fig. 4 시편 설치

FRP 분사 2주 후에 실시되었다. 2000 kN 용량의 만능시험기를 사용하였고, 휨 및 압축 실험 모두 변위 제어 상태에서 하중이 재하 되었다. 하중 재하 속도는 휨 실험의 경우 0.015 mm/sec이고, 압축 실험의 경우 0.030 mm/sec로 설정하였다. 각 변수별로 3개의 시편을 실험하여, 보강되지 않은 시편의 파괴 거동과 비교하였다. 휨 및 압축 시편의 설치 모습은 Fig. 4에 나타내었다.

3.3 반발률 실험

앞서 언급하였듯이, 본 공법의 경우 FRP의 반발률은 경제성뿐만 아니라 구조물의 보강 성능과 작업성에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 분사식 FRP의 반발률에 대해 평가 하였다. 현재 분사식 FRP의 적용에 대한 명확한 실험 규정이 명시되어 있지 않은 상태이므로, 분사식 FRP의 반발률을 평가하기 위하여 콘크리트 면으로 코팅 처리된 80×80cm 크기의 반발 패널을 제작하였다. FRP 분사 시간은 1분으로 설정하였고, 반발되어 떨어진 FRP 무게와 분사된 총 FRP의 무게를 측정, 비교하여 반발률을 평가하고자 하였다. 각 변수별 3번씩 실험을 진행하여 그 값을 평균하였다. 반발률 실험 변수로 섬유 길이, 콘크리트 면의 거칠기를 설정하였고, 콘크리트 면에 맞고 튀어나오는 FRP를 붙잡아주기 위하여 와이어메쉬를 콘크리트 면에 적용하였다.(Fig. 5)

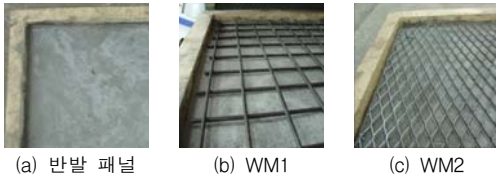


Fig. 5 와이어메쉬 적용

또한, 측면뿐만 아니라 천정면에 대한 반발률을 평가하였으며, Table 3에 반발률 변수를 나타내었다.

반발률 실험에 사용된 공통 인자는 다음과 같다. 섬유 혼입비는 30%로 유지하였고, 분사 노즐과 콘크리트 면 사이의 거리는 60~70cm였으며, FRP 분사 압력은 전 실험 과정에 걸쳐 0.34 MPa로 유지하였다.

Table 3 반발률 실험 상세

분사방향	시편	실험 상세
측면 수직면	F-20	평탄한 표면, 20mm 섬유 분사
	F-40	평탄한 표면, 40mm 섬유 분사
	SCR-40	거친 표면, 40mm 섬유 분사
	WM1-40	와이어메쉬(5mm두께, 40x40mm)
	WM2-40	와이어메쉬(1.5mm두께, 17x17mm)
천정면	UF-40	평탄한 표면, 40mm 섬유 분사

측면 분사 실험은 콘크리트 면과 수직으로 분사하였지만, 천정면에 대한 분사는 70°의 각도로 분사하였다. 일반적인 뿜칠 시공은 노즐과 시공면이 수직이 되어야 하지만 천정면에 수직으로 분사식 FRP를 적용할 경우, 작업자의 시공 용이성 감소, 반발되어 떨어지는 FRP의 정확한 측정 어려움, 그리고 섬유의 흘날림으로 인한 수직상향 분사의 어려움 등의 문제가 발생한다. 그래서 천정면에 대해서는 약 70도의 각도로 분사하였다. 반발률 실험에 대한 모습을 Fig. 6에 나타내었다.



(a) 측면 분사 실험 (b) 천정면 분사 실험
Fig. 6 반발률 실험

Table 4 일축압축 실험 결과

주 변수	시편	최대하중 (kN)	최대하중 증가(%)	인성(N·m)	인성 증가(%)
섬유 길이	S1-NS	423	-	251	-
	L15	445	5	600	139
	L30	535	26	1,103	339
	L40	477	13	1,289	414
FRP 보강 두께	S1-NS	423	-	251	-
	T1	429	1	940	275
	T2	535	26	1,103	339
	T3	1027	143	2,350	836
콘크리트 강도	S1-NS	423	-	251	-
	S1-S	535	26	1,103	339
	S2-NS	1,134	-	623	-
	S2-S	1,193	5	1,342	115
	S3-NS	1,260	-	791	-
섬유 혼입비	S1-NS	423	-	251	-
	V15	451	7	525	109
	V30	535	26	1,103	339
보강 방법	S1-NS	423	-	251	-
	M1	535	26	1,103	339
	M2	420	0	520	107
	M3	513	21	913	264

[Note] NS : 무보강 시편, S : 보강 시편

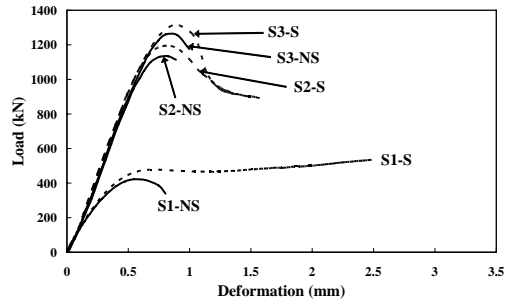
4. 실험 결과 및 분석

4.1 일축압축 실험 결과

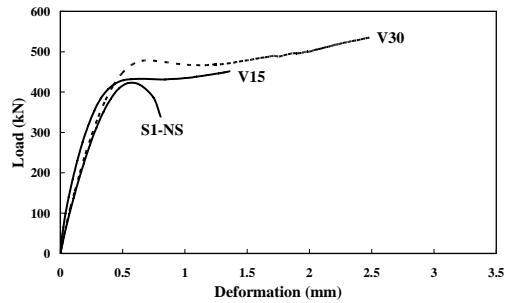
일축압축 실험 결과를 Table 4과 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 인성은 시편이 파괴될 때까지 받은 에너지를 의미하며, 그래프 아래의 면적을 계산하여 나타내었다.

섬유 길이에 대한 보강 효과를 비교하면, 섬유 길이가 15mm, 30mm, 40mm로 증가할 때, 최대 하중은 보강을 하지 않은 시편에 비하여 5%, 26%, 33%로 증가하였고, 인성은 139%, 339%, 414% 증가함을 나타냈다. 즉, 섬유 길이가 증가할수록 최대강도 및 인성이 증가하는 경향을 나타내었고, 연성 또한 증가하였다.(Fig. 7(a))

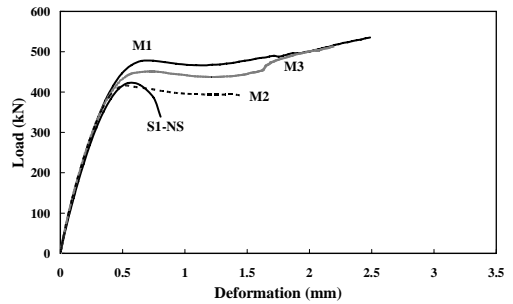
FRP 두께에 따른 보강 효과를 비교하면, T1, T2, T3일 경우, 최대 하중이 각각 1%, 26%, 143% 증가하였고, 인성은 275%, 339%, 836% 증가하였다. 다른 여러 변수들보다 FRP 두께가 보강 효과에 가장



(c) 콘크리트 강도 (S1, S2, S3)

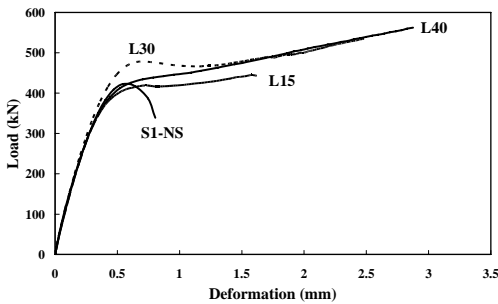


(d) 섬유 혼입비 (V15, V30)

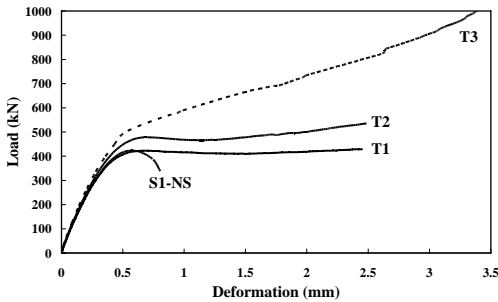


(e) 보강방법 (M1, M2, M3)

Fig. 7 압축 실험을 통한 하중-변위 곡선



(a) 섬유 길이 (L15, L30, L40)



(b) FRP 보강두께 (T1, T2, T3)

큰 영향을 주고 있고, 특히 압축 시편의 경우, 보강 두께가 T3일 경우 최대 강도뿐만 아니라, 연성 또한 큰 증가를 나타내었다.(Fig. 7(b))

콘크리트 강도 변수에 따른 실험 결과를 비교하면, 콘크리트 강도가 S1, S2, S3일 경우에는 보강된 S 시편은 각각 보강되지 않은 NS 시편에 비해 26%, 5%, 4%의 최대 하중 증가를 나타냈고, 339%, 115%, 51%의 인성의 증가를 나타내었다. 콘크리트 강도가 증가할수록, 최대하중과 인성이 증가를 나타냈

지만, 보강 효율은 오히려 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 최대하중까지 콘크리트 자체가 하중에 견디다가 그 이후에는 갑작스럽게 FRP로 하중이 전이되었기 때문인 것으로 판단된다. 보강된 시편은 최대하중까지는 보강되지 않은 시편과 비슷한 하중-변형 양상을 나타내다가, 최대 하중 이후에는 향상된 연성 능력을 나타냈다. 하지만, 고강도화 됨에 따라 연성 증가도 줄어드는 경향을 나타내었다.(Fig. 7(c))

섬유 혼입비 변수에 대한 실험 결과를 비교하면, 15%의 섬유 혼입비일 경우, 최대 하중과 인성은 각각 7%, 109%의 증가를 나타내었고, 30%일 경우에는 26%, 339%의 증가를 나타내었다. 즉, 본 실험에서 분사식 FRP의 경우 30%의 섬유혼입비를 적용하는 것이 가장 좋은 성능을 나타내었다. 또한, 섬유 혼입비가 15%일 경우에는 섬유의 양에 비해 액상의 레진의 비율이 낮음으로 인해 FRP 흘러내림 현상이 발생하였기에, 15%의 섬유 혼입비는 적절하지 않다.(Fig. 7(d))

보강 방법의 차이에 따른 실험 결과를 비교하면, 분사식으로 보강한 M1, 우븐 로빙 매트를 부착식으로 보강한 M2, 촘드 스트랜드 매트를 부착식으로 보강한 M3은 각각, 26%, 0%, 21%의 최대 하중 증가를 보였고, 339%, 107%, 264%의 인성의 증가를 나타내

었다. 즉, 분사식 FRP는 동일한 보강을 한 유리섬유 매트에 비해 향상된 보강 성능을 나타내었다.(Fig. 7(e))

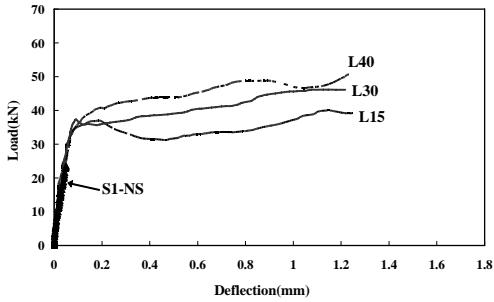
4.2 휨 실험 결과

휨 실험 결과를 Table 5와 Fig. 8에 나타내었다. 휨 실험에서는 최대 하중과 극한강도, 인성에 대하여 비교하였다. 최대하중은 선형적으로 하중이 증가하다가 콘크리트에 균열이 생기면서 하중이 떨어지는 시점으로 정의하였고, 극한 강도는 FRP 파단 또는 박리로 인해 파단되는 시점의 하중을 의미하는데, 휨 거동의 경우 최대하중 이후 FRP 보강에 의해 하중이 증가하는 경향을 보이므로 파괴 전까지의 가장 높은 하중을 극한강도로 나타내었다. 인성은 압축 시험에서와 마찬가지로 파괴 전까지의 그래프 아래의 면적을 계산하여 나타내었다.

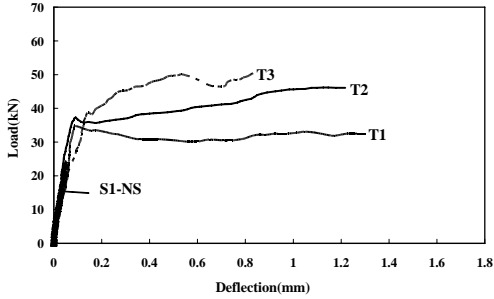
섬유 길이에 따른 보강 효과를 고려하면, 15mm, 30m, 40mm의 섬유 길이일 경우, 각각, 57%, 58%, 73%의 최대 하중 증가를 나타내었다. 또한, FRP에 의해 최대 하중 이후, 완만한 하중의 증가를 보였고 이에 따라, 극한 강도와 인성 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 휨 실험의 경우, 40 mm 섬유를

Table 5 휨실험 결과

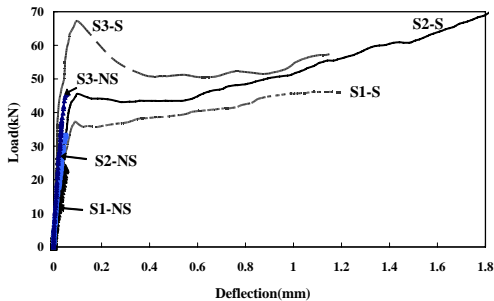
주 변수	시편	최대하중 (kN)	최대하중 증가 (%)	극한강도 (kN)	극한강도 증가 (%)	인성 (N·m)
섬유 길이	S1-NS	23.6	-	23.6	-	0.67
	L15	37.0	57	40.0	70	21.84
	L30	37.3	58	46.2	96	48.44
	L40	40.9	73	50.7	115	53.90
FRP 보강 두께	S1-NS	23.6	-	23.6	-	0.67
	T1	34.8	48	34.8	48	40.08
	T2	37.3	58	46.2	96	48.44
	T3	38.9	65	50.5	114	35.39
콘크리트 강도	S1-NS	23.6	-	23.6	-	0.67
	S1-S	37.3	58	46.2	96	48.44
	S2-NS	33.2	-	33.2	-	1.04
	S2-S	45.6	37	72.1	117	101.59
	S3-NS	45.8	-	45.8	-	1.88
	S3-S	67.3	47	67.3	47	61.32
보강 방법	M1	37.3	58	46.2	96	48.44
	M2	35.5	51	35.5	51	31.67
	M3	35.65	51	37.2	58	61.35



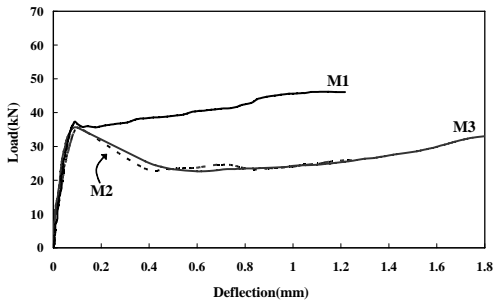
(a) 섬유 길이 (L15, L30, L40)



(b) FRP 보강 두께 (T1, T2, T3)



(c) 콘크리트 강도 (S1, S2, S3)



(d) 보강 방법 (M1, M2, M3)

Fig. 8 휨 실험을 통한 하중-변위 곡선

사용할 때, 보강 효율이 가장 좋은 것으로 나타났다. 이론적으로 FRP 내에서 하중은 섬유와 모재 (Matrix)간의 계면 전단력에 의해 섬유로 전달되게 되고, 이때 대부분의 하중은 섬유가 지지하게 된다. 분사식 FRP의 경우 짧게 잘려진 섬유의 길이가 길어짐에 따라 섬유가 충분한 부착 길이를 가지게 되고, 이에 따라 계면 전단력도 증가하게 되므로 FRP의 보강 성능이 증가하는 것으로 판단된다.(Fig. 8(a))

보강 두께에 따른 영향 역시 보강 두께가 T1, T2, T3로 증가할 때, 최대강도는 48%, 58%, 65%로 증가하였고 극한 강도 또한 증가하는 경향을 보였다. 하지만, 보강 두께가 두꺼운 T3 시편의 경우 보강재의 조기 박리로 인해 연성 능력이 감소하였음을 알 수 있었다.(Fig. 8(b))

콘크리트 강도 변수에 대한 보강효과를 알아보았다. 콘크리트 강도가 S1, S2, S3로 증가할 때 보강한 S 시편의 최대 하중 역시, 무보강한 NS 시편에 비해 58%, 37%, 47% 증가하는 경향을 나타냈고, 최대 하중 이후 완만한 하중의 증가를 나타냈다. 단, S3시편의 경우 최대 하중 이후에 급격한 하중의 하락을 보인후, S1, S2 시편과 유사한 하중 증가 경향을 나타냈다.(Fig. 8(c))

보강 방법의 차이에 따른 실험 결과를 비교하면, 분사식 FRP는 동일한 강도로 보강한 섬유 매트와 비슷한 최대 하중을 보였다. 하지만, 최대 하중 이후에는 분사식 FRP로 보강된 M1 시편은 완만한 하중 증가 경향을 나타내었고, 매트보 보강된 M2, M3 시편은 급격한 하중 감소 후, 더 큰 연성범위까지 하중이 증가하는 경향을 나타내었다. 이를 종합하면, 분사식 FRP보강은 기존의 섬유 매트 보강에 비해 동등하거나 더 나은 성능을 보여준다고 판단된다.(Fig. 8(d))

4.3. 반발률 실험 결과

반발률 실험 결과를 Table 6에 나타내었다. 반발률이 커진다는 것은 시공성 및 경제성이 떨어진다는 것을 의미고, 이를 고려하였을 때 본 연구에서는 5%의 반발률을 허용범위 이내라고 판단하였다. 섬유 길이에 대한 반발률 실험 결과, 20mm 길이의 유리섬유를 사

Table 6 반발률 실험 결과

분사 방향	시편	분사된 FRP(g)	반발된 FRP(g)	반발률 (%)
수직면	F-20	3116.6	86.6	2.78
	F-40	2911.5	131.5	4.52
	SCR-40	3474.2	134.2	3.86
	WM1-40	-	-	-
	WM2-40	-	-	-
천정면	U-F-40	2299	339	14.75

용하였을 경우 2.78%였고, 40mm 길이의 섬유일 경우에는 4.52%로 모두 허용할 만한 실험 결과를 나타냈다. 섬유 길이가 짧을 때, 섬유 자체의 무게가 가벼워짐에 의해 반발률 역시 작아진다고 판단된다. 콘크리트면의 거칠기에 따른 영향을 알아보기 위해 인위적인 스크래치를 내어 실험한 SCR-40 시편은 매끈한 표면보다 더 낮은 3.86%의 반발률을 보여주었다. 이 값은 평평한 면에 적용하였을 때보다 더 작은 수치를 나타낸다. 즉, 콘크리트 표면에 약간의 요철이 있을 경우, 적용시 표면처리가 중요한 FRP 매트 부착공법과 달리 분사식 FRP를 적용하는데 있어 큰 어려움이 없을 뿐만 아니라, 반발률 성능 역시 더 좋은 효과를 보일 것이라 판단된다.

와이어메쉬를 적용한 WM1-40, WM2-40 에서는 모두 FRP가 와이어메쉬를 통과하지 못해 콘크리트면에 부착되지 못하는 결과를 가져왔다. 콘크리트면에 맞고 튀어나오는 FRP 반발률을 제어하기 위하여 콘크리트 면 위에 와이어메쉬를 적용하였으나, 이는 오히려 FRP와 콘크리트 면 사이의 부착을 방해하는 역할을 하였고, 반발률 제어를 위하여 와이어메쉬를 적용하는 것은 적절치 않다고 판단된다.

천정면에 대한 반발률 실험 결과, 반발률은 14.75%로 무시할 수 없는 반발률을 나타내었다. 실제 휨 구조물을 보강할 경우, 분사식 FRP를 천정면에 적용하는 것을 고려한다면 반발률을 줄이기 위한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

5. 결론

분사식 FRP의 보강 성능을 알아보기 위하여, 섬유

길이, FRP 보강 두께, 콘크리트 압축 강도, 섬유 혼입비, 보강 방법 변수를 설정하고, 이에 대하여 휨 및 압축 실험을 실시하였다. 또한, 섬유 길이, 콘크리트 표면의 거칠기, 분사 방향에 따른 분사식 FRP의 반발률을 평가하였고, 실험을 수행하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 섬유 길이 변수에 대한 실험 결과, 섬유길이가 길수록 강도 및 연성이 증가하여 파괴될 때까지 흡수하는 에너지 또한 증가하는 경향을 나타냈다.
- 2) FRP 보강 두께가 두꺼울수록, 휨 및 압축 모두 강도의 증가를 가져왔고, 압축의 경우에 연성 또한 증가함을 나타냈다.
- 3) 콘크리트 강도에 따른 분사식 FRP의 보강 효과를 실험한 결과, 압축 시편은 강도가 증가할수록 분사식 FRP의 보강 효율이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 최대 하중까지 콘크리트 자체가 하중에 견디다가, 그 이후에는 갑작스럽게 FRP 전이되었기 때문인 것으로 판단된다.
- 4) 섬유 혼입비에 따른 실험 결과, 30%의 섬유 혼입비일 경우 최대의 보강 성능을 나타내었고, 시공시에 섬유의 흘러내림 현상이 발생하므로 15%의 섬유 혼입비는 적절하지 않다.
- 5) 보강 방법에 따른 실험 결과, 분사식 FRP로 보강된 시편은 강도 및 연성 증가 능력에서 유리섬유 매트 보강된 시편과 동등하거나 그 이상의 보강 성능을 나타내었다.
- 6) 분사식 FRP의 반발률 실험 결과, 수직면에 대한 반발률은 만족할만한 값을 나타내었고, 섬유 길이가 짧을 때, 반발률 역시 줄어드는 것으로 나타났다. 또한, 콘크리트 표면이 거친 상태일 경우에는, 매끈한 표면에 반발률이 감소하는 것으로 나타나, 섬유 매트 보강 공법에 비해 공정 과정이 줄어들 것으로 판단된다. 천정면에 분사식 FRP를 적용하였을 경우, 상대적으로 큰 반발률을 나타냈고, 반발률을 줄이기 위해 연구가 필요하다.
- 7) 본 논문은 분사식 FRP의 각 변수에 따른 보강 성능 평가로써 추후 관련 연구의 밑바탕이 될 것이다. 또한 반발률 제어 문제가 해결된다면, 구조물의 보수보강 기법으로 분사식 FRP가 널리 활용될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-041-D00793)

참고문헌

1. Anania L., Badald A., Giusy F., "Increasing the flexural performance of RC beams strengthened with CFRP materials", *Construction and Building Materials*, Vol. 19, 2005, pp. 55-61.
2. Arya C., Clarke J.L., Kay E.A., O'regan P.D., "TR 55: Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials: a review", *Engineering Structures*, Vol. 24, 2002, pp. 889-900.
3. Banthia N. and Boyd A.J., "Sprayed fibre-reinforced polymers for repairs," *Can. J. Civ. Eng.*, Vol. 27, 2000, pp. 907-915.
4. Banthia N., Yan C. and Nandakumar N., "Sprayed FRPs for repairs of concrete structures," *Proceedings of the 2nd international conference on advanced composite materials*, August, Montreal, Que., 1996, pp. 537-546.
5. Lee H.K., Hausmann L.R., "Structural repair and strengthening of damaged RC beams with sprayed FRP," *Composite structures*, Vol. 63, 2000, pp. 201-209.
6. Furuta T., Kanakubo T., Nemoto T., Takahashi K. and Fukuyama H., "Sprayed-up FRP strengthening for concrete structures," *Proceedings of the International Symposium on Earthquake Engineering Commemorating Tenth Anniversary of the 1995 Kobe Earthquake*, Vol. 2, 2005, pp. 299-307.

(접수일자 : 2007년 6월 12일)