

섬유 접착 보강 철근콘크리트 보의 보강재료에 따른 휨 성능 비교

Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams Retrofitted with Different FRPs

정 상 인*	신 영 수**	홍 건 호***	박 종 환****
Jeong, Sang In	Shin, Yeong Soo	Hong, Geon Ho	Park, Jong Hwan

ABSTRACT

This paper deals with the experimental evaluation of the performance of R.C beams strengthened with aramid, glass and carbon fiber sheets. To evaluate the effects of FRPs on the flexural strengthening of the beams, strengthening ratio is adopted as a main variable. Seven beams were fabricated and strengthened under same tensile strength based on ultimate strength of FRPs and strengthening length. Deflection, flexural stiffness, strain of FRP, ultimate load and failure load are compared to evaluate the effects of FRPs on structural behavior of retrofitted beams.

The results shows that little effects of FRPs on behavior of strengthened beams can be estimated and the fail modes are more influenced on structural behavior than that .

1. 서론

국내에서 건축물의 휨 부재의 보강방법으로 보강용 섬유재료를 에폭시 수지로 휨 부재의 표면에 접착하는 섬유 접착공법이 널리 사용되고 있으며 많은 연구가 진행되어 왔다. 기존 연구에 의하면 섬유 접착 보강공법으로 보강한 보의 성능은 보강재의 종류, 보강 폭, 보강길이, 보강비, 단부 보강 유무 등 여러 가지 변수에 의해 영향을 받는다. 또한, 섬유 접착공법의 다양한 변수들에 의한 구조 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 이러한 연구를 통하여 특정 섬유 보강재료와 변수에 대한 영향은 상당 부분 파악되었으나, 실제 보강작업에서 섬유 재료의 선택에 적용하기 위해서는 동일한 변수에서 각 섬유재료에 따른 구조체의 거동에 대한 비교 연구가 필수적이다.

즉, 기존의 연구에서는 섬유보강재료로 주로 사용되는 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유 등 개별 섬유재료에 대한 보강성능 평가 연구는 많이 수행되었으나, 각 섬유 보강재료의 특성에 따른 보강된 부재의 거동을 평가한 연구는 부족한 상태이다.

* 정회원, 호서대학교 건축학과 석사과정
** 정회원, 이화여대 건축학과 교수
*** 정회원, 호서대학교 건축학과 교수
**** 정회원, 호서대학교 건축학과 석사과정

본 연구에서는 섬유 접착 보강공법에 주로 사용되는 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드 섬유를 휨재의 보강에 적용하여 상대적인 성능비교를 위해, 섬유 보강재료의 종국강도를 기준으로 섬유가 받을 수 있는 인장력($T=A_sF_t$)을 거의 동일한 상태로 설정하고, 3가지의 섬유 보강재료를 적용하여 하중-처짐 곡선, 중립축의 변화, 동일한 하중하에서의 섬유재료 변형율, 파괴형상 등을 비교하여 상대적인 성능을 평가하고자 하였다. 이러한 연구결과를 통하여 가장 효율적인 보강재료의 선택근거를 제시하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 보강재료의 종류는 국내에서 생산하는 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드 섬유 3종류를 사용하고, 보강 섬유재료별 보강비를 2종류로 변화시켜 연구를 수행하였다.

2. 실험 계획

2.1 실험체 계획 및 제작

실험체의 주 실험변수로 보강재료 3종류와 보강량의 변화를 나타내기 위해 기본 실험체와 보강 실험체 6개, 총 7개의 실험체를 표 1과 같이 제작하였다. 실험체의 단면 크기는 그림 1에서와 같이 20×35cm로 하였으며 길이는 360cm로 하였다. 실험체는 28일간 기건양생하였으며 양생이 완료된 후 지점 부위를 고려해 순시간의 93%인 300cm 길이로 섬유 보강작업을 시작하였다. 실험체는 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드 섬유슈트르 보강한 후에도 최대철근비를 초과하지 않도록 하였으며 섬유 보강재료의 인장 성능($T=A_sF_t$)을 가능한 한 동일하도록 실험체를 제작하였다. 실험체는 인장철근을 2-D19, 압축철근을 2-D13을 사용하였으며 전단파괴가 발생하지 않도록 전단근을 D10@150으로 보강하였다. 콘크리트의 강도는 설계강도 $f_{ck}=210\text{kgf/cm}^2$ 로 계획하였으나 재료실험결과 표 2에서와 같이 $f_{ck}=273\text{kgf/cm}^2$ 로 나타났으며 철근은 각 직경별로 다르게 나타났다. 표 3의 섬유 보강재료의 강도는 실제공사에서와 같이 에폭시를 함침시켜 판상으로 하여 실험하여 종국강도를 측정하였으며 종국강도를 기준으로 보강 실험체를 계획하고 보강작업은 실제 공사에서의 질을 확보하기 위해 전문 보강업체에서 수행하였다.

표 1 실험체의 구성

실험체명	보강재	보강 접수	스팬방향 보강길이 (cm)	인장철근비	
				보강전	보강후
SB-CON	기본실험체	-	-	-	0.0096
SB-C1	탄소섬유	2	300	0.0134	0.0096
SB-C2	탄소섬유	1	300	0.0115	0.0096
SB-G1	유리섬유	2	300	0.0139	0.0096
SB-G2	유리섬유	1	300	0.0117	0.0096
SB-A1	아라미드	2	300	0.0135	0.0096
SB-A2	아라미드	1	300	0.0115	0.0096

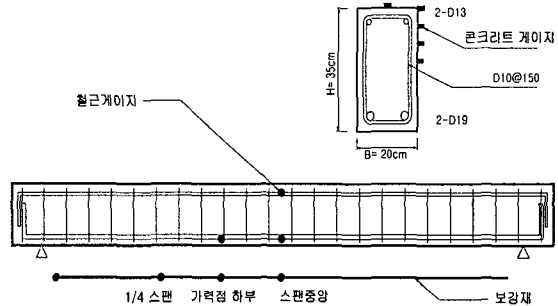


그림 1 실험체 상세 및 게이지 위치

2.2 실험체의 가력 및 측정

실험체의 가력은 그림 2에서와 같이 4점재하 방법으로 하였으며 하중 간격은 80cm, 하중점은 지점으로부터 120cm 떨어진 점에 가력하였다. 가력에 따른 처짐 및 변형율을 측정하기 위해 LVDT와 전기 변형율 게이지를 사용하였다. 중앙부 수직처짐 측정을 위한 LVDT는 실험체의 중앙부와 스패인의 1/4지점에 설치하였으며, 변형율은 실험체 타설전에 매입한 인장 철근에 2개, 압축철근에 1개, 가력점 하부 인장근에 1개의 전기적 게이지와 보강재료에 4개를 접착하여 각 하중에 따른 변형율을 측정하였고, 콘크리트의 변형율은 압축측 연단부와 측면에 5cm 간격으로 4개로부터 측정하였다.

표 2 재료의 물성

재 료	종 류	강 도(kgf/cm ²)	
콘크리트	압 축	273	
	할렬인장	22.6	
철 근	인장	D10	4763
		D13	5141
		D19	4275

표 3 보강재의 기계적 성질

시험항목	단위	탄소	유리	아라미드
강 도	kgf/cm ²	46545.45	6616.28	5494.73
두 겹	mm	0.59	0.86	0.95
탄성계수	kgf/cm ²	2.35×10^6	7.2×10^5	1.14×10^6
파단 신율	%	2.0	3.0	2.6

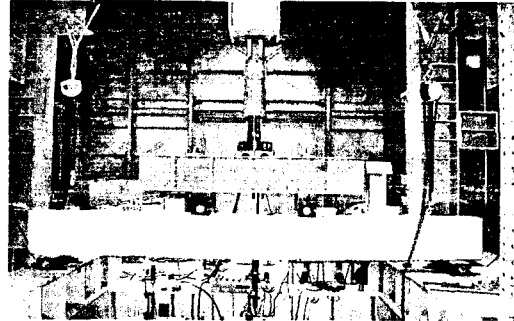


그림 2 가력장치도

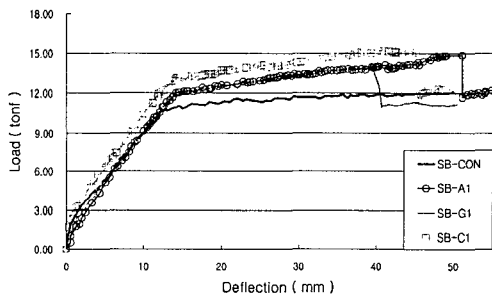
3. 실험결과 및 분석

3.1 하중-처짐 관계

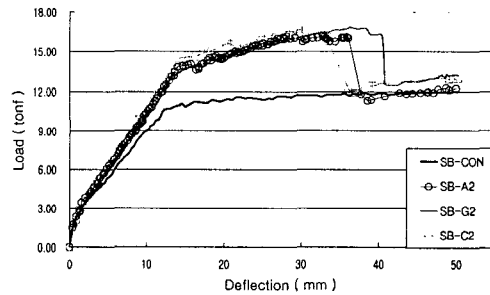
보강재료 및 보강량이 다른 실험체와 기준실험체와의 하중-처짐 곡선을 다음의 그림 3에 비교하여 나타내었다. 모든 실험체는 기준실험체 이상의 항복점과 최대내력을 나타냈으며, 그림 3 (a)에서 한겹 보강한 경우 SB-C1이 항복하중과 최대내력에서 가장 큰 값을 나타냈고 SB-A1과 SB-G1은 12tonf에서 항복내력과 최대내력이 매우 유사하게 나타났다.

그림 3 (b)에서 보강재를 두겹으로 보강한 보의 경우 항복하중이 모든 실험체에서 13.8tonf로 유사하게 나타나며, 최대내력은 SB-G2, SB-C2가 16.2tonf이고 SB-A2는 16.6tonf로 최대내력을 나타냈다.

그림 3에서 한겹으로 보강한 보가 두겹 보강에 비해 연성적으로 나타나며, 보강 부재의 철근 항복점에서 처짐은 모든 실험체가 유사한 값을 가진다.



(a) 한겹 보강시



(b) 두겹 보강시

그림 3 실험체의 보강매수별 하중-처짐 곡선

실험체의 하중-처짐 곡선에서 탄성구간 및 항복구간의 접선기울기를 비교하면, 표 4에서 보강시 실험체는 탄성구간에서 기준 실험체와 비교했을 때 약간 증가된 값을 나타내며 아라미드섬유로 보강한 SB-A1, SB-A2에서는 40% 증가되어 아라미드 섬유로 보강한 실험체가 상대적으로 높게 나타났다.

섬유쉬트의 보강매수에 따른 탄성구간의 하중-처짐 접선기울기에서는 2ply/1ply 비율이 8%내외로 모든 실험체에서 유사한 크기를 나타냈으나, 실험체의 항복점 이후에는 증가하며 보강재료와 보강매수에 따른 휨강성의 차이를 나타냈다.

표 4 초기 및 함복후 휨강성 비교

탄성구간	시험체명	SB-CON	SB-A1	SB-A2	SB-G1	SB-G2	SB-C1	SB-C2
기울기	기울기	0.95	1.34	1.32	1.08	1.17	1.22	1.29
	기울기 / CON	1	1.41	1.39	1.14	1.23	1.28	1.36
2ply / 1ply		-	0.99		1.08		1.06	
	항복	-	0.15	0.32	0.12	0.23	0.16	0.29
2ply / 1ply		-	2.13		1.92		1.81	

3.2 FRP의 길이방향 변형률 분석에 표시하였다.

동일 하중에서 비교하기 위해, 보강재의 변형율을 12tonf를 기준으로 하중 단계별로 구분하여, 보강재 단부에서 중앙부에 이르는 길이방향의 변형률 분포는 그림 4에 표시하였다.

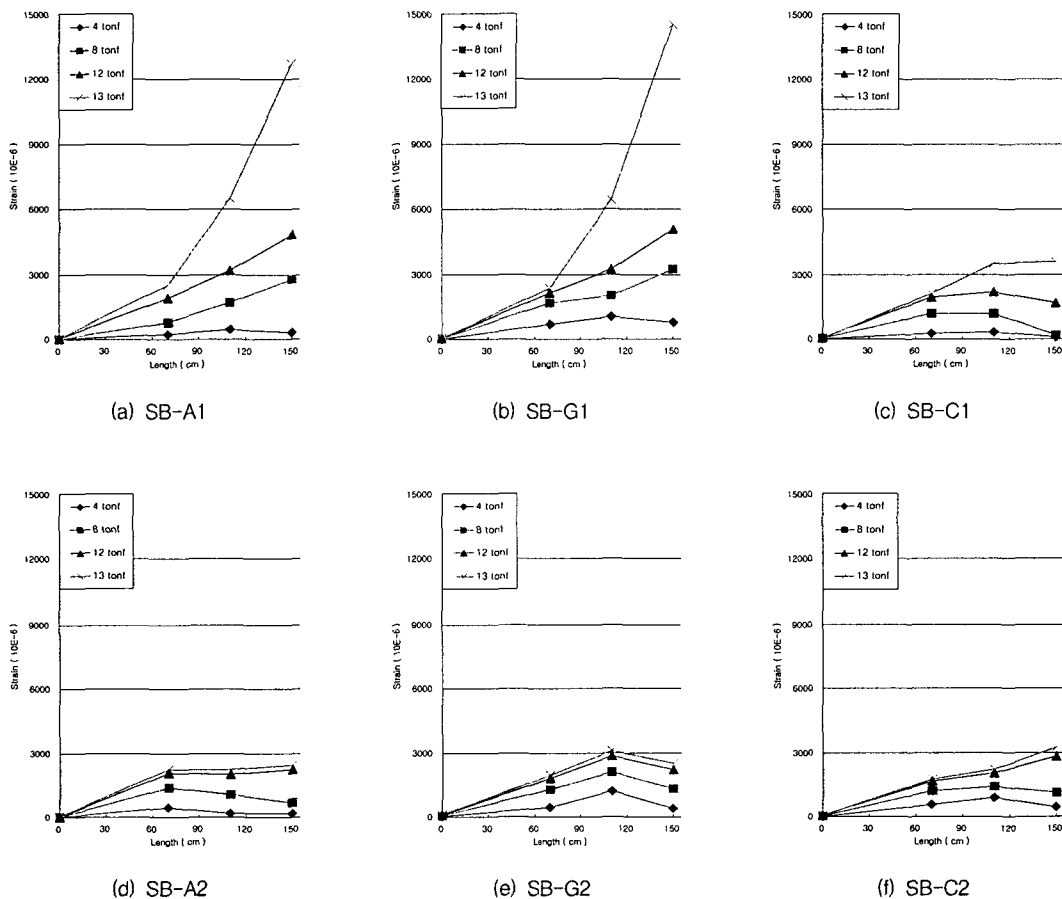


그림 4 길이방향의 쉬트 스트레인 분포도

보강재료 및 변형을 분포는 모든 실험체는 중국파괴시까지 보강재의 양쪽 단부에는 변형을 변화가 없었으며 스패의 1/4지점까지는 변형율이 전체적으로 유사하게 분포했다.

그림 4에서 보강재료 및 보강접수에 따른 차이는 가력점 하부에서 발생하기 시작하여 최대모멘트 지점인 스패의 중앙에서는 동일하중하에서 한점으로 보강한 실험체들이 두점으로 보강한 실험체에 비교해 두배 이상의 높은 변형율을 나타냈다. 두점으로 보강한 실험체는 모두 $2500 \sim 3200 \times 10^{-6}$ 에서 유사하게 변형율이 분포하였다. 변형을 분포도를 나타낸 그림 4 (c)에서 SB-C1 실험체가 13tonf 하중일 때 상대적으로 낮은 스트레인 값을 나타냈으나, 13.7tonf을 지나면서 급격하게 증가하여 8000×10^{-6} 로 증가하였으나 다른 실험체와 비교를 위해 12tonf까지만 그래프에 나타내었다.

보강재료에 따른 길이방향의 FRP의 변형율은 동일 접수로 보강한 실험체들은 대체로 유사한 분포를 나타냈으며, 동일하중에서 한점으로 보강한 실험체들은 두점 보강한 실험체보다 2배 이상의 변형율을 이었으며 유리섬유는 다소 높은 변형율을 값을 나타냈다. 보강재의 탄성계수 및 신율 등에 따른 재료의 성능과 접착상태가 따라서 다소의 차이가 있지만, 대체적으로 유사하다 할 수 있다.

3.3 실험체의 내력검토 및 파괴양상

모든 실험체는 실험결과를 나타낸 표 6에서 최대 휨내력값이 이론값 M_n 과 비교할 때 10% 이내에 분포하며 대체적으로 유사했으며, SB-C1이 이론값에 가장 근접한 내력을 나타냈다. 대부분의 실험체는 중국파괴시에 보강재의 접착파괴가 발생하였다. 파괴시 콘크리트의 압축측 최대변형도는 유사하나 쉬트의 최대 인장변형도는 $9715 \sim 21802 \times 10^{-6}$ 사이에서 차이를 나타내는데, 이는 중국변형도의 38%~72% 정도에 해당한다. 이는 보강재료만의 파단에 의한 파괴가 아니라 단부 혹은 중앙부의 파괴로 인한 것이다. 또 하나의 영향은, 실험체 하부면 접착강도가 길이방향에서 국부적으로 균등하지 않기 때문에 발생하는 것으로 판단되지만, 전체적인 내하력에는 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.

기준시험체는 전형적인 하부면에서 수직적인 균열의 휨파괴 형태를 나타냈고, SB-A1 실험체는 중앙부의 보강재의 인장파단에 의해 파괴되었으나 다른 실험체들은 콘크리트를 물고 떨어지는 정도는 다르지만 모두 모재인 콘크리트와 보강재와의 접착파괴 형태를 나타냈으며, 이것으로써 충분히 부재의 최대내력 도달시까지 보강재의 접착강도가 발현된 것으로 판단 할 수 있다.

표 5 실험체의 내력 비교

실험체명	모 멘 트						파괴형태		
	(tonf · m)			② / ①	③ / ①	③ / ②	($\times 10^{-6}$)		파괴형상
	① M_n	② 항복내력	③ 최대내력				콘크리트 압축변형율	FRP인장 변형율	
SB-CON	7.44	6.39	7.07	0.86	0.95	1.11	3661	-	휨인장파괴
SB-A1	9.20	7.28	8.53	0.85	0.93	1.17	3883	13623	접착파괴
SB-G1	9.30	7.08	8.32	0.85	0.89	1.18	3270	21801	중앙부 파단
SB-C1	9.10	7.80	9.08	0.82	0.99	1.16	2902	9715	접착파괴
SB-A2	10.76	8.4	9.66	0.87	0.90	1.15	2823	7328	접착파괴
SB-G2	11.0	7.96	10.11	0.79	0.92	1.27	3065	8230	접착파괴
SB-C2	10.6	8.23	9.89	0.83	0.93	1.21	2904	9902	접착파괴

3.4 균열진전 및 파괴거동

FRP보강 보 실험체의 파괴는 인장철근의 항복 후 균열폭의 증가로 인한 FRP의 접착파괴 및 FRP

의 중앙부 인장파단 등의 형태로 나타났다. 실험체에 균열이 발생할 경우 국부적으로 변형도가 집중하게 되므로 SB-G1의 경우는 보강재의 파단이 발생한 경우도 있었고, 대부분의 실험체는 가력지점 사이에서 균열폭이 급격히 증가하며 보강재가 뜯겨져 나오듯이 집착파괴의 형태를 보였다. SB-A1은 최대내력에 도달시 스패의 중앙부에서 두가력점 사이에서 FRP의 인장파단이 먼저 발생하였다.

기준실험체는 중앙부에서 전형적인 휨균열에 의한 파괴 형태를 나타냈으며, 섬유보강 실험체는 가력 초기에 스패중앙의 두 가력점 구간 사이에 편중된 휨균열을 보이거나, 항복내력의 2/3인 9tonf에 근접하면서 단부쪽을 포함한 하부면에 균열이 발생하면서 진전된다. 실험체는 항복점에 도달하면서 기존의 발생한 수직의 휨균열들 사이를 잇는 수직 및 경사진 미소균열들이 나타내는데, 이것이 성장하여 쉬트의 집착파괴시 모재에서 분리된 콘크리트 일부를 보강재가 물고 있는 탈락되는 형태로 파괴되며 모든 보강실험체들이 대체로 유사한 파괴형태를 나타낸다.

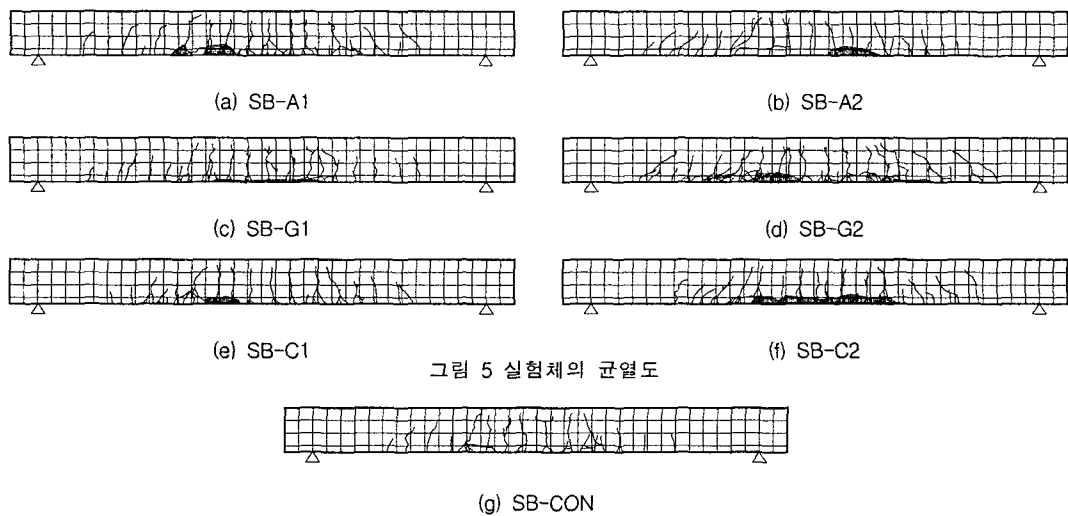


그림 5 실험체의 균열도

4. 결론

섬유보강재료와 철근비를 변화시킨 실험체에 대해서 보강후의 휨거동을 평가한 결론은 다음과 같다.

- (1) 탄소섬유, 아라미드 섬유, 유리섬유 보강재를 종국 섬유강도를 이용 보강재의 인장력을 동일설계하여 실험한 결과, 휨 내력에서도 유사하게 나타났다.
- (2) FRP로 보강된 시험체는 탄성구간의 초기강성은 모두 유사하나, 철근의 항복이후 FRP의 2차강성으로 항복점 이후에는 보강량에 따라 휨 강성의 차이가 발생한다.
- (3) 실험체의 파괴시 변형율이 종국 변형율의 38%~72%에 존재하여 설계강도의 설계시 변형율을 고려한 설계가 수행되어야 한다.

참고 문헌

1. 한복규, 홍건호, 신영수, "재하상태에 따른 탄소섬유보강공법의 휨 보강효과," 한국콘크리트학회 1999년도 봄 학술발표회 논문집, pp. 691-696.
2. 김희규, 신영수 외 3인, "탄소섬유 및 유리섬유로 보강한 합성보의 내력산정과 보강효과에 대한 연구." 한국콘크리트학회 1997년 봄 학술발표회 논문집 1997, 5 v.9, n.1 pp. 565-570.
3. Laura De Lorenzis, and Brian Miller, Antonio Nanni, "Bond of Fiber-Reinforced Polymer Laminates to Concrete." ACI Materials Journal/ May-June 2001.