

강판 및 유리섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트 보의 전단보강 효과에 관한 실험 연구

An Experimental Study on Shear-Strengthening Effect of Reinforced Concrete Beams by Steel Plates and GFS

최 현 구* 오 성 영** 김 상 식***
Choi, Hyon Ku Oh, Sung Young Kim, Sang Sik

ABSTRACT

The aim of this research is to investigate and to compare the shear strengthening effects of steel plates and glass fiber sheets(GFS). Shear damaged beams were repaired by steel plates and GFS. Thickness of steel plates and strengthening type of GFS were taken as the parameters. With loading, the development and propagation of cracks, failure mode and deformation of strengthening materials were checked. The ultimate load was compared with formulas proposed by previous researchers.

1 서 론

콘크리트 구조물의 전단내력이 부족할 때에는 연성적인 휨파괴가 생기기 전에 취성적인 전단파괴가 생기므로, 콘크리트 구조물의 전단보강에서는 전단강도와 더불어 파괴에 이르기까지의 전단거동이 실험적으로 검토되어야 한다. 이런 관점에서 이 연구에서는 전단균열이 생긴 보를 강판과 유리섬유쉬트로 보강했을 때 전단내력과 전단 거동을 실험을 통하여 파악하고 비교 검토하여 설계에 반영하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 보 전단거동의 이론적 고찰

2.1 철근콘크리트 보의 전단강도식

철근콘크리트 보에 외부 전단보강을 실시하여 보강재의 전단강도를 V_r 이라 하면, 공칭 전단강도는

$$V_n = V_c + V_s + V_r \quad (1)$$

으로 표현된다. 이때 V_c , V_s 는 콘크리트구조 설계기준에 의한 콘크리트와 전단보강근의 전단강도이다.

2.2 보강재에 의한 보의 전단강도

2.2.1 강판으로 보강된 보의 전단강도⁽¹⁾

강판으로 보강된 보의 파괴형태는 주로 강판과 콘크리트간의 계면 박리에 의한 파괴이며, 전단경간 내 측면 전 보강의 경우 보강재 단부의 전단응력이 최대 전단응력에 도달했을 때 박리가 일어나기 때문에 전 접촉면이 최대 전단응력에 이를 수 없으며, 이러한 경우의 전단강도 이론식은 다음과 같다.

$$V_r = 2[\tau_{ave}(dh_s/2)] \quad (kg) \quad (2)$$

* 정희원, 인하대학교 대학원 건축공학과 석사과정

** 정희원, 인하대학교 대학원 건축공학과 박사과정

*** 정희원, 인하대학교 공과대학 건축공학과 교수

여기서, τ_{ave} 는 평균전단응력으로 기존의 실험결과 8 kg/cm^2 으로 알려져 있다.

2.2.2 유리섬유쉬트로 보강된 보의 전단강도⁽²⁾

유리섬유쉬트로 보강된 보의 파괴는 유리섬유쉬트의 파단이나 단부 박리에 의해 발생하게 된다. 이 두 가지의 파괴형태에 따른 보강재의 전단강도는 최종적으로 다음과 같이 정리된다.

$$V_r = \frac{A_f f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} \quad (t) \quad (3)$$

여기서, A_f, f_{fe}, d_f 는 유리섬유쉬트의 단면적, 유효응력 그리고 유효춤이며, s_f 는 스트립 간격, α 는 스트립의 대각경사각을 나타낸다. 유효응력 f_{fe} 는 최대응력 f_{fu} 에 다음과 같은 감소계수 R 을 곱한다.

$$R = \frac{0.0904 (f_{ck})^{2/3} w_{fe}}{(E_f t_f)^{0.58} \epsilon_{fu} d_f} \quad (4)$$

이 때, f_{ck}, w_{fe}, E_f 는 콘크리트의 강도 (t/cm^2), 유리섬유쉬트의 유효폭과 탄성계수(t/cm^2)이며, t_f, ϵ_{fu} 는 두께(cm)와 최대변형률이다. 유리섬유쉬트의 실제 부착응력이 발생하는 유효부착길이 L_e 는

$$L_e = 0.1 e^{6.134 - 0.58 \ln(t_f E)} \quad (5)$$

로 표현된다. 전단에 저항하는 유효폭 w_{fe} 는 U형 보강의 경우에는 $d_f - L_e$ 의 값을, 측면 보강시에는 $d_f - 2L_e$ 의 값을 가지며, 스트립 보강의 경우는 이 값에 (w_f/s_f) 를 곱하게 된다.

3. 구조실험

3.1 시험체 및 전단보강재

시험체는 폭 15 cm, 총 30 cm의 길이 100 cm인 a/d=1.0 시험체 4 개와 길이 150 cm인 a/d=2.0 시험체 6 개가 제작되었다. 철근은 SD40 재질이며, 그림 1과 같이 배근하였다. 콘크리트의 평균압축강도는 286 kg/cm^2 였다. 강판은 SS400의 재질로 두께 2.3 mm, 4.5 mm가 사용되었고, 접착용의 에폭시 수지 두께는 4 mm이며 특성은 표 1과 같다. 유리섬유쉬트는 유리섬유와 에폭시의 복합재로 두께 1.3 mm의 1 겹을 사용하였으며 재료의 특성은 표 2와 같다. 표 3은 시험체의 개요를 나타낸 것이다.

3.2 실험방법

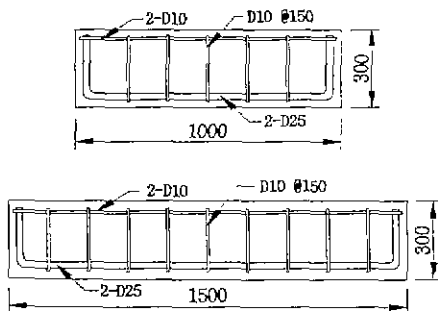


그림 1. 시험체의 치수 및 배근도 (a/d=1.0, a/d=2.0)

표 1. 강판접착용 에폭시의 특성

	혼합비 (주제 : 경화제)	인장강도 (kg/cm^2)	접착강도 (kg/cm^2)
접착용 에폭시	3:1 (중량비)	350	100

표 2. 유리섬유쉬트접착에 사용된 재료의 특성

	탄성계수 (kg/cm^2)	신장률 (%)	인장강도 (kg/cm^2)
유리섬유	735000	4.2	31000
에폭시	28000	1.8	500
유리섬유 복합재	252000	2.0	5600

표 3. 실험에 사용된 시험체의 개요

시험체	전단스팬비	보강재	보강방법	파괴하중 (t)	보강효과	파괴시의 중앙처짐 (mm)	파괴 형태
N1	1.0	-	기준 시험체	48.6	1.0	2.1	전단파괴
SAN1	1.0	강판	측면 보강 (t=2.3mm)	56.5	1.16	1.9	전단파괴
SAM1	1.0	강판	측면 보강 (t=4.5mm)	66.8	1.37	2.4	전단파괴
GA1	1.0	유리섬유쉬트	U형 보강 (t=1.3mm)	64.0	1.31	3.5	전단파괴
N2	2.0	-	기준 시험체	35.9	1.0	6.6	전단파괴
SAN2	2.0	강판	측면 보강 (t=2.3mm)	45.5	1.26	8.6	휨파괴
SAM2	2.0	강판	측면 보강 (t=4.5mm)	43.1	1.20	7.3	전단파괴
GA2	2.0	유리섬유쉬트	U형 보강 (t=1.3mm)	46.0	1.28	11.9	휨파괴
GSV2	2.0	유리섬유쉬트	스트립 보강 (90°)	45.6	1.25	7.4	전단파괴
GSD2	2.0	유리섬유쉬트	스트립 보강 (63°)	45.7	1.30	9.6	전단파괴

200 t 용량의 범용구조물시험기에 그림 2와 같이 시험체를 배치하였고, 시험체의 변위를 파악하기 위하여 자동변위계를 설치하였다. 1차 가력으로 전단경간마다 1 개씩인 기준 시험체는 최종파괴시까지 가력하였으며, 나머지는 파괴하중의 70 % 또는 균열 폭이 0.3~0.35 mm가 될 때까지 가력하였다. 그 후 그림 3과 같이 전단보강을 실시한 후 양생을 거쳐 보강재에 스트레인게이지를 부착한 다음 2차 가력하였다.

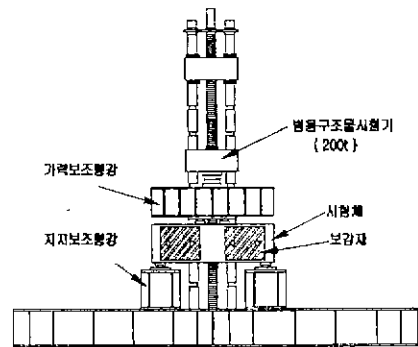


그림 2. 시험체 가력 상황도

4. 실험결과 및 고찰

4.1 파괴양상

강판보강 시험체는 강판의 부착 탈락에 이은 시험체의 전단파괴와 휨압축파괴가 발생하였다. 강판은 큰 변형없이 대각전단균열 발생 및 진전을 억제하는 데 효과적이었으나, 급속한 탈락에 의한 취성파괴의 문제점이 발생하였다. 표 3에서 보듯이 강판보강은 16~37 %의 내력증가를 나타냈다. 유리섬유쉬트보강 시험체도 쉬트 단부에서의 부착탈락에 이은 전단파괴와 휨압축파괴가 발생하였다. 재하시 기존 대각전단균열의 폭이 다시 증가되는 양상을 보였으며 25~31 %의 내력증가를 나타냈다. 최종파괴시의 중앙 처짐은 유리섬유쉬트 보강체가 강판 보강체보다 크게 나타나고 있는데 이는 강판과 유리섬유쉬트의 강성의 차이에서 비롯된 것이다. 그림 4는 보강시험체의 균열 및 파괴형태를 나타낸 것이다.

4.2 하중-변위 관계

그림 5는 보강시험체의 하중-변위관계를 기준 시험체와 비교한 그래프이다 a/d=1.0의 경우 2.0 mm의 처짐에 해당하는 하중을 비교하여 보면 N1의 경우 45 톤, SAM1의 경우는 65 톤을 나타내고 있어 약 30 %의 하중증가를 보이고 있다. 최종파괴시의 처짐을 비교하여 보면 강판 보강체의 약 2.0~2.3 mm에 비하여 유리섬유쉬트 보강체는 3.5 mm를 보이고 있다. a/d=2.0인 경우에는 모두 비슷한 형태로 처짐억제 효과를 보이고 있으며, 강판보강의 경우에는 7.3~8.6 mm, 유리섬유쉬트보강의 경우에는 7.4~11.9 mm로 강판으로 보강된 보의 처짐 억제효과가 높은 것으로 나타났다.

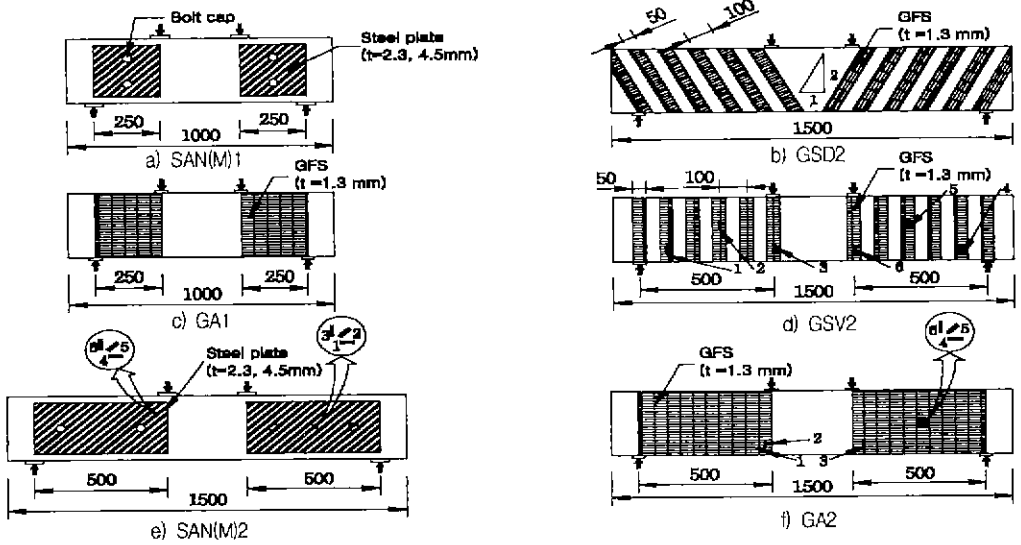


그림 3. 시험체의 전단보강도

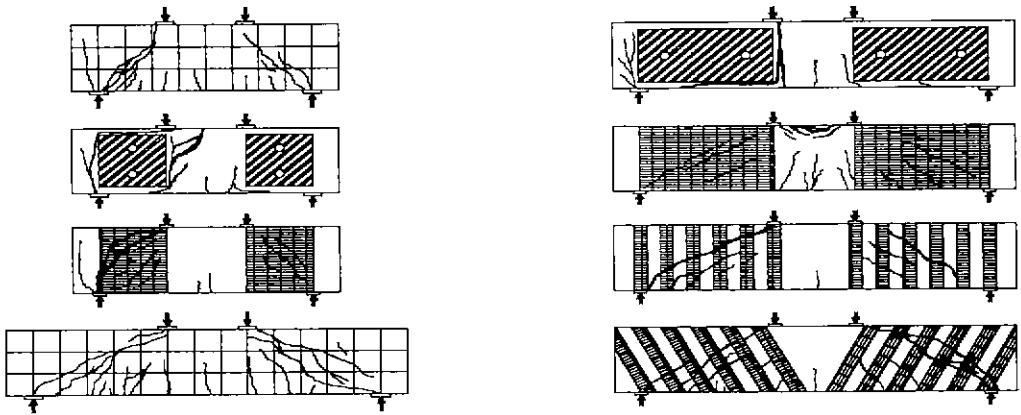


그림 4 시험체의 균열 및 파괴 형태 (N1, SAM2, SAM1, GA2, GA1, GSV2, N2, GSD2)

4.3 하중-변형률 관계

그림 6은 보강 전후의 철근 변형률을 비교하여 나타낸 것으로 전단내력의 분담효과를 알 수 있다. SAN1의 경우 주인장철근 변형률의 차이는 발견되지 않으나 전단보강근에서는 차이가 발생하고 있다. 1차 가력시에 초기 변형률이 미소하고, 전단균열이 발생한 후에는 현저한 변형률을 보여 보의 전단내력 분담이론에 부합되고 있다. 2차 가력시에는 초기부터 변형률이 확인되고 있으나 미소하게 증가하고 있는데, 이는 보강재가 전단력을 지지하고 있어서 전단보강근의 전단력 분담률이 줄어들었기 때문이다. GA2의 경우도 이와 비슷한 변형률을 보이고 있다.

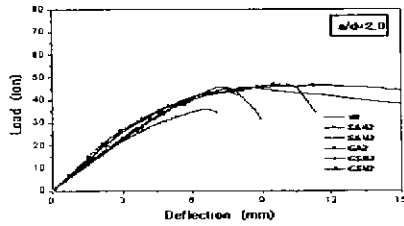
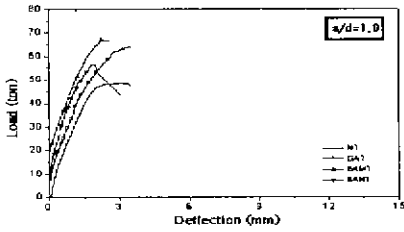


그림 5 보강시험체의 하중-변위 곡선

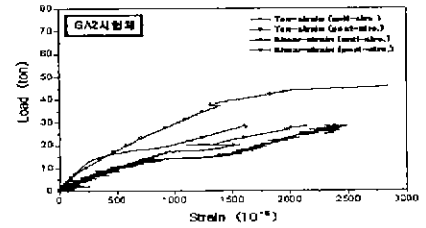
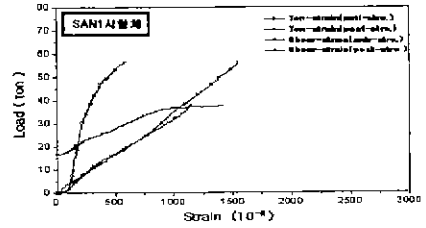


그림 6 보강시험체의 하중-변형률 곡선

표 4. 주응력 방향

시험체	변형률			주응력방향(°)
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	
SAN1	-0.000033	0.00050	-0.000031	-44.9
SAM1	-0.000118	0.00035	-0.000076	-43.6
GA1	0.00143	0.00562	0.00345	-36.2
SAN2	-0.00035	0.00024	0.00041	-14.4
SAM2	-0.00026	0.00022	0.000176	-24.5
GA2	-0.00074	0.00498	0.00441	-25.3

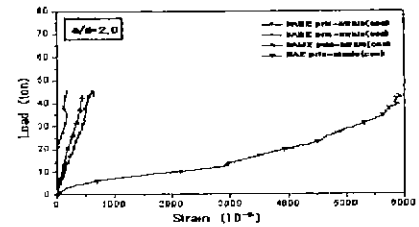
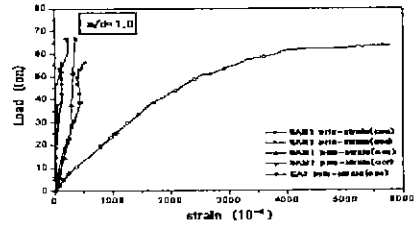


그림 7 보강재의 주변변형률 곡선

4.4 주변변형률 및 주응력

3축 스트레인게이지의 수평, 대각, 수직변형률을 차례로 ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 로 하면, 주변변형률과 주응력의 방향은

$$\epsilon_{\max(\min)} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]^{1/2}$$

$$\tan 2\theta = \frac{2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3}{\epsilon_1 - \epsilon_3}$$
(6)

으로 계산되며, 여기서 θ 는 부재축에 대한 경사각으로서 반시계 방향을 양의 값으로 한다. 이 식 (6)을 이용하여 그림 7은 보강재의 변형률들을 최대 주인장변형률로 계산하여 나타낸 그래프이고, 표 4는 극한하중시에 보강재의 중앙 변형률로부터 주응력방향을 구한 결과값이다. 그림 7에서 $a/d=1.0$ 보다 2.0 인 경우에 변형률이 크게 나타나는데, 이는 콘크리트의 압축장에 의한 압축력 분담이 상대적으로 작아 보강재의 인장력이 크게 작용하였기 때문이다.

4.5 실험값과 이론식과의 비교

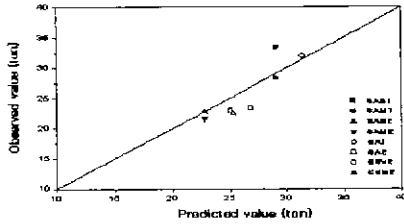


그림 8. 실험값과 이론값의 비교 곡선

그림 8과 표 5는 보강체의 전단력을 실험값과 2장에서 소개한 이론식과의 비교를 나타낸 것이다. SAN2는 실험값과 이론식에 의한 값이 정확하게 일치하고 있으며 다른 시험체의 경우에도 최대 14%의 오차를 나타낸 SAM1과 GSV2 시험체를 제외하고 모두 이론식과 근접한 값을 보이고 있다.

5. 결론

이상의 실험 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 강판으로 보강된 시험체는 기준 시험체에 비하여 약 16~37 %의 내력증가를 보였으며, SAN1, SAM1, SAM2는 전단파괴가 발생하였으며, SAN2는 휨압축파괴가 발생하였다. 유리섬유쉬트로 보강된 시험체는 25~31 %의 내력증가를 보였고 GA1, GSV2, GSD2는 유리섬유쉬트의 접착계면 탈락을 동반한 전단파괴가 발생하였고, GA2는 휨압축파괴를 보였다.
- 2) 강판보강의 경우는 대각전단균열이 효과적으로 억제되나 다른 전단균열이 발생하면서 최종파괴에 이르렀고, 유리섬유쉬트의 경우는 대각전단균열의 폭이 증가되면서 최종파괴에 이르렀다.
- 3) 전단보강에 의한 시험체의 강성이 증가되었으며 강판보강의 경우가 유리섬유쉬트보강의 경우보다 강성이 더 증가되어 시험체의 처짐억제에 효과적으로 작용하였다.
- 4) 전단강도 이론식을 실험값과 비교한 결과, 실험값이 강판의 경우에는 0.94~1.14의 값을, 유리섬유쉬트보강의 경우에는 0.86~1.09의 값을 보여 전단내력을 유사하게 예측하고 있는 것으로 조사되었다.

감사의 글

본 연구에서 시험체의 전단보강은 (주)한국쇼-본드건설 및 톨림파이버랩 건설(주)의 지원을 받아 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Sharif, A., Al-Sulaimani, G. J., Basunbul, I. A., Baluch, M. H. and Husan, M., "Strengthening of Shear-damaged RC Beams by External Bonding of Steel Plates," Magazine of Concrete Research, 47, No 173, Dec., pp. 329-334.
2. Khalifa, A., Wilham, J. G., Antonio, N. and Abdel Aziz, M. I., "Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of RC Flexural Members," Journal of Composites for Construction, Vol 2, No. 4, November, 1998, pp. 195-202
3. Brown, A T, Lyn, B. and Scott, A., Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill, Singapore, 1989.
4. 김상식, 철근콘크리트 구조설계, 문운당, 1996.

표 5. 실험값과 이론값의 비교 (t)

시험체	$V_c + V_s$ (실험)	V_r (이론)	V_n (이론)	V_n (실험)	$V_n(\text{실험}) / V_n(\text{이론})$
N1	24.3		14.5	24.3	1.67
SAN1		4.8	29.1	28.3	0.97
SAM1		4.8	29.1	33.4	1.14
GA1		7.1	31.4	32.0	1.09
N2	18.0		13.6	18.0	1.32
SAN2		4.8	22.8	22.8	1.0
SAM2		4.8	22.8	21.6	0.94
GA2		7.1	25.1	23.0	0.91
GSV2		8.9	26.9	23.4	0.86
GSD2		7.3	25.3	22.5	0.89