

# 강판 및 유리섬유쉬트로 전단보강된 철근콘크리트 보의 보강 및 연성 평가

## Strengthening and Ductility Evaluation of Reinforced Concrete Beams Shear-Strengthened by Steel Plates and Glass Fiber Sheets

문 상 범\*                      오 성 영\*\*                      김 상 식\*\*\*  
Moon, Sang Beom              Oh, Sung Young              Kim, Sang Sik

### ABSTRACT

Shear strengthening method by steel plates and fiber reinforced polymer lamination has recently been favorably selected due to its efficiencies of duration and performance. Shear failure being brittle and difficult to predict, reinforced concrete structures must have sufficient capacity to absorb the energy for shear failure and to support temporarily the overload which may result due to the loss of shear capacity to the structure. These respects being considered, this research has carried out with the purpose of the experimental verification of the shear strengthening effect and ductility evaluation.

### 1. 서 론

최근 전단내력이 손상된 구조물에 강판 또는 섬유보강폴리머(FRP)를 부착하는 방법은 내구성과 시공성의 효과 때문에 많이 사용되어지고 있다. 전단 파괴는 취성이고 예측하기 어려우므로 철근콘크리트 구조물은 전단내력의 손실을 가져올 과하중에 대한 충분한 에너지 흡수능력을 갖고 있어야 한다. 이러한 관점에서 이 연구는 강판과 유리섬유쉬트에 의한 보의 전단보강 효과를 확인하고 전단보강한 철근콘크리트 보의 연성능력을 평가하여 합리적인 보강설계를 위한 자료를 제시하고자 한다.

### 2. 전단보강에 대한 이론적인 고찰

#### 2.1 설계 기준에 의한 보의 전단강도식

철근콘크리트 보에 외부 전단보강을 했을 때, 보의 공칭 전단강도  $V_n$ 은 콘크리트의 전단강도  $V_c$  및 스티럽의 전단강도  $V_s$ 에 보강재의 전단강도  $V_r$ 이 추가되어 다음과 같이 주어진다.

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

#### 2.2 보강재의 전단강도

강판으로 전체 측면을 보강하는 경우 변형의 연속성이 보장되므로 보와 측면에 부착된 보강재 사이의 계면에서의 전단응력 분포는 일정하다고 가정할 수 있고, 전단응력이 최대 전단응력  $\tau_{ult} = 35 \text{ kgf/cm}^2$ 에 도달할 때 박리가 일어나며 이 때의 전단강도 이론식<sup>(1)</sup>은 다음과 같다.

\* 정회원, 인하대학교 공과대학 건축공학과 석사과정  
\*\* 정회원, 인하대학교 공과대학 건축공학과 박사과정  
\*\*\* 정회원, 인하대학교 공과대학 건축공학과 교수

$$V_r = 2\text{면} \times [\tau_{ult}(dh_j/2)] \quad (\text{kg}) \quad (2)$$

유리섬유쉬트로 보강된 보의 파괴는 유리섬유쉬트의 파단이나 단부 박리에 의해 발생하게 된다. 이 두 가지의 파괴 형태에 따른 보강재의 전단강도<sup>(2)</sup>는 Eurocode2 에서 다음과 같이 적용하고 있다.

$$V_r = \frac{0.9}{\gamma_f} \rho_f E_f \varepsilon_{frp,e} b_w d (1 + \cot \theta_2) \sin \theta_2 \quad (\text{kg}) \quad (3)$$

여기서,  $\varepsilon_{frp,e}$  는 유효 변형률로서 FRP의 축강성의 함수  $\rho_f E_f$  와의 관계식은 다음과 같다.

$$\varepsilon_{frp,e} = 0.0119 - 0.0205(\rho_f E_f) + 0.0104(\rho_f E_f)^2 \quad 0 \leq \rho_f E_f \leq 10,000 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{frp,e} = 0.00245 - 0.00065(\rho_f E_f) \quad \rho_f E_f > 10,000 \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

그리고  $\theta_2$ 는 보강재의 경사각도,  $\gamma_f$ 는 1축 인장상태에서의 FRP에 대한 안전계수이며 보강재에 따라 유리섬유는 1.25, 아라미드는 1.20, 탄소섬유는 1.15를 사용한다.

### 2.3 보의 연성 평가

구조체의 연성은 전체 변형에너지  $U_t$  에 대한 비탄성 변형에너지  $U_n$  의 비로 정의되며, 전체 변형에너지 중 탄성 변형에너지와 비탄성 변형에너지가 나누어지는 기울기  $S$  는 Jeong - Grace의 제안식<sup>(3)</sup>에 근거하여 이 연구에서는

$$S = \gamma \frac{P_1 S_1 + (P_2 - P_1) S_2 + (P_3 - P_2) S_3}{P_3} \quad (5)$$

으로 하였고, 연성지수  $D$  는

$$D = \frac{U_n}{U_t} \quad (6)$$

으로 하였다. 이 식에서  $\gamma$  는 파괴형태에 대한 계수이고,  $P_1, P_2$  는 각 기울기 교점에서의 하중값이며,  $P_3$  는 파괴시의 하중값이다. 그리고  $S_1, S_2$  는 파괴하중의 30 %와 70 %에서의 기울기이고,  $S_3$  는 파괴 하중점에서의 기울기이다.

## 3. 구조실험

### 3.1 시험체 계획

구조실험을 위하여 폭 15 cm, 깊이 30 cm에 길이 100 cm인 a/d=1.0 시험체 5 개와 길이 150 cm인 a/d=2.0 시험체 10 개가 제작되었다. 표 1은 시험체의 개요를 나타낸 것이다. 철근은 SD40 재질이며, 그림 1과 같이 배근하였다. 콘크리트의 평균 압축강도는 286 kgf/cm<sup>2</sup>였다. 강판은 SS400의 재질로 두께 2.3 mm, 4.5 mm, 6.0 mm가 사용되었고, 접착층의 에폭시 수지 두께는 4 mm이며 특성은 표 2와 같다. 유리섬유쉬트는 유리섬유와 에폭시의 복합재로 두께 1.3 mm의 1 겹을 사용하였으며, 재료의 특성은 표 3과 같다.

### 3.2 실험방법

200t 용량의 범용구조물시험기에 그림 2와 같이 시험체를 배치하였고, 시험체의 변위를 파악하기 위하여 자동변위계를 설치하였다. 1차 가력으로 전단경간마다 1 개씩 기본 시험체는 최종 파괴시까지 가력하

표1. 시험체 변수

전단 경간비	시험체명	보강방법				비고
		보강형태	보강두께	단부정착	균열보수	
1.0	N1	무보강		-	-	· 단부정착 플랫바 $t = 4.5\text{mm}$ 강판이용, · Y : 균열면 보수 · Z : 균열면 보수 및 단부정착 · t : 보강재 두께 · l : 보강재 길이
	SBN1-Y	강판전면보강	$t = 2.3\text{mm}, l = 940\text{mm}$	×	○	
	SBM1-Y	강판전면보강	$t = 4.5\text{mm}, l = 940\text{mm}$	×	○	
	GA1-Y	유리섬유슈트전면보강	$t = 1.3\text{mm}, l = 250\text{mm}$	×	○	
	GA1-Z			○	○	
2.0	N2	무보강		-	-	
	SBN2-Y	강판전면보강	$t = 2.3\text{mm}, l = 1440\text{mm}$	×	○	
	SBM2-Y	강판전면보강	$t = 4.5\text{mm}, l = 1440\text{mm}$	×	○	
	SBL2-Y	강판전면보강	$t = 6.0\text{mm}, l = 1440\text{mm}$	×	○	
	GA2-Y	유리섬유슈트전면보강	$t = 1.3\text{mm}, l = 500\text{mm}$	×	○	
	GA2-Z			○	○	
	GSD2-Y	유리섬유슈트	스트립 각도 : 56.3도	×	○	
	GSD2-Z	대각스트립보강	간격 : 50mm, 폭 : 50 mm	○	○	
	GSV2-Y	유리섬유슈트	스트립 각도 : 90도	×	○	
GSV2-Z	수직스트립보강	간격 : 50mm, 폭 : 50 mm	○	○		

였으며, 나머지는 파괴하중의 80% 또는 균열 폭이 0.3~0.35 mm가 될 때까지 가력하였다. 그 후 균열면을 에폭시로 보수한 후 그림 3과 같이 전단보강을 실시한 후 양생을 거쳐 보강재에 스트레인게이지를 부착한 다음 2차 가력하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 보강시험체의 균열 및 파괴양상

강판보강 시험체 중 2.3mm로 보강된 SBN1-Y 시험체는 강판의 하부에서 심한 좌굴이 발생하였으며, 4.5mm로 보강된 SBM1-Y 시험체는 보의 한 쪽 경간에서 강판이 콘크리트를 물고 떨어지는 파괴되었다. 한편  $a/d=2.0$ 인 시험체의 경우 그림 3에서와 같이 가력점 부위에서 압괴가 일어나는 파괴 양상을 보였다. 강판보강 시험체의 경우 전단균열에 대한 보수를 하고 보의 측면 전체를 보강하였기 때문에

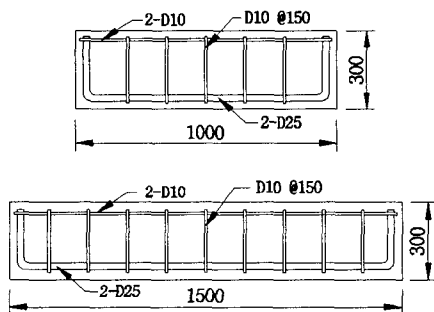


그림 1. 시험체의 치수 및 배근도 (  $a/d=1.0$ ,  $a/d=2.0$  )

표 2. 강판접착 및 균열보수용 에폭시의 특성

	혼합비 (주제 : 경화제)	인장강도 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	접착강도 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
접착용 에폭시	3:1 (중량비)	350	100
균열주입용 에폭시	2:1 (중량비)	-	110

표 3. 유리섬유슈트접착에 사용된 재료의 특성

	탄성계수 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	신장률 (%)	인장강도 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )
유리섬유	735000	4.2	31000
에폭시	28000	1.8	500
유리섬유 복합재	252000	2.0	5600

보의 강성이 전체적으로 증가되어 전면보강은 전단에 대한 보강 효과뿐만 아니라 휨에 대해서도 균열 폭의 증가를 제어해 주어 내력이 증대되고 처짐량이 감소함을 알 수 있었다. 유리섬유쉬트 보강 시험체는 중앙하부의 휨인장균열이 진전되었으며, 이후 보수한 균열면에서 약 1cm 정도 떨어진 곳에서 새로운 전단균열이 유리섬유쉬트 내부 또는 스트립의 계면을 타고 발생하였다. a/d=1.0인 시험체는 전단균열이 진전되며 전단파괴가 일어났고, a/d=2.0인 시험체는 유리섬유쉬트의 박리와 함께 휨압축파괴가 발생하였다. 단부 정착 플랫폼을 부착한 a/d=2.0인 시험체는 가력부 사이에서 압괴가 일어나면서 플랫폼의 좌굴이 발생하였으며 단부 정착한 Z계열 시험체는 Y계열 시험체보다 중앙부 처짐을 줄여주는데 효과적이었다.

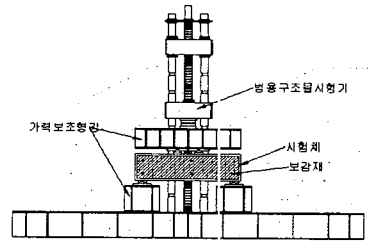


그림 2. 시험체 가력상황

#### 4.2 하중-변위 관계

강판으로 보강된 보의 경우는 두께의 증가에 따라 그림 4에서와 같이 62~95 %의 내력증가와 중앙부 처짐에서 42~65 %의 감소 효과가 나타났다. 유리섬유쉬트로 보강된 시험체는 그림 5에서와 같이 처짐의 감소에 있어서 Z계열의 시험체가 Y계열의 시험체보다 6~8 % 처짐이 감소하였고 이는 단부 정착한 플랫폼이 유리섬유쉬트의 박리를 방지해 주기 때문에 보에 발생한 균열의 진전을 유리섬유쉬트에 의해 억제되어 처짐이 Y계열 시험체보다 상대적으로 작게 나타나고 있다. 한편 유리섬유쉬트로 보강한 a/d=2.0인 시험체는 보강형태에 따라 보강효과가 약간씩 차이가 있었으며, 기본시험체에 대해 약 33 ~ 42 %의 보강 효과를 보였다.

#### 4.3 연성 평가

하중 - 변위 곡선에서 파괴하중의 30 %, 70 % 그리고 파괴 하중점에서의 접선의 기울기 S를 구하여

표 4. 실험결과

전단 경간비	시험체명	파괴하중		중앙부			연성지수 비탄성에너지 / 전체에너지	보강재 전단력	이론값	실험값 / 이론값	파괴양상
		ton	N1(N2) 대비	최대처짐 (mm)	파괴하중시 처짐 <sup>주1)</sup>	파괴시처짐 / 기본시험체					
1.0	N1	48.60	-	3.1	3.1	1.00	0.45	-	14.40	1.69	전단
	SBN1-Y	86.05	1.77	3.1	1.5	0.48	0.15	21.00	45.30	0.95	전단
	SBM1-Y	94.60	1.95	2.6	1.1	0.35	0.32	21.00	45.30	1.04	전단
	GA1-Y	60.35	1.24	2.7	1.7	0.55	0.41	5.81	30.11	1.00	전단
	GA1-Z	62.40	1.28	4.8	2.4	0.77	0.50	5.81	30.11	1.04	전단
2.0	N2	35.90	-	6.6	6.6	1.00	0.48	-	13.52	1.33	전단
	SBN2-Y	58.10	1.62	9.9	3.8	0.58	0.44	21.00	45.30	0.64	휨압축
	SBM2-Y	60.10	1.67	10.5	3.5	0.53	0.51	21.00	45.30	0.66	휨압축
	SBL2-Y	70.55	1.97	9.5	3.0	0.45	0.43	21.00	45.30	0.79	휨압축
	GA2-Y	47.20	1.31	9.3	4.7	0.71	0.47	5.81	23.76	0.99	휨압축
	GA2-Z	48.80	1.36	9.1	4.3	0.65	0.49	5.81	23.76	1.03	휨압축
	GSD2-Y	48.65	1.36	8.7	4.6	0.70	0.40	4.67	22.62	1.08	휨압축
	GSD2-Z	50.95	1.42	8.8	4.1	0.62	0.45	4.67	22.62	1.13	휨압축
	GSV2-Y	48.25	1.34	10.4	4.9	0.74	0.52	6.48	24.43	0.99	휨압축
	GSV2-Z	48.85	1.36	10.2	4.5	0.68	0.55	6.48	24.43	1.00	휨압축

주1) a/d = 1.0인 시험체 = 48.60 톤, a/d = 2.0인 시험체 = 35.90 톤에서의 중앙부 처짐값임.

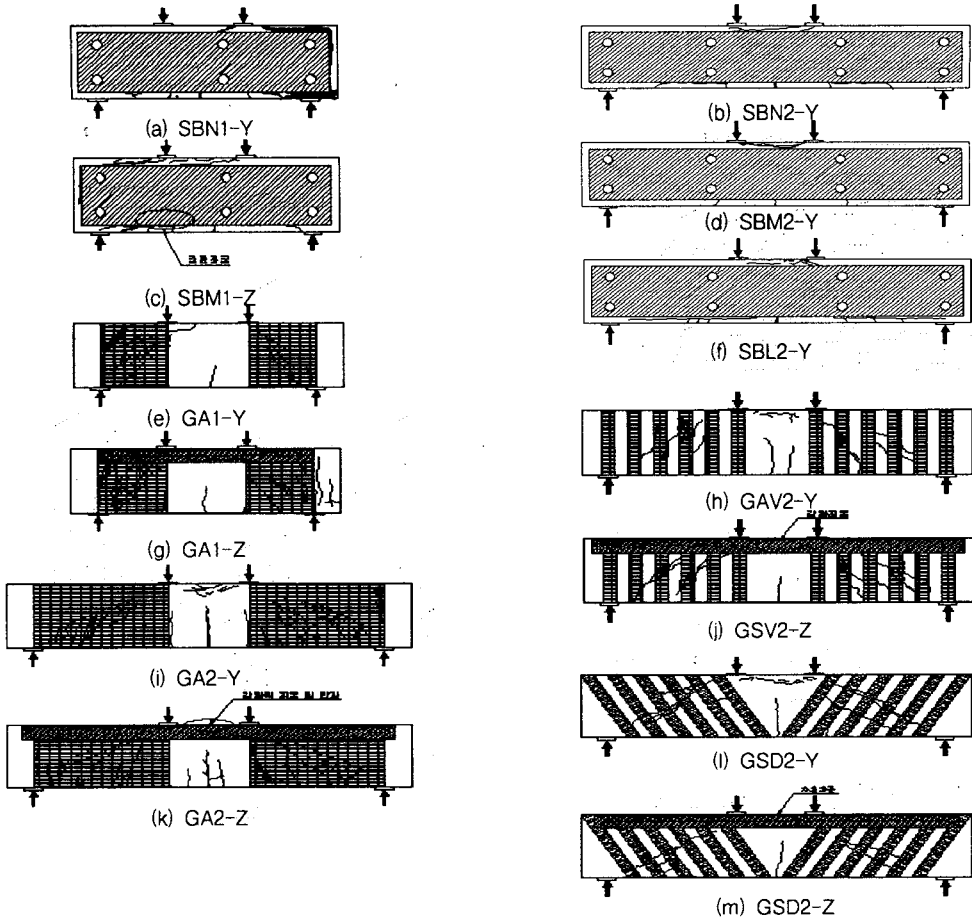


그림 3. 보강시험체의 균열 및 파괴양상

비탄성 변형에너지와 탄성 변형에너지가 분리되는 기울기를 찾아 비탄성 변형에너지에 대한 전체 변형에너지의 비로 연성 지수를 그림 6에 나타내었다. 유리섬유슈트보강 시험체의 경우 단부 정착한 Z계열의 시험체가 Y계열의 시험체보다 연성 지수가 더 높게 나타났으며,  $a/d = 1.0$ 인 시험체의 경우 약

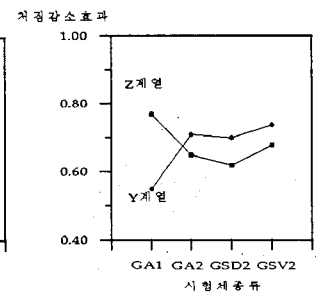
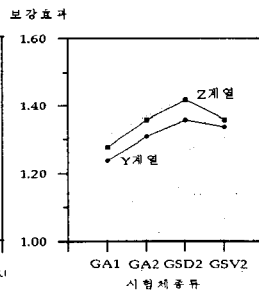
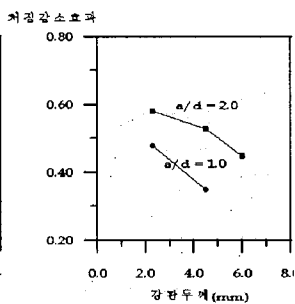
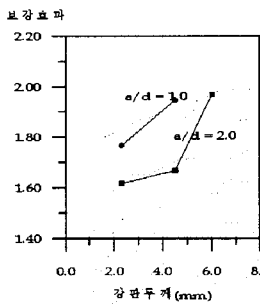


그림 4. 강판 두께의 영향

그림 5. 단부 정착의 영향

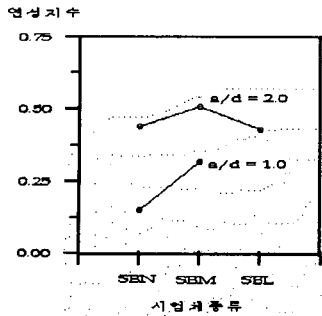


그림 6. 보강시험체의 연성지수

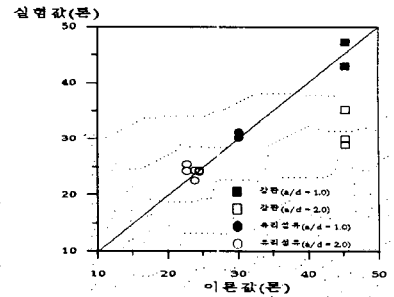
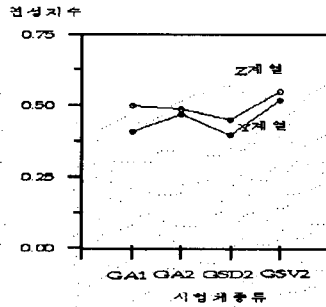


그림 7. 실험값과 이론값의 비교

20 %의 증가를 보였고,  $a/d = 2.0$  인 시험체의 경우 3 ~ 11 % 더 증가함을 알 수 있었다. 한편 보강 재료에 대해  $a/d = 1.0$  인 경우 유리섬유쉬트 보강이 강판 보강에 비하여 95%의 연성능력이 증가하였으며,  $a/d = 2.0$  인 시험체에서는 유리섬유쉬트 보강이 강판 보강보다 비해 5% 연성능력이 큰 것으로 조사되었다.

#### 4.4 실험값과 이론식과의 비교

그림 7에서와 같이 강판보강 시험체는  $a/d = 1.0$  인 경우 이론값과 실험값이 약 5 %의 오차를 보였으며  $a/d = 2.0$  인 시험체의 경우 21~36 %의 오차를 보였는데 이는 현재 적용된 식이 전단 경간비와 강판의 두께가 고려되지 않아 차이가 큰 것으로 판단된다. 유리섬유쉬트로 보강된 시험체의 경우 실험값과 이론값의 차이는 4~13 %의 차이가 나타났다.

### 5. 결론

- 1) 강판보강 시험체는 62 ~ 95 %의 전단보강 효과가 있었으며, 유리섬유쉬트보강 시험체의 경우에는 24 ~ 42 %의 전단보강 효과가 있었고, 단부 정착인 Z계열의 시험체가 Y계열의 시험체보다 2 ~ 6 %의 보강 효과가 있었다.
- 2) 강판보강 시험체의 경우 강판의 두께가 두꺼울수록 강성이 증가되어 처짐량이 감소하였다. 유리섬유쉬트보강시험체는 단부정착한 Z계열의 시험체는 Y계열의 시험체보다 6 ~ 8 %의 처짐 감소효과를 보였다.
- 3) 보강시험체의 연성 지수는 강판보다 유리섬유쉬트로 보강한 시험체가 큰 것으로 나타났으며, 유리섬유쉬트보강 시험체의 단부 정착을 위해 플랫폼바를 설치한 Z계열의 시험체가 Y계열의 시험체보다 연성 지수가 3 ~ 11 % 높게 나타났다.
- 4) 전단보강된 보의 전단강도를 예측한 이론식과 실험값을 비교한 결과, 강판보강 시험체의 경우 실험값이 0.64 ~ 1.04의 값을 보였고, 유리섬유쉬트 보강의 경우 0.96 ~ 1.13의 값을 보였으며, 이는 적용된 식이 유리섬유쉬트의 전단강도를 유사하게 예측할 수 있는 것으로 조사되었다.

#### 감사의 글

본 연구의 실험은 (주)한국쇼-본드건설 및 (주)콘크리닉의 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. Triantafillou, C. T., "Shear Strengthening of RC Beams Using Epoxy-Bonded FRP Plates," ACI Structural Journal, Vol. 95, No.2, March-April, 1998, pp. 107-115.
3. Grace, N.F., Sayed, G.A., Soliman, A.K., Saleh, K.R., "Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer Laminates," ACI Structural Journal, Vol. 96, No.5, September-October, 1999, pp. 864-874.
4. 김상식, 철근콘크리트 구조설계, 문운당, 1996.