

# 상한계 이론을 이용한 FRP로 보강된 RC보의 전단강도 예측 모델

## Prediction Model Using Upper Bound Theorem of Shear Strength for RC Beams Strengthened by FRP

홍 성 길\*      문 선 혜\*\*  
Hong, Sung Gul      Moon, Sun Hye

---

### ABSTRACT

This study was performed to verify the effect of reinforcement of RC Beams strengthened(90° strip type) by FRP(CFRP) and Predicted the shear strength of them using the upper bound theorem. The prediction model was confirmed with the result of the FEM analysis. The analyzed result showed that shear-damaged RC beams by strengthened by FRP was improved their shear capacity.

---

#### 1. 연구의 배경과 목적

경제적 요인 및 노후화, 내력저하 등의 이유로 구조물의 보수·보강 수요가 증가하고 있는 시점에서, 콘크리트 구조물의 전단 보강 재료로 일반적으로 사용되고 있는 강판은 자중이 크고 부식의 문제점도 있어 이런 약점을 해결 할 수 있는 신소재들이 개발·연구 되고 있다. 그 중 하나인 FRP(Fiber Reinforced Concrete)는 그것의 구성요소, 화학적·물리적 특성 등이 다양하다. 때문에 아직 시판되고 있는 것은 실험으로 내구성이 검증된 몇몇 소수에 불과하므로, 가볍고 튼튼하고 부식의 염려가 없는 대체 보강재가 요구되고 있는 때에 FRP는 좋은 연구 대상이 될 수 있다. 본 연구에서는 FRP로 보강된 구조물의 FEM해석을 통해 그 거동과 전단보강 효과를 소성학 상한계 이론을 기반으로 하여 예측한 모델과 비교 예측 모델의 적합성을 검토하였다.

#### 2. 실험(FEM해석) 계획

##### 2.1. 사용 재료 및 구조물

- (1) 콘크리트의 설계기준강도 :  $240\text{kgf}/\text{cm}^2$
- (2) 철근 :  $4000\text{kgf}/\text{cm}^2$  인 D13, D16 (압축철근 - 2D13, 인장철근 - 4D16)
- (3) 보강재로 쓴 FRP : CFRP
  - ① 인장강도 -  $31600\text{kg}/\text{cm}^2$

---

\* 정희원, 서울대학교 건축학과 부교수  
\*\* 서울대학교 건축학과 석사과정

② 탄성계수 -  $1.58 \times 10^2$

③ 자중 -  $1.6g/cm^3$

④ 극한 변형 - 1.9%

(4) 보강재 배열 형태 :  $90^\circ$  strip style

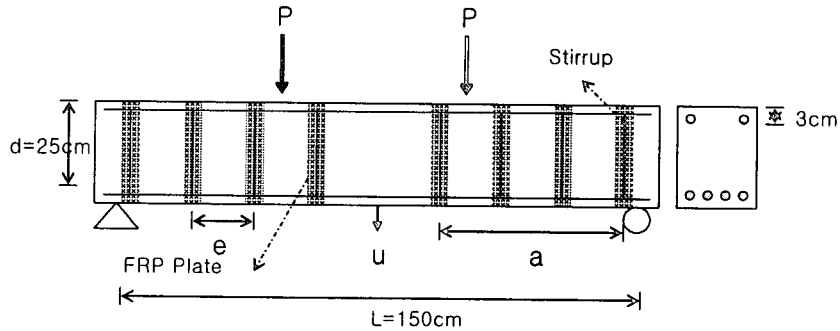


그림 1 실험체 상세 설계

(5) 변수 : 전단 경간비,

### 3. 실험 결과 및 전단강도 예측 모델

#### 3.1. 실험 결과 및 고찰

FEM해석을 위해 Stirrup과 보강재가 콘크리트과의 부착강도저하, 배합강도 저하 등 강도유효계수( $\alpha$ )를 산출하지 않았기 때문에 FEM해석 결과값이 실제보다 크게 나왔다. 강도유효계수( $\alpha$ )는 실제 환경과 재료, 구조등의 조건이 달라질 때마다 변해야 하기 때문에 그때마다 적절한 이 값을 달리해야 할 것이다. 본 연구에서는 이미 선행되어진 다른 실험과 논문\*에서 그 값을 어렵잡아 사용하여  $\alpha=0.03$ 으로 계산하였다. 그 값이 크지 않기 때문에 실제 실험치와도 오차 범위안에 있어 실제 전단강도 해석 모델에는 큰 영향을 미치지 않았다.

#### 3.2. 상한계 이론을 이용한 전단강도 예측 모델

수직변위에 비해 구조물의 수평변위에 의한 에너지량은 미소하고, 섬유보강재의 단차가 발생해 수평 방향의 변위가 커지는 경우는, 섬유보강재의 찢김으로 해석되어지며, 기존의 이루어졌던 연구와 실험에서 콘크리트 면에 부착된 쉬트 섬유보강재의 거동은 1방향적이고 섬유결에 직각방향의 파괴는 무시하는 것으로 알려져 있다. 그러므로 FRP로 전단 보강된 R/C보는 그림2와 같이 Part I의 중앙부분에 수직방향으로 처짐이 발생하고, PartII의 이동은 없고, Part I와 PartII사이에 항복 직선이 발생하고, 그 항복선은 수평축과  $\beta$ 의 각을 이루는 단순한 파괴 메커니즘으로 나타내어질 수 있다.

\* 심종성, 김규선 "FRP로 보강된 RC보의 전단 보강 효과 비교연구" 콘크리트 학회지 제10권 4호 1998.8

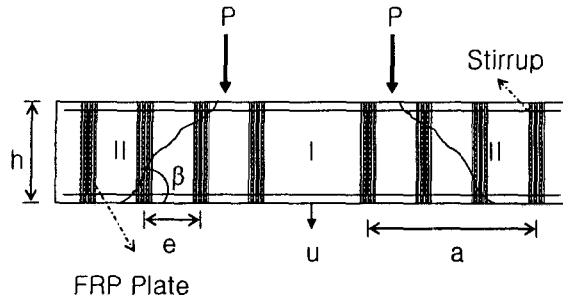


그림 2 FRP로 보강된 RC보의 파괴 양상

위의 메커니즘에 따라 외부일은 콘크리트, 보강재와 스트럽에 의한 내부 에너지와 평형을 이루어야 하므로,

$$V = P \quad V = V_c + V_s + V_p = V_c + V_{\psi} \quad (1)$$

에너지 보존 법칙을 적용하면,

$$P \cdot u = [(s_y + a \cdot v_y) b h \cot \beta \cdot u + \frac{1}{2} f_c b (1 - \cos \beta) \frac{h}{\sin \beta} \cdot u] \quad (2)$$

이 방정식(식.2)에서 상한해를 찾을 수 있다.

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{P}{b h f_c} = \psi \cot \beta + \frac{1}{2} (1 - \cos \beta) \frac{1}{\sin \beta} \quad (식.3)$$

식3에서 상한해를 최소화 시키기 위해  $\partial P / \partial \beta = 0$ 를 적용하면,  $\frac{\tau}{f_c} = \sqrt{\psi(1-\psi)}$  (4)

이는 하한해와 동일한 값이며, 이때의  $\tan \beta$  값을 구하면,  $\tan \beta = \frac{2\sqrt{\psi(1-\psi)}}{1-2\psi}$  (5)

구조물의 기하학적 특징을 이용해,  $\tan \beta$  값의 범위  $\frac{h}{a} \leq \tan \beta \leq \infty$ 를 얻을 수 있다.  $\tan \beta$ 의 최소값인  $\tan \beta = \frac{h}{a}$ 를 (3)에

넣으면,  $\frac{\tau}{f_c} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2} - \frac{a}{h} \right] + \psi \frac{a}{h}$  (6)

이렇게 얻어진 상한해 식.6은 위해서 구한 하한해와 동일한 (식.4)의 값과는 다르다. 또, 상한해는 전단 경간비에 의해 결정되어 지는 것을 알 수 있다

$\beta = \pi/2$ 이면, 수직의 항복선을 가지게 되며,  $\psi$ (전단 보강계수) =  $\frac{1}{2}$ ,  $\tau/f_c = \frac{1}{2}$ 를 가지며, 전단보강의 양이 증가하여,  $\psi > \frac{1}{2}$

면,  $\tau/f_c = \frac{1}{2}$ 로 구할 수 있으므로, 식.6과 이 성질을 이용해서 집중하중을 받는 빔의 최대 전단 능력의 상한해를 그림

으로 나타내면 다음과 같다.

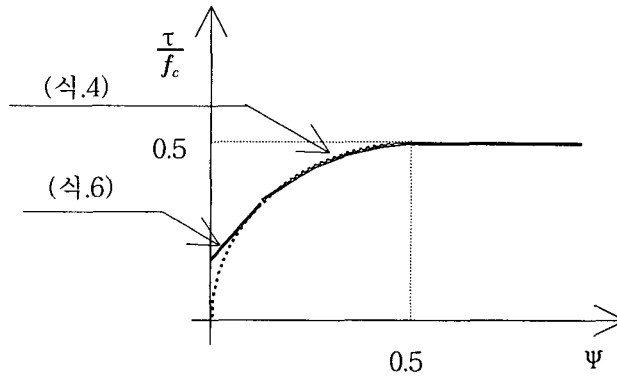


그림 3 집중하중을 받는 보의 최대전단응력의 상한치

### 3.3 결과 비교

$\Psi$ (Constant of shear reinforcement degree)	a/h(전단경간비)	FEM 해석치	전단 예측 강도	예측강도/해석치
0	1.5	0.148	0.151	1.02
	2.2	0.081	0.096	1.185
0.2	1.5	0.425	0.451	1.061
	2.2	0.387	0.548	1.416
0.5	1.5	0.843	0.901	1.068
	2.2	0.592	1.208	2.040

표 1 FEM 해석치와 전단 예측 강도의 비교와 분석

### 4. 결론

표1에서 나타나는 것과 같이 전단을 보강함으로 해서 보강하지 않은  $\Psi=0$ 인 것에 비해 전단강도는 크게 증가했다. 그러나 보강을 많이 한다고 전단 강도가 그에 비례해서 증가하는 것이 아니므로 경제적인 요인과 자중을 함께 고려해야 할 것으로 본다.

게다가 실제로 전단스팬비가 커질수록 전단 예측한 결과와는 오차가 커지고 있지만 전단경간비가 크지 않을 때에는 오차가 크지 않다. 때문에 전단경간비가 크지 않은 ( $\frac{h}{a} < 2$ )일 때에는 상한계 이론을 써서 FRC 보강된 구조물의 전단 강도를 쉽게 예측 할 수 있으나 전단 경간비가 클 때에는 상한계 이론의 의한 값과 함께 하한치를 구해 그 사이에 있는 값으로 전단 강도를 예상해야 하겠다.