

# 고강도 철근콘크리트 보에서 스티럽 유효성의 평가

## The Estimation on the Stirrup Effectiveness of Reinforced High Strength Concrete Beams

김진근\* 박찬규\*\* 이영재\*\*\* 서원명\*\*\*\*  
Kim, Jin-Keun Park, Chan-Kyu Lee, Young-Jae Seo, Won-Myung

### ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the effect of concrete strength on the stirrup effectiveness factor(K) of reinforced concrete beams with stirrup based on previous test results( $a/d \geq 2.5$ ). In the procedure of the estimation of K, it was assumed that the ultimate shear strength for beam without stirrup is equal to the concrete contribution to shear capacity of beams with stirrup.

A model equation for calculation the stirrup effectiveness factor was proposed, which was a function of compressive strength of concrete. It was shown that the stirrup effective factor is greater than 1.0 up to compressive strength of 85MPa. Therefore the current ACI Code equation for predicting the shear strength of beams with stirrup using the inclined cracking shear strength and the stirrup effectiveness factor of 1.0 is conservative for normal and high strength concrete beams with stirrup.

### 1. 서론

ACI 규준식에서<sup>1)</sup> 스티럽이 배근된 콘크리트 보의 전단강도는 콘크리트가 부담하는 강도( $v_c$ )와 스티럽이 부담하는 강도 ( $\rho_v f_{yv}$ )로 나누어 단순 중첩의 원리를 이용하여 구한다. 그런데 기존의 실험결과에 의하면, 스티럽은 실제적인 전단능력인  $\rho_v f_{yv}$  이상을 부담하고 있다고 보고되고 있다. Bresler와 Scordelis<sup>2)</sup> 그리고 Haddadin 등<sup>3)</sup>은 스티럽이 배근된 보의 전단강도는 ACI 규준식으로 계산한 전단강도보다 각각 80%, 75%

높은 것으로 보고하였으며, Palaskas 등<sup>4)</sup>과 Mphonde와 Frantz<sup>5)</sup>는 ACI 규준식에서 예측하는 값보다도 각각 50%, 60% 높게 스티럽이 부담한다고 보고하였다.

이러한 결과가 나타나는 이유로는, 첫째로 스티럽이 사인장 균열 폭의 증가와 전파를 유효하게 억제해줌으로써 압축영역의 콘크리트가 부담하는 강도가 커지기 때문이며, 두번째로는 주철근의 장부 작용(dowel action)이 스티럽으로 인하여 증가되기 때문인 것으로 추측되고 있다.<sup>5)</sup>

스티럽이 배근되지 않은 무근 콘크리트 보에서의 전단강도는 동일한 조건하에서 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 증가를 하지만, ACI 규준식에 대한 안전율은 감소한다고 알려져 있다. 그러나 최근의 실험결과

\* 한국과학기술원 토목공학과 교수  
\*\* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정  
\*\*\* 상주산업대학교 토목공학과 부교수  
\*\*\*\* 경상대학교 농공학과 교수

에 의하면,<sup>6,7)</sup> 스티럽이 배근된 고강도 콘크리트 보에서 ACI 기준식에 대한 안전율이 보통강도 콘크리트 보와 비슷하거나 높은 것으로 나타났다. 이는 스티럽의 배근이 고강도 콘크리트 보의 전단강도를 보통강도 콘크리트 보보다 상대적으로 높게 증가시키기 때문인 것으로 판단된다. 그 결과 고강도 콘크리트 보에서 스티럽의 유효성은 보통강도 콘크리트 보에서 보다 높음을 의미한다.

이 연구에서는 기존의 실험결과에 기초하여 보의 전단 거동에 있어서 콘크리트 압축강도 수준에 따른 스티럽의 유효성을 평가하고자 한다.

## 2. 보의 극한 전단 강도

### 2.1 스티럽이 없는 보에서의 전단력 전달 메카니즘(a/d≥2.5)

철근콘크리트 보에서 전단력은 다양한 방법에 의하여 전달되는데, 전단 스패닝가 비교적 큰 보(근사적으로 2.5 이상)에서는 휨 균열 발생 이후 압축부 콘크리트의 전단 저항력( $v_{cz}$ ), 골재의 맞물림 작용(aggregate interlocking action,  $v_a$ ) 및 철근의 장부 작용( $v_d$ )에 의해 전달된다. 그러므로 보의 전단내력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_n = v_c = v_{cz} + v_a + v_d \quad (1)$$

### 2.2 스티럽이 배근된 보에서의 전단력 전달 메카니즘(a/d≥2.5)

스티럽이 배근된 콘크리트 보의 경우, 전단력 전달 메카니즘은 스티럽이 없는 보의 그것보다 훨씬 복잡하다. 그러나 전단강도( $v_n$ )은 콘크리트가 부담하는 전단내력( $v_c$ )과 스티럽이 부담하는 전단내력( $\rho_v f_{yv}$ )의 합

으로서 나타낼 수 있다.

스티럽의 배근은 사인장 균열 폭을 감소시키며 사인장 균열의 전파를 억제시킨다. 그리고 폐합된 스티럽의 횡보강 효과에 기인하여 압축부 콘크리트의 전단내력을 증진시킨다. 또한 기존의 실험 결과를 살펴보면,<sup>5,7)</sup> 부재에 발생하는 균열의 형태가 스티럽이 없는 경우보다 훨씬 복잡하고 다양하기 때문에 골재 맞물림 작용에 의한 전단내력이 증진될 수 있다. 그리고 스티럽은 인장철근을 지지해주며, 주철근을 따라서 발생하는 활렬균열을 막아줌으로써 장부작용의 증가를 가져온다. 그러므로 스티럽이 배근된 콘크리트 보에서 콘크리트가 부담하는 전단내력을 스티럽이 없는 보의 경우와 비교해 볼 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_c = a_1 v_{cz} + a_2 v_a + a_3 v_d \quad (2)$$

$$a_1, a_2, a_3 \geq 1.0$$

여기서,  $v_{cz}$ ,  $v_a$ ,  $v_d$ 는 스티럽이 배근되지 않은 보에서 전단력 전달 메카니즘에 따른 각각의 전단 내력이다.

그리고 전단철근이 부담하는 전단강도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$v_s = K \rho_v f_{yv} \quad (3)$$

$$\rho_v = A_v / bs$$

여기서, K는 전단철근의 배근각도와 사인장 균열의 각도 및 여러가지 변수로서 결정되는 값이다. 현재 ACI Code에서는 사인장 균열의 각을 45°로 가정하고, 트러스 유사법을 사용하기 때문에 수직으로 배근된 스티럽의 경우에는 K=1.0이 된다.

그리고 Krefeld와 Thurston<sup>8)</sup>의 실험결과에 따르면, 식 (3)에서의 K값은 사용되는 전단철근의 종류(이형, 원형)와 간격에도 영향을 받는 것으로 나타났다. 이들의 실험결과에서 원형 스티럽을 사용한 경우보다 이형 스티럽을 사용한 경우의 전단강도가 높

은 것으로 나타났는데, 이는 전단철근의 부착능력과 관계된 것으로 판단된다. 그러나 실제 구조물에서는 이형철근을 사용하기 때문에 이와 같은 문제점은 제거할 수 있다. 그리고 전단 철근의 간격이 상당히 큰 경우 (0.5d 이상)에는 스티럽이 그 자체의 전단 내력에도 미치지 못하는 경우도 나타났는데 이는 결국 사인장 균열각과 관계가 있는 것이나, 스티럽을 현재의 표준식대로 0.5d 이하로 배근한다면 전단내력의 미달에 관한 문제점을 제거할 수 있으므로 식 (3)의 K와 관계된 함수는 수직 스티럽인 경우에 사인장 균열의 각도 문제로 줄일 수 있다.

그러므로 스티럽이 배근된 콘크리트 보의 전단내력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$v_n = \alpha v_c + K \rho_w f_{yw} \quad (4)$$

$$\alpha \geq 1.0$$

여기서,  $v_c$ 는 스티럽이 배근되지 않은 보의 전단강도이다.

### 3. 스티럽의 유효성 평가( $a/d \geq 2.5$ )

#### 3.1 기존의 표준식 및 제안식

스티럽이 배근된 콘크리트 보의 일반적인 전단강도 예측식이 식 (4)와 같으나, 기존의 모델식을 살펴보면,  $\alpha=1.0$ ,  $v_c$ 는 사인장균열강도( $v_{cr}$ ) 또는 극한전단강도( $v_c$ )를 사용하며, 사인장 균열각을  $45^\circ$ 로 가정하고 트러스 유사법을 사용하여 전단철근이 부담하는 강도를 계산한다.

ACI Code<sup>1)</sup>에서는 수직 스티럽인 경우 K를 1.0,  $v_{cr}$ 를 다음과 같이 정의하고 있다.

$$v_{cr} = 0.16\sqrt{f_c'} + 17.25\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \quad (5)$$

Mphonde와 Frantz<sup>5)</sup>는 그들의 실험결과

에 기초하여 K값이 1.6인 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$v_n = v_{cr} + 1.6\rho_w f_{yw} \quad (6)$$

$$v_{cr} = 0.1254\sqrt{f_c'} + 0.62$$

그리고 이들은 콘크리트의 압축강도 수준을 보통강도, 중간강도 및 고강도 수준으로 나누어 스티럽의 유효성을 파악하였지만, 콘크리트의 압축강도 수준에 관계없이 K 값을 1.6으로 제안하였다.

Zsutty<sup>9)</sup>는 K를 1.0으로 콘크리트가 부담하는 전단강도를 다음과 같이 제안하였다.

$$v_c = 2.175(f_c' \rho_w d/a)^{1/3} \quad (7)$$

#### 3.2 스티럽의 유효성 평가

앞에서도 언급한 바와 같이 스티럽이 배근된 콘크리트 보의 일반적인 전단강도 예측식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 그리고 사인장 균열의 각을  $45^\circ$ 로 가정하고 수직 스티럽의 간격이 크지 않은 경우(0.5d 이하)에서 스티럽의 전단강도는 이론적으로  $\rho_w f_{yv}$ 이다. 따라서, 수직 스티럽으로 배근된 콘크리트 보의 전단 강도는 식 (4)에서  $K=1.0$ 인 것과 같다.

그런데 스티럽이 배근된 보의 추가적인 강도 증가는 스티럽의 배근 효과에 따른 것이기 때문에 콘크리트가 부담하는 전단강도를 스티럽이 없는 보의 강도로 고정시키고 스티럽의 유효 계수를 도입한다면, 보의 전단내력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_n = v_c + K \rho_w f_{yw} \quad (8)$$

ACI 표준식과 Mphonde와 Frantz는 콘크리트가 부담하는 전단강도를 사인장 균열

강도로 정의하였지만 이 연구에서는 Zsutty가 제안한 것과 같이 스테럽이 배근되지 않은 보의 극한 전단강도로 정의하였다. 그리고 앞에서 언급한 바와 같이 고강도 콘크리트 보에서 스테럽의 유효성이 증가한다는 기존의 실험결과에 기초하여 K를 콘크리트의 압축강도 함수로 보았기 때문에 제안된 식의 형태는 다음과 같다.

$$v_n = v_c + K(f'_c) \rho_w f_{yv} \quad (9)$$

그리고 다음과 같은 3가지 제한조건하에서 그림 1에 나타낸 바와 같이 K값을 계산하였으며, 선택된 시험체 시리즈는 표 1에 나타낸 바와 같다.

- 1) 동일한 조건하에서,  $\rho_w f_{yv}$ 가 변수이면서 스테럽이 배근되지 않은 시험체를 포함한 일련의 시험체
- 2) 스테럽 종류(이형 또는 원형, 항복강도)가 같은 형태
- 3) 사각형 단면 및 수직 스테럽

그림 2는 계산된 K 값을 콘크리트 압축강도의 함수로 나타낸 것이다. 그림 2에서 K 값이 1 이하(약 0.5)인 경우의 실험결과는 Krefeld와 Thurston의 실험결과로서 이 실험결과를 제외한 나머지 실험결과에 대한 회귀분석 식은 다음과 같으며, 압축강도의 함수가 아닌 실험값의 평균값은 1.44로 나타났다.

$$K = 1.30 \left( \frac{f'_c}{20} \right)^{0.13} \quad (10)$$

그러므로 최종적인 전단강도 예측식은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$v_n = v_c + 1.3 \left( \frac{f'_c}{20} \right)^{0.13} \rho_w f_{yv} \quad a/d \geq 2.5 \quad (11)$$

표 1 선택된 시험체별 상세

researcher	$f'_c$ (MPa)*	a/d	$\rho_w$
Bresler, Scordelis <sup>2)</sup>	22.6	3.97	0.0181
	23.7	4.03	0.0227
Placas, Regan <sup>10)</sup>	28.1	3.36	0.0146
Johnson, Ramirez <sup>11)</sup>	55.9	3.10	0.0249
Krefeld, Thurston <sup>8)</sup>	38.3	4.01	0.022
Mphonde, Frantz <sup>5)</sup>	20.8	3.6	0.0336
	41.6		
	74.9		
	81.4		
Elzanaty et al. <sup>6)</sup>	20.7	4.0	0.025
	40.0		
	65.5		
윤영수 <sup>12)</sup>	35.3	3.2	0.028
	65.7		
	85.4		
신성우 등 <sup>13)</sup>	73.3	2.5	0.038
이영재 <sup>7)</sup>	26.9	3.00	0.023
	63.5		0.026

\* 스테럽이 배근되지 않은 콘크리트 보의 압축강도

여기서,  $v_c$ 는 스테럽이 배근되지 않은 콘크리트보의 극한 전단강도이며, 이 값을 잘 예측하는 모델식을 대입하면 되는데, 대표적인 모델식으로는 Zsutty가 제안한 식 (7)과 박연동<sup>14)</sup>이 제안한 다음과 식이 있다.

$$v_c = 19.4 f'_c{}^{0.3} \rho^{3/8} (0.4 + d/a) \left( \frac{1}{\sqrt{d}} + 0.07 \right) \quad (12)$$

여기서,  $a/d \geq 3.0$  이면,  $\alpha = 1.0$

$1.0 \leq a/d < 3.0$  이면,  $\alpha = 2 - (a/d)/3$

### 3.3 해석결과에 대한 고찰

그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 사인장균열 강도를 사용하지 않고 극한 전단강도를 사용하여도 스테럽의 유효 계수 K가 1.0 보다 큰 것으로 나타났다. 그 결과 사인장 균열강도와 극한전단강도와의 사이에는 어느 정도의 보유강도가 있기 때문에 현재의 ACI Code 전단강도 예측식은 압축강도

85MPa까지 안전축임을 알 수 있다. 그러나 K 값은 상당히 떨어지는 것으로 나타나 보다 많은 실험치가 축적되어야 할 것으로 사료된다.

그림 3은 스티럽 유효계수를 변수로 스티럽이 배근된 보의 전단강도 예측식의 ACI 기준식에 대한 안전율을 나타낸 것인데,  $v_c$ 는 식 (12)를 사용하였다. 그림 3(a)에서 알 수 있는 바와 같이 스티럽의 유효계수가 1.0이면, 스티럽이 배근되지 않은 보의 안전율이 가장 크며, 압축강도가 증가할수록 안전율은 감소함을 보인다. 그러나 동일한 압축강도에서 스티럽의 전단강도가 커질수록 안전율이 감소하는 것으로 나타났다. 기존의 실험결과<sup>6,7,11-13)</sup>를 보면, 콘크리트 압축강도가 41MPa 이상인 보에서 스티럽이 배근되면서 안전율이 증가하는 경향을 나타냈다. 예외적으로 Mphone와 Frantz의 실험결과에서는 압축강도 74.9MPa에서는 이와 같은 경향이 나타났지만, 압축강도 81.4MPa에서는 반대의 경향이 나타났다. 그러므로 스티럽의 유효 계수가 1.0인 경우에는 이와 같은 경향을 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 그림 3(b), (c)에서는 이와 같은 경향을 나타냈지만, 제안된 K 식의 형태에 따라 상당한 차이를 보임을 알 수 있다.

그림 3(c)에서 알 수 있는 바와 같이 제안된 스티럽 유효 계수를 사용하는 경우에 스티럽의 전단강도가 1.0인 경우의 안전율은 보통강도 및 고강도 콘크리트 보에서 거의 같은 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

이 연구에서 제안된 스티럽의 유효 계수 K 값이 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 나타냈지만, 이에 대한 보다 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

스티럽이 배근된 보의 전단 강도 예측식에서 콘크리트가 부담하는 전단강도를 극한 전단강도를 사용하여도 스티럽 유효계수 K는 압축강도 85MPa 까지 1.0이상으로 나타났다. 그결과 보의 사인장 균열강도를 기준으로 하는 현재의 ACI 전단 강도 기준식은 안전축임을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI318-89)," American Concrete Institute, Detroit, 1989, 353 pp.
2. Bresler, B., and Scordelis, A.C., "Shear Strength of Reinforced Concrete Beams," ACI Journal, Vol. 60, No. 1, 1963, pp. 51-72.
3. Haddadin, M. et al., "Stirrup Effectiveness in Reinforced Concrete Beams with Axial Force," ASCE, Vol. 97, ST9, 1971, pp. 2277-2297.
4. Palaskas, M.N. et al., "Shear Strength of Lightly Reinforced T-Beams," ACI Journal, Vol. 78, No. 6, 1981, pp. 447-455.
5. Mphone, A.G., and Frantz, G.C., "Shear Strength of High Strength Reinforced Concrete Beams," Report CE 84-157, University of Connecticut, Storrs, 1984, 260 pp.
6. Elzanaty, A.H. et al., "Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams using High-Strength Concrete," ACI Journal, Vol. 83, No. 2, 1986, pp. 290-296.
7. 이영재, "전단철근이 있는 고강도 및 보통강도 철근콘크리트 보의 전단거동에 관한 실험적 연구," 경성대학교 박사학위논문, 1995, 126pp.
8. Krefeld, W.J., and Thurston, C. W., "Studies of the Shear and Diagonal Tension Strength of Simply Supported Reinforced Concrete Beams," ACI Journal, Vol. 63, No. 4, 1966, pp. 451-476.
9. Zsutty, T.C., "Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests," ACI Journal, Vol 68, No. 2, 1971, pp. 138-143.

10. Placas, A., and Regan, P.E., "Shear Failure of Reinforced Concrete Beams," ACI Journal, Vol. 68, No. 10, 1971, pp. 763-773.

11. Johnson, M.K., and Ramirez, J.A., "Minimum Shear Reinforcement in Beams with Higher Strength Concrete," ACI Structural Journal, Vol. 86, No. 4, 1989, pp. 376-382.

12. 윤영수, "철근콘크리트 보의 고강도화에 따른 전단거동에 관한 연구," 한국콘크리트학회지, 제 6권, 제 6호, 1994, pp. 190-198.

13. 신성우 외 5인, "전단-스팬비가 작은 고강도 철근콘크리트 보의 전단성능에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회지, 제 4권, 제 4호, 1992, pp. 171-179.

14. 박연동, "고강도 콘크리트의 재료 특성 및 철근콘크리트 보의 전단강도에 관한 연구, 한국과학기술원 박사학위 논문, 1994, 150 pp.

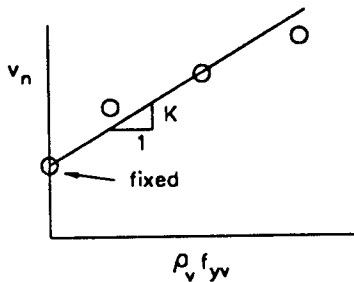


그림 1 K 값의 계산

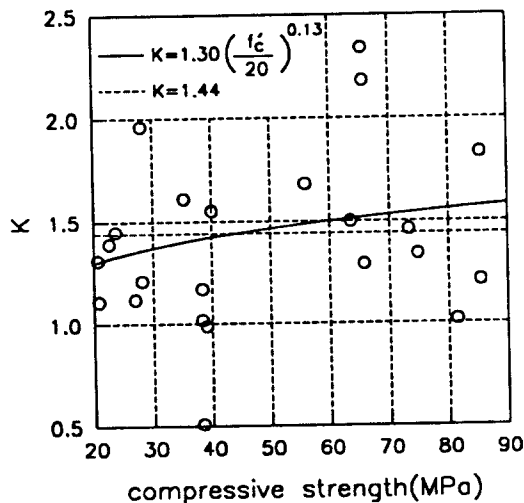


그림 2 압축강도에 따른 K

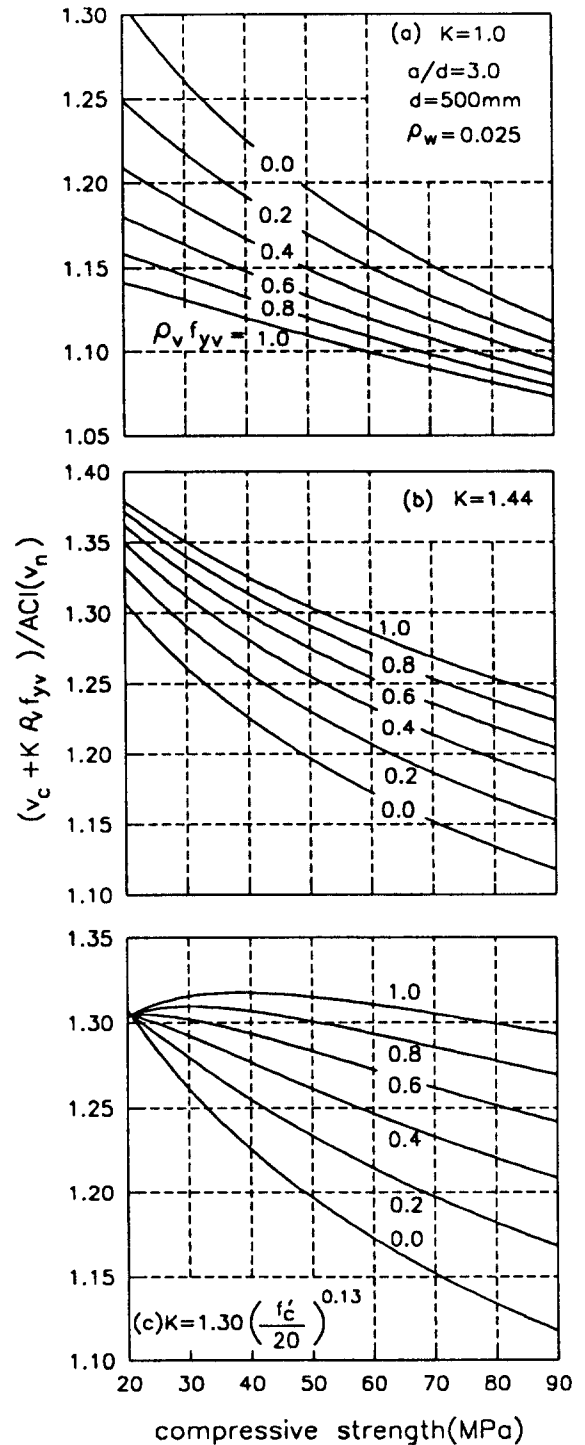


그림 3 모델식의 ACI식에 대한 안전율