

# 철근콘크리트 보의 전단에 대한 역학적 거동에 관한 연구

신 영 진\* · 고 봉 수\* · 은 회 창\*\* · 서 일 교\*\*

## A Study on Mechanical Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams

Young-Jin Shin\*, Bong-Soo Ko\*, Hee-Chang Eun\*\* and Ill-Gyo Suh\*\*

### ABSTRACT

The shear capacity of reinforced concrete beams is characterized by various parameters as the strength of concrete, the shear-span ratio, the strength of shear reinforcement etc. Sixteen specimens were tested with those variables. All specimens showed the shear failure mode to accompany the diagonal shear cracks or the flexural failure. Through the experimental works, it was evidenced that the shear strength depends on the strength of concrete, the shear-span ratio, the confinement index including the strength and spacing of shear reinforcement bars etc. Although part of test results could not distinct the effects of test variables due to the yielding of longitudinal bars, it was shown that they almost satisfy the ACI code except several specimens confined by high-strength shear bars.

**Key Words** : shear reinforcements, high-strength concrete, shear-span ratio, confinement index

### 1. 서론

철근콘크리트 보의 구조 설계는 급격한 보의 파괴를 조장하는 전단에 의한 파괴가 발생하지 않는 범위에서 설계가 행해진다. 보에 작용하는 전단력은 콘크리트와 전단 철근이 부담하며, 이들의 합으로 전단내력이 산정된다. 철근콘크리트 보의 전단내력에 영향을 미치는 요인으로는 콘크리트의 압축강도, 전단경간비, 전단철근에 의한 구속 지수(confinement index),

단면의 크기 등을 들 수 있다.

철근콘크리트 보의 전단에 대한 역학적인 거동은 각 요인들에 의해 복합적으로 나타나므로 매우 복잡하다. 특히 콘크리트의 강도가 고강도화 됨에 따라 보다 취성적인 콘크리트의 특성을 보완하기 위하여 각 요인들의 역할들이 규명되어야 할 필요가 있다. 철근콘크리트 보의 전단 내력과 거동을 규명하기 위한 많은 노력이 있어 왔다. 1968년 Fenwick과 Paulay<sup>1)</sup>는 보에 균열이 발생함에 따라 전체 전단력을 압축축의 콘크리트가 20~40%, 골재 맞물림 작용에 의해 33~50%, 주철근의 장부작용에 의해 15~25%를 담당한다고 하였다. 1972년 White와 Holley<sup>2)</sup>는 초기균열이 있고 반복하중의 전단력을 받는 시험체의 실험을 통하여 전단전달거동을 파악하기 위한 연구를 하였고,

\* 제주대학교 건축공학과

Department of Architectural Engineering, Cheju Nat'l Univ.

\*\* 제주대학교 건축공학과, 첨단기술연구소

Faculty of Architectural Engineering, Research Institute of Advanced Technology, Cheju Nat'l Univ.

전단철근비와 작용하는 전단 응력의 선형 관계식을 제안했다. 또 Dulacska<sup>3)</sup>는 기존의 실험 결과를 분석 조사하여 비선형 장부 하중-변위 관계를 제안하였으며, 최대 장부력(dowel force)는 철근이 항복하거나 콘크리트의 파괴에 의해 지배된다고 지적하였다. 1980년 野口 博<sup>4)</sup>은 전단저항 메카니즘에 대해 전단력의 분담비율은 콘크리트 압축부분이 53~85%, 장부 작용이 20%, 골재 맞물림 작용이 30%이하이며, 전단철근 증가 효과는 압축부분의 부담분을 감소시키며, 전단 철근의 부담분을 증가시킨다는 점과 전단철근으로 보강된 보에서는 골재 맞물림 작용의 부담분은 상대적으로 작다라고 지적하였다. Kani<sup>5)</sup>는 전단 철근이 없는 철근콘크리트 보에서 전단 경간비가 1.0에서 2.5에 가까울수록 전단파괴하중은 급격히 감소하는데, 이것은 아치 작용에 의한 지지효과가 감소하기 때문이며, a/d가 2.5부근에서 아치 작용에 의한 지지효과는 거의 없으며 철근콘크리트 부재는 가장 낮은 강도를 갖는다고 하였으며 a/d가 2.5에서 6으로 증가하면 부재의 파괴형태는 휨전단파괴 형태를 나타내며 부재의 파괴하중도 점차 증가한다고 하였다.

이러한 철근콘크리트 보의 전단내력 및 거동을 파악하고자 하는 많은 시도에도 불구하고 상이한 결과들을 나타내고 있다. 따라서, 본 연구에서는 콘크리트의 압축 강도, 전단 경간비, 그리고 전단철근의 강도를 변수로 총 16개의 시험체를 제작 및 실험을 실시하여 철근콘크리트 보에서 전단에 대한 내력 및 거동을 파악한다.

## II. 실험

### 2.1. 시험체 계획

철근콘크리트 보에서 전단에 의한 역학적 거동을 파악할 목적으로 Table 1에서와 같이 총 16개의 시험체를 제작하여 실험을 실시하였다. 콘크리트의 압축 강도, 전단 경간비, 그리고 전단철근의 강도를 실험 변수로 사용하였다. 콘크리트의 예상 강도는 210, 400, 600kgf/cm<sup>2</sup>를, 전단 경간비는 2와 3을, 강도가 4500과 9000kgf/cm<sup>2</sup>인  $\phi$ 10의 전단철근을 사용하

Table 1. Summary of specimen and test results

specimen	$f_{ck}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	shear bar		$V_h$ (tonf)	failure mode**	
		$\rho_w$	$\rho_w f_{yk}$			
L2NOO	284	0.0	0.0	10.9	F-S	
L2LNO		0.0112	39.25	18.92	F-S	
L2LWO		0.0056	19.62	17.84	S	
L2HWO		0.0049	44.15	18.05	F-S	
L3NOO		0.0	0.0	9.04	S	
L3LNO		0.0112	39.25	18.95	S	
L3LWO		0.0056	19.62	18.41	S	
L3HWO		0.0049	44.15	17.11	S	
M2NOO		585	0.0	0.0	14.52	F-S
M2LNO			0.0112	39.25	22.36	F-S
M2LWO			0.0056	19.62	22.71	S
M2HWO			0.0049	44.15	24.58	S
H2NOO		680	0.0	0.0	15.68	F-S
H2LNO			0.0112	39.25	24.83	F-S
H2LWO			0.0056	19.62	24.8	S
H2HWO			0.0049	44.15	24.23	S

\*L2NOO

Spacing of shear bar : O(without shear bar), N( $s_v=7cm$ ), W( $s_v=14cm$ )  
 Yield strength of shear bar :  
 N( $f_{yk}=3500kgf/cm^2$ ), H( $f_{yk}=3500kgf/cm^2$ )  
 Shear span ratio : 2( $a/d=2.0$ ),  
 3( $a/d=2.0$ )  
 Concrete strength : L( $f_{ck}=280kgf/cm^2$ ),  
 M( $f_{ck}=580kgf/cm^2$ ), H( $f_{ck}=680kgf/cm^2$ )

\*\* failure mode : F-S : flexure-shear failure.  
 S : Shear failure

였다. 또한 휨에 의한 파괴를 막고자 4-D19로 배근하였다. 시험체는 Fig. 1과 같은 형태로 제작되었으며, 가력은 전단 경간을 고려하여 2점 재하를 실시하였다. 시험체에 콘크리트 타설과 동시에 콘크리트 압축 강도 측정용 공시체를 제작하여 시험체와 동일한 조건에서 양생을 실시하였다. 동일 콘크리트에 대하여 5개의 공시체를 제작하여 4주 후 실험시에 측정된 압축 강도를 Table 2에 나타내고 있다. 전단철근의 위치 고정을 위해  $\phi$ 10인 압축철근을 사용하였다. 사용된 철근의 역학적인 특성을 Table 3에 나타내었다.

가력은 변위 제어에 의하였으며, 급격한 내력 저하가 일어나거나 파괴정도가 너무 심하여 더 이상 가력이 불가능하다고 판단될 때까지 가력하였다. 하중은

Table 2. Concrete strength

Design strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Cylinder strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
210	284.2
400	585
600	679.6

Table 3. Mechanical properties of bars

bar	yield strength ( kgf/cm <sup>2</sup> )	strain at yield(%)	Young's modulus ( kgf/cm <sup>2</sup> )
D10	5.280	0.199	2.04 × 10 <sup>6</sup>
D19	4.976	0.252	1.95 × 10 <sup>6</sup>
φ10	3.520	0.243	1.9 × 10 <sup>6</sup>
φ10	9.040	0.235	1.97 × 10 <sup>6</sup>

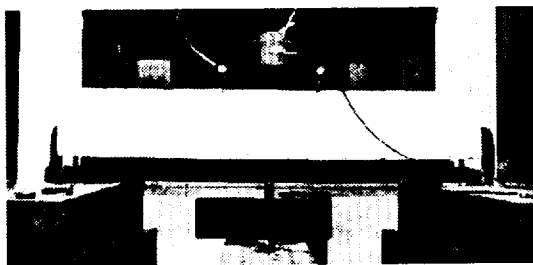


Fig. 1. Test set-up of specimen.

프레임에 부착된 로드 셀에 의해 측정하였으며, 전단 구간 내에서 전단 철근의 변형을 측정하기 위하여 변형 게이지를 부착하였다. 시험체의 처짐을 측정하고자 Fig. 1에서 보는 바와 같이 L.V.D.T.를 설치하였으며, 이들을 데이터 로거에 연결시켜 일정한 시간 간격으로 하중, 변형을 및 변위를 측정하였으며, 매 하중 증가에 따라 시험체의 균열 양상을 육안으로 관찰 기록하였다.

## 2.2. 실험 결과

### (1) 파괴 양상

Fig. 2는 실험이 끝난 시험체의 파괴 양상을 나타내



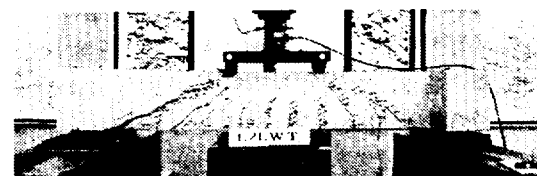
(a) L3HWO



(b) M3LWO



(c) M3N00



(d) L2LWT

Fig. 2. Failure modes.

고 있다. 이들 그림에서 보는 바와 같이 모든 시험체는 전단에 의한 사인장 파괴를 동반한 전단 파괴 양상을 나타냈다. 가력의 초기 단계에서 휨 균열이 발생한 후에 균열이 지점 방향으로 진전되었으며, 사인장 균열이 발생한 후에 급격한 전단 내력의 저하와 함께 전단 파괴가 발생하였다. 전단 경간비가 2에서는 압축측 콘크리트의 압괴를 동반하였으며, 인장측의 주철근은 항복 전에 있었다. 전단 경간비가 3인 시험체에서는 인장측 주철근의 항복을 나타내었다.

콘크리트의 강도가 고강도화 됨에 따라 파괴는 보다 급격하게 발생하였다. 전단 내력은 전단 철근과 콘크리트에 의해 분담하므로 콘크리트의 강도가 증가

함에 따라서 전단철근의 역할이 상대적으로 감소하여 변형률이 감소하는 것을 볼 수 있었다.

전단 철근의 구속 지수는 전단 철근의 체적과 전단 철근의 항복강도의 곱으로 표현된다. 즉, 동일한 구속 지수에 대하여 고강도의 전단 철근을 사용한다면 배근 간격을 증대시킬 수 있다. 철근콘크리트 설계 기준에서는 전단 철근의 강도를  $4000 \text{ kgf/cm}^2$  이하로 규정하고 있으나, 본 연구에서는 전단 철근의 강도에 의한 구속 효과를 비교하고자 항복 강도가  $9000 \text{ kgf/cm}^2$  인 전단 철근을 사용하여 전단 내력 관계를 파악하였다. 그러나 고강도의 전단 철근은 항복 이전에 최대 내력에 달하여 전단 철근의 고강도화는 전단 내력 증진에 효과가 거의 없음을 알 수 있었다.

(2) 하중-처짐 관계

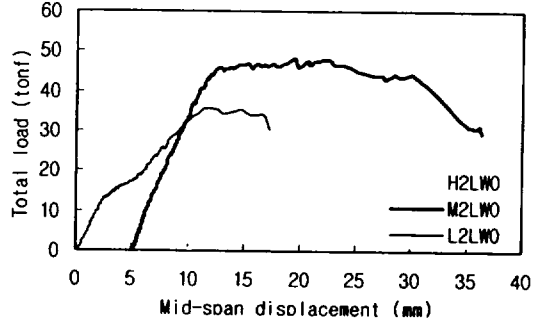
Fig. 3은 하중과 처짐 관계를 나타내고 있다. (a)는 전단철근으로 보강된 시험체를, (b)는 무보강된 시험체를 나타낸다. 이들 그림에서 무보강된 시험체는 최대 내력 후에 급격한 내력의 저하와 함께 파괴를 보이고 있다. 그러나 전단철근으로 보강된 시험체에서는 전단철근에 의해 내력이 확보되며, 주철근의 저항으로 급격한 휨 내력의 저하를 나타내지 않았으며, 전단 파괴외에 휨에 의한 파괴 양상을 나타내었다. 이는 주철근의 항복으로 전단에 의한 저항이라기 보다는 휨 저항이 지배적인 것으로 해석될 수 있다.

콘크리트의 강도 증가는 최대 내력의 증가를 나타내었으나, 콘크리트 강도 증가비와 비례하여 전단 내력의 증진을 나타내지는 않았다. 즉, 콘크리트 강도만의 증가로 전단 내력을 증진시킬 수 없으며, 콘크리트 강도의 증가율이 전단 내력의 증가율과 선형으로 비례하지 않음을 의미한다.

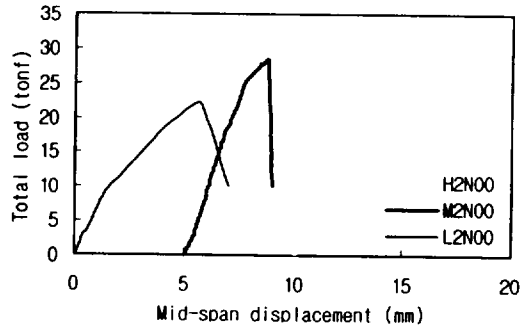
(3) 콘크리트 강도의 영향

콘크리트의 강도 증가에 따른 시험체의 전단 내력을 Fig. 4에 비교하였다. 이 그림에서 콘크리트 강도 증가에 따라 전단 내력이 증진함을 볼 수 있다. 전단 철근의 배근은 전단 내력의 증진은 보이나, 전단 내력은 전단 철근의 양에 의해 크게 지배되지 않는 것을 볼 수 있다. 그리고 콘크리트 강도의 증가에 따라 전단 내력의 증가율은 전단 철근의 배근양에 관계없

이 일정하게 증가함을 볼 수 있다.



(a)  $a/d=2$ , with shear reinforcements



(b)  $a/d=2$ , without shear reinforcements

Fig. 3. Load-deflection relation.

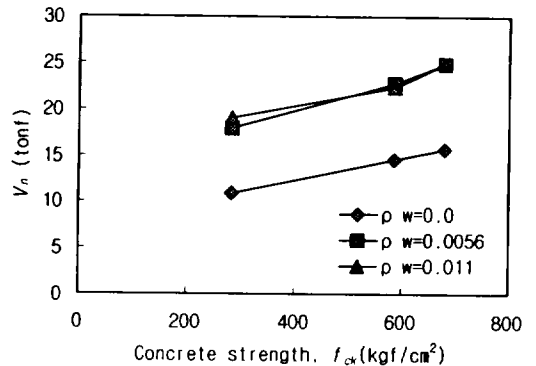


Fig. 4. Shear strength according to concrete strength.

(4) 전단 경간비의 영향

전단 경간비에 따른 시험체의 전단 내력 관계를 Fig. 5에 나타내고 있다. 이 그림에서 전단 철근으로

보강되지 않은 시험체에서는 전단 경간비가 증가함에 따라 전단 내력의 저하를 볼 수 있다. 그러나 전단 철근으로 보강된 시험체에서는 전단 경간비에 대한 영향이 거의 없음을 볼 수 있다. 전단 경간비는 철근 콘크리트 보의 전단 내력에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 본 실험의 결과에서는 전단 경간에 대한 영향이 거의 없는 것으로 나타났으나, 이는 전단에 대한 최대의 저항 능력을 발휘하기 이전에 휨에 의한 주철근의 항복이나 인장 주철근의 항복에 의한 휨 파괴 양상을 보였기 때문이라 판단된다. 이와 같이 전단에 의해 지배적으로 파괴가 발생하지 않을 경우에는 휨에 의한 능력이 보의 내력을 지배할 수 있을 것이라 사료된다.

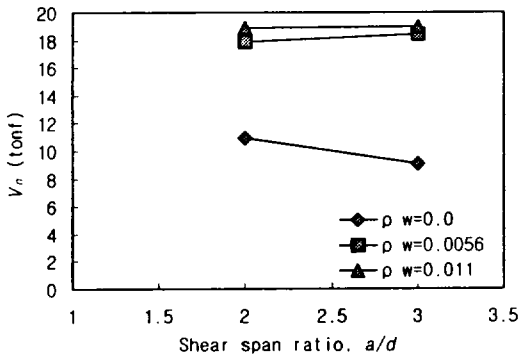


Fig. 5. Shear strength according to  $a/d$ .

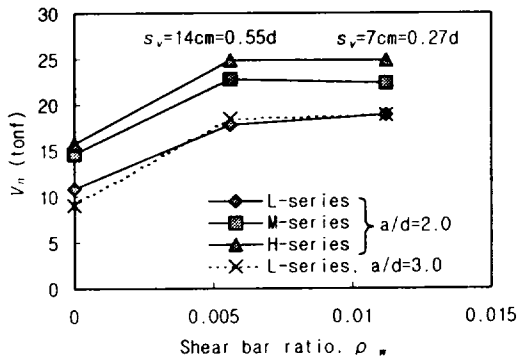


Fig. 6. Shear strength according to shear bar ratio.

(5) 전단 철근비에 대한 영향

전단 철근의 배근양에 따른 전단 내력 관계를 Fig.

6에 나타내고 있다. 이 그림에서도 볼 수 있는 바와 같이 전단 철근에 의한 보강은 전단 내력의 증가를 나타내나, 0.0056 이상 전단 철근을 배근한다면 전단 내력에는 크게 영향을 미치지 않는 것을 볼 수 있다. 그리고 전단 경간비에 대해서도 영향이 없음을 볼 수 있다. 일반적으로 전단 경간비가 감소하면 전단 내력은 증가한다. 그러나 이들 관계에서 전단 내력이 거의 일정한 것으로 나타난 이유는 전단 경간비가 감소하여도 휨에 의한 영향이 발생한 것으로 전단 내력이 일정하게 나타난 것으로 판단된다.

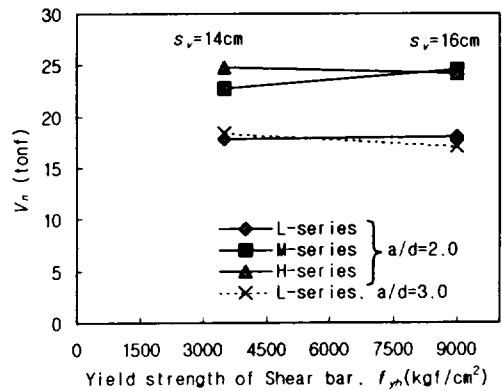


Fig. 7. Shear strength according to the strength of shear reinforcement.

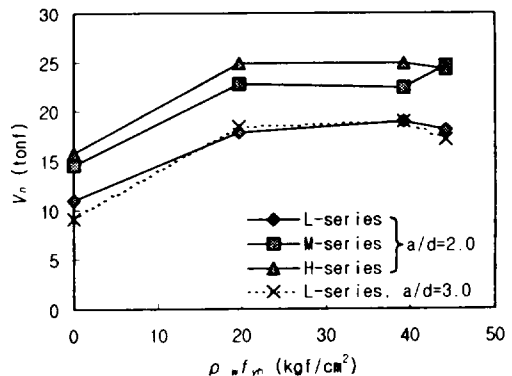


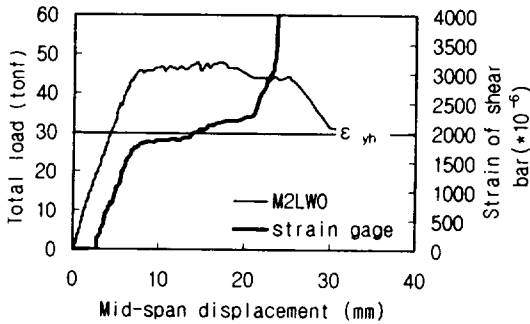
Fig. 8. Shear strength according to confinement index.

(6) 전단 철근의 강도에 대한 영향

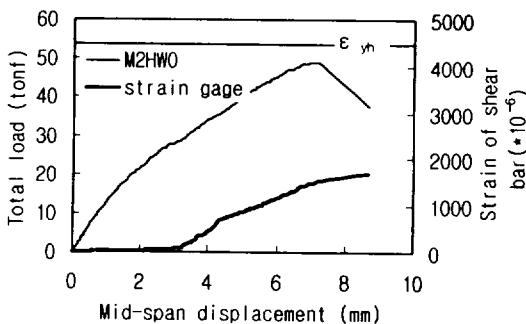
전단 철근의 강도 증가에 따른 전단 내력을 Fig. 7

에 나타내고 있다. 이 그림에서는 전단 철근의 강도 증가에 따라 전단 내력은 거의 일정한 것을 볼 수 있다. 즉, 전단 철근의 강도 변화는 전단 내력에 그다지 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 전단 철근의 강도를  $4000\text{kgf/cm}^2$  이하로 규정하고 있는 철근콘크리트 구조 설계 기준과 부합되는 결과라고 볼 수 있다. 그러므로 전단 철근의 강도만을 증가시켜 전단 내력을 증진시킬 수는 없다.

전단 철근에 의한 구속 지수는 전단 철근의 배근량과 전단 철근의 강도의 곱으로 표현된다. Fig. 8은 구속 지수와 전단 내력과의 관계를 나타내고 있다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 구속 지수에 의한 영향은 거의 없음을 볼 수 있으며, 단지 콘크리트 강도의 증가로 내력의 증진만을 보일 뿐이다. 그 이유는 전단외에 휩에 의한 파괴가 선행하여 전단 철근의 구속력이 극대화 되지 않았기 때문이라 판단된다.



(a) normal-strength shear bar



(b) high-strength shear bar

Fig. 9. Effects of the strength of shear bars.

전단 철근의 최적 설계는 최대 전단 내력에 도달 때까지 전단 철근에 의한 구속이 이루어져 궁극적으로 항복을 할 경우에 해당한다. Fig. 9는 하중에 따른 전단 철근의 변형률 관계를 나타내고 있다. 이 그림에서 보통 강도의 전단 철근은 최대 하중시에 이미 항복을 한 것으로 보아 적절하게 구속이 이루어졌음을 볼 수 있다. 반면에 고강도의 전단 철근을 사용할 경우에는 항복 이전에 최대 하중에 달하였으며, 파괴에 이를 때까지도 전단 철근은 항복하지 않는 것으로 보아 전단 철근의 배근 설계가 적절하지 않음을 알 수 있다.

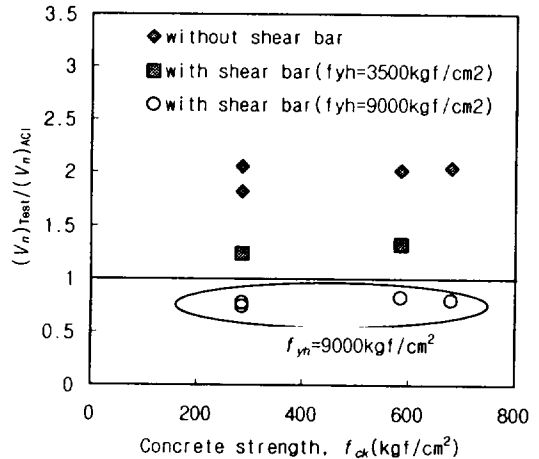


Fig. 10. Comparison with the ACI code.

### (7) ACI 기준과의 비교

Fig. 10은 실험 결과를 ACI 기준과 비교하고 있다. 기준에서는 전단 철근의 강도 상한을  $4000\text{kgf/cm}^2$  이하로 규정하고 있으므로 고강도의 전단 철근은 ACI 기준을 만족하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 보통 강도의 전단 철근을 사용할 경우에는 기준을 충족하고 있음을 볼 수 있다.

### III. 결론

본 연구는 철근콘크리트 보의 전단에 대해 영향을 미치는 요인들을 변수로 총 16개의 실험을 실시하여

전단 내력을 평가하였다. 모든 시험체들은 전단 파괴 외에 시험체 일부에서는 휨 파괴를 동반하였다. 이 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 전단철근으로 보강된 시험체에서는 전단철근에 의해 내력이 확보되며, 일부 시험체에서는 전단 파괴 외에 휨에 의한 파괴 양상을 나타내었다.
- 2) 콘크리트의 강도 증가는 최대 내력의 증가를 나타내었으나, 콘크리트 강도 증가비와 비례하여 전단 내력의 증진을 나타내지는 않았다.
- 3) 전단 철근의 배근은 전단 내력의 증진은 보이나, 전단 철근의 배근양을 증가시킬 때, 콘크리트의 강도의 영향은 그다지 크지 않음을 볼 수 있다.
- 4) 전단 철근으로 보강되지 않은 시험체에서는 전단 경간비가 증가함에 따라 전단 내력의 저하를 볼 수 있다. 그러나 전단 철근으로 보강된 시험체에서는 전단 경간비에 대한 영향이 거의 없음을 볼 수 있다. 이는 휨에 의한 파괴가 선행하여 전단에 저항 범위를 벗어났기 때문이라 사료된다.
- 5) 전단 철근에 의한 보강은 전단 내력의 증가를 나타내나, 0.0056 이상 전단 철근을 배근한다면 전단 내력에는 크게 영향을 미치지 않는 것을 볼 수 있다.
- 6) 전단 철근의 강도를  $4000 \text{ kgf/cm}^2$  이하로 규정하고 있는 철근콘크리트 구조 설계 기준과 부합되는 결과를 얻었다.
- 7) 기준에서는 전단 철근의 강도 상한을  $4000 \text{ kgf/cm}^2$  이하로 규정하고 있으므로 고강도의 전단 철근은 ACI 기준을 만족하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 보통 강도의 전단 철근을 사용할 경우에는 기준을 충족하고 있음을 볼 수 있다.

## 참고문헌

- 1) R. C. Fenwick and T. Pauley 1968. Mechanism of Shear Resistance of Concrete Beams. Journal of Structural Division, ASCE, Vol.94, No.ST10, pp.2235-2350.
- 2) R. N. White and M. J. Hilley 1972. Experimental Studies of Membrane Shear Transfer. Journal of Structural Division, ASCE, pp.1835-1865.
- 3) H. Dulacska 1972. Dowel Action of Reinforcement Crossing Cracks in Concrete. Journal of Structural Division, ASCE, Vol.69, No.ST12, pp.754-757.
- 4) 野口 博, 落合正雄 1980. 鐵筋 斷抵抗 機構 關 研究. 第2回 工學年次 講演會講演論文集, pp.441-444.
- 5) G. N. J. Kani 1964. The Riddle of Shear Failure. ACI Journal
- 6) 은희창 외 4인 2000. 철근콘크리트 구조설계. 태림문화사.
- 7) H. S. Chung 1983. Experimental Study on the Behavior of Reinforced High Strength Concrete Members Subjected to Bending Moments, Shear Force and Axial Force. Report of the Research Laboratory of Engineering Materials, Tokyo Institute of Technology.
- 8) 정현수, 박기철, 이영호 1988. 철근콘크리트 보의 전단강도 예측에 관한 연구. 대한건축학회 학술발표논문집, 제8권 제1호, pp.483-486.