

# 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 전단 거동에 관한 실험적 연구

김 창 회\* · 고 봉 수\* · 은 회 창\*\* · 서 일 교\*\*

## An Experimental Study on the Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Using High-Strength Concrete

Chang-Hee Kim\*, Bong-Soo Ko\*, Hee-Chang Eun\*\* and Ill-Gyo Suh\*\*

### ABSTRACT

The shear capacity of reinforced concrete beam depends on the strength of concrete, the amount and strength of shear reinforcement bars, the support conditions of end points etc. These factors makes the shear behavior or capacity of reinforced concrete beam be complicated. For the purpose of grasping the shear behavior and capacity of reinforced concrete beams, sixteen specimens were tested. Most of specimens showed the shear failure along with the yielding of longitudinal bars or crushing of compressive concrete. The effects on each of test variables were related to the shear capacity of reinforced concrete beams. And, the comparison of the test results and ACI code showed the reasonable agreement.

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

### 1. 서론

철근콘크리트 보의 휨에 대한 이론적인 해석은 실험의 결과와 일반적으로 일치하고 있다. 해석에서 사용한 가정이나 그 역학적인 거동이 이론적으로 잘 설명된다고 유추할 수 있다. 그러나 전단 거동에 미치는 영향 인자들은 다양하여 그 이론적인 해석으로 규명할 수 없는 어려운 점이 있다.

철근콘크리트 구조 부재의 설계는 최소한 전단에 의한 파괴가 발생하지 않도록 규정하고 있다. 이는 궁극적으로 급격한 구조물의 파괴로 인명이 대피할 시간적인 여유가 없기 때문이다. 그러므로 구조 부재는 최소한 전단 내력을 확보할 필요성이 있다. 그러나 전단 내력에 영향을 미치는 요인들이 복합적으로 존재하며 정량적으로 제시하는데 어려움이 있다.

철근콘크리트 보의 전단 내력에 관한 많은 연구들이 행해졌으며 현재도 진행중에 있다. 荒川 卓<sup>1)</sup>은 콘크리트 강도 350kg/cm<sup>2</sup> 이하까지는 전단 초기균열 응력과 전단 종국 응력은 콘크리트 강도에 직접 비례하고, 유효 깊이가 40cm까지는 유효 깊이가 증가함에 따라 전단 초기 균열 응력과 전단 종국 응력은 감소하고

\* 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.

전단 종국 응력에 미치는 전단철근의 효과는 전단철근 구속력의 평방근에 비례한다고 하였다. Mathey<sup>2)</sup>는 전단철근이 없는 철근콘크리트 보에서 전단 초기 균열 응력은 콘크리트 강도의 평방근에 비례하며, 또한 전단 종국강도는 전단 경간비가 1.5인 경우 전단초기 크랙이 발생한 후 응력 재분배가 일어나지 않고 전단 초기크랙은 파괴하중의 약 85%에서 발생한다 하였다. Kani<sup>3)</sup>는 전단철근이 없는 철근콘크리트 보에서 전단 경간비가 1.0에서 2.5에 가까울수록 전단파괴하중은 급격히 감소하는데, 이것은 아치 작용에 의한 지지효과가 감소하기 때문이며,  $a/d$ 가 2.5부근에서 아치 작용에 의한 지지효과는 거의 없으며 철근콘크리트 부재는 가장 낮은 강도를 갖는다고 하였으며  $a/d$ 가 2.5에서 6으로 증가하면 부재의 파괴형태는 휨 전단파괴 형태를 나타내며 부재의 파괴하중도 점차 증가한다고 하였다. Zsutty<sup>4)</sup>는 전단초기 균열 응력과 전단 종국응력은 콘크리트 압축강도, 전단 경간비의 역수, 인장 철근비를 하나의 변수로 하여 이들 복합변수의 3제곱근에 비례하고, 전단철근의 구속력은 전단종국강도에 직접 비례하며 전단 경간비가 2.5인 점을 아치 작용이 일어나는 점으로 잡아 전단 경간비가 2.5보다 적은 부재는 2.5를 전단 경간비로 나눈 값을 예측식에 곱하

여 전단 종국응력을 예측할 수 있다고 보고하였다.

이러한 많은 연구들에도 불구하고 부재의 전단 거동에 대해 상이한 결과들을 제시하고 있다. 전단 거동에 영향을 미치는 요인으로는 콘크리트 강도, 전단철근의 강도 및 배근 간격으로 설명되는 구속 지수 및 전단 경간비 등을 들 수 있으며, 이들 요인들과 전단 거동을 관련짓는 명확한 관계 조건을 설정하지 못하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이들 요인들을 사용하여 16개의 시험체를 제작 및 실험을 실시하여 철근콘크리트 보의 전단 거동을 규명하는데 목적이 있다. 또한, 일반적으로 보 부재의 실험은 단순 지지 조건을 사용하나, 실제 구조물에서는 연속인 지지 조건이 발생하므로 지점 조건을 단순지지와 연속 지점에 따른 영향을 비교한다.

## 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, 전단철근의 강도 및 지점의 조건을 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  $\phi 10$ 의 전단철근을 사용하였다. 또한 지점 조건을 단순지지와 연속지지 조건으로 구분하였으며, 휨에 의한 파괴를 막고자 4-D19로 배근하였다. 시험체는 Fig. 1과 같은 형태로 제작되었으며, 가력은 전단 경간을 고려하여 2점 재하를 실시하였다.

Table 1. Summary of specimens

specimen	$f_{ck}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	shear bar			$a/d$	support condition
		$s_v$ (cm)	$\rho_w$	$f_m$ (kgf/cm <sup>2</sup> )		
L3NOO	284	-	0.0	-		
L3LNO	284	7	0.0112	-		
L3LWO	284	14	0.0056	3,500		
L3HWO	284	16	0.0049	9,000		
M3NOO	585	-	0.0	-		
M3LNO	585	7	0.0112	-		
M3LWO	585	14	0.0056	3,500	3.0	simple
M3HWO	585	16	0.0049	9,000		
H3NOO	680	-	0.0	-		
H3LNO	680	7	0.0112	-		
H3LWO	680	14	0.0056	3,500		
H3HWO	680	16	0.0049	9,000		
L2NOT	284	-	0.0	-		
L2LNT	284	7	0.0112	-		
L2LWT	284	14	0.0056	3,500	2.0	continue
L2HWT	284	16	0.0049	9,000		

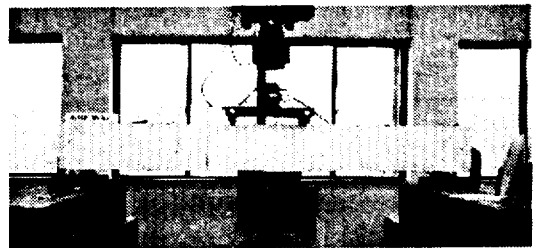


Fig. 1. Test set-up of specimens.

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  $\phi 10$ 인 압축철근을 사용하였다. 사용된 철근의 역학적인 특성을 Table 3에 나타내었다.

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

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>
$\phi 10$	3.520	0.243	1.9 × 10 <sup>6</sup>
$\phi 10$	9.040	0.235	1.97 × 10 <sup>6</sup>

## 2.2. 실험 결과 및 고찰

실험 결과를 Table 4에 요약하였다. Fig. 2는 시험체들의 파괴 양상을 나타내고 있다. 이들 파괴 양상

들에서 보는 바와 같이 대부분의 시험체들에서 사인장 균열을 나타내었으며, 휨 주철근의 항복에 의한 휨 파괴가 선행하는 시험체들도 관찰할 수 있었다. 모든 시험체들은 전단에 의한 파괴가 선행되도록 설계되었으나, 전단에 의한 영향이 계획된 하중 보다도 적은 값에서 파괴하였기 때문이라 사료된다.

또한, 지점 상태에 따른 영향을 고려하여 단순지지와 연속지지 조건에서의 시험체는 다른 거동을 나타내었으나, 전단 균열에 의한 파괴는 동일하게 나타났다. 전단 철근으로 과보강된 시험체는 주철근의 항복



(a) M2LNO



(b) M2N00



(c) H2N00



(d) H2LW0

Fig. 2. Failure modes.

Table 4. Test results

specimen	$V_n$ (tonf)	ACI		$(V_n)_{Test}/$ $(V_n)_{ACI}$	$(M_n)_{Test}/$ $(M_n)_{ACI}$
		$V_n$ (tonf)	$M_n$ (tf · m)		
L3NOO	9.04	4.97	9.5	1.82	0.73
L3LNO	18.95	23.19	9.5	0.82	1.52
L3LWO	18.41	14.98	9.5	1.23	1.48
L3HWO	17.11	23.19	9.5	0.74	1.38
M3NOO	13.7	6.84	10.6	2.00	0.98
M3LNO	20.47	26.86	10.6	0.76	1.47
M3LWO	21.96	16.85	10.6	1.30	1.58
M3HWO	18.36	29.36	10.6	0.63	1.32
H3NOO	14.62	7.32	10.8	2.00	1.04
H3LNO	22.76	27.34	10.8	0.83	1.61
H3LWO	19.8	17.33	10.8	1.14	1.40
H3HWO	21.56	29.84	10.8	0.72	1.53
L2NOT	15.91	5.31	9.5	3.00	0.85
L2LNT	25.63	23.53	9.5	1.09	1.37
L2LWT	24.43	15.32	9.5	1.60	1.31
L2HWT	23.5	23.53	9.5	1.00	1.26

이나 압축측 콘크리트의 압괴에 의한 파괴 양상을 나타내기도 하였다.

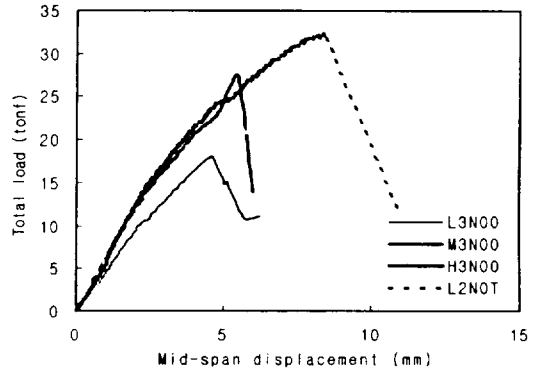
(1) 지점에 상태에 따른 하중과 처짐 관계

Fig. 3은 하중과 처짐 관계를 나타내고 있다. 이 그림에서 전단 철근으로 보강되지 않은 시험체(Fig. 3(a))는 최대 내력 후에 급격한 전단 파괴를 일으킴을 볼 수 있다. 그러나 전단 철근으로 보강된 시험체는 전단에 대한 저항 능력이 증가하여 급격한 전단 파괴는 막을 수 있었으며, 휨에 의한 파괴가 지배하는 양상을 나타내고 있다.

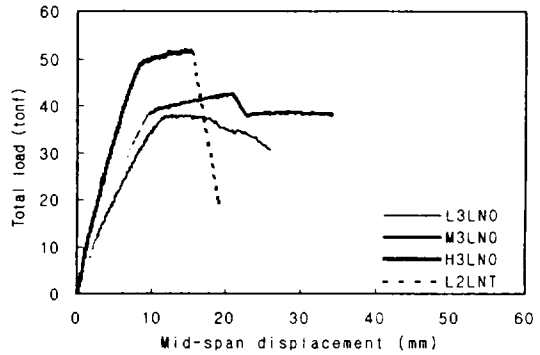
지점은 양단 단순 지지와 연속지지 조건으로 구분되며, 그림에서 보는 바와 같이 지점 조건에 따라서 파괴 양상에 차이를 나타냈으며, 전단 철근으로 보강에도 불구하고 급격한 전단 파괴를 일으켰다.

(2) 전단 내력에 영향을 미치는 요인 분석

Fig. 4는 콘크리트 강도와 전단 내력과의 관계를 나타내고 있다. 이 그림에서 콘크리트 강도의 증가는 콘크리트가 분담하는 전단 내력의 증가로 전체적으로 전단 내력의 증가를 나타내었다. 그러나, 전단 철근의 배근양이 증가할수록 콘크리트 증가에



(a) specimens without shear bars



(b) specimens with shear bars

Fig. 3. Load-deflection relation.

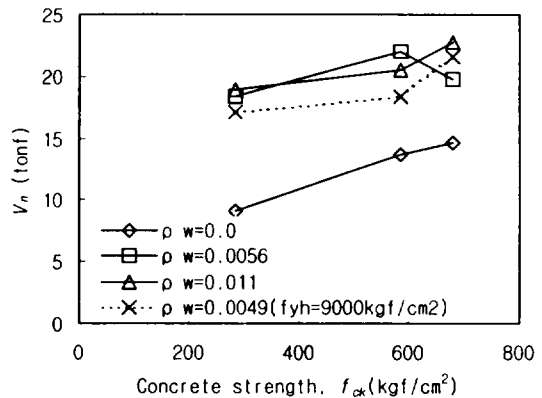


Fig. 4. Shear strength according to concrete strength.

의한 전단 내력의 증가율의 감소를 나타냄을 볼 수 있다. 이는 전단 철근에 의한 전단 내력의 분담율의

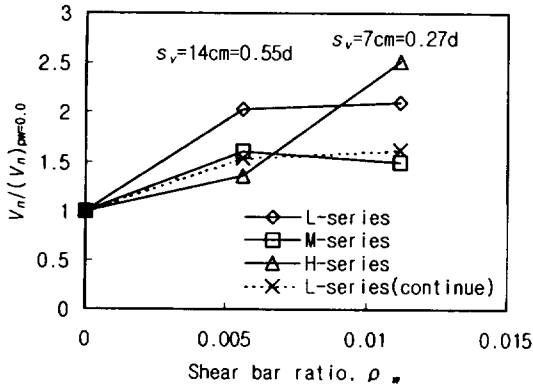
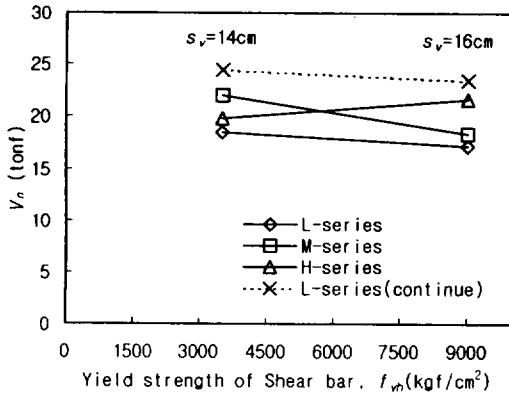
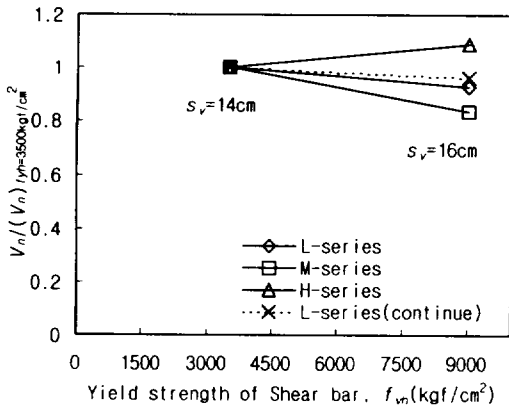


Fig. 5. Shear strength according to shear bar ratio.



(a) dimensional shear strength



(b) dimensionless shear strength

Fig. 6. Shear strength according to the yield strength of shear bars.

감소로 이해되나, 휨이 지배하지 않을 경우에는 전단 철근에 의한 전단 내력의 분담 정도가 크게 증가할 것으로 판단된다.

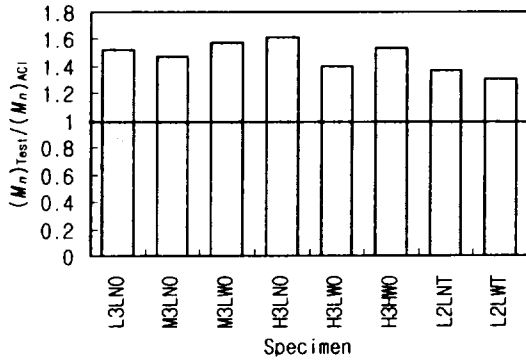
Fig. 5는 전단 철근비와 전단 내력과의 관계를 나타내고 있다. 전단 내력은 전단 철근으로 보강되지 않은 시험체의 전단 내력에 의해 무차원화시켰다. 이 그림에서 전단 철근에 의한 보강은 전체적으로 전단 내력의 증가를 나타내고 있다. 그러나 전단 철근비가 0.005에서 0.011로 증가시킬 경우에 고강도 콘크리트 보를 제외한 기타의 시험체들에서 전단 내력의 증가를 거의 볼 수 없다. 이는 휨 철근의 항복이 전단 파괴를 선행하여 발생하였기 때문에 고강도 콘크리트의 사용은 휨 주철근 항복을 지연시켜 전단 파괴를 일으켰기 때문이라 사료된다.

Fig. 6은 전단 철근의 항복 강도가 전단 내력에 미치는 영향을 비교하였다. 이 그림에서 전단 철근의 항복 강도는 크게 전단 내력에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. Fig. 6(b)는 배근 간격이 14cm이며, 항복 강도가 보통인 전단 철근이 부담하는 전단 내력으로 무차원화시킨 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 동일한 구속 지수에 대하여 전단 철근의 강도를 증가시키고 그 배근 간격을 줄일 경우에 전단 내력은 증가함을 볼 수 있다. 즉, 전단 철근의 강도를 증가시키는 것보다는 배근 간격을 줄이는 것이 전단 내력을 증진시킬 수 있음을 알 수 있다.

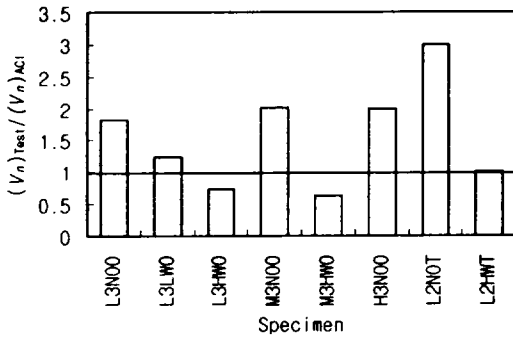
### (3) ACI 기준과의 비교

ACI 기준은 사용 전단 철근의 항복 강도를 4000 kgf/cm<sup>2</sup> 이하로 규정하고 있으며, 보통 강도의 콘크리트에 대한 실험식들을 고강도 콘크리트에 적용하여 설계에 반영하고 있다. 따라서, 이들이 변수인 본 실험에서 그 타당성을 ACI 기준과 비교하였다.

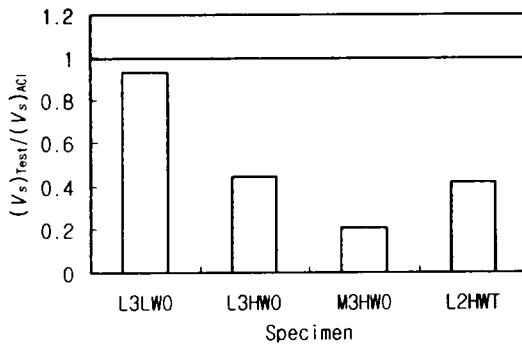
Fig. 7(a)는 휨내력을 비교하였다. 모든 시험체들은 ACI기준보다 큰 모멘트 저항 능력을 가지고 있음을 볼 수 있다. 즉, 기준에 의하여 적절한 휨 내력 및 설계가 가능하다고 판단된다. Fig. 7(b)는 전단 내력을 비교하였다. 이 그림에서 전단 철근의 강도가 4000 kgf/cm<sup>2</sup> 이하인 시험체에서는 기준에서 정하는 전단 내력을 상회하나, 고강도 철근인 경우는 전단 내력이 기준 이하의 값을 보인다. 따라서, 전단 내력을 증진을 위



(a) flexural capacity



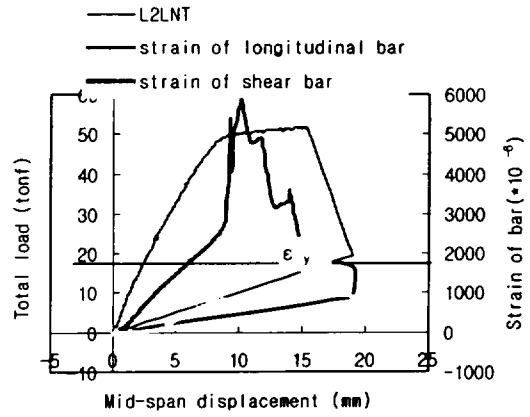
(b) shear capacity



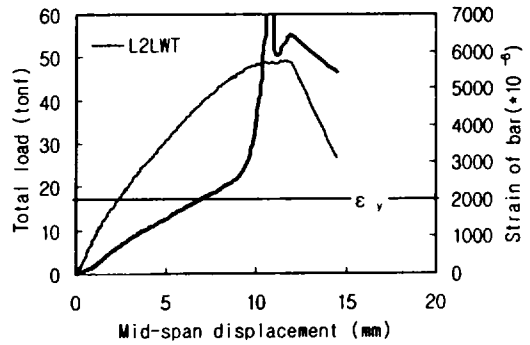
(c) shear contribution of shear bars

Fig. 7. Comparison with ACI code.

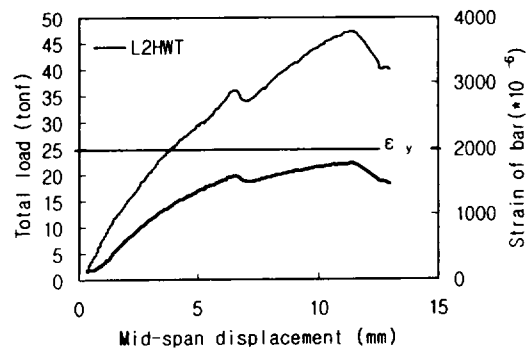
하여는 전단 철근의 강도를 고강도화 하는 것은 바람직하지 않음을 알 수 있다. 이는 Fig. 7(c)에서 전단 철근만에 의한 전단 내력을 산정한 결과로부터 명확히 알 수 있다. 즉, 고강도 철근을 사용할 경우에 전



(a) L2LNT



(b) L2LWT



(c) L2HWT

Fig. 8. Behavior of shear reinforcements.

단 내력은 기준 보다 작은 내력을 보임을 알 수 있다. 또한 Fig. 8은 각 시험체의 거동을 요약하고 있다.

(a)에서 L2LNT 시험체는 주철근의 항복 후에 전단에 의한 파괴를 나타내고 있다. 그러나 전단 철근은 항복 이전에 있음을 볼 수 있다. 주철근의 항복으로 최대 내력 후에 급격한 내력의 저하를 보이지 않았으며, 오히려 휨에 지배가 된 것으로 판단된다. (b)의 시험체 L2LWT는 지점이 연속지지 조건일 경우로 시험체가 최대 내력에 도달하기 이전에 주철근의 항복을 나타내었으므로 전단에 의한 급격한 파괴는 나타나지 않았다. 그러나 전단 철근은 항복하지 않은 것으로 미루어 전단 내력을 극대화시키지는 않은 것으로 판단된다. (c)의 시험체 L2HWT는 주철근과 전단 철근 모두 항복하지 않고 최대 내력에 달하였으며 최대 내력에 의하여 압축측 콘크리트의 압괴에 의해 급격한 전단 파괴를 나타내었다.

### III. 결론

철근콘크리트 보의 전단 내력에 영향을 미치는 요인들을 근거로 콘크리트의 강도, 지점의 상태, 전단 철근의 강도 등을 변수로 총 16개의 실험체를 제작하여 실험을 실시하여 그 영향을 파악하였다. 실험 결과 대부분의 시험체들에서 사인장 균열을 나타내었으며, 휨 주철근의 항복에 의한 휨 파괴가 선행하는 시험체들도 관찰할 수 있었다. 실험 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) 전단 철근으로 보강되지 않은 시험체는 최대 내력 후에 급격한 전단 파괴를 일으킴을 볼 수 있다. 그러나 전단 철근으로 보강된 시험체는 전단에 대한 저항 능력이 증가하여 급격한 전단 파괴는 막을 수 있었으며, 휨에 의한 파괴가 지배하는 양상을 나타내고 있다.

(2) 콘크리트 강도의 증가는 콘크리트가 분담하는 전단 내력의 증가로 전체적으로 전단 내력의 증가를 나타내었다. 그러나, 전단 철근의 배근량이 증가할수록 콘크리트 증가에 의한 전단 내력의 증가율의 감소를 나타냄을 볼 수 있다.

(3) 전단 철근에 의한 보강은 전체적으로 전단 내력의 증가를 나타내고 있다. 그러나 전단 철근비가

0.005에서 0.011로 증가시킬 경우에 고강도 콘크리트 보를 제외한 기타의 시험체들에서 전단 내력의 증가를 거의 볼 수 없었다. 이는 휨 철근의 항복이 전단 파괴를 선행하여 발생하였기 때문으로 고강도 콘크리트의 사용은 휨 주철근 항복을 지연시켜 전단 파괴를 일으켰기 때문이라 사료된다.

(4) 동일한 구속 지수에 대하여 전단 철근의 강도를 증가시키고 그 배근 간격을 줄일 경우에 전단 내력은 증가함을 볼 수 있다.

(5) 모든 시험체들은 ACI기준보다 큰 모멘트 저항 능력을 가지고 있음을 볼 수 있다. 즉, 기준에 의하여 적절한 휨 내력 및 설계가 가능하다고 판단된다. 그리고, 전단 내력을 증진을 위하여는 전단 철근의 강도를 고강도화 하는 것은 바람직하지 않았다.

### 참고문헌

- 1) 荒川 卓 D. 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.
- 2) R. C. Mathey 1963. Shear Strength of Beam Without Web Reinforcement Containing Deformed Bars of Different Yield Strengths. ACI Journal.
- 3) G. N. J. Kani 1964. The Riddle of Shear Failure and It's solution. ACI Journal.
- 4) T. C. Zsutty 1971. Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests. Vol.62. No.2.
- 5) 은희창 외 4인 2000. 철근콘크리트 구조설계. 태림문화사.
- 6) 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.
- 7) 박기철 1992. 고강도 철근콘크리트 부재의 내력 및 변형 성상에 관한 실험적 연구. 중앙대학교 대학원 박사학위논문.