

전단스팬비가 작은 고강도 철근콘크리트 보의 전단성능

Shear Capacity of High-Strength Concrete Beams
With a Shear Span-Depth Ratio Between 1.5 and 2.5

○ 문정일*, 안종문*, 김대근*, 이광수**
Moon, J. I., An, J. M., Kim, D. K., Lee, K. S.
이승훈*, 오정근*, 장일영**, 신성우***
Lee, S. H., Oh, J. K., Jang, I. Y., Shin, S. W.

ABSTRACT

This paper is an experimental study on shear capacity of the high strength R/C beams with a shear span-depth ratio between 1.5 and 2.5. A total of 15 beams was tested to determine diagonal cracking and ultimate shear strength. The major variables are shear span-depth ratio ($a/d=1.5, 2.0, 2.5$), vertical shear reinforcements ratio ($V_s = 0, 25, 50, 75, 100\%$ ($V_s = P_v/P_v(ACI)$)), and concrete compressive strength ($f'_c = 747\text{kg/cm}^2$).

Test results indicate that ACI 318-89 Eq.(11-31) generally underestimates shear strength carried by vertical shear reinforcements, and the mode of failure may change from shear tension to shear compression for the beams having higher V_s than 75%, thus the effectiveness of r-fy on ultimate shear strength (v_u) decreased.

1. 서론

현대 건축물의 초고층화, 대형화, 그리고 특수화됨에 따라서 콘크리트 강도의 고강도화는 선진외국을 중심으로 적극적인 연구가 이루어져 왔으며, 이러한 구조물에 대한 외부하중은 매우 복잡하게 작용하게 되어 전단력과 휨모멘트가 조합되거나 혹은 축력, 비틀림 등이 추가되기도 한다. 이와같은 복잡한 하중에 의해 구조물이 파괴될 경우 필연적으로 방지되어야 하는 것은 전단에 의한 취성파괴(Brittle Failure)로써, 이는 철근콘크리트 부재의 강도를 휨능력 이하로 감소시킬 뿐만 아니라 부재의 연성(Ductility)을 현저히 감소시키게 된다.

현행 ACI 318-89 전단 설계기준식은 비교적 콘크리트의 강도가 낮은 범위의 시험체인 $140\sim 420\text{kg/cm}^2$ 의 콘크리트를 사용한 시험체를 대상으로 한 실험식이며 콘크리트 압축강도가 700kg/cm^2 이상일 경우 최소전단보강량 규정을 강화함으로써 고강도 콘크리트 보 전단설계에 대한 비안정성을 보완하였다.⁴⁾ 하지만 압축강도 420kg/cm^2 를 넘는 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 경우 아직도 많은 의문점을 내포하고 있으며, 일부 연구자들은 현행 ACI 전단설계식의 불합리함을 지적하고 있다.⁵⁾⁶⁾⁷⁾

고강도 콘크리트의 경우 골재를 가르는 균열면이

형성되어 사균열 이후의 보유내력이 보통강도 콘크리트에 비해 감소하는 것으로 알려져 있는데, 본 연구에서는 사균열 이후 아치거동(Arch Action)으로 보유내력(Reserved Strength)을 많이 나타내는 전단스팬비가 2.5이하인 보를 대상으로 전단내력을 평가하고, 콘크리트 압축강도의 전단스팬비, 전단보강비에 따른 전단 거동을 분석, 본 실험결과와 기존 제안식을 비교하여 고강도 철근콘크리트 보의 전단설계에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험체 계획

본 연구에서는 고강도콘크리트($f'_c=747\text{kg/cm}^2$)를 사용하여 총 15개의 보 시험체를 제작하였으며, 주요 변수로는 전단스팬비(a/d)를 1.5, 2.0, 2.5, 각각의 전단스팬비에 따라 전단보강비($V_s=P_v/P_v(ACI)$), P_v =전단 보강량, $P_v(ACI)$ =ACI 소요전단보강량)를 0, 25, 50, 75, 100%로 하였다.

시험체의 단면은 $12.5\times 25\text{cm}$ 로 일정하게 하였으며, 전단내력 및 전단보강비의 양은 ACI 318-89 규준에 따라 산정하여 배근하고 양 지점에 지압파괴를 방지하고 주근의 정착길이를 확보하기 위해 양단에 10cm 씩 여유길이를 두었다.

각 시험체별 특성은 표 1에, 그리고 시험체의 상세는 그림 1에 나타나 있다.

여기서 HB1.5-0은 다음을 의미한다.

H : High Strength Concrete($f'_c=747\text{kg/cm}^2$)

B : Beam

1.5: $a/d = 1.5$ ($a/d = 1.5, 2.0, 2.5$)

0 : $V_s = 0\%$ ($P_v/P_v(ACI) = 0, 25, 50, 75, 100\%$)

- * 한양대 대학원 건축공학과 석사과정
- ** 한양대 대학원 건축공학과 박사과정
- + (주)삼성종합건설 기술연구소 연구원
- ++ 금오공대 토목공학과 전임강사
- +++ 정회원 한양대 건축과 부교수

표 1 시험체 일람표

구분 시험체	단면 (cm)		유효중 (cm)	콘크리트 압축강도 (kg/cm ²)	전단 스팬비 (a/d)	전단보강비 (Pv=Av/bs)	인장 철근비 (Pt)	압축 철근비 (Pc)
	폭	중						
HB1. 5-0	2.5	25	21.5	747	1.5	0.0	0.0377	0.0
HB1. 5-25	2.5	25	21.5	747	1.5	0.0045	0.0377	0.005
HB1. 5-50	2.5	25	21.5	747	1.5	0.0091	0.0377	0.005
HB1. 5-75	2.5	25	21.5	747	1.5	0.0136	0.0377	0.005
HB1. 5-100	2.5	25	21.5	747	1.5	0.0181	0.0377	0.005
HB2. 0-0	2.5	25	21.5	747	2.0	0.0	0.0377	0.0
HB2. 0-25	2.5	25	21.5	747	2.0	0.0032	0.0377	0.005
HB2. 0-50	2.5	25	21.5	747	2.0	0.0065	0.0377	0.005
HB2. 0-75	2.5	25	21.5	747	2.0	0.0097	0.0377	0.005
HB2. 0-100	2.5	25	21.5	747	2.0	0.0129	0.0377	0.005
HB2. 5-0	2.5	25	21.5	747	2.5	0.0	0.0377	0.0
HB2. 5-25	2.5	25	21.5	747	2.5	0.0024	0.0377	0.005
HB2. 5-50	2.5	25	21.5	747	2.5	0.0047	0.0377	0.005
HB2. 5-75	2.5	25	21.5	747	2.5	0.0071	0.0377	0.005
HB2. 5-100	2.5	25	21.5	747	2.5	0.0094	0.0377	0.005

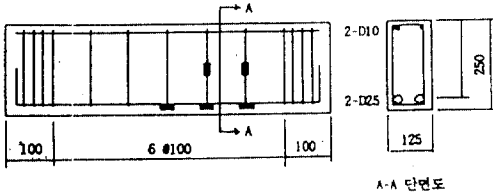


그림 1 시험체 상세도(a/d=1.5, Vs=25%, 단위:mm)

2.2 재료의 성질

본 실험에서 사용한 재료들 중 시멘트는 국내용 S 사 제품의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 대상으로 하였으며, 세골재로는 한강 이포사, 조골재는 최대 크기 13mm의 곤지암산 화강암 쇄석을 사용하였다. 고유동화재로는 나프탈렌계 Super-20을 사용하였으며, 인장철근은 SD 40의 D25와 압축철근은 SD 40의 D10, 전단철근은 SD 40의 D6이다.

본 실험에 사용한 콘크리트의 압축강도 시험결과 747kg/cm²를 나타내었으며, 철근의 인장시험결과는 표 2에 나타나 있다.

표 2 철근 인장강도 시험결과

구분 종류	E (t/cm ²)	δy (t/cm ²)	εy (×10 ⁻⁶)	σu (t/cm ²)	신율 (%)
HD25	1.61	4.09	2,548	6.20	23.4
D10	1.58	4.00	2,394	4.89	18.6
D 6	2.02	3.80	1,883	4.97	20.3

2.3 실험체 설치

100ton 용량의 U.T.M. Bed Roller 지지점을 전단스팬비에 따라 조정하고, 그 위에 보 시험체를 설치하여 중앙부에서 1점 가력하였다. 중앙부 처짐을 측정하기 위하여 가력점 (시험체 중앙부) 부위 밑에 전기 다이얼 게이지를 설치하고 Data Logger에 리드선으로 각 게이지를 연결하여 매하중마다 계속하였다.

2.4 하중재하 및 측정

가력 기기에 시험체 설치를 완료한 후 시험체 예상 종국 파괴 하중의 1/3까지는 하중을 일정하게 증가시키는 하중조절 방식(load control), 그리고 이후부터는 시험체 중앙부에 설치된 다이얼 게이지의 처짐을 관찰하면서 변위조절 방식(deflection control)에 의해 가력하였다.

하중과 처짐 그리고 각 게이지에 대한 변형율은 Data Logger를 통하여 각각의 하중단계마다 측정되었으며, 시험체의 균열상황을 관찰하여 초기균열과 사균열을 기록하였다.

3. 실험결과

3.1 파괴양상

전단보강근이 없는 보의 균열진행은 보 중앙하부에서 초기 휨균열이 미세하게 발생한 후 하중이 증가함에 따라 전단지간에 휨균열을 형성하고 일정 하중단계에서 전단지간 휨균열이 가력점을 향하면서 사인장 균열로 진전되거나, 전단스팬내의 보중앙에서 사인장 균열이 급작스럽게 발생했다. 사인장균열이 어느 한 쪽 보의 중앙지간 중간높이에서 대각의 방향으로 형성되어 하중이 증가함에 따라 가력점과 지지점을 향하여 진행되고 이러한 사인장균열이 어느 한쪽면에서 계속 진전, 압축대가 형성되며 균열의 폭이 넓어지면서 인장철근과 만나는 지점에 응력이 집중되어 인장근을 따르는 할렬균열이 지점으로 이어지면서 종국 파괴되었다. 초기 보 중앙하부에 발생한 휨균열은 사균열 발생 이후 거의 균열의 진행이 없어 전단 보강근

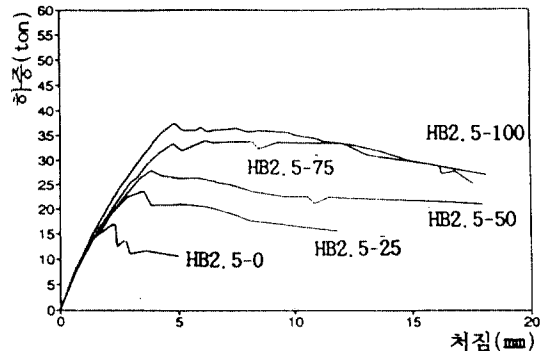


그림 2 하중 처짐 곡선 (HB 2.5 시리즈)

이 없는 경우 보의 거동은 전단인장에 의해 파괴가 결정되었다.

전단보강근이 있는 보는 초기 휨균열과 사인장균열 형성까지는 전단 보강근이 없는 경우와 같으나 전단 보강근의 전단저항으로 인하여 전단균열의 폭을 제어하여 사균열 이후에도 계속적인 하중저항 능력을 나타내며 이에따라 다수의 휨균열을 수반하고 내력의 재분배가 이루어져 대칭적인 균열을 나타내며 전단인장, 전단압축 중 취약한 부분에서 최종적인 파괴를 나타내었다.

3.2 전단철근의 변형도

전단 철근의 변형도는 사균열 이전에는 거의 나타나지 않고, 사균열 이후에 급격하게 증가함을 알 수 있으며, 동일 전단 철근비에서 a/d가 증가함에 따라 전단 철근의 변형도는 급격히 증가함을 나타내었다. 또한 동일 a/d에서 전단 보강량이 증가함에 따라 전단철근의 변형도는 사균열 이후에도 서서히 증가하였다.

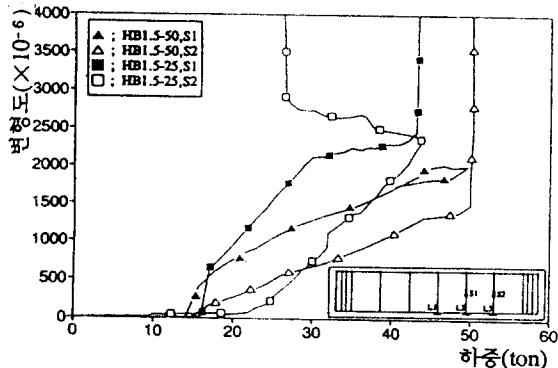


그림3(a) 전단보강비에 따른 전단근의 하중-변형도

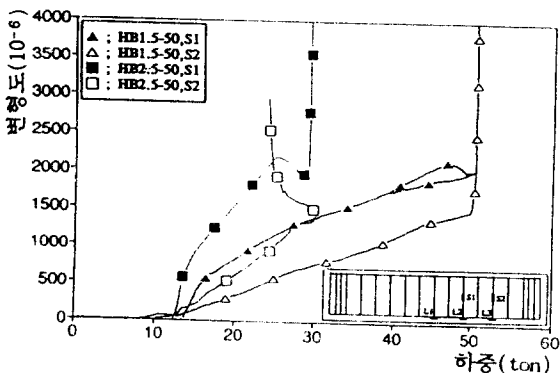


그림3(b) 전단스팬비에 따른 전단근의 하중-변형도

3.3 전단강도

각각의 시험체에 대한 전단강도 실험값과 각각의 식에 의한 계산값이 표 3에 나타나 있다. 표 3에서

보듯이 ACI의 사균열강도식의 계산값은 본 실험결과에 비하여 평균 54% 안전측으로 평가를 하고 있다. 이에 반하여 Zsutty의 제안식 계산값은 a/d=1.5인 경우는 실험값과 평균 14%로 과소평가하고 있으나 a/d=2.0, 2.5인 경우는 상당히 잘 일치하고 있다. 이는 ACI식이 사균열강도에 대한 전단스팬비와 인장철근비의 영향을 과소평가하고, Zsutty의 제안식은 각 변수에 대한 영향을 어느정도 정확하게 평가하고 있다고 볼 수 있다.

ACI의 극한전단강도식은 콘크리트 전단부담강도와 전단철근의 전단부담강도를 합산하여 산정한다. 그리고 전단스팬비가 2.5이하일 경우는 콘크리트 전단부담강도는 아치거동을 고려하여 사균열 이후의 보유강도를 포함하여 평가하고 있으며, 전단철근의 전단부담강도는 수직전단철근과 수평전단철근의 부담을 각각 나누어 합산하고 있다.

표 3 사균열 및 극한전단강도 실험값 및 계산결과

구분 시험체명	실험값					ACI					Zsutty					실험값/ACI		실험값/Zsutty		
	V _{cr}	V _u	V _{cr1}	V _{cr2}	V _{cr3}	V _{cr1}	V _{cr2}	V _{cr3}	V _{cr4}	V _{cr5}	V _{cr1}	V _{cr2}	V _{cr3}	V _{cr4}	V _{cr5}	V _{cr(1)}	V _{cr(2)}	V _{cr(3)}	V _{cr(4)}	V _{cr(5)}
HB1.5-0	32.37	53.90	18.09	18.09	36.72	26.63	47.71	1.79	2.98	1.47	1.22	1.13								
HB1.5-25	31.63	81.30	18.09	37.68	43.14	26.63	64.77	1.75	2.16	1.88	1.19	1.26								
HB1.5-50	28.90	93.40	18.09	57.27	49.56	26.63	84.36	1.60	1.63	1.88	1.09	1.11								
HB1.5-75	26.04	100.8	18.09	76.86	55.99	26.63	103.95	1.44	1.31	1.80	0.98	0.97								
HB1.5-100	32.74	106.4	18.09	96.45	62.39	26.63	123.54	1.81	1.10	1.71	1.23	0.86								
HB2.0-0	26.91	37.67	16.98	16.98	20.38	24.20	32.50	1.59	2.22	1.85	1.11	1.16								
HB2.0-25	23.62	54.14	16.98	30.73	26.12	24.20	44.53	1.39	1.76	2.07	0.98	1.22								
HB2.0-50	28.46	74.42	16.98	44.48	31.85	24.20	58.29	1.68	1.67	2.34	1.18	1.28								
HB2.0-75	26.23	87.26	16.98	58.23	37.58	24.20	72.04	1.54	1.50	2.32	1.08	1.21								
HB2.0-100	26.05	91.91	16.98	71.98	43.31	24.20	85.78	1.53	1.28	2.12	1.08	1.07								
HB2.5-0	23.81	30.47	16.32	16.32	20.38	22.46	24.14	1.46	1.87	1.49	1.06	1.26								
HB2.5-25	23.07	43.81	16.32	27.01	25.73	22.46	33.55	1.41	1.62	1.70	1.03	1.31								
HB2.5-50	23.44	56.56	16.32	37.71	31.08	22.46	44.25	1.44	1.50	1.82	1.04	1.28								
HB2.5-75	21.86	63.26	16.32	48.40	36.43	22.46	54.94	1.34	1.31	1.73	0.97	1.15								
HB2.5-100	24.00	69.77	16.32	59.10	41.78	22.46	65.64	1.47	1.18	1.67	1.07	1.06								

A. ACI 규준식

1) (11-6)식

$$V_{cr} = 0.503 \sqrt{f_c} + 176 p_t (d/a) \leq 0.93 \sqrt{f_c}$$

2) (11-17)식: 일반 보의 경우(a/d ≥ 2.5)

$$V_u = V_{cr} + r f_y \quad (r = A_v / s \cdot b)$$

3) (11-30), (11-31)식: 깊은 보의 경우(a/d < 2.5)

$$V_{cu} = [3.5 - 2.5 \cdot a / (2 \cdot d)] \cdot V_{cr} \leq 1.6 \sqrt{f_c} \quad (\text{여기서, } a/2s \leq d)$$

$$V_u = V_{cu} + \left[\frac{A_v}{s} \left| \frac{1 + \ln(d)}{12} \right| + \frac{A_{vh}}{s_2} \left| \frac{11 - \ln(d)}{12} \right| \right] \frac{f_y}{b}$$

B. Zsutty 제안식 : 1.5 < a/d < 2.5인 경우

4) $V_{cr} = 10.02 (f_c \cdot p_t \cdot d/a)^{1/3} \cdot [2.5 / (a/d)]$

5) $V_u = 10.77 (f_c \cdot p_t \cdot d/a)^{1/3} \cdot [2.5 / (a/d)]$

$$V_u = 10.2 (f_c \cdot p_t \cdot d/a)^{1/3} \cdot [2.5 / (a/d)] + r f_y$$

3.4 사균열강도

일반적으로 기존실험에 의하면 전단-스팬비가 3이하 일 경우 사균열강도에 대한 전단-스팬비의 영향은 크게 나타나며, 그 이하일 경우는 적게 나타나고 있다. 본 실험에서는 a/d가 2.5이하이므로 비교적 사균열강도에 대한 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 일정 전단-스팬비에서 전단보강비에 관계없이 거의 일정하게 나타나, 전철의 전단철근의 변형도와 상응하는 결과를 나타내고 있다. 따라서 전단보강근은 사인장균열 이전에는 전단을 부담하지 않는다는 기존 실험결과와 일치하고 있다.¹⁾⁶⁾

본 실험결과와 ACI식, Zsutty식의 계산값을 전단-스팬비에 따라 사균열강도를 비교한 그래프가 그림 4(a)에 나타나있다. 그림에서 알 수 있듯이 ACI식은 전체적으로 낮게 평가를 하고 있으며, Zsutty식은 a/d=2.0, 2.5에서는 잘 일치하고 있으나 a/d=1.5일 경우는 1.14배로 실험식보다 낮게 평가를 하고 있다. 이로써 본 실험결과에 Zsutty식을 비교 할 경우 a/d의 영향함수가 $(d/a)^{1/3}$ 보다는 크게 나타난다고 판단 할 수 있다.

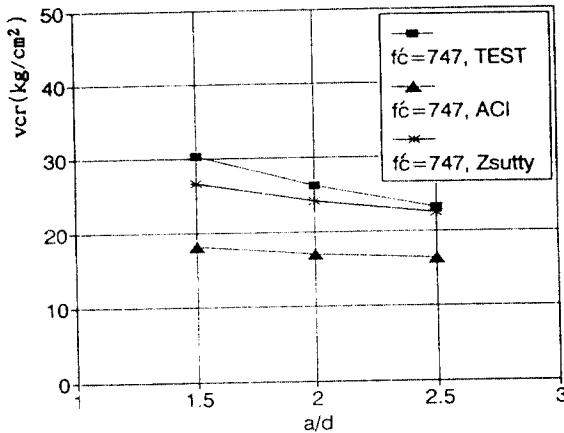


그림 4(a) 전단-스팬비에 따른 사균열강도

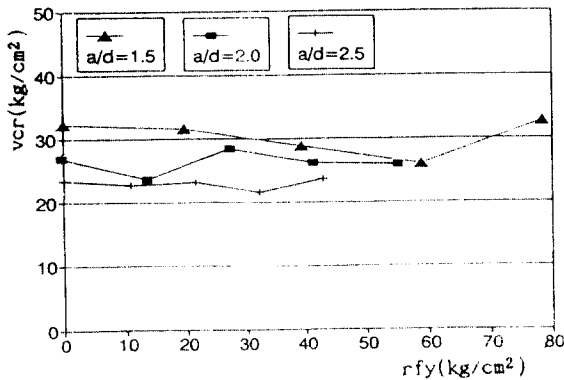


그림 4(b) 전단보강율에 따른 사균열강도

3.5 극한전단강도

a) 전단보강근이 없는 경우

그림 5(a)은 전단보강근이 없는 경우 실험치, ACI식, Zsutty식의 계산값을 전단-스팬비에 따라 극한전단강도를 비교한 그래프이다. ACI식의 값은 보의 적용범위는 a/d가 2.5보다 작을 경우이나 본 연구에서는 a/d가 짧은 보에서 전단-스팬비에 의한 비교 평가를 위하여 a/d=2.5인 경우도 포함하여 비교하였다. 그림에서 나타나듯이 ACI식에 대한 실험치의 비가 a/d가 2.5일 경우 1.49배, a/d가 2.0일 경우 1.85배, a/d가 1.5일 경우 1.46배를 나타내어 전단-스팬비에 대한 평가가 비합리적으로 나타나고 있다. 이는 ACI식이 집중하중을 받는 경우 전단-스팬비가 2.0에서 2.5사이의 위험단면 유효축(d)으로 고정되어 전단-스팬비에 대한 영향이 고려되지 않아 a/d가 2.0이하 일 경우만 고려되고 있기 때문이다.

Zsutty식에 대한 실험치의 비가 a/d가 2.5일 경우 1.26배, a/d가 2.0일 경우 1.14배, a/d가 1.5일 경우 1.13배를 나타내어, 전체적으로 과소평가를 하고 있으나 a/d에 대한 영향평가는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

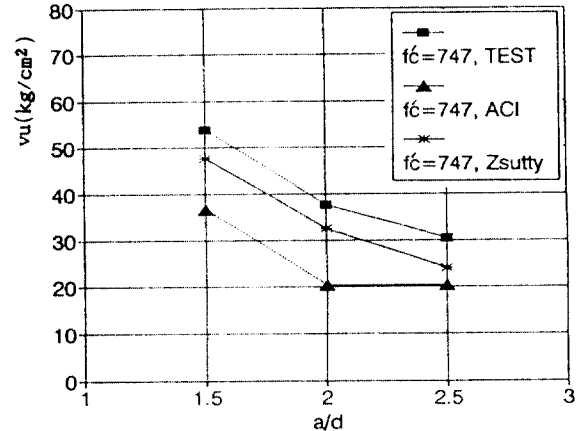


그림 5(a) 전단-스팬비에 따른 극한전단강도

b) 전단-보강근이 있는 경우

그림 5(b), 5(c), 5(d)은 각 전단-스팬비별로 전단보강비에 따른 극한전단응력에 대한 영향을 나타낸 그래프이다. 그림에서 나타나듯이 ACI318-89 (11-31)식은 전단-스팬비에 따라 수직전단철근의 전단부담응력을 달리하고 있다. 그러나 전단보강율이 증가함에 따라 실험치와 차이가 상당히 증가하고 있음을 알 수 있으며, a/d=2.0인 경우에는 전단보강비가 50%에 이르면 실험치가 ACI값의 2.34배를 나타내고 있어, 지나치게 수직전단철근에 대한 전단부담을 과소평가하고 있다.

Zsutty식은 실험치와 a/d=2.0, 2.5에서는 비교적 양호하게 일치하고 있으나, a/d=1.5에서는 전단보강

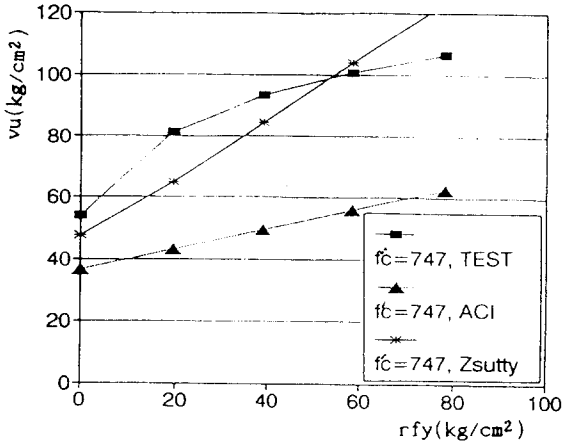


그림 5(b) 전단보강율에 따른 극한전단강도($a/d=1.5$)

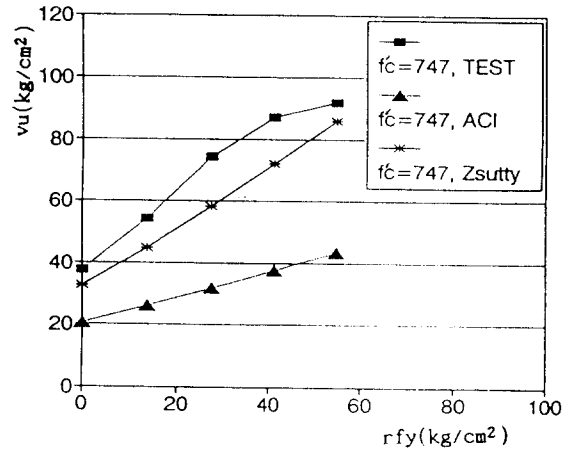


그림 5(c) 전단보강율에 따른 극한전단강도($a/d=2.0$)

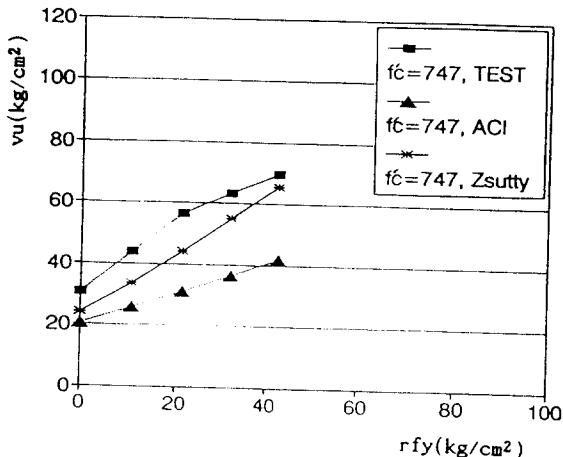


그림 5(d) 전단보강율에 따른 극한전단강도($a/d=2.5$)

비가 증가할수록 실험값과의 비가 감소하며 V_v 가 75% 이상일 경우는 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. 이는 Zsutty식이 전단보강근의 효과계수를 a/d 에 관계없이 1로 일정하게 산정하였기 때문이다.

또한 전단보강비가 75% 이상일 경우부터 전단보강율의 효과가 감소하고 있다. 이는 전단보강비가 높을 경우 전단인장파괴보다는 전단압축 파괴모드가 주로 나타나는데, 이에 따라 전단보강근이 항복하기 이전에 사압축대의 파괴로 인하여 최대내력이 결정되기 때문에 나타나는 현상이라 볼 수 있다. 따라서 전단보강철근이 있는 경우는 전단압축파괴와 전단인장파괴 모드를 나누어 최대내력을 결정하여야 한다고 사료된다.

4. 결론

본 연구는 고강도 철근콘크리트($f'_c=747\text{kg/cm}^2$) 보의 전단강도에 대해 전단-스팬비(a/d), 전단보강비(V_v)에 따른 실험결과를 분석하고, 기존식과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전단철근의 변형도는 사균열 이전에는 거의 나타나지 않았으며, 전단보강량이 감소하고 a/d 가 증가할수록 급격히 증가하였다.

2) 본 연구의 전단-스팬비 범위($1.5 \leq a/d \leq 2.5$)에서 사균열응력은 ACI 318-89 (11-6)식이 실험결과치에 비해 평균 54% 과소평가하고 있어, 사균열응력에 대한 ACI 기준식은 매우 안전측임을 알 수 있다.

3) 극한전단응력에 대한 ACI 318-89 (11-31)식은 수직전단철근에 대한 영향은 지나치게 과소평가하고 있어 비경제적이며 수직전단철근에 대한 영향평가가 재고되어야 한다고 사료된다.

4) 전단-스팬비가 2.5 이하인 경우 극한전단응력에 대한 정밀한 예측을 위해서는 전단인장파괴와 전단압축파괴 모드로 나누어 산정되어야 한다고 사료된다.

참사의말

본 연구를 위한 시험체 제작시에 현장 B/P를 사용하도록 도움을 주신 (주)삼성종합건설 기술연구소 소장님이하 임직원 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1) 권영호, "고강도 철근콘크리트 보의 전단거동에 관한 연구," 한양대학교 학위논문집, 1990년 6월