

# 경량고강도 콘크리트보의 전단거동에 관한 연구

## A Study on the Shear Behavior of Reinforced High Strength Lightweight Concrete Beams

신종렬\* 권우현\*

Sin, Joung Lyoul Kwon, Woo Hyun

권기혁\*\*곽윤근\*\*\*노희일\*\*\*\*

Kwon, Ki Hyuk Kwak, Yoon Keun Roh, Hee Il

### 요 약

최근의 건설 재료의 발전은 인공경량골재의 대량생산을 가능케 했으며 이를 사용한 경량고강도콘크리트의 발전을 가속화시켰다. 경량고강도콘크리트는 Dead Load를 감소시켜 건설비용을 경감시킬 뿐만 아니라 자중 감소로 인하여 지진 등에도 적절히 대응할 수 있는 재료이다. 그러나 대부분의 연구가 보통중량 골재를 사용한 고강도 콘크리트에 대한 연구이고, 경량골재를 사용한 고강도콘크리트에 대해서는 그 연구 결과가 많지 않다.

일반적으로 철근콘크리트 보의 전단강도는 콘크리트의 압축강도, 인장철근비, 전단스팬비, 그리고 전단보강철근의 유무에 영향을 받는다고 한다. 이에 본 연구에서는 전단스팬비( $a/d = 1.5, 2.5, 3.5, 4.5$ )와 전단보강철근( $\rho = 0\%, 1.136\%$ )을 변수로 한 총 8개의 시험체를 가지고 경량고강도콘크리트의 전단거동에 관한 특성을 규명하고자 전단실험을 행했다.

실험결과들은 ACI준칙 및 Zsutty의 제안식과 비교 검토되었다. 그 결과 ACI (11-3)식과 (11-6)식은 경량콘크리트 보에서도 적용 가능하고, 또한 Zsutty의 제안식도 전단스팬비( $a/d$ )가 1.5인 경우를 제외하고는 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

### Abstract

Recent advances in material technology has accelerated the development of higher strength concretes using lightweight manufactured aggregates. Concretes with these characteristics are designable since the reduction of dead loads and the increase in load capacity can offer substantial cost reductions. Although these characteristics are very desirable, very little information is available to the structural researcher about the

\* 정회원, 금오공과 대학교 건축공학과 석사과정  
\*\* 정회원, 서울시립대학교 건축공학과 전임강사  
\*\*\* 정회원, 금오공과 대학교 건축공학과 부교수  
\*\*\*\* 정회원, 서울시립대학교 건축공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1996년 10월 30일까지 학회로 보내주시면 1996년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

properties of highstrength lightweight concrete.

In general, shear strength of reinforced concrete beams is dependent on the compressive strength of concrete, the longitudinal steel ratio, the shear span to the depth ratio and shear reinforcement. In this study, eight single reinforced high strength lightweight concrete beams were tested to investigate their behavior and to determine their ultimate shear strengths. The variables studied in this investigation are shear span to effective depth ratio  $a/d = 1.5, 2.5, 3.5$  and  $4.5$ ; vertical shear reinforcement ratio  $\rho_s = 0\%$  and  $1.136\%$ .

Test results were analyzed and compared with strengths predicted by ACI code equation, Zsutty's equation. As the results, ACI Eq.(11-3) and ACI Eq.(11-6) are conservative for high strength lightweight concrete beam. Also Zsutty's Eq. is conservative for beams except short beams. ( $a/d=1.5$ )

Keywords : high strength lightweight concrete, shear span to depth ratio, longitudinal steel ratio, shear strength.

## 1. 서 론

1963년 (ACI 318-63 제정) 이래 콘크리트의 전단강도에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 전단강도에 대한 대부분의 연구가 보통골재를 사용한 콘크리트 및 고강도콘크리트에 대한 연구이고 경량골재를 사용한 고강도콘크리트에 대해서는 그 연구가 많지 않다. 최근에 성능이 향상된 건설재료를 개발하기 위한 노력의 일환으로 대량생산된 인공경량골재를 구조용으로 사용하기 위한 연구가 계속되었고 경량고강도콘크리트의 개발 및 특성에 대한 연구가 이루어지고 있다. 미국 콘크리트 학회 고강도콘크리트분과위원회 (Committee 363)는 1984년 보고서를 통해 보통중량콘크리트는  $420\text{kg}/\text{cm}^2$ , 그리고 경량콘크리트는  $280\text{kg}/\text{cm}^2$  이상을 고강도로 정의하고 있다.

경량고강도콘크리트에 대한 연구는 1980년대 이후 미국을 중심으로 발전되었는데, Ahmad는 경량고강도콘크리트의 전단강도<sup>(5)</sup>, 휨강도<sup>(6)(7)</sup>에 관해 발표하였고 Shah는 응력-변형도 관계<sup>(15)</sup>, Nilson은 역학적 특성<sup>(14)</sup>에 관해 발표하였다. 그러나 국내에서는 아직 경량고강도콘크리트의 배합에 대한 연구<sup>(23)(27)</sup>에 머물러 있고 구조적 특성에 대한 연구<sup>(22)(24)</sup>는 미비한 실정이다.

이러한 현실을 감안하여 본 연구에서는 국내 생산된 인공경량골재를 사용한 경량고강도 콘크리트 부재에 대해 전단실험을 수행하여 부재의 역학적 거동특성을 규명하고, 경량고강도콘크리트의 이용 가능성을 제시하고자 한다. 또한 현 ACI code 및 국내 표준식에서 경량 고강도 콘크리트의 콘크리트 강도  $V_c$ 의 타당성을 연구하여 경량고강도콘크리트의 특성 연구에 대한 기초적 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

## 2. 실 험

### 2.1 시험체의 개요

이 연구에서는 경량고강도콘크리트의 역학적 거동을 구조 모델의 실험으로 고찰하여 그 측정 결과들을 ACI 표준식 및 이미 제시된 이론식들과 비교 검토하였다.

실험은 일정한 단면 ( $b=12.5\text{cm}$ ,  $D=25\text{cm}$ )을 가지고 길이는 전단 스패んに 따라 다르게 한 총 8개의 시험체를 가지고 전단실험을 하였다.

하중을 증가시키면서 균열의 발생과 전파, 균열의 양상, 처짐, 변형 등을 측정·관찰하였다.

## 2.2 시험체의 제작

시험체의 형태와 크기는 그림 1과 같이 폭 12.5cm, 높 25cm이고 길이는 전단스팬비(a/d)에 따라 각각 1.34m, 1.76m, 2.18m, 2.6m의 4종류로 하였다. 주근은 D-16 철근으로 하고 압축철근과 스티럽은 D-10 철근으로 하였다.

시험체의 종류는 전단스팬비(a/d)를 1.5, 2.5, 3.5, 4.5로 하고 전단보강비( $\rho_s$ )를 0%, 1.136%로 한 총 8개로, 표 1과 같이 분류 제작하였다. 인장철근비( $\rho$ )는 1.5%로 동일하게 하였다.

## 2.3 사용된 재료 및 배합설계

시멘트는 보통포틀랜드 시멘트, 세골재는 강모래, 조골재는 최대크기 19mm의 인공경량골재를 사용하였다. 사용한 인공경량골재는 국내K사에서

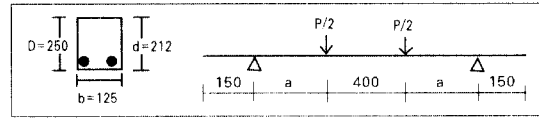
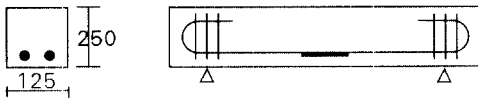
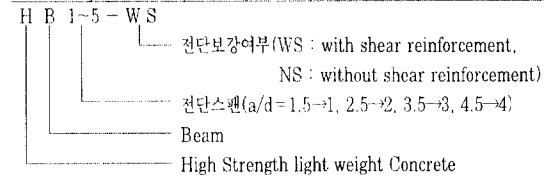
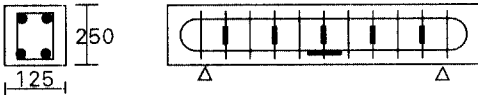


Table 1 Details of test beams

시험체명	전단스팬비 (a/d)	단면(cm)		인장철근비 (%)	전단보강철근비 (%)
		폭	높		
HB1-NS	1.5	12.5	25	1.5	0
HB1-WS	1.5	12.5	25	1.5	1.136
HB2-NS	2.5	12.5	25	1.5	0
HB2-WS	2.5	12.5	25	1.5	1.136
HB3-NS	3.5	12.5	25	1.5	0
HB3-WS	3.5	12.5	25	1.5	1.136
NB4-NS	4.5	12.5	25	1.5	0
NB4-WS	4.5	12.5	25	1.5	1.136



(a) Beam Type without shear Reinforcement



(b) Beam Type with shear Reinforcement

Fig. 1 Specimen details and location of measurity sensor

생산한 팽창점토를 주원료로 고온에서 소성한 것으로 서로 독립된 무수한 기포를 함유하고 있는 입형이 구체에 가까운 구조용 골재이다. 인공경량 골재의 화학성분은 표 2와 같다. 고성능 감수제로는 Naphtalene계의 EZ-CON을 사용하였고 철근은 SD40철근을 사용하였다.

Table 2 Chemical composition of lightweight aggregate

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	lg.loss (%)	내화도 (SK)
57.8	18.4	8.81	0.96	0.65	1.00	2.82	0.63	8.2	10

Table 3 Mix proportions of concrete

중 량 비(kg/m <sup>3</sup> )						물시멘트	슬럼프
시멘트	경량골재	모래	Silica Fume	고성능감수제	물	W/C(%)	(cm)
480	480	560	80	7.94l	154	32%	12

시험체의 제작에는 실험실에서 콘크리트 믹서를 사용하였는데, 콘크리트의 배합비는 표3과 같이 W/C=32%, 고성능감수제/Cement=2%, Silica Fume/Cement=17%로 하였다. 콘크리트를 붓기 전, 시험체의 철근에 스트레인 게이지를 부착하였으며, 콘크리트에는 봉형진동기를 사용하여 밀실하

Table 4 Measured strength of concrete

공시체명 압축강도	No.1	No.2	No.3	평균
3일 강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	299	208	312	307.7
7일 강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	344	354	318	338.7
28일 강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	471	383	485	439.7

Table 5 Measured strength of steels

공시체명	No.1	No.2	No.3	평균
항복강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	4190	4190	4134	4171
인장강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	6117	6145	6089	6117

Table 6 Measured unit weight

공시체명	No.1	No.2	No.3	평균
중량				
단위체적 중량 (t/m <sup>3</sup> )	1.93	1.89	1.92	1.91

Table 7 Measured tension strength of concrete

공시체명	No.1	No.2	평균
인장강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	32	34	33
탄성계수 (kg/cm <sup>2</sup> )	$2.33 \times 10^5$	$2.33 \times 10^5$	$2.33 \times 10^5$

계 다졌다.

콘크리트 압축강도 시험용 공시체는  $\phi 10 \times 20$ 의 것을 사용하였다. 구조 시험시의 콘크리트 28일 압축강도는 표 4와 같이  $440 \text{ kg/cm}^2$ 이고 철근의 항복강도는 표5와 같다. 사용된 경량골재의 단위체적 중량은  $1.91 \text{ t/m}^3$ 이고, 공시체의 쪼갬인장강도는  $33 \text{ kg/cm}^2$ 로 압축강도의  $1/3$  정도이다. 탄성계수( $E_c$ )는  $2.28 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 이다.(표 6.7 참조)

#### 2.4 실험장치 및 실험방법

각 시험체들은 그림 2와 같이 가력장치를 사용하여 시험체에 2점 가력하였다. 시험체에는 H-150×150×7×10의 형강을 가력보로 설치하고 가력보 아래 콘크리트 재하면에는 강재 플레이트를 설치하여 콘크리트의 지압파괴를 방지하였다.

부재의 변형을 측정하기 위하여 그림2와 같이 변위계와 스트레인게이지를 설치하였다. 철근 스트레인게이지는 인장철근 중앙부에 2개 및 전단보강철근에 5개를 붙여 콘크리트를 타설하였고, 콘크리트 스트레인게이지는 시험체 중앙부 상·하단에 각각 1개씩 부착하였다.

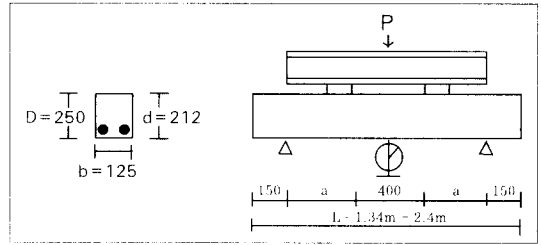
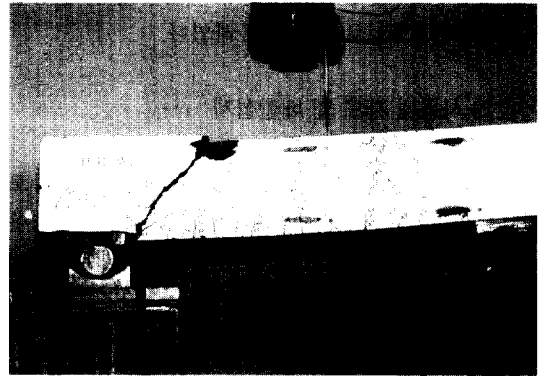
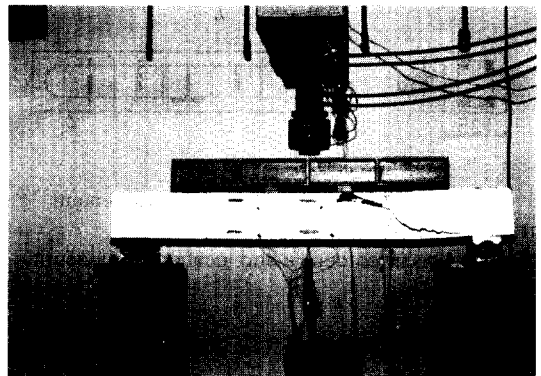


Fig. 2 Support and loading details for test beams



(a) HB1-WS beam



(b) HB3-NS beam

Photo 1 Crack development of test beams

재하방법은 예상중국파괴하중의 1/3까지는 일정하게 하중을 증가시키는 하중조절방식(Load Control), 그리고 이후부터는 시험체 중앙부에 설치된 다이얼게이지의 처짐을 관찰하면서 변위조절

방식(Deflection Control)에 의해 가력하였다. 각각의 재하하중 단계마다 처짐 및 변형도를 측정하고 균열폭을 관찰하면서 직접 보면에 균열된 전 과정을 그리며 발생균열 끝에 하중값을 기록하였다. (사진 1)

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 시험체의 균열 및 파괴 양상

수직하중에 의해 일어나는 시험체의 균열발생위치와 그 전파 양상은 그림 3과 같다.

시험체에 하중을 가하면 초기 휨균열이 휨영역에서 발생한다. HB1(a/d=1.5)과 HB2 시험체(a/d=2.5)는 2.5t~3.5t에서, HB3 시험체(a/d=3.5)는 2.0t~2.5t에서, 그리고 HB4 시험체(a/d=3.5)는 1.5t에서 초기 휨 균열이 발생하였다. 전단보강을 하지 않은 시험체는 파괴하중의 약 30%에서, 전단보강을 한 시험체는 파괴하중의 약 20%에서 초기 수직균열이 발생하였다.

하중을 증가시키면 사인장 균열이 전단영역에서 발생하였다. 전단보강을 하지 않은 시험체는 파괴하중의 약 40%에서, 전단보강을 한 시험체는 파괴하중의 약 30%에서 전단균열이 발생하였다.

하중을 계속 증가시키면 전단보강을 하지 않은 시험체에서는 전단영역에 생긴 사인장 균열이 하부 지지점 부근으로 확대되고 또한 하중점을 향해 전파된다. 파괴 하중에 거의 이르려면 균열폭이 증대되면서 a/d=1.5인 HB1-NS 시험체는 전단균열에

의한 전단압축 파괴를 일으키고, a/d= 2.5, 3.5, 4.5인 HB2-NS, HB3-NS, HB4-NS 시험체는 사인장균열에 의한 전단파괴를 일으키는데 전단균열의 형성이후 빠른 전달에 의해 급속도로 파괴되었다. 전단보강한 시험체에서도 파괴 하중에 거의 이르려면 균열폭이 커지면서 파괴되는데, a/d= 1.5인 HB1-WS 시험체는 전단균열에 의한 전단압축 파괴를 일으키고, a/d= 2.5인 HB2-WS 시험체는 휨균열 및 가력부압축에 의하여 파괴되었으나 시험체의 사인장 균열도 상당히 진전되었다. a/d= 3.5, 4.5인 HB3-WS, HB4-WS 시험체는 휨균열 및 가력부압축에 의해 파괴되었다.

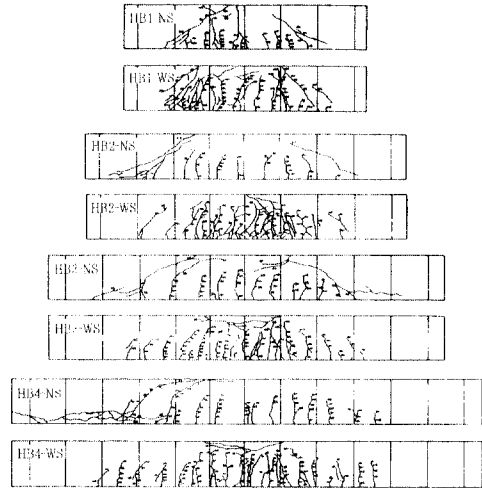


Fig. 3 Cracking patterns at failure

Table 8 Comparison of shear strength

Specimen	ACI (11-3)	ACI (11-6)	ZSutty (V <sub>cr</sub> )	Zsutty (V <sub>u</sub> )	EXP. V <sub>cr</sub>	EXP. V <sub>u</sub>	P <sub>u</sub>	Exp. V <sub>u</sub> /Exp. V <sub>cr</sub>	EXP. V <sub>cr</sub> /ACI(11-3)	EXP. V <sub>cr</sub> /ACI(11-6)	EXP V <sub>cr</sub> /Zsutty(V <sub>cr</sub> )	EXP. V <sub>u</sub> /Zsutty(V <sub>u</sub> )
	t	t	t	t	t	t	t					
HB1-NS	2.50	2.85	6.18	6.64	4.50	9.75	19.5	2.16	1.80	1.58	0.72	1.46
HB2-NS	2.50	2.66	3.13	3.36	3.00	3.65	7.3	1.22	1.20	1.13	0.96	1.09
HB3-NS	2.50	2.58	2.80	3.01	3.00	3.35	6.7	1.12	1.20	1.16	1.07	1.11
HB4-NS	2.50	2.54	2.57	2.76	2.25	2.65	5.3	1.18	0.90	0.89	0.87	0.96
HB1-WS	2.50	2.85	6.18	26.7	4.75	11.8	23.6	2.48	1.90	1.67	0.77	0.44
HB2-WS	2.50	2.66	3.13	15.4	4.50	7.15	14.3	1.59	1.80	1.69	1.44	0.46
HB3-WS	2.50	2.58	2.80	15.04	3.50	5.40	10.8	1.54	1.40	1.36	1.25	0.36
HW4-WS	2.50	2.54	2.57	14.8	3.25	3.50	7.0	1.08	1.30	1.28	1.26	0.24

V<sub>cr</sub> : Shear strength at diagonal crack

V<sub>u</sub> : Shear strength at ultimate failure

### 3.2 전단강도

ACI 규준식 및 Zsutty 제안식과 실험값을 비교한 것이 표8에 나타나 있다. 규준식 및 제안식은 시험체가 경량콘크리트이므로 0.85를 곱하였다.(보통  $\lambda=1.0$ , 경량  $\lambda=0.85$ )

(1) ACI 규준식

① ACI(11-3)

$$V_{cr} = 0.53\lambda\sqrt{f'_c}b_wd \quad (kg) \quad (1)$$

② ACI(11-6)

$$V_{cr} = (0.5\lambda\sqrt{f'_c} + 176\rho_w \frac{V_u d}{M_u})b_wd \quad (kg) \quad (2)$$

(2) Zsutty 제안식

①  $a/d \geq 2.5$

$$V_{cr} = 10.02\lambda(f'_c \rho_w \frac{d}{a})^{\frac{1}{3}}b_wd \quad (kg) \quad (3a)$$

$$V_u = 10.77\lambda(f'_c \rho_w \frac{d}{a})^{\frac{1}{3}}b_wd \quad (kg) \quad (3b)$$

$$V_u = [10.77\lambda(f'_c \rho_w \frac{d}{a})^{\frac{1}{3}} + \rho_s f_y]b_wd \quad (kg) \quad (3c)$$

②  $a/d < 2.5$

$$V_{cr} = (2.5\frac{d}{a}) \times [eq.(3)] \quad (4a)$$

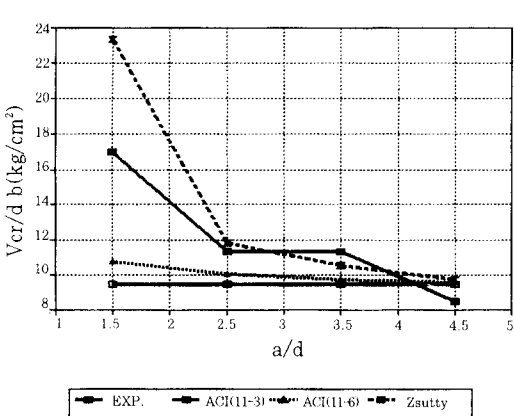
$$V_u = (2.5\frac{d}{a}) \times [eq.(3)] \quad (4b)$$

앞 식에서 식(3b)는 전단보강하지 않은 시험체의 극한전단강도를 나타내고 식(3c)는 전단보강한 시험체의 극한전단강도를 나타낸다.

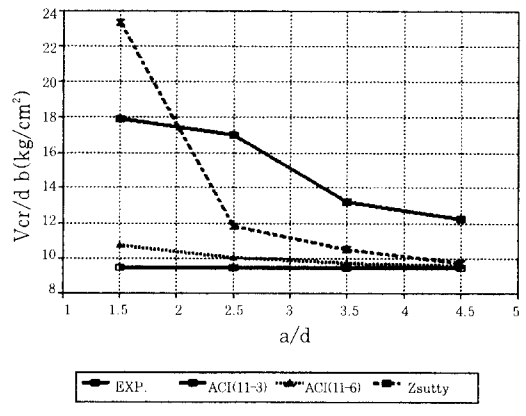
#### 3.2.1 전단 스패비의 영향

전단스패비( $a/d$ )에 따른 전단강도를 ACI 규준식 및 Zsutty 식과 비교한 것이 그림 4, 그림 5에 나타나 있다.

그림 4에서 보면 전단보강( $\rho_s=1.136\%$ )을 한 보에서는, ACI 규준식은 모든 전단스패비에 대해 안전측이었으며 전단스패비가 감소함에 따라 안전율이 점차 증가하여 전단스패비가 1.5인 경우에는 안전율이 1.9로 나타났다. Zsutty 식은 전단스패비가 2.5, 3.5, 4.5인 시험체에서는 각기 1.44, 1.25, 1.26의 안전율을 보였으나 전단스패비가 1.5인 시험체에서는 0.77로 과대평가가 되고 있다. 전단보강을 하지 않은 보에서도 ACI 규준식은 전단스패비가 4.5인 시험체를 제외하고는 실험값이 높게 나타났다. 즉 ACI 규준식은 전단보강을 하지 않은 보에서도 대체로 안전측이며 전단스패비가 4.5인 보에



(a) without shear reinforcement



(b) with shear reinforcement

Fig. 4 Effect of  $a/d$  on shear strength at cracking

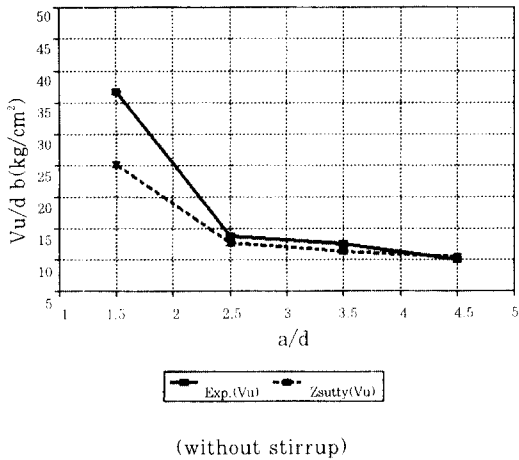


Fig. 5 Effect of  $a/d$  on shear strength at ultimate

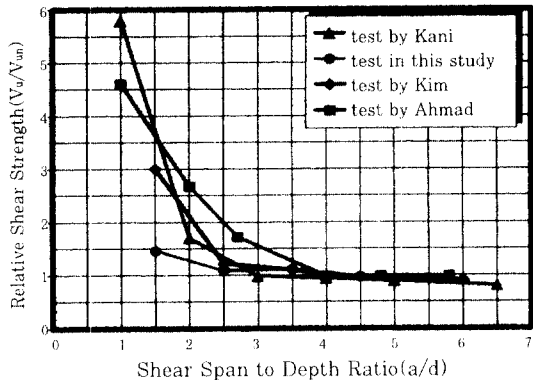


Fig. 6 Effect of  $a/d$  on the relative shear strength (without stirrup)

서는 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. Zsutty 식은 전단스팬비가 1.5인 시험체에서는 전단보강을 한 시험체에서와 같이 과대평가되고 있고, 전단스팬비가 2.5이상인 시험체에서는 대체로 실험값과 근접함을 알 수 있다.

그림 5에서 보면 전단보강을 하지 않은 보에서는 Zsutty 식에 의한 극한전단강도( $V_u$ )는 전단스팬비에 관계없이 안전측임을 알 수 있다.

그림 6은 전단스팬비가 보의 전단강도에 미치는 영향을 알아보기 위해 본 실험결과와 보통골재를 사용한 Kani<sup>(11)</sup>, Ahmad<sup>(4)</sup>, 및 김진근<sup>(21)</sup>의 실험결과를 비교한 것이다. Kani의 실험치는  $\rho=0.026$ .

$d=274\text{mm}$ ,  $f'_c=276\text{kg/cm}^2$ 이고, Ahmad의 실험치는  $\rho=0.023$ ,  $d=208\text{mm}$ ,  $f'_c=684\text{kg/cm}^2$ , 김진근의 실험치는  $\rho=0.019$ ,  $d=270\text{mm}$ ,  $f'_c=548\text{kg/cm}^2$ 이다. 그림에서 보듯이, 전단스팬비가 1.5에서는 1.46의 값을 가지며 전단스팬비가 2.5이상에서는 각기 1.09, 1.11, 0.96의 값을 가지므로 다른 연구자들에 의한 결과와 유사함을 알 수 있다. 즉, 경량콘크리트 보에서도 보통중량콘크리트 보와 같은 전단거동을 하는 것을 알 수 있다. 또한 전단스팬비의 영향은 콘크리트강도와 거의 관계가 없음을 보여준다.

### 3.2.2 전단보강근의 영향

전단스팬비에 따른 전단균열강도 ( $V_{cr}$ ) 및 전단

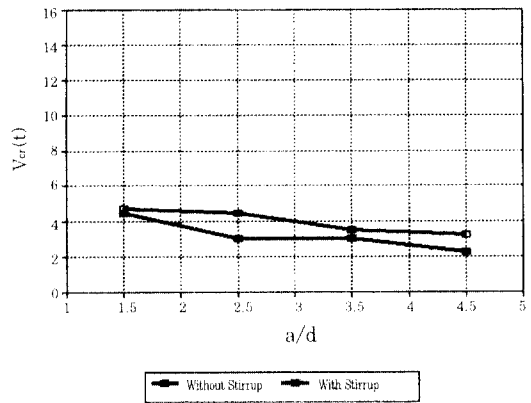


Fig. 7 Comparison of Exp.  $V_{cr}$  for beams with and without stirrups

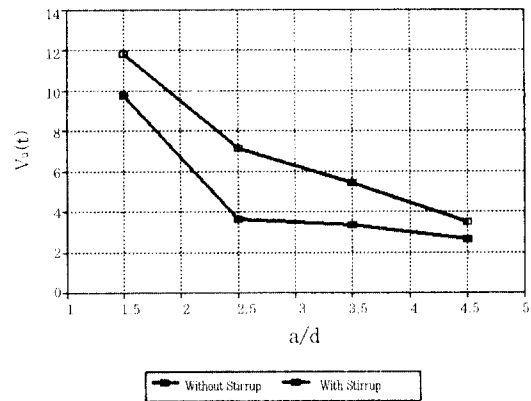


Fig. 8 Effect of shear reinforcement on shear strength at ultimate

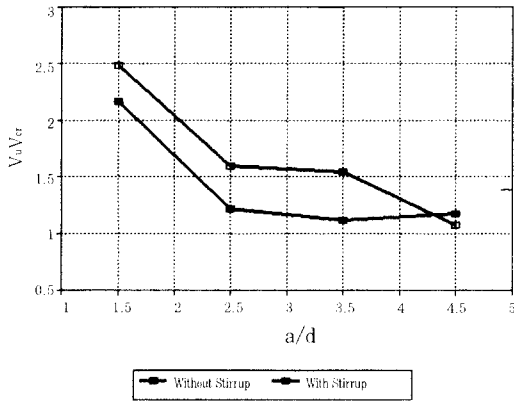


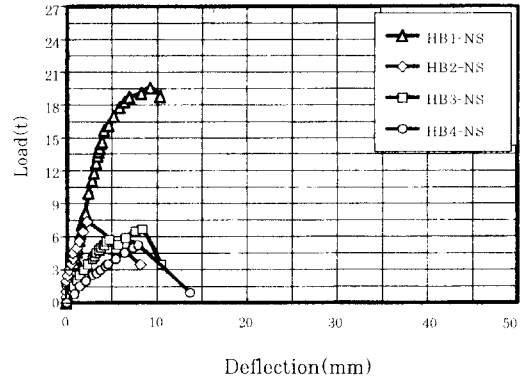
Fig. 9 Exp.  $V_u/Exp. V_{cr}$  versus  $a/d$  for test beams

극한강도 ( $V_u$ )를 비교한 것이 그림 7, 그림 8에 나타나 있다. 또한 전단균열강도에 대한 극한전단강도비( $V_u/V_{cr}$ )를 비교한 것이 그림9에 나타나 있다. 그림 7에서 보듯이 전단균열강도는 전단보강근의 유무에 크게 영향을 받지 않는다. 그러나 극한전단강도는 전단보강을 한 보가 월등히 큰 값을 나타내고 있다. 즉, 초기 사인장 균열에는 전단보강근이 큰 역할을 하지 못하나, 이후에는 상당한 전단내력을 부담하는 것을 알 수 있다. 그림8에서 보듯이 전단보강근에 의한 극한전단강도의 증가는 전단스팬비가 증가함에 따라 각각 21%, 96%, 61%, 32%의 증가를 나타내었다. 이것은 전단보강근이 전단파괴에서 휨파괴로 유도함을 알 수 있다.

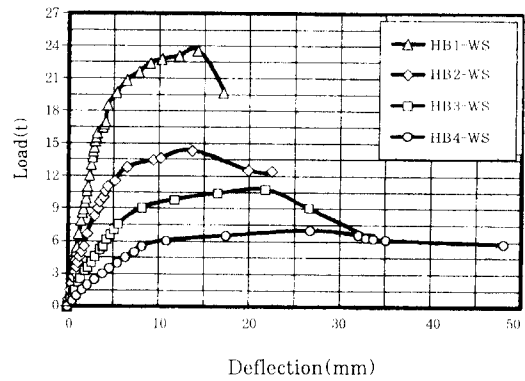
전단보강근이 없는 시험체는 그림 10에서와 같이 사인장균열 이후 어느정도의 보유내력을 보이다가 최대하중 이후에 급격하게 내력이 떨어지고 있으며, 전단보강근이 있는 경우에는 최대내력 이후 거동이 안정적이다. 즉 전단스팬비가 1.5인 시험체를 제외하고는 최대내력 이후에 연성적거동을 보이고 있다.

### 3.3 시험체의 하중변위 곡선

각 시험체의 중앙에서 하중-변위 관계는 그림 10과 같다. 그림과 같이 시험체의 처짐은 전단스팬비, 전단보강 유무에 따라 많은 영향을 받고 있다. 이들의 영향은 초기 탄성범위 내에서는 큰 영향을 주지 못하나 하중이 증가하여 콘크리트에 균열이 발생한



(a) without shear reinforcement



(b) with shear reinforcement

Fig. 10 Load-deflection curve

후에는 점차 증대된다.

전단스팬비가 1.5인 시험체(HB1-NS, HB1-WS)는 다른 시험체에 비하여 처짐이 현저히 작으나, 전단스팬비가 4.5인 시험체(HB4-NS, HB4-WS)는 처짐이 상당히 크다. 따라서 전단스팬비가 4.5 이상이면 내력이 현저히 감소함을 알 수 있다.

전단보강한 시험체에서는 전단보강근이 부담하는 연성능력 때문에 최대하중 이후에도 하향곡선이 급격히 떨어지지 않음을 알 수 있다. 즉, 일정 전단보강비 이상에서는 전단보강근이 전단파괴에서 휨파괴로 유도하여 연성적 거동에 중요한 역할을 담당하고 있음을 알 수 있다.



Table 9 comparison of moment capacity

Specimen	전단스팬비 (a/d)	전단보강비 (%)	인장철근비 (%)	$M_n$ (t.m)	$M_{cr}$ (t.m)	$M_f$ (t.m)	$M_{cr}/M_n$	$M_f/M_n$
HB1-NS	1.5	0	1.5	3.22	1.44	3.12	0.45	0.97
HB1-WS	1.5	1.136	1.5	3.22	1.52	3.78	0.47	1.17
HB2-NS	2.5	0	1.5	3.22	1.59	1.93	0.50	0.60
HB2-WS	2.5	1.136	1.5	3.22	2.39	3.79	0.74	1.18
HB3-NS	3.5	0	1.5	3.22	2.22	2.48	0.69	0.77
HB3-WS	3.5	1.136	1.5	3.22	2.59	3.99	0.80	1.24
HB4-NS	4.5	0	1.5	3.22	2.14	2.52	0.67	0.78
HB4-WS	4.5	1.136	1.5	3.22	3.09	3.33	0.96	1.03

$M_n$  : Nominal moment strength     $M_{cr}$  : Moment at diagonal crack     $M_f$  : Moment at ultimate failure

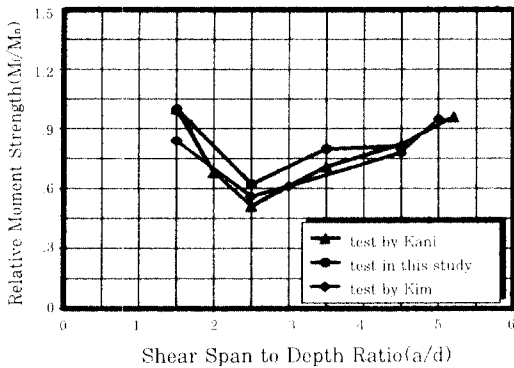


Fig. 11 Effect of a/d on the relative moment strength (without stirrup)

### 3.4 시험체의 휨강도 비교

ACI 규준식에 의한 단면의 공칭휨강도( $M_n$ )와 실험에서 측정된 극한파괴시의 휨강도( $M_f$ )를 비교 분석하여 표 9에 나타내었다.

전단보강을 하지 않은 시험체에서는 1.0보다 낮은 값을 나타내고 있으나, 전단보강을 한 경우에는 실험에 의한 휨강도( $M_f$ )가 규준식에 의한 공칭휨강도( $M_n$ ) 보다 17~24% 증대됨을 알 수 있다. 즉, 전단보강한 시험체에서는 전단파괴에서 휨파괴로 바뀌었음을 알 수 있다.

그림 11은 전단스팬비가 보의 휨강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 본 실험결과와 보통골재를 사용한 Kani<sup>[12]</sup> 및 김진근<sup>[21]</sup>의 실험결과를 비교한 것이다. Kani의 실험치는  $\rho=0.018$ ,  $d=272\text{mm}$ ,  $fc'=267\text{kg/cm}^2$ 이고, 김진근의 실험치는  $\rho=0.019$ ,  $d=270\text{mm}$ ,  $fc'=548\text{kg/cm}^2$ 이다. 그림에서 보듯이, 전단스팬비에 따라 각기 0.97, 0.6, 0.77, 0.78의

값을 가지며 전단스팬비 2.5에서 최소값 0.6을 나타내므로 보통중량콘크리트보에서와 같이 전단계곡(Shear valley) 형태를 보여주고 있음을 알 수 있다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 경량고강도콘크리트보의 전단성능을 규명하기 위해 전단스팬비(a/d)와 전단보강철근( $\rho_s$ )을 변수로 하여 전단 실험을 하였다. 얻어진 실험결과는 ACI 규준식 및 Zsutty 제안식과 비교 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) ACI 규준식은 전단스팬비에 따른 전단강도를 과소평가하고 있는 것으로 나타났으며, Zsutty 식은 전단스팬비(a/d)가 1.5인 보를 제외하고는 실험값과 근접함을 알 수 있었다.

(2) 전단스팬비가 4.5인 보에서는 ACI 규준식 및 Zsutty 식은 과대평가되고 있는 것으로 나타났다.

(3) 전단보강을 한 시험체는 전단보강을 하지 않은 시험체에 비해 많은 균열을 일으킨 후에 파괴된 것으로 보아 보통콘크리트보와 마찬가지로 전단보강근이 내력에 상당한 효과를 발휘한 것으로 생각된다.

(4) 전단보강을 하지 않은 시험체에서는 전단스팬비가 1.5인 시험체는 전단균열에 의한 전단압축파괴를 일으켰고 전단스팬비가 2.5, 3.5, 4.5인 시험체는 사인장 균열에 의한 전단파괴를 나타내었다. 그러나 전단보강한 시험체는 대부분 휨파괴를 나타내었다.

(5) ACI 전단설계규준식은 경량고강도콘크리트

보의 전단강도에 대한 설계식으로 적용될 수 있고 보통중량콘크리트 보에 대한 Zsutty 제안식도 ACI 규준식과 같이 0.85계수( $\lambda=0.85$ )를 곱하면 경량 고강도 콘크리트 보에 대한 설계식으로 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89)", American Concrete Institute, Detroit, 1989.
2. ACI Committe 363 "State-of-the- Art Report on High-Strength Concrete" ACI Journal, Proceedings V. No.4, July-Aug. 1984, pp. 364-412.
3. Ahmad, S. H. and Shah, S. P., "Structural Properties of High Strength Concrete and Its Implications for Precast Concrete", PCI Journal, V. 30, No. 6, Nov.-Dec 1985, pp. 92-119.
4. Ahmad, S. H., and Shah, S. P., "Structural Properties of High Strength Concrete and Its Implications for Precast Prestressed Concrete-Author's Closure", PCI Journal, V. 32, No. 1, Jan.-Feb. 1987, pp. 130-132.
5. Ahmad, S. H., "Shear Capacity of Reinforced Lightweight High Strength Concrete Beams", ACI Journal, V.86, No.6, Nov-Dec.1989, pp. 697-704
6. Ahmad, S. H., and Barker Roy, "Flexural Behavior of Reinforced High Strength Lightweight Concrete Beams", ACI Journal, V. 88, No. 1, Jan- Feb. 1991, pp. 69-77.
7. Ahmad, S. H., "Flexural Behavior of Doubly Reinforced High - Strength Lightweight Concrete Beams with Web Reinforcement", ACI Journal, V. 88, No. 3, May-June, 1991, pp. 351-358.
8. Andrew, G. M. and Gregory, C. F., "Shear Test of High and Low Strength Concrete Beams without Stirrup, ACI Journal, July-Aug., 1984.
9. Carrasquillo, R. L., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Properties of High Strength Concrete Subject to Short- Term Loads", ACI Journal, Proceed- ings V. 78, No. 3, May-june 1981, pp. 171-178.
10. Kaar, P. H., Hanson, N. W., and Capell, H. T., "Stress-Strain Characteristics of High-Strength Concrete", Douglas McHenry International Symposium in Concrete and Concrete Structures, SP-55, American Concrete institute, Detroit, 1978, pp. 161-185.
11. Kani, G.N.J., "How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams?", ACI Journal, Proceedings V. 64, No.3, Mar. 1967, pp.128-141.
12. Kani, G.N.J., "Basic Facts Concerning Shear Failure." ACI Journal, Proceedings V. 63, No.6, Mar. 1966, pp.675-692.
13. Pastor, J. A., Nilson, A. H., and Slata, F. O., "Behavior of High Strength Concrete Beams", Report No. 84-3, Structural Engineering Depart- ment, Cornell University, Ithaca, Feb. 1984, 311.
14. State, F. O., Nilson, A. H., and Martinez, Salvador, "Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete", ACI Journal, Proceedings V. 83, No. 4, July-Aug. 1986, pp. 606-613.
15. Shah, S.P., Editor, Proceedings, National Science Foundation Workshop in High Strength Concrete, Univ ersity of Illinois at Chicago Circle, Dec. 1979, 226.
16. Wang, P. T., Shah, S. P., and Naaman, A. E., "High Strength Concrete in Ultimate Strength Design", Proceedings, ASCE, V. 104, ST11, Nov. 1978, pp. 1761-1773.
17. Wang, P. T., Shah, S. P., and Naaman, A. E., "Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression", ACI Journal Proceedings V. 75, No.11, Nov. 1978, pp. 603-613
18. Zsutty, T. C., "Beam Shear Strength Prediction By Analysis of Existing Data", ACI Journal, V. 65, No. 11, Nov. 1968, pp. 942-951.
19. 고평일, 김 우, "고강도 철근콘크리트보의 전단강

- 도에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제9권 제4호, 1989년 12월, pp.63-71.
20. 김진근, 김상식, 신성우, “고강도, 유동화및 섬유 콘크리트의 개발과 역학적 특성에 관한 연구 (Ⅱ)”, 과학기술처 특성과제 제2차년도 연구보고서, 1989, 5.
  21. 김진근, 박연동, “스터럽이 없는 고강도 철근 콘크리트 보의 전단강도 특성에 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회논문집, 제5권 제1호, 1993년 3월, pp.103-113
  22. 김진수, 박성무, “고강도 경량콘크리트 보의 전단 성능에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집 제10권 제5호, 1994년 5월, pp.149 ~ 158.
  23. 김홍열, 류택동, 서치호, “중공경량 골재 콘크리트의 특성에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 제11권 제5호, 1995년 5월, pp.209-215.
  24. 박정국, 서수연, 박성무, 이리형 “경량콘크리트 보의 전단강도에 관한 연구”, 대한건축학회논문집 제8권 제10호, 1992년 10월, pp.155 -161.
  25. 신성우, 이광수, 권영호, 오정근, “전단보강이 없는 고강도 철근 콘크리트 보의 전단역학적 거동에 관한 연구”, 콘크리트학회논문집, 제1권 제1호, 1989년 9월, pp.67-74.
  26. 신성우 외 5인, “전단 스패비가 작은 고강도 철근 콘크리트보의 전단성능에 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회논문집, 제4권 제4호, 1992년 12월, pp.171-179.
  27. 임유목 : 팽창점토를 이용한 경량콘크리트의 고강도화를 위한 실험적 연구, 건국대학교 대학원 석사학위논문, 1992. 2.
  28. 정현수와 2인 “고강도 철근콘크리트보의 전단전달 메카니즘에 관한 연구”, 1988년 추계 학술발표대회논문집, 대한건축학회, 1988년 10월, pp.543-546.

(접수일자 : 1996. 4. 4)