

## 산업부산물을 활용한 고강도 경량 콘크리트 보의 전단강도에 대한 실험 연구

이승조<sup>1)\*</sup> · 박정민<sup>2)</sup> · 김화중<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>퍼듀대학교 토목공학과, <sup>2)</sup>경북전문대학 건축과, <sup>3)</sup>경북대학교 건축학부

### Experimental Studies on Shear Strength of High-Strength Lightweight Concrete Beam using the Industrial by-products

Seung-Jo Lee<sup>1)\*</sup>, Jung-Min Park<sup>2)</sup>, and Wha-Jung Kim<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Purdue University, USA

<sup>2)</sup>Dept. of Architectural Interior Engineering, Kyungpook College, Younju 750-712, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

**ABSTRACT** Twelve beams made of lightweight high-strength concrete were tested to determine their diagonal cracking and ultimate shear capacities. A total of 12 beams without(4 beams) and with lightweight(8 beams) were tested in a stiff testing facility, and complete load-midspan deflection curves, including the maximum capacities portion, were obtained. The variables in the test program were concrete strength, which varied 35.4 MPa, 65.3 MPa; shear span-depth ratios  $a/d = 1.5, 2.5, 3.5, 4.5$ ; and tensile steel ratio between 0.57 and 2.3 percent. Also, we divided beam by diagonal tension crack and ultimate shearing strength to propose an equation. In addition, it analyzed comparison mutually applying existing proposal and guide.  $V_{cr}$  was as result that AIK recommendations and Zsutty proposal decrease more than  $a/d = 2.5$ , increased some in Mathey's proposal equation.  $V_{cr,exp}/V_{cr,cal}$  showed tendency of overestimation according to increase of tensile steel ratio and compressive strength of concrete. On the other hand,  $V_{cr,exp}/V_{cr,cal}$  is superior in conformability with an experiment result Zsutty's proposal among other equations. The proposal equation knew that expect  $V_{cr}/V_u$  rationally about shearing strength. Therefore, shear strength an equation is considered to be utilized usefully evaluating capacity by change of the shear span depth ratio of lightweight concrete, tensile steel ratio, and compressive strength of the concrete in this research.

**Keywords** lightweight concrete, shear span depth ratio, shear strength, tensile steel ratio

### 1. 서 론

근대과학의 진보와 경제발전에 따라 최근의 콘크리트 구조물은 점차 고층화, 대형화되어 구조부재의 단면과 구조체의 자중이 커지는 문제를 발생시키고 있다. 이러한 문제의 해결을 위하여 콘크리트의 고강도·경량화에 대한 연구의 필요성이 크게 대두되고 있다. 선진국의 경우는 이미 혼화재료의 적절한 사용, 구조용 경량 골재의 개발 및 활용 등을 통한 지속적인 연구 결과 경량 콘크리트의 강도를 구조용으로 사용하기에 충분할 만큼 증진시킬 수 있음을 확인한 바 있다<sup>1,4)</sup>. 구조실험을 통한 경량 콘크리트 보의 전단거동에 대한 논문은 1958년 압축강도 56.7 MPa를 가진 경량 콘크리트 보의 전단 강도에 대한 연구 결과<sup>3)</sup>를 시작으로 다수의 연구 결과들을 찾을 수 있다.

특히, 전단강도를 평가하기 위하여 21~83 MPa 범위의

압축강도 콘크리트 보를 대상으로 무보강 및 전단보강 콘크리트 보를 상호 비교·분석하여 전단강도를 평가하였다<sup>2)</sup>. 그리고, 고강도 경량 콘크리트 보에 대하여 ACI Code<sup>5)</sup> 규준식 (11-3), (11-6)을 이용하여 사인장 균열과 극한전단내력 결정을 하기 위한 실험을 실시하였다. 이 실험에서는 전단력에 대한 콘크리트의 기여도와 고강도 콘크리트, 철근비 및 전단스팬비의 영향에 대하여 분석하였다<sup>4)</sup>. 또한, 보통 콘크리트와 고강도 콘크리트를 대상으로 전단스팬비( $a/d$ ), 전단보강유무를 바탕으로 전단 연성에 대한 연구를 실험으로 분석한 연구 성과가 있다<sup>1)</sup>. 이밖에도 국외 여러 연구자들에 의해 경량콘크리트의 전단거동 및 내력에 대한 연구 결과가 다수 있으며, 현재 이것에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다.

국내에서는 비구조용으로만 사용되던 경량 콘크리트에 대하여 구조용으로서의 필요성 인식을 바탕으로 콘크리트의 경량화와 경량 골재에 대한 연구성과가 보고되고 있다<sup>6,8)</sup>. 특히, 전단거동에 대한 특성을 구명하고자 한 연구와<sup>9,11)</sup> 전단보강비율에 따라 고강도 경량 RC보에서 전단

\*Corresponding author E-mail : Lsj3948@gmail.com  
Received January 27, 2006, Accepted September 12, 2006  
©2006 by Korea Concrete Institute

보강근의 효과는 보통 중량 콘크리트에 비해 낮다고 발표된 논문이<sup>12)</sup> 있다. 또한, 기존 전단강도식에 콘크리트의 압축강도와 쪼갬인장강도를 주요 변수로 선정하여 새로운 전단강도식을 제안한 연구 결과가 있다<sup>13)</sup>.

따라서 본 연구에서는 산업부산물인 가넷(Garnet) 미분말과 1,100°C에서 고온소성 가공한 인공 경량 골재를 활용한 고강도 경량 콘크리트 보의 역학적 거동을 구명하고, 국외 경량 콘크리트 보의 이론식을 바탕으로 비교·분석 고찰하여 합리적인 전단강도식을 제안하고자 한다.

## 2. 실험 계획

### 2.1 실험체 계획

본 연구에서는 산업부산물을 활용한 고강도 경량 콘크리트 보의 내력 및 변형 특성, 전단강도식 제안을 위한 실험 연구이다. 각각의 실험 변수에 따른 실험체 계획을 Table 1에 표기했으며, 실험체 상세도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험에서는 전단 스패んに 따른 고강도 경량 콘크리트 보의 구조적 특성을 고찰하기 위하여 실험체 전단 스패ん비 4종류( $a/d=1.5, 2.5, 3.5, 4.5$ ), 인장철근비 4종류(0.57%, 1.0%, 1.59%, 2.3%)를 주요 변수로 하여 고강도 경량 콘크리트 보(L) 실험체 8개 및 이것과의 비교를 위하여 일반 골재를 사용한 고강도 콘크리트 보(H) 실험체를 전단스패ん비( $a/d=1.5, 2.5, 3.5, 4.5$ )에 따라 1개씩 제작하여 총 12개의 실험체를 계획하였다.

### 2.2 가력 방법

보 실험체에 대한 가력 방법은 가력 프레임에서 유압

Table 1 Specimen list

Name	Section (mm)		Shear span ratio ( $a/d$ )	Tensile steel		$\rho_w/\rho_b$	Concrete $f_c$	Length (mm)
	$b$	$d$		$\rho_w$	Size			
L15B	150	300	1.5	1.0	3-D13	0.385	35.4 (MPa)	1650
L25B			2.5	1.0	3-D13	0.385		2150
L35B			3.5	1.0	3-D13	0.385		2650
L45B			4.5	1.0	3-D13	0.385		3150
L25A			2.5	0.57	3-D10	0.277		2150
L25B			2.5	1.0	3-D13	0.385		2150
L25C			2.5	1.59	3-D16	0.525		2150
L25D			2.5	2.3	3-D19	0.718		2150
H15B			1.5	1.0	3-D13	0.367	65.3 (MPa)	1650
H25B			2.5	1.0	3-D13	0.367		2150
H35B			3.5	1.0	3-D13	0.367		2650
H45B			4.5	1.0	3-D13	0.367		3150

Notes) L15B [L (lightweight), H (high-strength concrete)], [15 (shear span ratio) : 15 (1.5), 25 (2.5), 35 (3.5), 45 (4.5)], [A (tensile steel ratio) : A (0.57%), B (1.0%), C (1.59%), D (2.3%)]

잭으로 지간의 1/3 지점에 가력용 강재보를 이용하여 4점 재하 하였으며, 보 중앙부 및 실험체 길이의 L/4 지점에 LVDT를 설치하여 처짐을 측정하였다. 또한, 재하 단계별로 각 요소별의 변형을 분포를 측정하기 위하여 압축철근, 인장철근, 스티럽, 콘크리트 중앙면과 압축측 콘크리트면에 변형계이치를 부착하였다. 실험체 가력 방법을 Fig. 2에 나타내었다.

### 2.3 재료의 역학 특성

보 실험체에 사용된 철근에 대해 3개씩의 실험편을 절취하여 인장 실험을 행하였으며, 실험 결과를 Table 2에 나타내었다. 또한, 사용된 콘크리트는 KS F 2404의 규정에 따라  $\phi 100 \times 200$  mm의 공시체에 대해 콘크리트의

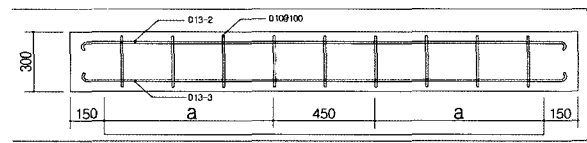


Fig. 1 Details of the specimen (unit : mm)

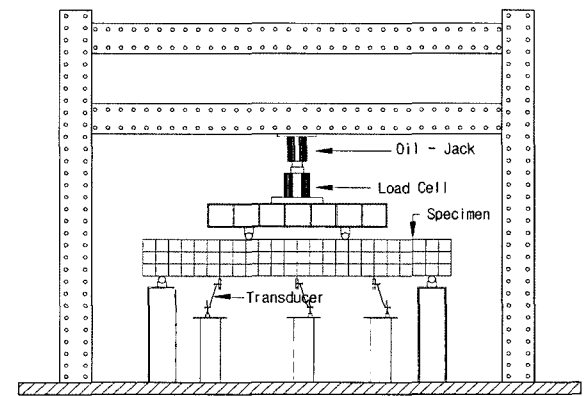


Fig. 2 Test setup

Table 2 Tensile test results of steel

	$f_y$ (MPa)	$f_{max}$ (MPa)	$f_y/f_{max}$	E (MPa)	elo (%)
D10	390.8	541.6	0.722	177,282	20.1
D13	419.7	591.1	0.710	176,988	20.6
D16	406.1	578.0	0.703	180,810	19.8
D19	422.3	593.9	0.711	178,556	19.8

Table 3 Mix proportion & test results of concrete

Sl	Unit weight ( $N/m^3$ )						$f_c$ (MPa)	E (MPa)	$f_t$ (MPa)
	C	Ag	Sa	G	W	A			
L 130	4,704	519	7,232	6,085	1,568	41.7	35.4	38,220	5.7
H 150	4,704	519	6,840	9,212	1,568	52.2	65.3	39,200	7.6

Note) C: Cement, Ag: Agent, Sa: Sand, Sl: Slump (mm), G: Gravel, W: Water, A: Admixture, L: Lightweight, H: High-strength concrete,  $f_c$ : Compressive strength, E: Modulus of elasticity,  $f_t$ : Bending strength

압축강도 실험을 행하였으며, 콘크리트의 배합표와 실험 결과를 Table 3에 나타내었다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 실험 결과와 균열 상황

보 실험체 실험 결과를 Table 4에 나타내었으며, 실험체에 대한 균열상황도를 Fig. 3에 보였다. L15B 실험체는 30.63 kN을 기점으로 실험체 중앙 표면부에 미세 휨균열이 나타나 하중의 증가에 따라 휨 균열이 실험체 단부쪽으로 확산되면서 휨균열이 성장하여 항복하중 이전에 88.73 kN을 전후로 전단균열로 진전되었으며, 항복하중 이후에는 휨균열의 성장은 억제되며 최종적으로 전단균열이 지배적인 파괴양상을 나타내었다. L25B 실험체의 초기균열은 20.75 kN 부근에서 실험체 중앙 표면부에서 발생하였으며, 하중의 증가에 따라 실험체 단부쪽으로 균열이 확산되며 항복하중 이후 곧바로 휨균열이 전단균열로 진전되어 휨과 전단균열이 복합적인 최종 파괴양상을 나타냈다. 또한, L35B 실험체는 18.77 kN을 기점

으로 실험체 중앙부에 휨균열이 발생하여 하중의 증가에 따라 균열이 확장, 확산되어 L25B( $a/d=2.5$ )인 실험체와 마찬가지로 휨과 전단이 복합적인 파괴 양상을 나타냈으며, L45B 실험체는 전하중에 걸쳐서 전단균열은 거의 나타나지 않았으며, 휨균열이 지배적인 파괴양상을 나타내었다.

인장철근비( $\rho_w$ )에 따른 실험체의 파괴성상은 철근비의 크기에 관계없이 하중 초기에는 중앙부에서 미세 휨균열이 발생하였으며, 균열발생 시기의 균열하중은 철근비가 높을수록 약간씩 높게 나타났다. 그 후 하중의 증가에 따라 휨 균열이 확장 확산되었으며, 모든 실험체가 항복하중 이후 전단균열이 나타나, 이후 휨과 전단이 복합적인 파괴양상을 보임을 알았다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 고강도 콘크리트(H)보인 H15B, H25B의 파괴성상은 고강도 경량 콘크리트(L시리즈)보와 유사한 균열 패턴을 보였으며, H35B, H45B 실험체 하중 초기의 균열 양상이 H15B, H25B 실험체와 마찬가지로 하중 초기에 실험체 중앙 콘크리트 표면부에 미세 휨균열이 발생하여 하중의 증가에 따라 휨균열이 실험체 단부 방향으로 확산되는 경향을 보였다. 항복하중 이후에도 휨균열이 지배적인 균열 패턴으로 나타났

Table 4 Test results of high-strength lightweight concrete beam

Name	Initial crack (bending crack)					Diagonal tension crack (shear crack)				
	Load (kN)	Displacement (mm)	Strain ( $\times 10^{-6}$ )			Load (kN)	Displacement (mm)	Strain ( $\times 10^{-6}$ )		
			Stirrup	Tensile steel	Concrete			Stirrup	Tensile steel	Concrete
L15B	30.96	0.86	60	770	820	88.73	3.57	460	2,460	3,030
L25B	20.96	0.58	77	810	790	78.34	4.36	660	2,990	3,220
L35B	18.82	0.62	85	830	760	71.10	4.19	720	3,030	3,350
L45B	18.57	0.53	95	850	730	62.26	4.17	770	3,120	3,320
L25A	18.41	0.51	90	840	760	60.30	3.59	460	2,660	2,990
L25B	20.96	0.58	77	810	790	78.34	4.36	660	2,990	3,220
L25C	24.51	0.76	73	770	820	78.28	3.43	490	2,550	2,730
L25D	25.72	0.86	70	750	850	91.21	3.76	470	3,110	3,290
H15B	34.54	1.66	55	889	990	103.93	6.45	413	2,133	2,020
H25B	28.89	1.52	63	950	810	76.36	4.22	330	3,220	2,100
H35B	26.11	1.19	83	990	770	71.48	4.72	880	3,250	3,300
H45B	19.39	1.11	90	1,030	750	67.53	5.96	890	3,280	3,440

Name	Yield load					Ultimate load				
	Load (kN)	Displacement (mm)	Strain ( $\times 10^{-6}$ )			Load (kN)	Displacement (mm)	Strain ( $\times 10^{-6}$ )		
			Stirrup	Tensile steel	Concrete			Stirrup	Tensile steel	Concrete
L15B	91.79	3.99	580	2,660	3,210	115.05	17.30	790	3,120	3,720
L25B	77.53	4.00	610	2,880	3,050	95.21	16.33	830	3,220	3,580
L35B	70.04	3.80	650	2,820	3,070	90.59	19.12	850	3,320	3,470
L45B	59.73	3.40	690	2,890	2,990	75.66	18.51	880	3,370	3,390
L25A	58.93	2.93	630	2,780	3,110	70.33	15.21	770	3,090	3,660
L25B	77.53	4.00	610	2,880	3,050	95.21	16.33	830	3,220	3,580
L25C	82.77	4.14	580	2,920	2,960	99.47	17.08	870	3,270	3,440
L25D	97.40	4.28	560	2,990	2,910	117.42	17.00	920	3,310	3,410
H15B	111.20	6.97	680	2,880	3,050	165.79	32.27	820	3,220	3,350
H25B	81.52	5.06	640	2,930	3,220	122.99	28.38	880	3,280	3,550
H35B	69.96	4.44	622	3,030	3,320	92.92	30.23	930	3,580	3,780
H45B	65.31	4.78	580	3,090	3,380	82.46	28.35	990	3,660	3,800

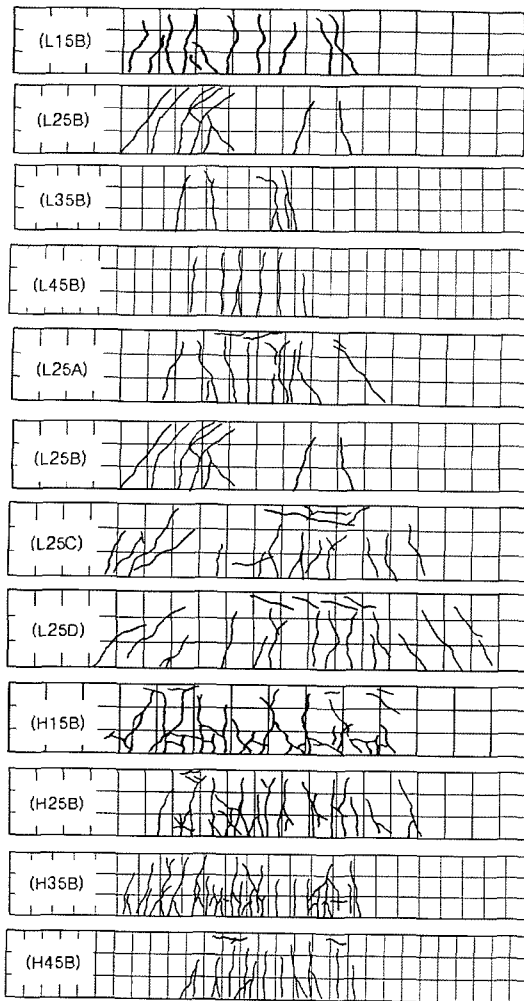


Fig. 3 Failure modes

며, 일부 균열 지점에서 전단 균열이 약간씩 발생되었으나 최종적으로는 휨이 지배적인 균열 양상이 나타났다.

### 3.2 하중-처짐 관계

전체적인 실험체의 거동 양상은 bi-linear적인 거동양상을 나타냈으며, 부재강성은 H시리즈 보에 비해 L시리즈 보가 상대적으로 작게 나타났다. 최대내력 후의 거동은 콘크리트에 따라서는 전반적으로 비슷한 양상을 나타냈으며, 전단스팬비( $a/d$ )에 따라서는  $a/d$ 가 증가할수록 내력저하가 다소 완만하게 일어났다. 한편, 각각의 하중 단계별 중앙부 처짐량은 대체적으로 H시리즈 보가 L시리즈 보에 비해 처짐량이 많으며, 전단균열 발생시점에 있어서의 처짐량도 유사한 양상을 보였다. Fig. 4에 각 실험체의 하중과 중앙부 처짐관계를 나타내었다.

### 3.3 변형률 분포

Fig. 5에 L시리즈 실험체에 대하여 콘크리트, 인장철근 비를 대상으로한 변형률 값을 나타냈으며, H시리즈는 스티럽을 대상으로 대표적인 결과치만을 보였다. L시리즈

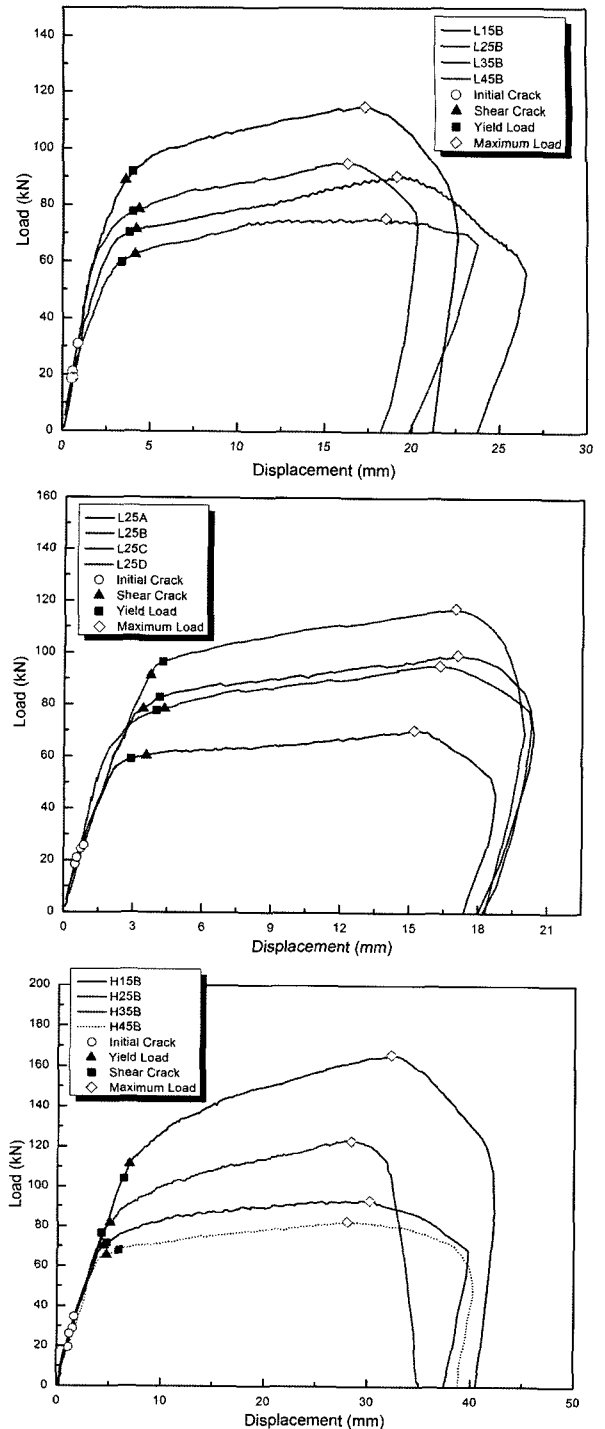


Fig. 4 Load vs. displacement

보의 경우 극한하중에 도달했을 때 보 주철근의 변형률은 0.0030~0.0033의 범위였다. 그리고 콘크리트는 0.0033~0.0037의 범위의 값으로서 보 주철근에 비해 상대적으로 콘크리트의 변형률 값이 크게 나타났다. 하중 단계별 보 주철근과 콘크리트의 변형률 분포양상은 하중 초기에는 보 주철근의 변형률 값이 콘크리트에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 그 이후 하중 증가에 따라 전단균열 및 항복하중에 가까워지면 변형률 값은 콘크리트 부분이 다소 높아지는 경향을 나타내며 극한하중에 가까울수록 그 비율 차이가 급격하게 증가함을 알 수 있었다. H보의 하중단계별 주철근의 변형률 분포는 극한하중시 0.0032~

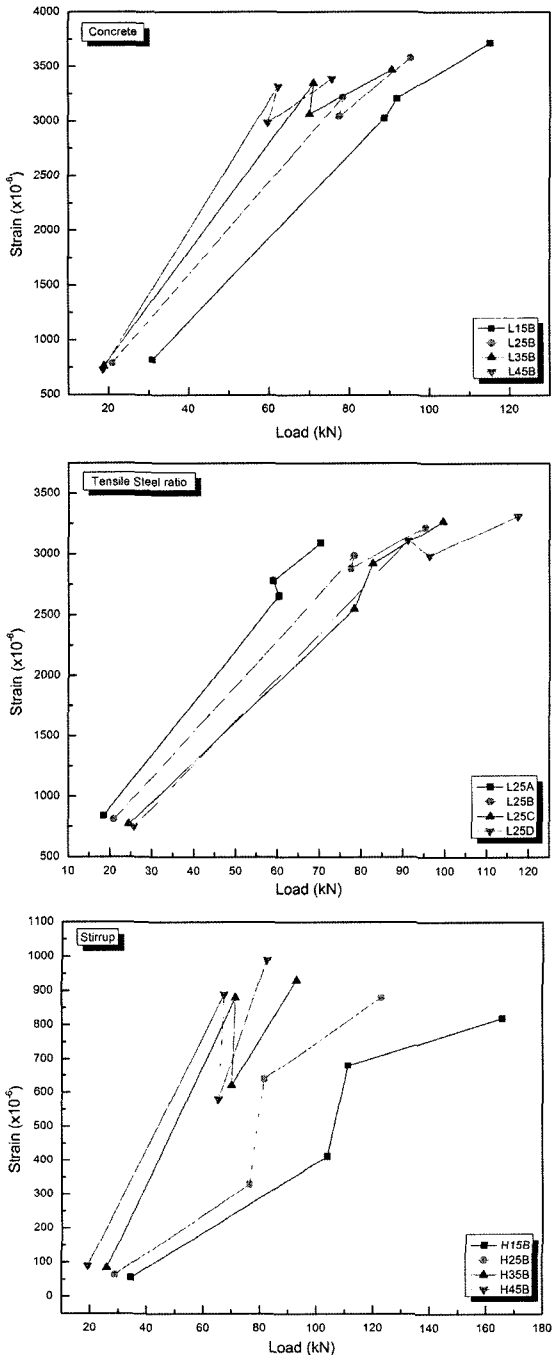


Fig. 5 Strain vs. load

0.0036 정도의 분포를 나타냈다. 그리고, 콘크리트의 변형률 분포는 극한하중시 0.0033~0.0038의 값을 나타내어 콘크리트 부분의 변형률 값이 약간 높게 나타났다. L시리즈 보에 비하여 그 값은 완만하여 거의 비슷한 분포 값을 나타냈다.

#### 4. 설계 조항과 분석

경량 콘크리트 보의 전단파괴에 대해 영향을 미치는 요인은 전단스팬비( $a/b$ ), 인장철근비( $\rho_w$ ), 콘크리트 압축강도( $f_c$ ), 전단보강 유무 등이 있다. 대부분의 기존식들은 보통 콘크리트 보에 대한 전단강도식에 감소계수(BS 8110의 경우 0.8, 대부분 0.85 사용)를 곱한 것으로 제안

되고 있다. 아래에서는 기존에 제시되고 있는 다양한 제안식에 의해 본 고강도 경량 콘크리트 보의 내력을 이론적으로 평가하고 실험치와 상호 비교 분석을 실시하였다. 그리고, 사인장 균열강도( $V_{cr}$ )와 극한전단강도( $V_u$ )에 따른 L실험체 보와 H실험체 보의 실험치와 기준식, 제안식에 대한 계산치를 Table 5에 나타내었다.

#### 4.1 사인장 균열강도 ( $V_{cr}$ )에 대한 기준식 및 제안식

아래에는 대한건축학회(AIK)<sup>14)</sup>의 기준식 및 Zsutty<sup>15)</sup> 제안식, 그리고 Mathey and Wastein<sup>16)</sup>의 제안식을 나타낸 것이다. 여기에서 AIK의 경우 한국콘크리트학회의 콘크리트설계기준(통합 기준 2003)을 설계기준으로 한 것이다. 기준식 및 제안식은 경량 콘크리트로서 기준식에 0.85를 곱한 값이다.

##### 4.1.1 AIK 기준식<sup>14)</sup>

$$V_{cr} = (1/6\sqrt{f_c})b_w d \quad (1)$$

여기서,  $f_c$ : 콘크리트의 압축강도

$b_w$ : 복부의 폭

$d$ : 유효깊이

##### 4.1.2 Zsutty<sup>15)</sup> 제안식 ( $\lambda = 0.85$ )

$$a/d \geq 2.5$$

$$V_{cr} = 10.02\lambda(f_c\rho_w\frac{d}{a})^{1/3} b_w d \quad (2)$$

$$a/d < 2.5$$

$$V_{cr} = (2.5\frac{d}{a}) \times 10.02\lambda(f_c\rho_w\frac{d}{a})^{1/3} b_w d \quad (3)$$

여기서,  $\rho_w$ : 인장 철근비

$a/d$ : 전단스팬비

##### 4.1.3 Mathey and Wastein<sup>16)</sup> 제안식 ( $\lambda = 0.85$ )

$$V_{cr} = (0.816\lambda\sqrt{f_c}\frac{d}{a} + 281\rho_w)b_w d \quad (4)$$

#### 4.2 극한전단강도 ( $V_u$ )에 대한 기준식 및 제안식

극한전단강도에 대한 내력평가는 기존의 Zsutty<sup>15)</sup>의 제안식과 CEB-FIP<sup>17)</sup>, JSCE<sup>18)</sup> 기준식을 이용하여 살펴보기로 한다.

##### 4.2.1 Zsutty<sup>15)</sup> 제안식 ( $\lambda = 0.85$ )

$$a/b \geq 2.5$$

$$V_u = 10.77\lambda(f_c\rho_w\frac{d}{a})^{1/3} b_w d \quad (5)$$

$$a/b < 2.5$$

$$V_u = (2.5\frac{d}{a}) \times [10.77\lambda(f_c\rho_w\frac{d}{a})^{1/3} b_w d] \quad (6)$$

**Table 5** Comparisons of test results and calculated capacities

No.	Calculated capacities						Test results		Proposal equation		Test results / Calculated capacities						Proposal equation	
	$V_{cr, cal}$ (kN)			$V_{u, cal}$ (kN)			$V_{cr, exp}$ (kN)	$V_{u, exp}$ (kN)	$V_{cr, pro}$ (kN)	$V_{u, pro}$ (kN)	$V_{cr, exp} / V_{cr, cal}$			$V_{u, exp} / V_{u, cal}$			$V_{cr, exp} / V_{cr, pro}$	$V_{u, exp} / V_{u, pro}$
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑦/①	⑦/②	⑦/③	⑧/④	⑧/⑤	⑧/⑥	⑦/⑨	⑧/⑩
L15B	31.71	55.33	37.56	55.33	17.94	33.57	88.73	115.0	110.4	142.8	2.798	1.604	2.363	2.079	6.410	3.427	0.834	0.805
L25B	31.71	34.34	27.84	36.91	15.48	33.57	78.36	95.25	68.54	88.69	2.471	2.282	2.814	2.581	6.152	2.838	1.143	1.074
L35B	31.71	31.02	23.25	33.34	13.99	33.57	71.14	90.61	61.92	80.11	2.244	2.294	3.060	2.718	6.476	2.699	1.149	1.131
L45B	31.71	28.67	20.56	30.83	12.93	27.83	62.25	75.69	57.25	74.06	1.963	2.171	3.027	2.455	5.852	2.719	1.087	1.022
L25A	31.71	28.47	23.36	30.60	12.84	33.57	60.27	70.35	56.83	73.51	1.901	2.117	2.580	2.299	5.481	2.096	1.061	0.957
L25B	31.71	34.34	27.84	36.92	15.48	39.19	78.36	95.25	68.54	88.69	2.471	2.282	2.814	2.580	6.152	2.431	1.143	1.074
L25C	31.71	40.08	33.98	43.08	18.07	44.32	78.26	99.50	80.00	103.5	2.468	1.953	2.303	2.310	5.506	2.245	0.979	0.961
L25D	31.71	45.32	41.37	48.72	20.44	41.19	91.20	117.4	90.48	117.2	2.876	2.012	2.204	2.409	5.742	2.850	1.008	1.002
H15B	43.11	67.89	47.32	157.2	22.02	41.19	103.9	165.8	135.5	175.5	2.411	1.531	2.197	1.055	7.528	4.025	0.767	0.945
H25B	43.11	42.13	34.11	97.58	19.00	41.19	76.38	123.0	84.11	108.9	1.772	1.813	2.239	1.261	6.474	2.986	0.908	1.130
H35B	43.11	38.05	27.86	88.13	17.16	41.19	71.44	92.88	75.96	98.29	1.657	1.877	2.564	1.054	5.412	2.255	0.941	0.945
H45B	43.11	35.20	24.22	81.49	15.87	41.19	67.49	82.51	70.25	90.97	1.565	1.917	2.787	1.012	5.199	2.003	0.961	0.907

① AIK ② Zsutty ③ Mathey and Watstein ④ Zsutty ⑤ CEB-FIP ⑥ JSCE

4.2.2 CEB-FIP<sup>17)</sup> 규준식

$$V_c = \left[ 0.15 \sqrt[3]{\frac{3d}{a}} \times \sqrt[3]{100 \rho_w f_c} \times \left( 1 + (d'/200)^{-2} \right) \right] b_w d \quad (7)$$

4.2.3 JSCE<sup>18)</sup> 규준식

$$V_c = 0.9 \left[ \sqrt[3]{100 \rho_w f_c} (d'/100)^{\frac{1}{4}} \right] b_w d \quad (8)$$

4.3 현재의 전단강도 설계에 따른 실험값과의 비교 평가

4.3.1 사인장 균열강도 ( $V_c$ )에 대한 비교(Fig. 6)

1) 전단스팬비에 따른 영향

사인장 균열에 있어서 전단스팬비의 영향으로 인한 사인장균열 강도의 경우  $a/d=2.5$ 를 기준으로 AIK<sup>14)</sup>는 내력이 감소하는 경향을 보였다. 그 경향은 고강도 콘크리트 일수록 급격하게 떨어지는 현상을 파악 할 수 있었다. 또한, 실험체의 길이가 길어짐에 따라서도 비슷한 현상을 나타냈다.

한편, Zsutty<sup>15)</sup>에 따른 내력평가는 고강도 콘크리트의 사용과 실험체 길이가 증가함에 따라  $V_{cr, exp} / V_{cr, cal}$ 의 값은 증가함을 알 수 있었다. 이러한 경향은 경량 콘크리트를 사용한 실험체에 있어서  $a/d=3.5$ 의 범위까지는 비슷한 결과였으나, 그 후  $a/d=4.5$ 에서는 값이 감소하는 결과를 나타냄을 Fig. 6(a)에서 알 수 있다. Mathey<sup>16)</sup>의 제안식의 경우,  $V_{cr, exp} / V_{cr, cal}$ 의 값이 고강도 콘크리트를 사용한 실험체에 대하여 지속적으로 상승하는 경향이었으며, 그러한 현상은 경량 콘크리트의 경우 일 때 더욱 뚜렷한 현상을 보였다.

2) 인장철근비( $\rho_w$ )의 변화에 따른 영향

Fig. 6(b)에서  $V_{cr, exp} / V_{cr, cal}$ 의 AIK<sup>14)</sup>규준에 따른 평가

를 살펴보면, 인장철근비( $\rho_w$ )의 증가에 비례하여 값이 증가하였으며, 사인장균열강도 ( $V_{cr}$ )을 과대평가하고 있다. 특히, L25D실험체에 대하여 L25A는 33.9%, H45B는 45.6%의 내력을 과대평가하는 것을 알 수 있다. 한편, Mathey<sup>16)</sup> 제안식의 경우는 그 반대효과를 나타냈으며, Zsutty<sup>15)</sup>의 제안식은 인장철근비 0.0159까지는 감소하였지만, 그 이후의 경향은  $V_{cr, exp} / V_{cr, cal}$ 의 값이 증가하는 경향을 보였다.

일반적으로 인장철근비( $\rho_w$ )가 작은 경우에는 큰 경우에 비하여 휨 인장 균열이 보의 상부에 더 깊이 나타나며, 따라서, 사인장 균열이 더 쉽게 발생하고 콘크리트의 전단강도가 떨어지게 된다. 즉, L25A~L25D까지의 실험체 있어서 이러한 결과치를 Table 4의 shear crack 부분의 실험값과 AIK<sup>14)</sup> 부분의 결과치에서도 확인 할 수 있다.

3) 콘크리트의 강도에 따른 영향

콘크리트 강도의 상승은  $V_{cr, exp} / V_{cr, cal}$ 의 값을 감소시키는 역할을 하며, 그 경향은 Zsutty<sup>15)</sup>의 제안식을 적용한 경우 더욱 뚜렷한 현상을 보임을 Fig. 6(c)에서 알 수 있다. Mathey<sup>16)</sup>의 제안식은 전반적으로 다른 제안식들에 비하여 과대평가 경향이 현저함을 확인 하였다. 이것은 Mathey<sup>16)</sup>의 제안식이 콘크리트 부분과 철근 부분을 누가 강도로 평가하도록 하는데 이유가 있는 것으로 판단된다. 또한, 이러한 사인장 균열강도 평가로 인하여 다른 제안식이나 규준식보다 계산치에서의 값이 다소 작은 값을 띄게 되도록 영향을 미쳐 실험치와의 비교에서 과대평가됨을 알 수 있다.

4.3.2 극한전단강도 ( $V_u$ )에 대한 비교

1) 전단경간비에 따른 영향

전반적으로 대부분의 제안식에 따른 평가 결과  $a/d$ 와

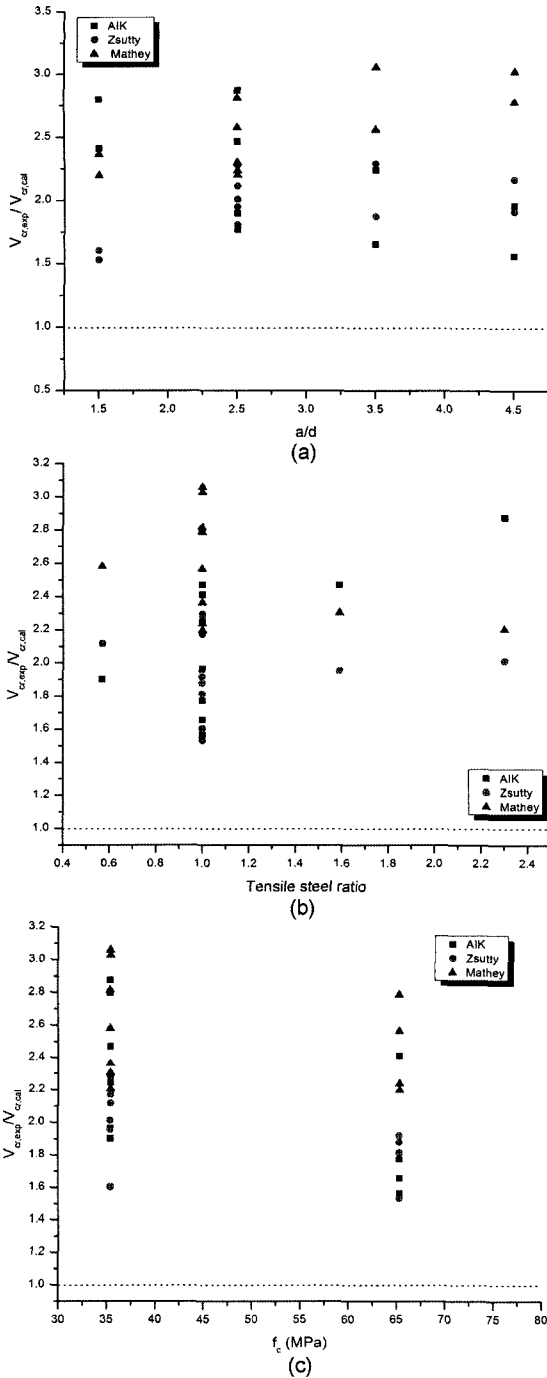


Fig. 6  $V_{er,exp} / V_{cr,cal}$  vs.  $a/d$ , tensile steel ratio and  $f_c$

실험체의 길이가 증가함에 따라  $V_{u,exp} / V_{u,cal}$ 의 값이 낮아지는 현상을 보였다. 먼저, Zsutty<sup>15)</sup>의 제안식에 따른 내력평가 결과  $V_{u,exp} / V_{u,cal}$ 에 대해서는 1에 근접하는 결과를 보여 극한전단강도( $V_u$ )의 내력평가에 좋은 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 기존 연구자들의 논문<sup>10,11,13,14)</sup>에서도 비슷한 결과를 보임을 알 수 있었다. 한편, JSCE<sup>18)</sup>의 표준식은 1에 근접하는 경향을 보이고는 있으나,  $a/d$ 가 2.5 미만인 경우가 그 이상의 경우에 비하여 값이 높게 나타났다. 그러나, CEB-FIP<sup>17)</sup>의 표준식은 다른 표준식에 비하여 내력평가가 높게 나타남을 Fig. 7(a)에서 알 수 있다.

이러한 결과는 Zsutty<sup>15)</sup>는 비교적 간격이 큰 보(slender

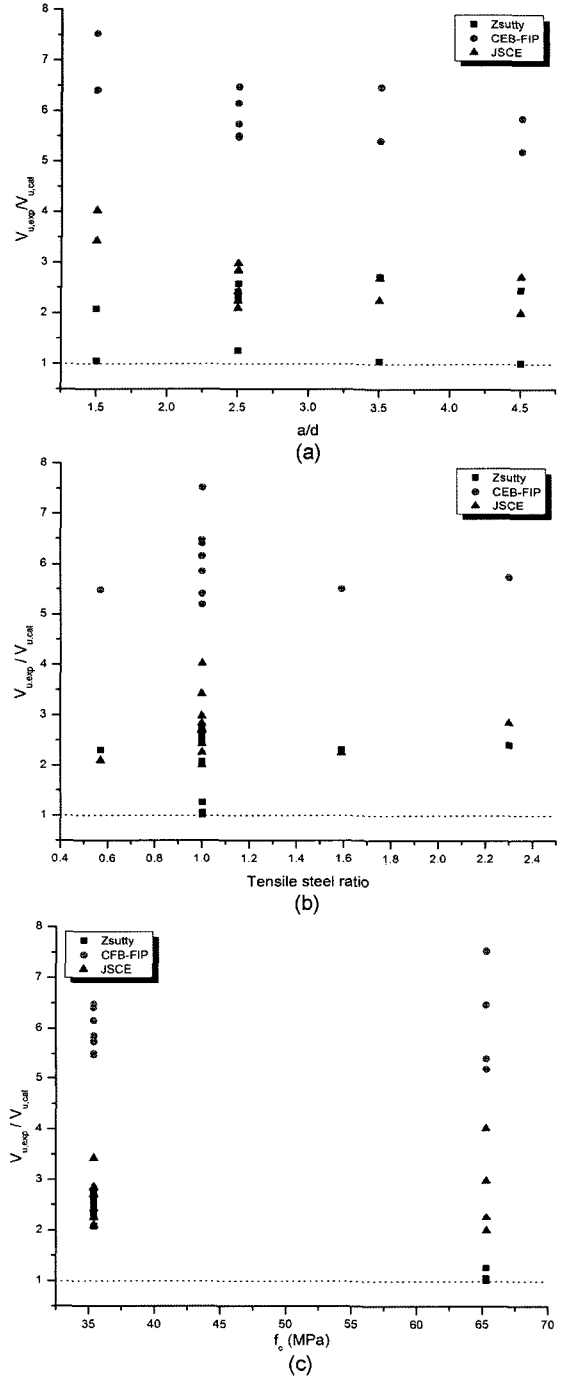


Fig. 7  $V_{u,exp} / V_{u,cal}$  vs.  $a/d$ , tensile steel ratio and  $f_c$

beams:  $a/d \geq 2.5$ )에 적용하는 식과 짧은 보(short beams:  $a/d < 2.5$ ), 이를테면 식 (5)에 확대계수가 곱해져 있다는 점이다. 이것은  $a/d$ 가 2.5 미만인 짧은 보에서 아치작용(arch action)이 현저해짐에 따른 전단강도의 증가를 고려하기 위한 것으로 다른 표준식 보다 보의 전단내력 평가를 더욱 쉽게 접근할 수 있도록 하기 위한 것이다. 따라서, 지금까지의 철근콘크리트 보의 전단강도 예측식 중에서 통계적인 방법으로 유도된 Zsutty<sup>15)</sup>의 식은 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

## 2) 인장철근비의 변화에 따른 영향

Fig. 7(b)에 의하면 인장철근비가 1%일때 Zsutty<sup>15)</sup>의 제

안식은 실험 결과에 가장 가까운 경향을 보임을 알 수 있다. 특히, 이러한 결과는 본 연구자가 인장철근비 1% 일때 9개의 실험체를 제작한 결과 중에서 Zsutty<sup>15)</sup>의 제안식이  $V_{u,exp}/V_{u,cal}$ 의 내력평가에서 가장 좋은 결과를 보였다는 점이다.

그리고, 인장철근비 1.59%일때는 Zsutty<sup>15)</sup>식과 JSCE<sup>18)</sup>식이 거의 일치하는 값을 나타냈으며, 인장철근비 1.0% 일 때를 제외한 평가에서 거의 비슷한 결과를 보였다. 그러나, CEB-FIP<sup>17)</sup>는 인장철근비가 증가함과 동시에  $V_{u,exp}/V_{u,cal}$ 의 값도 증가하는 경향을 보여 과대평가되고 있음을 알 수 있다.

### 3) 콘크리트의 강도에 따른 영향

L 실험체의 보와 H 실험체의 보에 대하여  $V_{u,exp}/V_{u,cal}$

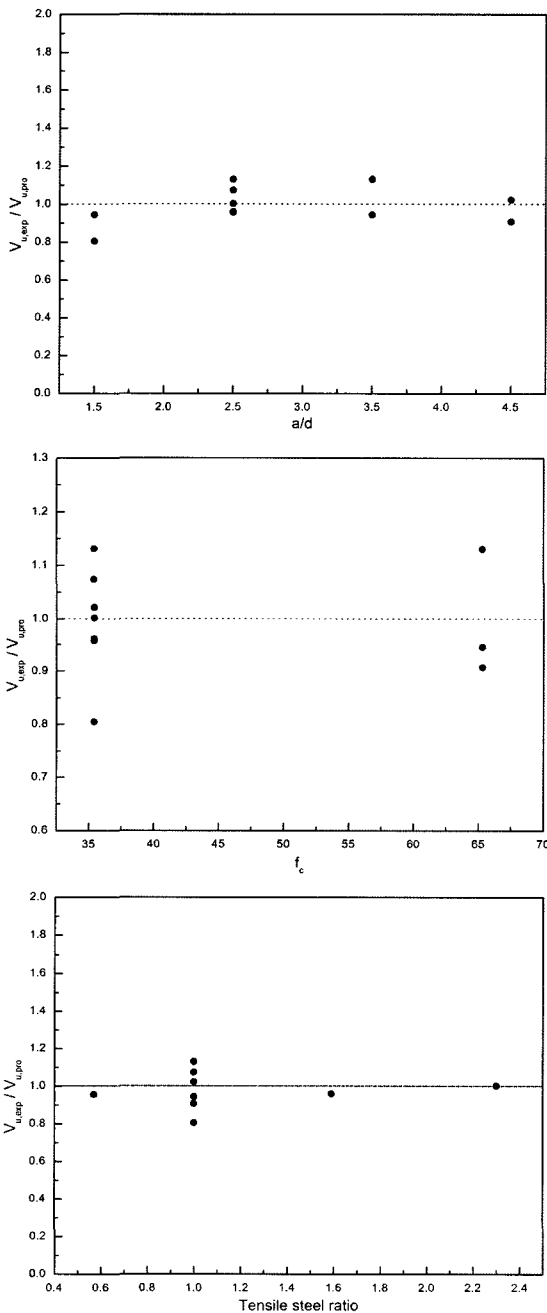


Fig. 8  $V_{u,exp}/V_{u,pro}$  vs.  $a/d$ , tensile steel ratio and  $f_c$

의 평가 결과를 Fig. 7(c)에서 살펴보았다. Zsutty<sup>15)</sup>의 제안식이 실험체의 결과에 가까운 결과를 보였으며, CEB-FIP<sup>17)</sup>는 과대평가 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 이것은 CEB-FIP<sup>17)</sup>규준식이 다른 규준식에 비하여 콘크리트와 인장철근비 부분 값의 증가가 현저하여 과대평가에 많은 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 그리고 고강도 콘크리트( $f_c=65.3$  MPa)를 사용한 경우에서 Zsutty<sup>15)</sup> 결과치는 가장 좋은 결과를 보임을 알 수 있었다.

## 5. 제안식

경량 콘크리트 보의 전단파괴에 대해 영향을 미치는 요인은 전단스팬비( $a/d$ ), 인장철근비( $\rho_w$ ), 콘크리트 압축강도( $f_c$ ), 전단보강 유무 등이 있다.

따라서 위의 변수들과 결과를 잘 반영하여 적용할 수 있고, RC보의 전단강도를 비교적 정확히 예측할 수 있는 Zsutty<sup>15)</sup>의 제안식에 통계적 방법인 회귀분석을 통하여 얻은 상수 값을 적용시켜서 제안하였다. Fig. 8에  $V_{u,exp}/V_{u,pro}$ 와 전단스팬비( $a/d$ ), 인장철근비, 콘크리트의 강도에 따른 회귀분석 결과값을 나타냈다. 그리고 극한 전단강도에 대한 실험값 ( $V_{u,exp}$ )과 제안값( $V_{u,pro}$ )의 통계분석 결과값을 Fig. 9에 보였다.

### 1) 사인장균열강도( $V_{cr}$ )

$$a/d \geq 2.5$$

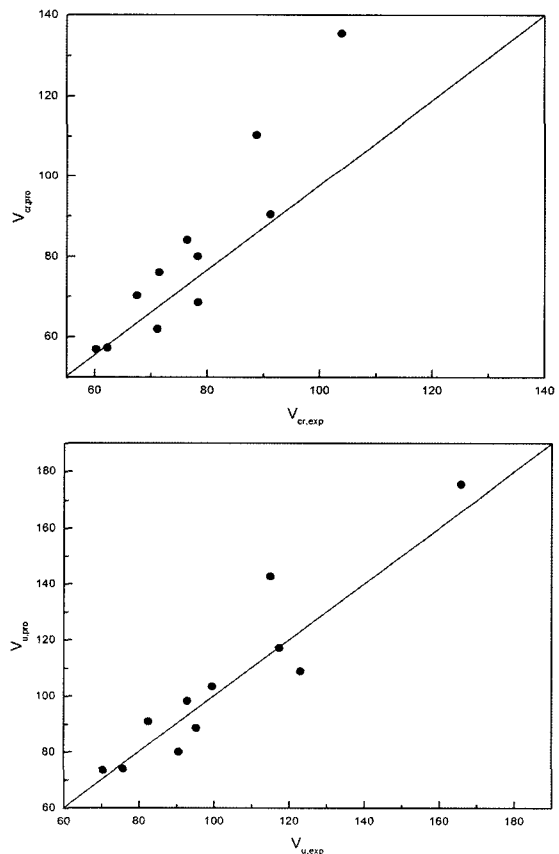


Fig. 9  $V_{u,exp}$  vs.  $V_{u,pro}$



$$V_{cr} = 17 \left( f_c \rho_w \frac{d}{a} \right)^{1/3} b_w d \quad (9)$$

$$a/d < 2.5$$

$$V_{cr} = \left( 2.5 \frac{d}{a} \right) \times 17 \left( f_c \rho_w \frac{d}{a} \right)^{1/3} b_w d \quad (10)$$

2) 극한전단강도( $V_u$ )

$$a/d \geq 2.5$$

$$V_u = 22 \left( f_c \rho_w \frac{d}{a} \right)^{1/3} b_w d \quad (11)$$

$$a/d < 2.5$$

$$V_u = \left( 2.5 \frac{d}{a} \right) \times \left[ 22 \left( f_c \rho_w \frac{d}{a} \right)^{1/3} b_w d \right] \quad (12)$$

## 6. 결 론

본 연구에서는 산업부산물을 활용한 고강도 경량 콘크리트 보의 역학적 거동의 규명과 국외 경량 콘크리트 보의 이론식을 바탕으로 고찰하였다. 이로부터 Zsutty<sup>15)</sup>의 제안식에 기초한 고강도 경량 콘크리트에 합리적으로 적용될 수 있도록 전단강도식을 수정하여 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 부재의 강성은 H시리즈 보 보다는 L시리즈 보가 상대적으로 작은 값을 보였다.  $a/d=1.5$ 인 실험체는 전단파괴가 지배적이며,  $a/d=2.5, 3.5$ 인 실험체는 휨과 전단균열이 상호 복합적이었다.  $a/d=4.5$ 인 실험체는 전체하중에 걸쳐서 전단균열은 거의 보이지 않으며, 휨 균열이 지배적인 파괴양상이다.
- 2) L보의 경우 하중초기에는 보 주철근의 변형을 분담률이 높았으나, 그 후 하중증가에 따라 콘크리트 분담률이 높아져  $V_u$ 에 가까울수록 그 비율 차이가 급격하게 증가함을 알 수 있다. H보는 콘크리트 분담률이 약간 높았지만 L보에 비하여 그 비율은 완만하여 거의 비슷한 분담률이다. 이것은 H보가 L보에 비교하여 실험체의 강성효과와 고강도 콘크리트의 효과로 인한 것으로 판단된다.
- 3) 사인장균열강도 ( $V_{cr}$ )와 극한전단강도 ( $V_u$ )에 대한 비교 고찰 결과 기존의 규준식이나 제안식 중에서 통계적인 분석으로 유도한 Zsutty의 제안식이 주요 변수인  $a/d, \rho, f_c$ 를 우수하게 반영하여 1에 가장 가까운 근사치를 보였다. 이것은 보를  $a/d$ 의 변화에 따라 짧은 보와 비교적 간격이 큰 보로 나누어 전단강도 예측식을 제안하였고, 더욱 쉽게 접근하여 평가할 수 있도록 하였기 때문이다.
- 4)  $V_{u,exp}/V_{u,cal}$ 에 대하여  $a/d(1.5\sim 4.5)$ , 인장철근비 1%, 그리고  $f_c=65.3$  MPa 일 때 Zsutty의 식에서 내력 평가치가 1에 가장 근접하여 안전측으로 평가되는 결과를 보였다.
- 5) 기존의  $V_{cr}, V_u$  규준식과 제안 식은  $a/d, \rho, f_c$ 의 변

수 조건에서 그 값을 과대평가하고 있다. 특히, Mathey의 제안식과 CEB-FIP 규준식이 과대평가되는 것은 콘크리트부분과 인장철근비 값의 증가가 과대평가 경향에 많은 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. 그러므로 본 연구자는 다양한 비교 분석에서 좋은 결과를 보인 Zsutty의 제안식을 근거로 전단강도식을 제안하였다. 제안식을 실험 결과와 비교 분석하여 본 결과 회귀분석을 통하여 얻은 상수 값을 통해 제시된 전단강도식은 다변수 조건의 함수를 보다 합리적으로 예측 함을 알 수 있다.

## 참고문헌

1. Ahamd, S. H. and Xie, Y. & Yu, T., "Shear Ductility of Reinforced Concrete Beams of Normal Strength and High Strength Concrete", *ACI Journal*, Vol.91, No.2, 1994, pp.140~149.
2. Ashraf, H., Elzanaty, A., Nilson, H., and Slate, F. O. "Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Using High-Strength Concrete", *ACI Journal Proceedings*, Vol.83, March, 1986, pp.290~296.
3. Hanson, J. A., "Shear Strength of Lightweight Reinforced Concrete Beams", *ACI Journal Proceedings*, Vol.55, Sep, 1958, pp.387~403.
4. Miguel, A. S. and Ahmad, S. H., "Shear Capacity of Reinforced Lightweight High-Strength Concrete Beams", *ACI Journal*, Vol.86, No.6, 1989, pp.697~704.
5. ACI Committee 318, *Building Code Require for Reinforced Concrete (ACI 318-95)*, American Concrete Institute, Detroit, 1995.
6. 강병희, 안재철, 오상훈, "재생골재를 이용한 고강도 경량콘크리트의 물성에 관한 실험적 연구", *대한건축학회 논문집*, Vol.18, No.8, 2002. 8, pp.35~42.
7. 박성무, "경량 콘크리트의 역학적 특성", *콘크리트 학회지*, Vol.10, No.4, 1998. 8, pp.38~45.
8. 서치호, "경량 콘크리트의 재료적 특성", *콘크리트 학회지*, Vol.10, No.4, 1998. 8, pp.27~37.
9. 노희일, 신종렬, 광윤근, 권우현, 권기혁, "경량고강도 콘크리트 보의 전단거동에 관한 연구", *콘크리트학회 논문집*, Vol.8, No.4, 1996. 8, pp.149~159.
10. 정수영, 송병훈, 박완신, 한병찬, 성수용, 윤현도, "전단보강근이 없는 고강도 경량콘크리트 보의 전단거동", *대한건축학회 학술발표논문집*, Vol.20, No.1, 2000. 4, pp.185~188.
11. 정현수, 유영기, 배지윤, "고강도경량 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 부재의 전단성상에 관한 실험적 연구", *대한건축학회 학술발표논문집*, Vol.16, No.1, 1996. 4, pp.291~296.
12. 신성우, 이광수, 안종문, 최명신, "고강도 경량 철근콘크리트 보의 전단보강 효과", *콘크리트 학회지*, Vol.11, No.1, 1999. 2, pp. 89~97.
13. 광윤근, 김우석, 백승민, 이영미 "경량 콘크리트 보의 전단강도에 관한 연구", *대한건축학회 학술발표논문집*, Vol.21, No.2, 2001. 10, pp.1~4.
14. 대한건축학회(AIK), "건설교통부 고시 건축구조설계기

- 준”, 사단법인대한건축학회, 2005, 245pp.
15. Zsutty, T. C., “Beam Shear Strength Prediction By Analysis of Existing Data”, *ACI Journal*, Vol.65, No.11, Nov. 1968, pp.942~951.
  16. Mathey, R. G and Watstein, D., “Shear Strength of Beams without Web Reinforcement Containing Deformed Bars of Different Yield Strengths”, *ACI Journal Proceedings*, Vol.60, No.2, Feb. 1963, pp.183~206.
  17. CEB-FIP Model Code 1993, *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, Bulletin 14*, July 2001, 39pp.
  18. JSCE, *Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures, Part I(Design)*, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, 1991.

**요 약** 산업부산물을 활용한 고강도 경량 콘크리트 보의 역학적 거동 구명과 함께 경량 콘크리트 보의 이론식을 바탕으로 합리적인 전단강도식을 제안하였다. 보는 경량 골재를 사용한 고강도 경량 콘크리트 보(L) 8개와 일반 골재를 사용한 고강도콘크리트 보(H) 4개의 실험체를 제작하였다. 그리고 전단스팬비( $a/b = 1.5, 2.5, 3.5, 4.5$ ), 인장철근비( $\rho = 0.57, 1.0, 1.59, 2.3\%$ ), 콘크리트의 압축강도 (35.4, 65.3 MPa)를 주요 변수로 설정하여 실험하였다. 이로부터 보에 대한 하중-처짐관계 및 변형을 분포, 파괴성상, 최대내력 등에 대하여 측정하였다. 또한 보의 전단강도식의 제안을 위하여 사인장 균열 강도와 극한전단강도로 세분화하여 기존 제안식과 규준식에 적용시켜 상호 비교 분석을 하였다.  $V_{cr}$ 에 있어서는  $a/b = 2.5$  이상에서는 ACI 규준식과 Zsutty 제안식에서 감소하는 결과였지만, Mathey의 제안식에서는 약간의 상승 경향을 보였다. 또한,  $\rho, f_c$ 의 증가에 따라  $V_{cr,exp}/V_{cr,cal}$ 은 과대평가의 경향이 나타났다. 한편,  $V_{u,exp}/V_{u,cal}$ 에서는 통계적인 방법으로 유도된 Zsutty의 제안식이 실험결과와의 일치성에서 좋은 결과를 보였다. 이 식으로부터 유도 수정된 전단강도에 대한 제안식은  $V_{cr}, V_u$ 에서 합리적으로 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안된 전단강도 식은 경량 콘크리트의 전단스팬비, 인장철근비, 콘크리트 압축강도의 변화에 따른 전단내력을 합리적으로 평가하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

**핵심용어** 경량 콘크리트, 전단스팬비, 전단강도, 인장철근비