

# 전단보강이 없는 강섬유보강 콘크리트보의 전단강도

## Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups

구 성 모\*      이 정 석\*      김 우 석\*\*      백 승 민\*\*      곽 윤 근\*\*\*  
Koo, Sung-Mo    Lee, Jeung-Seok    Kim, Woo-Suk    Baik, Seung-Min    Kwak, Yoon-Keun

### ABSTRACT

Nine steel fiber reinforced high strength concrete beams and three steel fiber reinforced normal strength concrete beams without stirrups were tested by two point load. The variables studied in this investigation are the shear span/depth ratios of  $a/d = 2, 3$  and  $4$ , steel fiber volume fractions of  $V_f = 0, 0.5\%$  and  $0.75\%$  and concrete compressive strengths of  $f_{ck} = 630\text{kgf/cm}^2$ , and  $310\text{kgf/cm}^2$ .

Based on these tests and on tests by previous investigators, predictive equation is proposed for evaluating the ultimate shear strength of steel fiber reinforced concrete beams without stirrups. The proposed equation gave good prediction for the ultimate shear strength of the tested beams.

### 1. 서 론

본 연구에서는 강섬유보강 콘크리트 부재에 대해 전단시험(Shear Test)을 수행하여 강섬유보강 효과 및 부재의 역학적 거동특성을 규명하였고, 기존의 전단강도식보다 더 정확히 전단강도를 예측할 수 있는 전단설계식을 제안하였다.

### 2. 실 험

#### 2.1 시험체 개요

강섬유보강 콘크리트보의 전단거동을 규명하기 위해 전단스팬비( $a/d$ )를 2.0, 3.0, 4.0의 3종류, 강섬유 혼입율( $V_f$ )을 0%, 0.5%, 0.75%의 3종류로 한 9개의 고강도콘크리트보와 강섬유 혼입율을  $V_f = 0.5\%$ 로 일정하게 하고 전단스팬비( $a/d$ )만 2, 3, 4로 변화시킨 3개의 보통콘크리트보등, 총 12개의 시험체를 가지고 전단실험을 행하였다. 시험체의 단면은 그림1과 같이  $b = 12.5\text{ cm}$ ,  $D = 25\text{ cm}$ 로 균일하게 하였고, 모든 시험체는 지점에서 파괴를 방지하기 위하여 시험체의 양 끝부분을 15cm씩 돌출시키고 충분한 정착길이를 확보하기 위하여 전단보강 하였으며, 주인장철근의 피복두께는 3 cm로 하였다. 시험체의 전단스팬비( $a/d$ )와 강섬유혼입율( $V_f$ )은 표1에 나타내었다.

#### 2.2 사용재료 및 배합설계

콘크리트배합에 사용된 시멘트는 Type I 포틀랜드 시멘트이고 조골재는 최대직경 19mm의 쇄석, 세골재는 입도 2.17의 강모래를 사용하였다. 배합비는 표2와 같다. 사용된 강섬유는 직경 0.8mm, 길이 50mm, 형상비 62.5의 갈고리(Hook)형으로 항복강도는  $11,000\text{kgf/cm}^2$ 이다. 철근은 SD40 고강도 이형 철근으로, D16을 주철근으로, D10철근은 주철근의 고정을 위하여 주철근의 양 끝에 스티럽으로 사용하였다.

\* 정희원, 금오공과대학교 건축공학과 석사과정  
\*\*\* 정희원, 금오공과대학교 건축공학과 교수

\*\* 정희원, 금오공과대학교 건축공학과 박사과정

표1. 시험체의 종류와 크기

시험체명	단면 (cm)		전단스팬비 (a/d)	인장철근		강섬유 혼입량 (%)	길이 (cm)
	폭	높이		인장철근비 ρ (%)	인장철근		
FHB-2-1	125	25	2	1.5	2-D16	0	154.8
FHB-2-2	125	25	2	1.5	2-D16	0.5	154.8
FHB-2-3	125	25	2	1.5	2-D16	0.75	154.8
FHB-3-1	125	25	3	1.5	2-D16	0	197.2
FHB-3-2	125	25	3	1.5	2-D16	0.5	197.2
FHB-3-3	125	25	3	1.5	2-D16	0.75	197.2
FHB-4-1	125	25	4	1.5	2-D16	0	239.6
FHB-4-2	125	25	4	1.5	2-D16	0.5	239.6
FHB-4-3	125	25	4	1.5	2-D16	0.75	239.6
FNB-2-2	125	25	2	1.5	2-D16	0.5	154.8
FNB-3-2	125	25	3	1.5	2-D16	0.5	197.2
FNB-4-2	125	25	4	1.5	2-D16	0.5	239.6

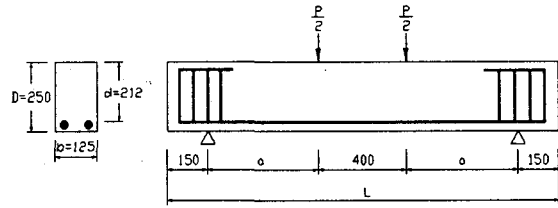


그림1. 시험체의 형태

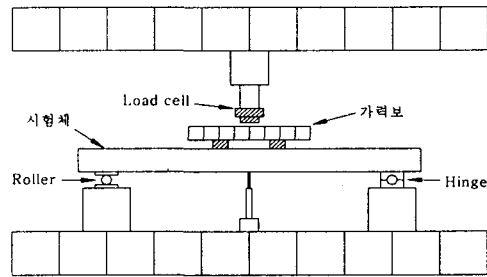


그림2. 시험체의 가력장치

2.3 실험장치 및 실험방법

각 시험체들은 그림2와 같이 H-150×150×7×10의 형강을 가력보로 설치하였고 가력보 아래 콘크리트 재하면에는 강재 플레이트를 양쪽에 설치하여 2점가력 하였다.

변위계는 시험체 중앙 하부에 설치하였고, 철근 스트레인게이지는 인장철근 중앙부에 2개를 붙였으며, 콘크리트 스트레인게이지는 시험체 중앙부 상·하단에 각각 1개씩 부착하여, 부재의 변위 및 변형도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시험체의 균열 및 파괴형태

시험체에 하중을 가하면서 보의 중앙부 가력점 하부에서 초기균열이 발생하기 시작하였으며, 하중의 증가로 휨균열이 연장되고 가력점과 지지점 사이의 전단스팬에서 사인장균열로 이어졌다. 사인장균열 이후에 시험체의 거동에는 강섬유 혼입여부에 따라 많은 차이가 있었으며, 시험체의 균열폭 및 평균균열간격은 강섬유 혼입율과 전단스팬비에 따라 다르게 나타났다.(그림 3참조)

표4. 콘크리트 배합비, 압축강도 및 재료특성

구분 종류	배합 중량비 (kgf/m³)					W/C (%)	슬럼프 (cm)	압축강도 (kgf/cm²)	조깅인장강도 (kgf/cm²)	휨인장강도 (kgf/cm²)	탄성계수 (kgf/cm²)
	시멘트	모래	보통골재	고성능 감수제 (l)	강섬유						
고강도 (FHB1)	480	560	1060	9.35	0 (0%)	33	10.4	638	44	91	3.42 × 10⁵
고강도 (FHB2)	480	560	1060	10.50	39.3 (0.5%)	33	9.6	650	60	103	3.85 × 10⁵
고강도 (FHB3)	480	560	1060	12.40	58.5 (0.75%)	33	8.3	699	62	109	3.89 × 10⁵
보통 (FNB)	299	704	1098	-	39.3 (0.5%)	62	13.1	314	39	79	3.18 × 10⁵

시험체의 파괴형태는 강섬유가 보강되지 않은 보 FHB 2-1, FHB 3-1, FHB 4-1과 FNB 2-2, FNB 3-2는 취성적인 전단파괴형태를 나타내었고, 강섬유를 보강한 보 FHB 3-2, FHB 3-3, FHB 4-2, FHB 4-3과 FNB 4-2에서는 인장철근의 항복에 의한 전형적인 휨파괴형태를 나타냈으며 FHB 2-2와 FHB 2-3은 전단-휨파괴되었는데, 강섬유의 혼입으로 인하여 전단파괴가 휨파괴 또는 전단-휨파괴로 바뀌었음을 알 수 있다.

표3. 시험체의 실험결과 및 파괴형태

시험체명	강섬유량(%)	전단력(t)		전단응력 ( $kgf/cm^2$ )		파괴형태
		균열 ( $V_{cr}$ )	극한 ( $V_u$ )	균열 ( $v_{cr}$ )	극한 ( $v_u$ )	
FHB-2-1	0	4.50	8.15	16.98	30.75	전단
FHB-2-2	0.5	5.25	13.75	19.81	51.88	전단-휨
FHB-2-3	0.75	6.00	14.70	22.64	55.47	전단-휨
FHB-3-1	0	4.00	6.84	15.09	25.81	전단
FHB-3-2	0.5	4.50	8.35	16.98	31.51	휨
FHB-3-3	0.75	4.85	9.18	18.30	34.64	휨
FHB-4-1	0	4.00	5.35	15.09	20.19	전단
FHB-4-2	0.5	4.15	6.50	15.66	24.53	휨
FHB-4-3	0.75	4.25	7.40	16.04	27.92	휨
FNB-2-2	0.5	3.50	10.91	13.21	41.17	전단
FNB-3-2	0.5	3.00	6.90	11.32	26.04	전단
FNB-4-2	0.5	2.90	5.40	10.94	20.38	휨

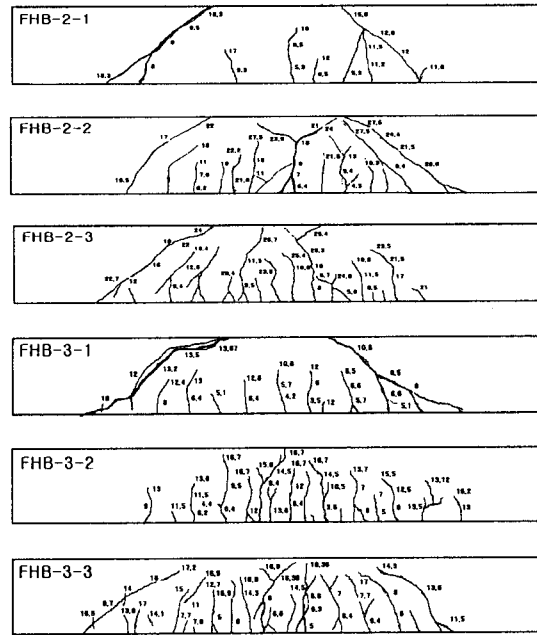


그림3. 시험체의 균열상태

### 3.2 전단강도

표 3은 실험에 의한 균열전단강도(Cracking Shear Strength)와 극한전단강도(Ultimate Shear Strength)에 대한 실험 결과인데, 모든 보의 균열전단강도와 극한전단강도 실험값은 전단스팬비가 작아지고 강섬유의 혼입율이 증가함에 따라 증가하였다.

#### 3.2.1 전단스팬비에 따른 전단강도

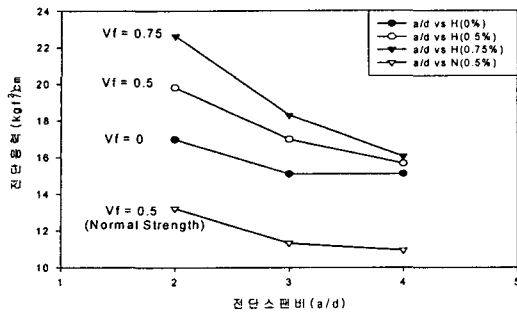
그림 4는 강섬유가 혼입된 콘크리트보 및 강섬유가 혼입되지 않은 콘크리트보의 전단스팬비에 따른 균열전단강도 및 극한전단강도를 나타낸다. 균열전단강도와 극한전단강도 모두 전단스팬비에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 강섬유 혼입율이 증가할수록 전단스팬비에 대한 균열전단강도의 감소율이 증가함을 나타낸다.

극한전단강도의 증가비를 보면 전단스팬비가 2인 경우 강섬유를 각기 0.5%, 0.75%로 혼입할 때 강섬유를 혼입하지 않은 보에 비해 69, 80%의 증가를 보여주고 있으며 전단스팬비가 3인 경우 22, 34%의 증가를, 전단스팬비가 4인 경우 22, 38%가 증가함을 알 수 있다. 즉, 전단스팬비가 4인 보에서 강섬유를 0.5%만 혼입해도 22%의 전단성능의 향상을 가져옴을 알 수 있다.

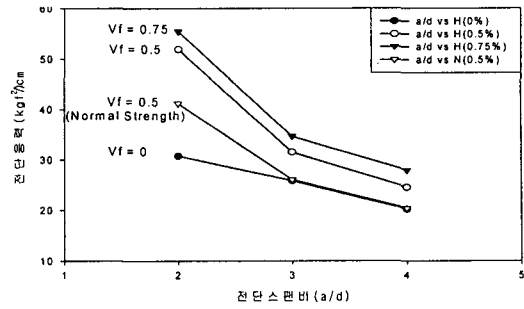
극한전단강도에 대한 균열전단강도의 비는 전단스팬비가 2일 때 38~55%인데 반해 전단스팬비가 3,4일 때는 53~64%의 범위를 갖는다. 즉, 전단스팬비가 작은보가 전단스팬비가 큰보보다 사인장균열이 후 더 많은 하중을 지지함을 알 수 있다.

#### 3.2.2 강섬유혼입율에 따른 전단강도

강섬유 혼입율에 따른 고강도 콘크리트보의 균열전단강도 및 극한전단강도의 변화를 그림 5에 나타



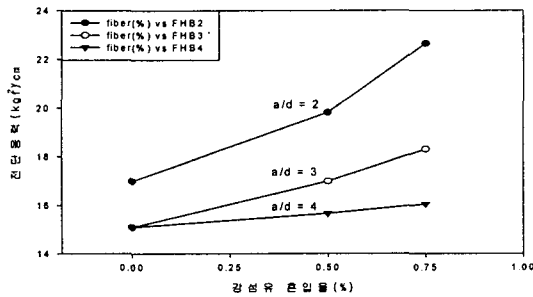
(a) 균열전단강도 ( $v_{cr}$ )



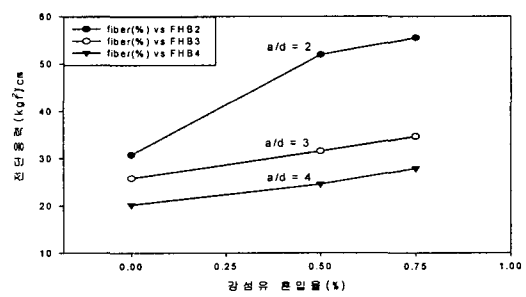
(b) 극한전단강도 ( $v_u$ )

그림4. 전단스팬비에 따른 전단강도

내었다. 강섬유혼입을 증가시키면 균열전단강도와 극한전단강도 모두 증가함을 알수 있다. 강섬유가 혼입된 콘크리트보에서는 균열전단강도  $v_{cr}$ 은 13~33%의 증가를 나타냈는데 반해 극한전단강도  $v_u$ 는 22~80%의 증가를 나타냈다. 이것은 강섬유가 보의 사인장균열이후 더욱 효과적임을 나타낸다.



(a) 균열전단강도 ( $v_{cr}$ )



(b) 극한전단강도 ( $v_u$ )

그림5. 강섬유 혼입율에 따른 극한전단강도

### 3.2.3. 콘크리트강도에 따른 전단강도

그림 6은 콘크리트강도에 따른 전단강도를 조사하기 위해  $f_{ck}=650\text{kgf/cm}^2$ ,  $f_{ck}=314\text{kgf/cm}^2$ 인 고강도콘크리트보와 보통강도콘크리트보를 비교한 것이다. 강섬유혼입율은 0.5%로 일정하고 전단스팬비만 다른 6개의 시험체를 비교하였다. 강섬유혼입율이 같을 때 콘크리트강도가 증가하면 전단강도도 증가하였다. 그러나 증가율은 전단스팬비에 관계없이 거의 일정하였다.

## 3.3. 기존제안식의 고찰 및 극한전단강도식의 제안

### 3.3.1 기존제안식의 고찰

#### (1) Narayanan · Darwish의 제안식

$$v_u = e \left\{ 0.24 f_{sp/c} + 815.7 \rho \frac{d}{a} \right\} + v_b \quad (1)$$

여기서,  $e = 1.0$ ,  $\frac{a}{d} > 2.8$

$$e = 2.8 \frac{d}{a}, \quad \frac{a}{d} \leq 2.8$$

#### (2) Ashour · Wafa의 제안식

##### ① ACI 수정식

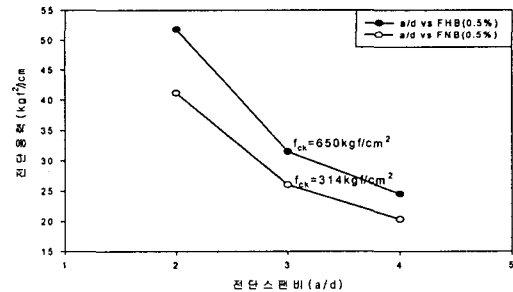


그림6. 콘크리트강도에 따른 극한전단강도 ( $v_u$ )

$$v_u = (2.24 \sqrt{f_{ck}} + 71.4F) \frac{d}{a} + 175.4 \rho \frac{d}{a} \quad (2)$$

② Zsutty's 수정식

$\frac{a}{d} \geq 2.5$  일 때

$$v_u = (9.92 \sqrt[3]{f_{ck}} + 71.4F) (\rho \frac{d}{a})^{0.333} \quad (3a)$$

$\frac{a}{d} < 2.5$  일 때

$$v_u = \left\{ (9.92 \sqrt[3]{f_{ck}} + 71.4F) (\rho \frac{d}{a})^{0.333} \right\} \times \frac{2.5}{a/d} + v_b (2.5 - \frac{a}{d}) \quad (3b)$$

(3) Sharma의 제안식

$$v_u = k f_{spfc} (\frac{d}{a})^{0.25} \quad (4)$$

(4) 신성우 · 오정근의 제안식

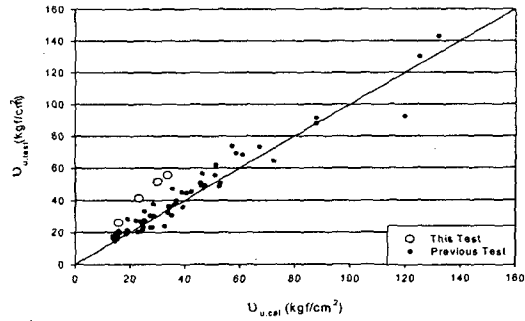
$\frac{a}{d} \geq 3$  일 때

$$v_u = 0.19 f_{spfc} + 951 \rho \frac{d}{a} + 0.834 v_f \quad (5a)$$

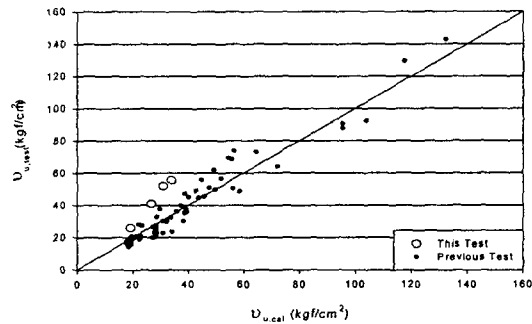
$\frac{a}{d} < 3$  일 때

$$v_u = 0.22 f_{spfc} + 2217 \rho \frac{d}{a} + 0.834 v_f \quad (5b)$$

(단, 단위는 모든 제안식 및 수정식에서  $\text{kgf/cm}^2$ 임)



(a) Narayanan의 제안식



(b) 본연구에서의 제안식

그림7. 극한전단강도에 대한 실험값과 제안식에 의한 이론값의 비교

### 3.3.2 본 연구에서의 제안식

철근콘크리트보의 전단강도를 비교적 정확히 예측하는 Zsutty의 식과 기존의 강섬유보강철근콘크리트보의 전단강도 제안식 및 86개 시험체(본 연구 4개, Narayanan 29개, Baston 42개, Ashour 11개)의 회귀분석에서 아래와 같은 극한전단강도식을 제안하였다.

$\frac{a}{d} \geq 2.5$  일 때

$$v_u = A (f_{spfc} \rho \frac{d}{a})^{1/3} + B v_b \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (6a)$$

$\frac{a}{d} < 2.5$  일 때

$$v_u = (2.5 \frac{d}{a}) \left[ A (f_{spfc} \rho \frac{d}{a})^{1/3} + B v_b \right] \quad (6b)$$

여기서,  $f_{spfc}$  : 강섬유보강콘크리트의 조개인장강도로서,  $\frac{f_{cut}}{20 - \sqrt{F}} + 0.7 + 1.0\sqrt{F}$  (MPa)

$v_b$  : 평균부착강도로서,  $0.41 \tau F$  (MPa)

$F$  : 강섬유계수로서,  $(L_f/D_f) V_f d_f$

상수 A, B는 86개 시험체의 회귀분석에 의해 구해졌는데 각기 28.2, 1.0의 값을 갖는다. 계산값에 대한 실험값의 평균값은 1.01이고 표준편차는 0.185이다.

### 3.3.3 기존제안식 및 본연구에서의 제안식과의 비교

표4, 표5는 강섬유가 혼입된 콘크리트 보의 실험값을, Narayanan · Darwish, Ashour · Wafa, Sharma, 오정근 · 신성우등의 제안식 및 본연구에서의 제안식에 의한 계산값을 비교한 것이다. 표 4, 표 5와 그림 7에서 볼 수 있듯이 본 연구에서의 제안식에 의한 계산값이 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

표4. 강섬유를 혼입한 콘크리트보의 실험값과 기존제안식 및 본연구에서의 제안식에 대한 비교(단위:kgf/cm<sup>2</sup>, 14개 시험체)

연구자	시험체명	실험값 $v_{u, test}$	이론값 ( $v_{u, cal}$ )					$v_u / v_{u, Na}$	$v_u / v_{u, ACI}$	$v_u / v_{u, Zsu}$	$v_u / v_{u, sha}$	$v_u / v_{u, shin}$	$v_u / v_{up}$	
			Narayanan Eq(1)	Ashour Eq(2) Eq(3)		Sharma Eq(4)	신성우 Eq(5)							제안식 Eq(6)
본연구	FHB-2-2	51.90	30.08	38.14	27.23	33.65	31.41	30.90	1.73	1.36	1.91	1.54	1.65	1.68
	2-3	55.47	33.63	43.44	36.79	34.77	34.06	34.06	1.65	1.28	1.80	1.60	1.62	1.63
	FNB-2-2	41.20	23.15	29.46	22.64	21.82	26.92	26.82	1.78	1.40	1.83	1.89	1.53	1.53
	3-2	26.00	15.70	19.68	14.38	19.78	14.07	19.27	1.66	1.32	1.81	1.31	1.84	1.35
Narayanan et al.	SF1	30.18	29.06	33.75	26.51	26.10	34.26	30.49	1.04	0.89	1.14	1.16	0.86	0.99
	SF2	27.23	22.13	27.02	18.66	24.68	29.88	23.05	1.23	1.01	1.46	1.11	0.91	1.18
	SF3	28.25	19.17	22.54	17.54	23.56	17.34	21.92	1.47	1.25	1.61	1.20	1.63	1.29
	SF4	27.63	25.29	28.76	23.66	17.33	31.82	28.04	1.09	0.96	1.17	1.59	0.87	0.99
Batson et al.	H1	17.54	14.68	11.32	14.38	20.90	13.66	18.66	1.19	1.55	1.22	0.84	1.29	0.94
	H2	17.23	14.68	11.32	14.38	20.90	13.66	18.66	1.17	1.52	1.20	0.82	1.26	0.92
	H3	16.93	14.68	11.32	14.38	20.90	13.66	18.66	1.15	1.50	1.18	0.81	1.24	0.91
Ashour et al.	B-1-1.0-A	129.91	125.12	114.82	120.32	74.34	87.49	115.23	1.04	1.13	1.08	1.75	1.49	1.13
	B-2-1.0-A	61.79	51.29	57.41	46.80	62.51	56.08	48.23	1.21	1.08	1.32	0.99	1.10	1.28
	B-4-1.0-A	32.32	33.96	28.86	26.82	46.60	29.47	32.83	0.95	1.12	1.21	0.69	1.10	0.99

\*  $v_u$ : 실험에 의한 극한전단강도,  $v_{up}$ : 본연구에서의 제안식에 의한 극한전단강도

#### 4. 결론

본 연구에서는 강섬유보강 고강도콘크리트보의 전단성능을 규명하기 위해 전단스팬비(a/d)와 강섬유 혼입율( $V_f$ ), 그리고 콘크리트강도( $f_{ck}$ )를 변수로 하여 전단실험을 하였다. 얻어진 실험결과는 Nara-yanan · Darwish의 제안식, Ashour · Wafa의 ACI 수정식과 Zsutty 수정식, Sharma의 제안식, 오정근 · 신성우의 제안식 및 본 연구에서의 제안식과 비교 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 강섬유를 혼입 하지않은 보에서는 취성적인 전단 파괴가 일어났지만 강섬유를 혼입한 보는 전단-휨 파괴 또는 휨 파괴가 발생하였다.

2) 강섬유를 혼입한 콘크리트보에서는 강섬유를 혼입 하지 않은 콘크리트보 보다 더 높은 처짐 및 변형능 력을 나타내었고, 평균균열간격 및 균열폭이 감소되었다.

3) 강섬유가 혼입된 콘크리트보에서 균열전단강도  $v_{cr}$ 은 13-33%의 증가를 보인데 반해 극한전단강도  $v_u$ 는 22-80%의 증가를 나타냈다. 이것은 강섬유가 보의 사인장균열이후 더 효과적임을 나타낸다.

4) 본 연구에서 제안한 극한전단강도식은 실험값과 좋은 일치를 보여주고 있다.

#### 참 고 문 헌

1. Ashour, S. A. and Hasanain, G. S. and Wafa, F. F., "Shear Behavior of High- Strength Fiber Reinforced Concrete," ACI Structural Journal, V. 89, No. 2, Mar-Apr. 1992. pp. 176-184.
2. Batson, G.B., and Jenkins, E., and Spatney, R., "Steel Fibers as Shear Reinforcement in Beams," ACI Journal, Proceedings, V. 69, No. 10, Oct. 1972, pp. 640-644.
3. Narayanan, R., and Darwish, I. Y. S., "Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement," ACI Structural Journal, V. 84, No. 3, May-June. 1987, pp 216-227.
4. Sharma, A. K., "Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams," ACI Journal, V. 83, No. 4, July-Aug. 1986, pp. 624-628.
5. 오정근, 이광수, 신성우, "전단보강이 없는 강섬유보강 고강도 철근콘크리트보의 전단거동에 관한 연구", 콘크리트학회논문집, 제3권 제3호, 1991년 9월, pp. 141-146.