

## 전단 보강이 없는 고강도 섬유보강 철근 콘크리트보의 전단 역학적 거동에 관한 연구

### Shear Mechanism of Steel-Fiber Reinforced High Strength Concrete Beams without Shear Reinforcement

○ 오 정 근 \* 이 광 수 \* 권 영 호 \* 신 성 우 \*\*

#### ABSTRACT

Investigations on the behavior of steel fiber reinforced high strength concrete beams subjected to pre-dominant shear are accomplished to determine their diagonal shear strength including ultimate shear strength. The parameters varied were the volume fraction( $V_f$ ) of the fibers, shear span depth ratio( $a/d$ ). The test result show that diagonal shear strength and ultimate shear strength are increased significantly due to crack arrest mechanism. Predictive equations are suggested for evaluating the diagonal cracking strength and ultimate shear strength of the fiber reinforced high strength concrete beams.

#### 1. 서 론

##### 1.1 연구의 목적

현대 건축물의 고층화, 대형화 및 특수화에 따른 콘크리트의 품질개선을 위하여 일부 선진외국을 중심으로 고강도화가 이루어져 왔으며, 근래에 많은 실용화가 이루어져 왔다. 그러나 이러한 고강도 콘크리트 부재는 높은 취성과 갑작스러운 전단파괴등의 불리한 면을 가지고 있어, 고강도 콘크리트 부재 또는 바닥판이나 P.C판넬과 같은 콘크리트 2차제품등에는 이를 방지하기 위한 방법으로 부재의 인장력을 증대시켜 주는 강섬유를 이용할 수 있으며, 강섬유를 보강함으로써 구조부재의 연성 증대를 위한 연구가 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고강도 철근콘크리트보의 연성 증대라는 측면에서, 강섬유 보강 고강도 철근 콘크리트 보에 대한 전단강도 양상을 파악하여 강섬유 보강 콘크리트의 활용에 대한 기본자료를 제시하고자 한다.

##### 1.2 연구내용 및 추진방법

##### 1.2.1 종래의 연구

보통강도에 대한 강섬유의 효과를 위한 연구로 지난 몇년간 직사각형, T형, I형 단면형상의 보에 대한 전단강도를 측정하고 거기에 대한 제안식이 제시되어 왔다. (3,5,6). 그러나 섬유의 서로 다른 특징 즉, 부착특성(bond characteristics), 섬유형상비(aspect ratio) 섬유첨가율(volume fraction)등의 서로 다른 특징 때문에 설계식의 일반화와 각각의 부재의 전단강도에 영향을 미치는 변수들에 대한 만족할만한 분석자료가 부족하며 고강도 콘크리트에 대하여는 전무한 실정이다.

##### 1.2.2 연구의 추진방법

기존의 연구결과에 의하면 전단강도에 영향을 미치는 요인으로 활열강도, 부재의 전단스팬비, 전단보강의 유무

그리고 주근비 등으로 보고되고 있다.(6)(7)

이에 본 연구에서는 섬유보강 고강도 철근콘크리트 보( $F_c' = 800 \text{ kg/cm}^2$ )에 있어서 섬유첨가율( $V_f$ )을 0.0, 0.5, 1.0%로 하고, 전단스팬비( $a/d$ )를 2.0, 3.0, 4.5로 하였으며, 주근비는 0.5Pb로 고정하여 이들 변수에 대한 전단응력의 효과를 검토하고자 한다.

따라서 본 연구에서는

- 1) 고강도 섬유보강 콘크리트 제조에 관한 재료 및 공시체 시험
- 2) 섬유첨가율의 증가에 따른 보 시험체의 전단부담 능력의 변화
- 3) 전단스팬비( $a/d$ )에 따른 섬유보강 고강도 철근 콘크리트 보 시험체의 전단부담 능력
- 4) 실험결과와 기존 구조설계식의 비교, 분석 및 섬유첨가율( $V_f$ ), 전단스팬비( $a/d$ ), 주근비( $P_t$ ) 등에 의한 구조설계식의 제안등을 위한 제안연구를 주요내용으로 한다.

#### 2. 실험체 계획

##### 2.1 보 시험체 계획

섬유보강 고강도 철근 콘크리트보 부재의 전단능력을 조사하기 위하여 총 9개의 보 시험체를 제작하였다. 보 시험체의 상세는 Fig.1에 나타나 있다.

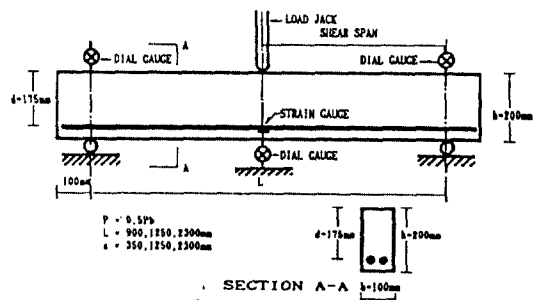


Fig.1 보 시험체 상세도

\*. 한양대 대학원.

\*\* . 한양대 건축공학과 조교수, 공박.

시험체를 대별하면

- 1) 전단스팬비에 따른 구분(a/d=2.0, 3.0, 4.5)
  - 2) 주근비(Pt)에 따른 구분(U=0.5Pb 단 Pb=balanced steel ratio)
  - 3) 섬유 첨가율에 따른 구분(Vf=0.0, 0.5, 1.0%)
- 예를 들면 HFB3-U1-0.5  
H:고강도 콘크리트(High Strength Concrete)  
F:섬유보강(Fiber reinforced)  
B:보(Beam)  
3:a/d=3  
U:Pb=0.5Pb(Under Reinforced Concrete)  
1:전단보강(Vs)=0%(2:Vs=25%, 3:Vs:50%)

2.2 사용된 재료 및 최적 배합비

시멘트는 S사제품의 수출용 2종 포틀랜드 시멘트를 대상으로 하였으며, 세골재는 강모래, 그리고 조골재는 최대크기 13mm의 화강암 쇄석을, 혼화제는 Naphtalane 계의 Super-20을, 철근은 인천제철 제품 SBD 40의 D22를 사용하였으며 KS B 6801의 규정에 의해 철근의 인장 시험단을 제작하였고, KS B 0802의 금속재료 인장시험 방법에 따른 시험을 실시하였다.

본 연구에 사용된 강섬유는 단면이 원형이고, 직선형 강선으로 일정한 길이를 잘라서 사용하였다. 직경 df=0.4mm, 길이 lf=40mm, 그리고 섬유형상비(Aspect Ratio=lf/df)=100인 경우로서, Table.1에 강섬유의 물리적 특성이 나타나 있다.

Table.1 강섬유의 물리적 특성

항복점 강도	극한 강도	탄성 계수	단위중량
13.282E+03	18.185E+03	2.27E+06	7.8

(단위 ; kg/cm<sup>2</sup>)

콘크리트 배합은 요구되는 강도와 성형성에 맞게 설계되었으며, 이때 W/C=0.3 그리고 S.P재 사용량을 1.0%로 하였다. 타설과 동시에 KS F 2402에 따른 슬럼프 시험을 실시하였다. 시험체는 온도가 25°C 이상에서 수중 양생하였다. 재령 28일 경과후 KS F 2405에 의한 압축강도 시험과 KS F 2423에 의한 활열강도 시험을 하였으며 그 결과가 Table.2에 나타나 있다.

Table.2 섬유첨가율에 따른 압축강도 및 활열강도

재령	28일 강도 (kg/cm <sup>2</sup> )		
	0%	0.5%	1.0%
압축 강도	800	840	890
활열 강도	65	82	107

(단위 ; kg/cm<sup>2</sup>)

3. 시험법

3.1 보 시험체 설치

본 실험에 사용된 보 시험기는 최대용량 100t의 만능 시험기이다. 모든 시험체는 전단스팬비에 관계없이 중앙부 1점 가력을 하였으며 시험체의 처짐을 측정하기 위하여 중앙부에 1/100mm, 양 단부의 회전을 측정하기 위하여 1/1000mm의 정밀도를 갖는 전기 다이얼 Gauge를 각각 1개씩 설치하였다.

3.2 하중 재하

재하과정은 예상 중극 파괴하중의 1/3까지는 하중을 일정하게 증가시키는 하중 조절방식(Load Control)을, 그 후에는 가력속도를, 가력점 중앙부의 처짐과 변형 측정기(Strain Indicator)에 나타나는 변형등을 관찰 하면서 변위조절(Deflection Control) 방법으로 전환하여 실시하였다.

4. 실험 결과

4.1 일반적 파괴양상

일반적인 파괴양상을 관찰해 보면, 섬유첨가율(Vf)과 전단스팬비(a/d)에 따라 다른 형태를 보여준다. 섬유를 첨가하지 않은 시험체는 사인장균열후에 곧바로 극한 파괴에 도달함을 볼수있고, 섬유보강을 한 경우에는 초기균열후에도 높은 전단응력에 저항함을 볼수있다.

전단스팬 내에 초기균열이 발생한 후에도 섬유첨가율이 증가할수록 발생균열의 수가 많아짐을 볼 수 있는데 이러한 섬유보강 콘크리트 부재의 파괴양상은 Romualdi와 Baston에 의한 섬유의 균열 억제 거동(crack arrest mechanism)에 의해서 설명되어진다.(10)

섬유 첨가율이 증가함에 따라 파괴성상은 전단에서 휨파괴로의 전환을 보여주고 있으나 극한파괴는 전단에 의한 파괴를 보여주고 있다.

전단스팬비(a/d)에 따른 파괴양상을 볼때 a/d가 2인 경우에는 전단스팬 내에서 초기균열이 발생되면서 가력점으로 연장되어 압축부에서 최대 응력에 저항하는 사인장 압축 활열(diagonal compression splitting)에 의한 파괴양상을 보여주고 있다.

전단스팬비가 3.0이상인 경우에는 섬유첨가율에 비례하여 휨 균열의 발생후에 전단균열이 발생하였고, 전단응력의 많은 부분이 섬유에 의해서 저항함을 관찰

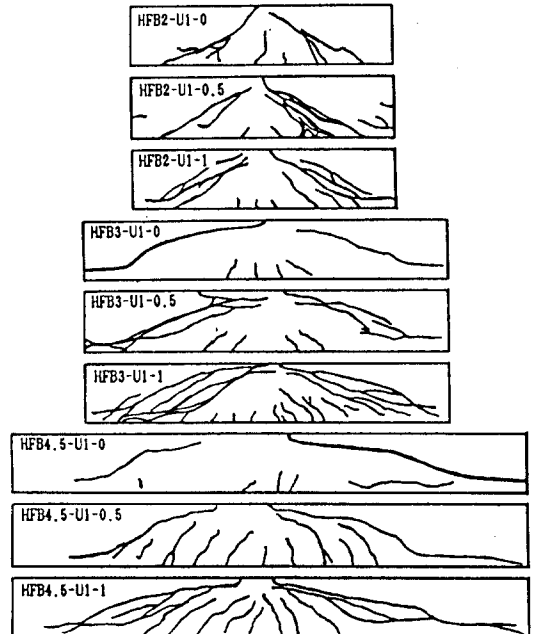


Fig.2 각 시험체별 균열상태도

할 수 있었고, 섬유작용의 마지막 단계에 도달하여 압축 부분과 주인장 철근을 따라 균열이 연장되는 것을 볼 때 압축부분(compression zone)의 콘크리트와 Dowel Action에 의한 2차 전단거동(additional shear)임을 알 수 있다.

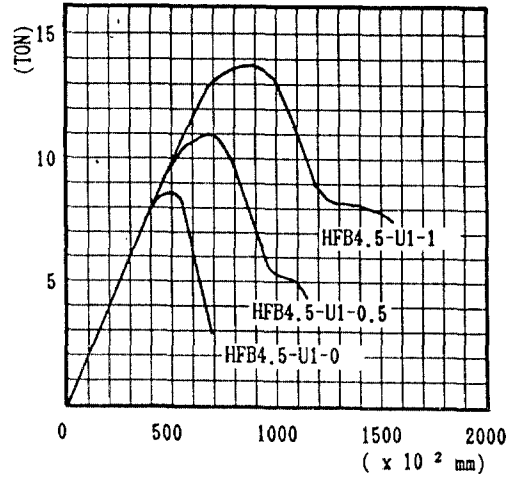
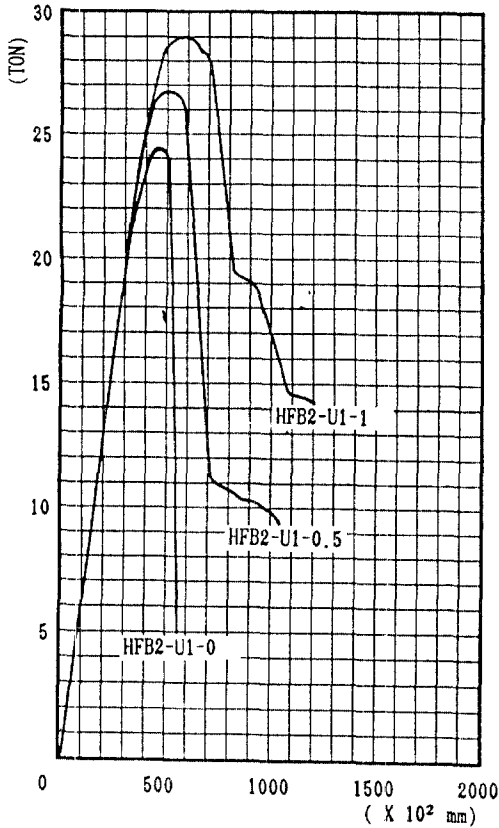


Fig.3 각 시험체별 하중-처짐 곡선

4.2 하중 처짐곡선

각 시험체는 Fig.3에서 알 수 있듯이 전단스팬비에 따른 감성 경사도의 차이를 볼 수 있으며 섬유첨가율 0%일때 최대하중후에 급격한 취성파괴양상을 보여주는 반면 1%일때는 전단응력에 저항하는 섬유의 거동으로 제 2차 하중 처짐곡선이 발생함을 볼 수 있다. 이것은 섬유의 보강에 의해서 고강도 콘크리트 부재의 급작스런 파괴를 방지할수 있음을 보여주고 있다.

4.3 전단응력

4.3.1 최대 전단 응력

Table.3을 볼때 전단스팬비가 감소하고, 섬유첨가율에 비례해서 최대 전단응력은 증가함을 알 수 있으나, 초기균열강도는 다소 낮은 증가율을 보여주고 있다.

Table.3 각 시험체별 전단응력값

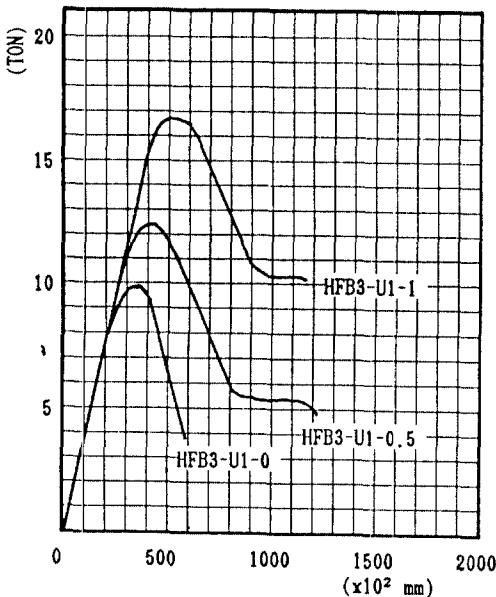
시험체명	전단스팬비 (a/d)	f <sub>c</sub> ' (kg/cm <sup>2</sup> )	종가 f <sub>c</sub> ' (kg/cm <sup>2</sup> )	전단 실험치 (kg/cm <sup>2</sup> )		피대내력 (kg/cm <sup>2</sup> )
				사 균열	극 한	
HFB2-U1-0	2.0	851	800	32.70	61.25	122.50
HFB2-U1-0.5	"	"	"	38.50	67.00	134.00
HFB2-U1-1	"	"	"	45.32	72.50	145.00
HFB3-U1-0	3.0	851	800	26.71	28.17	56.34
HFB3-U1-0.5	"	"	"	28.55	31.25	64.50
HFB3-U1-1	"	"	"	35.32	40.15	99.00
HFB4.5-U1-0	4.5	851	800	23.60	25.43	44.50
HFB4.5-U1-0.5	"	"	"	24.75	27.75	55.50
HFB4.5-U1-1	"	"	"	30.43	33.75	67.50

\* f<sub>c</sub>' : 10cm x 20cm 일린더

\*\* 종가 f<sub>c</sub>' : 15cm x 30cm 표준일린더(10x20cm의 94%)

4.3.2 전단 스펬비(a/d)에 따른 전단응력의 효과

섬유첨가율이 일정할때 전단스팬비에 따른 전단 응력 값이 Fig.4,5에 나타나 있는데 전단스팬비가 3.0일 때 까지는 급격하게 감소하고 있으나, 그 이후에는 섬유첨가량이 많을수록 감소추세는 줄어들고 있어, 부재의 거동이 전단에서 휨으로 바뀔때 따라 섬유 첨가량이 많을수록 전단응력에 대한 효과가 있음을 알 수 있다.



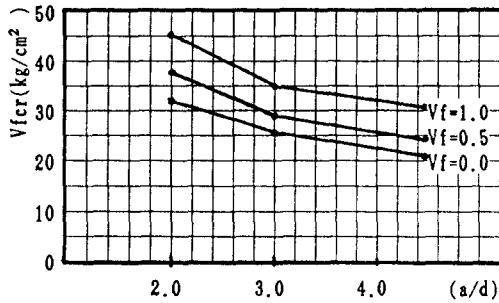


Fig. 4 전단스팬비에 따른 사균열 응력

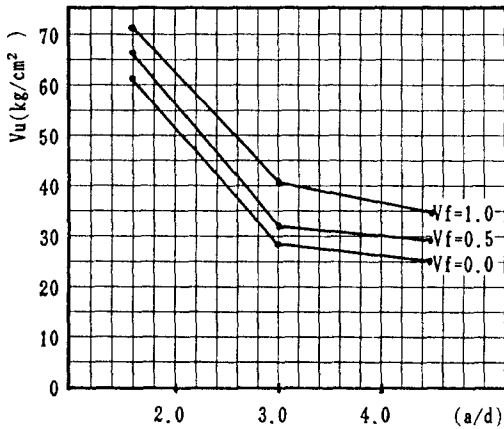


Fig. 5 전단스팬비에 따른 극한전단응력

#### 4.3.3 섬유 첨가율(Vf)에 따른 전단응력

Fig. 6, 7은 섬유첨가율에 따른 전단응력의 효과를 나타내는데 Fig. 7은 a/d가 2인 경우에는 1.0%의 섬유첨가율에 의해 극한 전단응력이 18%, a/d가 3인 경우에는 62%, a/d가 4.5인 경우에는 51%의 전단응력의 증가를 보여준다. 이중 a/d가 2인 경우에는 섬유 첨가율에 따른 극한전단응력의 증가가 작은것으로 나타났는데, 이는 a/d가 작을수록 보의 거동 (beam action)이 아치거동 (arch action)으로 전환하면서, 섬유의 전단응력 저항이 콘크리트의 전단 응력 저항으로 전환되어 섬유의 효과가 감소되는 것으로 사료된다.

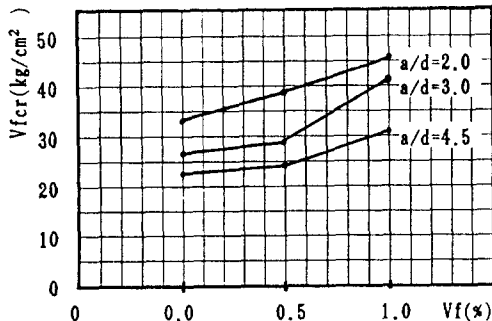


Fig. 6 섬유첨가율에 따른 사균열 응력

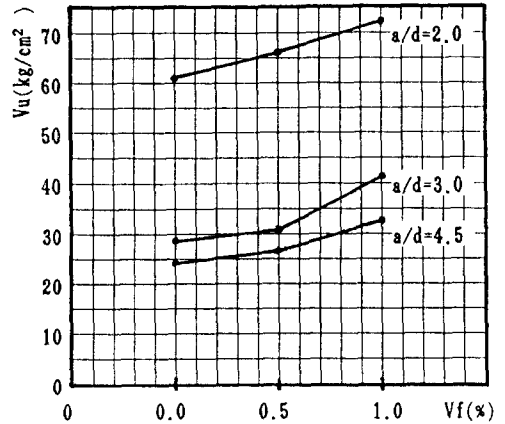


Fig. 7 섬유첨가율에 따른 극한전단응력

#### 5. 기존 제안식에 대한 이론적 고찰 및 실험적 해석

##### 5.2 기존 제안식

현재 건설부 규준이나 ACI 규준에는 섬유보강을 한 철근콘크리트 부재의 전단강도에 관한 식이 제안되고 있지 않다. 섬유 보강을 한 철근 콘크리트 보 부재의 전단 응력에 관한 식이 몇몇 연구자들에 의해 제안되었는데 R. Narayanan 과 I.Y.S. Darwish는(이하 Narayanan)는 기존의 제안된 전단응력에 관한 식 (3.4.7)을 정리하였으며 또한 그의 실험을 통하여 섬유보강 콘크리트부재의 사균열응력과 극한전단응력에 관한 다음과 같은 이론과 제안식을 전개하였는데 먼저 섬유뽑힘응력(Vfp=fiber pullout stress)에 관한 이론을 전개하면 다음과 같다.

Narayanan은 Romualdi et al이 제안한(8) 부재 단면의 섬유의 갯수(Nw)에 대한 이론

$$N_w = \frac{1.64 V_f}{\Pi d f^2} \quad \text{----- (1)}$$

을 도입하여 섬유뽑힘응력(Vfp=fiber pull out stress)

$$V_{fp} = 0.41 d f L/D V_f \quad \text{----- (2)}$$

$$= 0.41 \cdot \tau \cdot F \quad \text{----- (2)}$$

에 관한 식을 전개하였다. 이때  $\tau$  값은 섬유와 콘크리트의 평균 부착 응력으로서 Swamy et al이 제안한 (11) 4.15 N/mm<sup>2</sup> (42.3kg/cm<sup>2</sup>) 값을 적용하였다.

위의 이론과 자신의 실험을 통하여 Narayanan은 사균열 전단응력과 극한전단응력에 관한 다음과 같은 식을 제안하였다.(9)

$$V_{fcr} = 0.24 f_{spfc} + 20P(d/a) + 0.5V_{fp} \quad \text{(N/mm}^2 \text{)} \quad \text{--- (3)}$$

$$V_{fcr} = 0.24 f_{spfc} + 204P(d/a) + 5V_{fp} \quad \text{(kg/cm}^2 \text{)}$$

$$V_u = e[0.24 f_{spfc} + 80P(d/a)] + V_{fp} \quad \text{(N/mm}^2 \text{)} \quad \text{----- (4)}$$

$$V_u = e[0.24 f_{spfc} + 815P(d/a)] + V_{fp} \quad \text{(kg/cm}^2 \text{)}$$

$$e = 1.0 \quad \text{when } a/d > 2.8$$

$$e = 2.8(d/a) \quad \text{when } a/d < 2.8$$

### 5.2 실험값과의 비교

Narayanan이 제안한 식에 의한 값과 본 연구의 실험 결과와의 비교가 Fig.8에 사균열 응력, 그리고 Fig.9에 극한전단에 관하여 나타나 있다. 이에 의하면 본 실험에 의한 사균열 전단응력과 극한 전단 응력의 값이 작게 나타났는데, 이는 Narayanan의 제안식이 주근비와 전단스팬비, 섬유뽑힘응력( $V_{fp}$ =fiber pull out stress)을 과대평가하고 할열강도의 영향을 과소평가하였으며, 또한 Narayanan은 시험체 압축강도가  $600\text{kg/cm}^2$  이하로서 본 실험의  $800\text{kg/cm}^2$ 에 비하여 다소 낮기 때문인 것으로 보인다.

### 5.3 본 실험에 의한 제안식

Narayanan의 제안식은 전단응력의 예측에 있어 다소 높게 나타났기 때문에 섬유 보강 고강도 콘크리트보의 전단응력에 대한 좀더 안전한 제안식이 요구되고 있으며 본 실험결과로 볼때 섬유보강 고강도철근콘크리트보의 전단 응력은 할열강도와 섬유첨가율에 의한 섬유 뽑힘 응력( $V_{fp}$ =fiber pull out stress)에 크게 의존하는 것으로 나타났다.

따라서 본 실험으로 얻은 전단 응력값과, 할열강도, 주근비, 전단스팬비, 그리고 섬유 뽑힘 응력( $V_{fp}$ )의 관계를 회기분석한 사균열 전단응력에 대한 새로운 제안식은 다음과 같다.

$$V_{fcr} = 0.20f_{spfc} + 680P(d/a) + 0.52V_{fp} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (5)$$

, 표준편차  $S = 6.12$

극한전단응력을 위한 회기분석에 의한 결과는 다음과 같다.

$$a/d > 3 \text{인 경우;}$$

$$V_u = 0.19f_{spfc} + 951P(d/a) + 0.834V_{fp} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (6)$$

, 표준편차  $S = 3.414$

$$a/d < 3 \text{인 경우;}$$

$$V_u = 0.22f_{spfc} + 2217P(d/a) + 0.834V_{fp} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (7)$$

, 표준편차  $S = 5.34$

Fig.8에 본 실험에 의한 사균열응력값( $V_{fcr}$ )과 제안식(Eq.5)에 의한 값( $V_{fcrp}$ ), 또 Narayanan의 실험에 의한 값과 제안식에 의한 값의 비교된 결과를 보여 주고 있다. 본 실험에 의한 제안식은 Narayanan et al과 비교하여 안전측(conservative)이며, Fig.9에서 나타난 극한 전단 응력값의 비교 결과에서도 본 실험에 의한 제안식(Eq.6,7) 역시 안전측임을 알 수 있다.

## 6. 결 론

전단보강이 없는 고강도 철근콘크리트보에 섬유첨가율과 전단스팬비를 변수로 한 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 섬유첨가율의 증가에 따른 섬유의 균열억제거동에 의해 보의 파괴양상이 전단에서 휨 파괴로의 전환을 보여주고 있으며, 강섬유의 보강은 고강도콘크리트보의 급작스런 파괴를 방지함은 물론 전단파괴에 효과적으로 저항함을 알 수 있다.

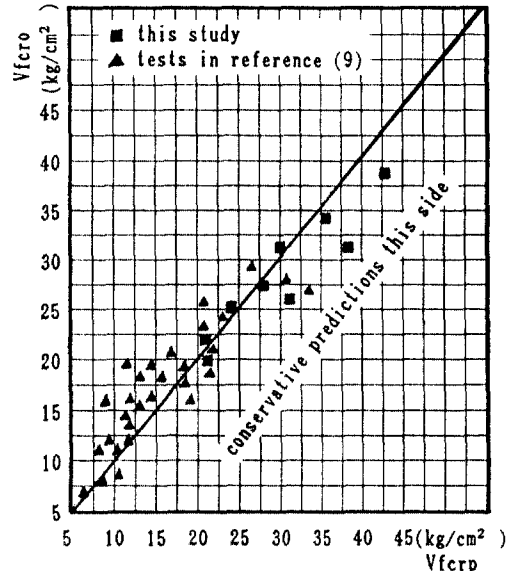


Fig.8 실험에 의한 사균열응력과 제안식(Eq.7)에 의한 사균열응력의 비교

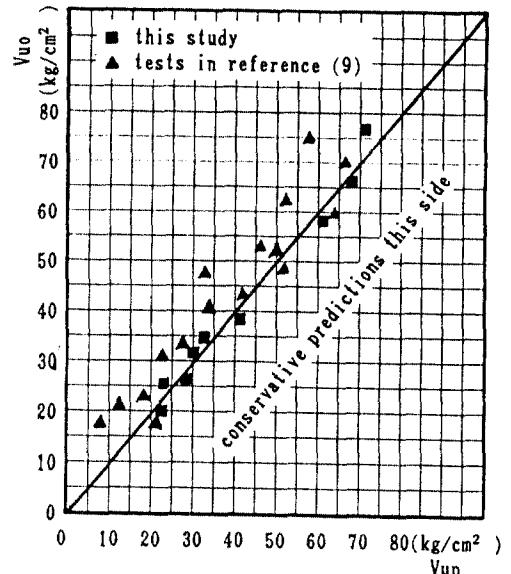


Fig.9 실험에 의한 극한전단응력과 제안식(Eq.8)에 의한 극한전단응력의 비교

- 2) 고강도 콘크리트보에 강섬유의 보강은 섬유첨가율에 비례하여 사균열응력과 극한전단응력의 높은 증가를 보여주고 있다.
- 3) 섬유보강 고강도콘크리트보는 섬유보강을 하지 않은 고강도 콘크리트보에 비하여 높은 후기 균열강도(post cracking strength)와 에너지 흡수능력(energy absorption)을 보여주고 있다.
- 4) 섬유보강 콘크리트에 대한 제안 기준식이 요구되고 있으며, 이러한 기준식의 정립을 위해 섬유보강 콘크리트에 대한 많은 연구가 필요한 실정이다.

## 6. 참고 문헌

- 1) Romualdi, J.P., and Baston, G.B., "Behavior of Reinforced Concrete Beamss with closely spaced Reinforced.", ACI Jr. Vol. 60, 1963, June, 1963, pp. 775-790.
- 2) Romualdi, J.P., and Baston, G.B., "Mechanics of Crack Arrest in Concrete." ASCE, Proceedings, Vol. 89, EM3, June, 1963, pp. 147-168.
- 3) La Fraugh, R.W., and Moustafa, S.E., "Experimental Investigation of the Use of Steel Fiber for chear Reinforcement." Concrete Technology Associates, Tacoma, Jan, 1975, 53pp
- 4) Williamson, G.R., and Knab, L.I., "Full Scale Fiber Concrete Beam Tests," Fiber Reinforced Cement And Concrete (RILEN Symposium, London), Construction Press, Lancaster, 1975, pp. 209-214.
- 5) Jindal, Roop l., "Shear and Moment Copacities of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams," Fiber Reinforced Concrete-International Symposium, sp-81, ACI, Detroit, 1984, pp. 1-16.
- 6) Muhidin, N.A., and Regan, P.E., "Chopped Steel Fibers as Shear Reinforcement in Concrete Beams," Fiber Reinforced Materials, Institution of Civil Engineerings, London, 1977, pp. 135-149.
- 7) Narayanan, R., and Kareem-Palanjian, A.S., "Effect of Fiber Addition on Concrete Strengths," Indian Concrete Journal (Bombay), V. 58, No. 4, Apr. 1984, pp. 100-103.
- 8) Romualdi, James P., and Mandel, James A., "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement," ACI Journal, Proceedings V. 61, No. 6, June, 1964, pp. 657-671.
- 9) R. Narayanan and I.Y.S. Darwish, "Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement.", ACI Structural Jr. May-June. 1987, pp. 216-227.
- 10) De Vekey, R.C., and Majumdar, A.J., "Determining Bond Strength in Fiber-Reinforced Composites." Magazine of Concrete Research (London), V. 20, No. 6, June, 1968, pp. 229-234.
- 11) Swamy, R.N.; Mangat, P.S.; and Rao, C.V.S.K., "The Mechanics of Fiber Reinforcement of Cement Matrices," Fiber Reinforced Concrete, SP-44, American Concrete Institute, Detroit, 1974, pp. 1-28.