

전단보강이 없는 고강도 철근 콘크리트 보의 전단역학적 거동에 관한 연구

Shear Mechanism of Reinforced High Strength Concrete Beams Without Shear Confinement

신	성	우*	이	광	수**
Shin,	S.	w.	Lee,	K.	S.
권	영	호**	오	정	근**
Kwon,	Y.	H.	OH,	J.	K.

요 약

건축물의 고층화, 대형화 및 특수화에 따른 콘크리트의 고강도화는 필수적이다.

그러나 고강도화는 높은 취성파괴 양상을 보여주며, 이들이 전단파괴와 병합될 때 구조체의 안전성에 큰 문제를 던져주고 있다.

본 연구는 고강도 콘크리트($f'_c=800\text{kg/cm}^2$)보가 전단보강이 되어있지 않은 경우 전단강도 및 파괴양상을 조사하기 위하여 주요변수로서 전단스팬비(a/d)=3.0, 4.5, 6.0 그리고 주근비(ρ_l)=0.5%, 1.0%로 하였다.

실험결과, 현재의 건설부 극한강도 구조 규준식이나 ACI규준식은 주근량과 a/d 의 효과를 과소평가하고, 콘크리트의 강도 증가에 따른 잇점은 과대평가하고 있는 것으로 판명되었다.

ABSTRACT

Reinforced High-Strength Concrete Beams without Confinement were tested to Determine their diagonal Shear Strength including Ultimate Shear Strength.

The major variables are ; concrete strength, Shear Span ratio(a/d) and longitudinal reinforcement ratio. The present ACI Shear design method was found to be too conservative. An equation is presented to predict the shear strength of high strength concrete up to 800 kg/cm^2 more accurately.

* 정희원, 한양대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

** 한양대학교 대학원 건축공학과, 석사과정.

● 1989.9.2접수. 본 논문에 대한 토론을 1990.3.31까지 본 학회에 보내주시면 1990. 6월호에 그 결과를 게재해 드립니다.

1. 서 론

1.1 연구의 필요성

근래에 와서 건축구조물의 고층화, 대형화 및 특수화(원자력 발전소, 해양구조물, 고속철도침목, 등)에 따른 콘크리트의 품질개선으로 일부 선진 외국을 중심으로 고강도화가 적극적으로 이루어져 왔으며, 많은 실용화가 되고 있다.⁽¹⁾

이러한 고강도 콘크리트 부재는 일반적으로 높은 취성(brittleness)을 동반하는데, 이와 더불어 갑작스러운 전단파괴(shear failure)가 수반되는 경우에는 구조부재의 안전적 설계라는 측면에서 매우 불리한 영향을 미칠 수 있다.⁽²⁾

그러므로 압축강도 증가에 따른 구조부재의 전단강도와 그의 파괴양상은 고강도 콘크리트가 주요 구조재료로서 쓰여지기 전에 미리 검토되어야 한다.

1.2 연구 내용 및 추진 방법

현재의 건설부 극한강도 구조규준⁽³⁾과 ACI 318-83⁽⁴⁾ 규준은 부재의 공칭 전단 강도가 $\sqrt{f_c'}$ 에 비례한다고 하고 있으며 Z_{sutty} 는 $\sqrt[3]{f_c'}$ 에 비례한다고 하고 있다. 그러나 이러한 제안식들은 콘크리트 강도가 비교적 낮은 (420 kg/cm^2) 경우의 압축강도에 대해서만 고려되고 있어 강도가 높은 경우에는 그 규준식의 정확도가 다소 불명확한 부분이 있다. 또한 기존의 연구결과에 따르면 전단강도에는 콘크리트 압축강도 외에도 부재의 전단스팬비(a/d), 전단보강의 유·무, 그리고 주근의 양 등이 전단강도에 상당한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.⁽⁵⁾

이에 본 연구는 고강도 콘크리트(800 kg/cm^2 이상)의 경우에 있어 전단스팬비 (a/d)를 3.0, 4.5, 6.0으로, 그리고 주근의 철근비를 평행철근비(P_b)의 0.5와 1.0배인 경우를 변수로 두어 각각의 효과를 검토하고자 한다.

따라서 본 연구에서는

1) 고강도 콘크리트 제조에 관한 재료 및 공시체 시험

2) 콘크리트 강도 증가에 따른 보 시험체의 전단 부담능력.

3) 전단스팬비(a/d)에 따른 고강도 콘크리트 보 시험체의 전단부담 능력.

4) 주근비(ρ_t)에 따른 보 시험체의 전단부담 능력 및 Dowel Action에 대한 연구

5) 그리고 실험결과와 기존 구조 설계식과의 비교, 분석 및 국내 실정에 맞는 구조 설계식의 제안 등을 위한 제반 연구를 주요 내용으로 한다.

2. 시험체 계획

2.1 보 시험체 계획

고강도 콘크리트 부재의 전단 능력을 조사하기 위하여 총 10개의 보 시험체를 제작하였다. 보 시험체의 상세는 그림1에 나타나 있다.

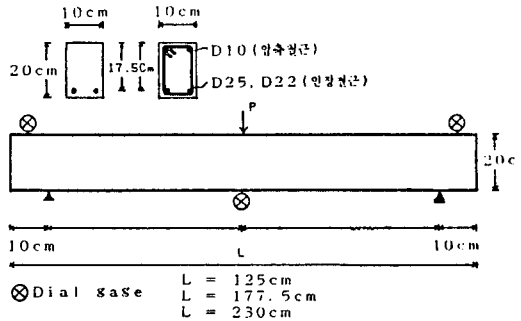


그림 1. 보 시험체

시험체를 대별하면

- 1) 전단스팬비에 따른 구분(a/d=3.0, 4.5, 6.0)
- 2) 주근비(ρ_b)에 따른 구분(U, P; 여기서 U = $0.5\rho_b$, P = $1\rho_b$, 단 ρ_b = balanced steel ratio).

예를 들면 HB3-U1은 다음을 의미한다.

- H : 고강도콘크리트(High Strength Concrete)
- B : 보(Beam)
- 3 : a/d=3
- U : $\rho_b=0.5\rho_b$ (Under Reinforced Concrete)
- 1 : 전단 보강(V_s)=0%

2.2 사용된 재료 및 최적 배합비

시멘트는 S사 제품의 2종 포틀랜드 시멘트를

대상으로 하였으며, 세골재는 강모래, 그리고 조골재는 최대크기 13mm의 화강암 채석을 사용하였다.

혼화제는 Naphtalene계의 Super-20을 사용하였고, 철근은 인천제철 제품의 SBD40의 D25, D22를 사용하였으며 KS B 6801의 규정에 의해 철근의 인장시험단을 제작하였고 KS B 0802의 금속재료 인장시험 방법에 따른 시험을 실시하였다.

콘크리트 배합은 요구되는 강도와 성형성에 맞게 설계되었으며, 이 때 W/C=0.3, 그리고 S.P.제 사용량을 1%로 하였다. 타설과 동시에 KS F 2402에 따른 슬럼프 시험을 실시하였다. 시험체는 온도가 30°C에서 수중 양생하였다.

3. 시 험

3.1 보 시험체 설치

본 실험에 사용된 보 시험기는 최대용량 100t 만능시험기이다. 모든 시험체는 전단 스펜비에 관계없이 중앙부 1점 가력을 하였다. 처짐을 조사하기 위하여 중앙부에 1/100mm, 양 단부의 회전을 측정하기 위하여 1/1000mm 정밀도를 갖는 전기 다이얼 게이지를 각각 1개씩 설치하였다.

3.2 하중재하

재하과정은 예상 종국 파괴하중의 1/3까지는 하중을 일정하게 증가시키는 하중조절 방식(Load Control), 그 후에는 가력속도를 가력점 중앙부의 처짐과 변형 측정기(Stain Indicator)에 나타나는 변형 등을 관찰하면서 변위조절(Deflection Control)방식으로 바꾸었다.

4. 실험결과

4.1 일반적 파괴양상

일반적인 파괴양상은 전단스팬비(a/d), 주근비(ρ_t)에 따라 다르게 일어났으나 모든 시험체는 종국적 사인장 균열에 의해 파괴되었으며, 주근

의 부착력 감소에 의해 주근을 따라 쪼개짐(Splitting)현상이 일어났다.

대체로 사인장 균열 이후 극한파괴에 이르는 보유강도(Reserve Strength)가 현저히 작아, 보통강도에서 보의 보거동(Beam Action)이 아취거동(Arch Action)으로 변함에 따른 이점이 줄어들음을 보여주고 있다. 이는 고강도 콘크리트 보에서 사균열이 늦게 발생한 후 곧바로 극한 파괴로 이어져 고강도 콘크리트의 취성파괴로 인한 안정성에 문제가 있음을 보여 주고 있다. 각 시험체에 대한 실험결과는 표1에, 균열양상은 그림2에 나타나 있다.

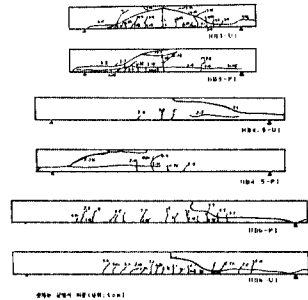


그림2 각 시험체별 균열 상태도

표1. 보 시험체별 실험결과 일람표

시험체명	(a/d)	f'c (kg/cm ²)	등가f'c (kg/cm ²)	전단실험치(t)		최대내력 (t)
				사균열	종국	
HB3-U1	3.0	861	800	4.60	4.93	9.85
HB3-P1	3.0	861	800	4.63	5.40	10.4
HB4.5-U1	4.5	861	800	4.13	4.45	8.90
HB4.5-P1	4.5	861	800	4.43	4.47	8.94
HB6-U1	6.0	861	800	3.86	4.00	8.00
HB6-P1	6.0	861	800	4.25	4.50	9.00

- f'c : 10cm×20cm 실린더
- 등가 : 15cm×30cm 표준실린더(f'c의 94%)
- 파괴양상은 그림2 참조.

4.2 하중-처짐 곡선

각 시험체는 그림 3에서 보듯이 전단 스펜비에 따라 강성 경사도의 차이는 있으나 최대하중 후 연성 능력이 없기 때문에 급격한 취성파괴 현상을 보여주고 있다.

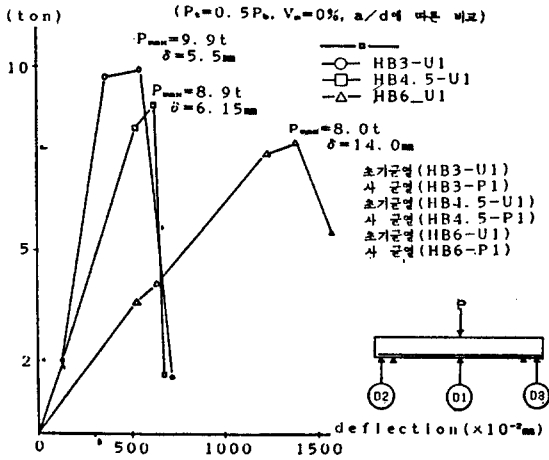


그림 3 각 시험체의 하중-처짐 곡선

4.3 최대 전단내력

각 시험체는 그림4에서 보듯이 주근비가 일정할 때 전단스팬비가 증가함에 따라 최대 전단내력은 줄어들고 있다. 즉 HB3-U1(9.85t)이 HB6-U1(8t)보다 전단내력이 1.23배 상승하고 있는데 이러한 전단내력은 보거동(Bean Action)에서 전단스팬비가 줄어들며 따라 아취거동(Arch Action)으로 변하여 보유내력이 증가되기 때문으로 보인다.

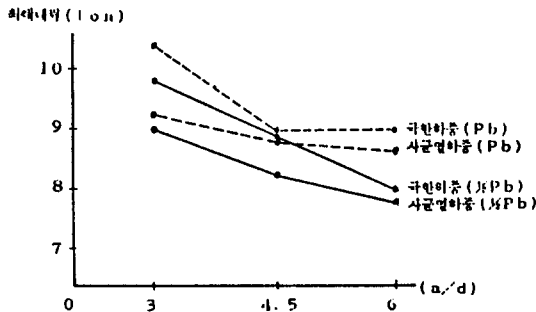


그림 4. 전단보강이 없는 시험체의 보유강도 비교

4.4 주철근량에 따른 하중-변형도

그림 5는 a/d=3인 경우 주근의 양에 따른 하중-변형도 관계를 보여주고 있다. 주근량이 적은 U1인 경우 ($\rho_1=0.5\rho_b$)의 극한 변형도가 1.5×10^{-3} 인데 비하여 P1($\rho_1=1.0\rho_b$)인 경우 0.8×10^{-3}

에 불과하다. 이러한 경향은 전단스팬비가 다르더라도 유사한 경향을 보여주고 있다.

이는 주근량이 많을 수록 주근의 변형에 비해 극한 전단파괴가 일찍 일어나기 때문으로 보인다.

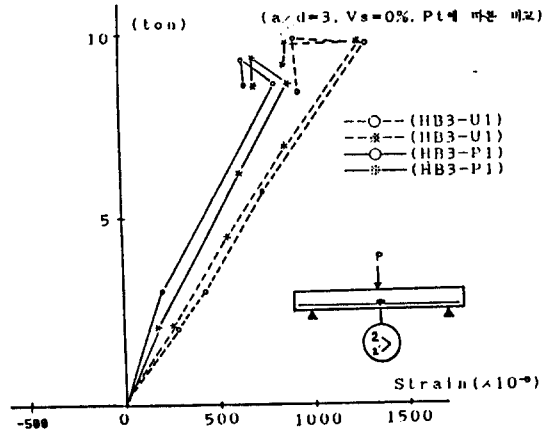


그림 5. 주근의 하중-변형도 곡선

5. 기존식에 대한 이론 및 실험적 해석과 새로운 제안식

5.1 기존의 규준식

기존의 많은 논문들은 콘크리트의 압축강도와 전단강도의 관계를 규명하기 위한 노력을 하여 왔다. 그 대표적인 연구들을 보면 다음과 같다.

a) ACI CODE 규준식.

$$\begin{aligned} V_{cr} &= 2\sqrt{f'c} \quad (\text{psi}) \\ &= 0.53\sqrt{f'c} \quad (\text{kg/cm}^2) \end{aligned} \quad (1)$$

ACI (11-6)식 ;

$$\begin{aligned} V_{cr} &= 1.9\sqrt{f'c} + 2500\rho \cdot d/a \quad (\text{Psi}) \\ &= 0.5\sqrt{f'c} + 176\rho \cdot d/a \quad (\text{kg/cm}^2) \end{aligned} \quad (2)$$

ACI 318-83 규준은 공칭전단 강도가 콘크리트 압축강도가 $\sqrt{f'c}$ 에 비례하는 식을 사용하였

다. 여기서 (1)식은 설계시에 사용하는 약산식인데 비하여 (2)식은 여러 변수를 고려한 비교적 정밀한 식이다.

두 식은 전단보강이 없는 보의 전단강도가 처음 사균열(Diagonal crack)형성시에 소요됨을 가정한 식들이다.

b) Zsutty의 제안식.

Zsutty는 콘크리트 보의 공칭전단강도가 $\sqrt[3]{f'c}$ 에 비례하는 식을 제안하였다.

사균열 전단응력식 ;

$$V_{cr} = 59 (f'c \cdot \rho \cdot d/a)^{1/3} \text{ (psi)} \quad - (3)$$

극한 전단응력식 ;

$$V_u = 63.4 (f'c \cdot \rho \cdot d/a)^{1/3} \text{ (psi)} \quad - (4)$$

c) A.G.Mhonde와 G.C. Frantz의 제안식⁽⁶⁾.

전단스팬비가 3.6, 주근비(ρ)가 3.36%로 고정하고 콘크리트 압축강도가 210~1050 kg/cm²의 범위를 가진 보의 실험을 통하여 다음 식을 제안하였다.

$$V_{cr} = 1.52\sqrt{f'c} + 93 \text{ (psi)} \quad - (5)$$

5.2. 기존식의 검토 및 실험결과와의 분석

기존 제안식들과 본 실험결과와 비교 분석한 것이 표2에 나타나 있다.

본 실험에 의한 사균열 전단응력(V_{cr})과 극한 전단응력(V_u)이 대체로 ACI규준식과 Zsutty의 제안식보다 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 주근비나 전단스팬비를 고려해 볼 때 실험값이 ACI (II-6)식보다 30~40%크게 나타났다. 이는 ACI규준이 420 kg/cm²이하의 압축강도를 가진 콘크리트를 기준으로 한 식으로 콘크리트의 압축강도 영향을 과대평가한 반면 전단스팬비와 주근비(ρ)의 영향을 과소평가하였기 때문인 것으로 보인다.

Zsutty의 식들은 대체로 사균열 전단응력(V_{cr})과 극한 전단응력(V_u)이 0~25%정도로 실험값보다 적은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 고강도 콘크리트에서 전단응력식이 $\sqrt{f'c}$ 보다 $\sqrt[3]{f'c}$ 에 더 가깝다는 것을 의미하는 것으로 보인다.

a) 전단스팬비에 따른 전단응력

그림 6은 사인장균열 응력을 기존식에 대하여 실험값을 전단스팬비에 따라 나타낸 것이다. ACI (II-3)식은 콘크리트로 변수만을 고려하였기 때문에 여기서 고려할 필요가 없으며, ACI(II-6)식과 비교하여 볼 때 실험값에 비해 매우 안전측인 것을 알 수 있으며, 이는 ACI(II-6)식이 전단스팬비와 주근의 전단강도에 미치는 영향을 과소평가한 반면, 콘크리트강도의 영향은 과대평가한 것으로 보인다. 대체로 a/d가 커짐에 따라서 사인장응력이 감소하는 것을 알 수 있는데 시험값으로 미루어 볼 때 ρ 가 적을수록, a/d가 클수록 전단응력의 감소비는 다소 커지고 있다. 이는 같은 하중을 보에 가할 때 a/d가 클수록 그 전단길이에서 더 큰 휨 모멘트가 생긴다는 것을 의미하며 휨균열이 사인장 균열로 진전될 가능성이 커지게 된다.

그림 7은 극한전단응력(Ultimate Shear Strength)이 a/d에 따라 어떻게 변화하는가를 보여 주고 있다. 실험결과를 Zsutty의 식 (4)와 비교해 볼 때 Zsutty의식이 안전측임을 알 수 있다. 대체로, 전단스팬비가 커질수록 극한 전단응력이 감소됨을 보이고 있다. 즉 주근량(ρ)이 증가할수록, a/d가 낮을수록 그 보가 부담하는 전단응력이 크게 된다.

b) 주근비(ρ)에 따른 전단응력

고강도 콘크리트 부재와 주근비에 따른 전단응력의 효과를 보기 위하여 주근량을 0.5 ρ 와 ρ 로 두고 관찰하였다. 그림8에서 ρ 가 증가함에 따라 사균열 전단응력이 증가함을 알 수 있다. ACI (II-6)식과 실험값의 비교에서 ρ 가 증가할 때, a/d의 감소에 따른 사인장 전단 응력의 증가비는 비슷하나 ACI(II-6)식이 보다 안전측임을 알 수 있다. 그러나 Zsutty(3)식과 비교해 볼 때 주근량이 적을 경우 안전측이나 주근량이 많을 경우 안전측이 아님을 볼 수 있다. 이 점으로 미루어 볼때 주근비(ρ)가 전단전이 (Shear Transfer) 메카니즘에 지대한 영향을 주게되며, 휨균열이 사균열로 진전되는 데 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

표2. ACI CODE 및 Zsutty식에 의한 전단응력과 실험치의 비교일람표

구분 시험 체명	전단 스팬 비 (a/d)	콘크 리트 강도 (kg/cm ²)	전단응력 실험치 (kg/cm ²)		전단응력계산치(kg/cm ²)				계산치/측정치(%)			
			사균열	종국	사 균 열				사균열	사균열	사균열	종국
					1)식	2)식	3)식	4)식				
HB3-U1	3.0	800	26.71	28.17	15.0	16.1	20.1	22.4	58.3	62.7	78.1	79.6
HB3-P1	3.0	80-0	26.46	30.86	15.0	18.1	26.3	28.2	56.7	68.4	99.3	91.5
HB4.5-U1	4.5	800	23.60	25.43	15.0	15.5	18.2	19.6	63.5	65.5	77.2	77.0
HB4.5-P1	4.5	800	25.30	25.64	15.0	16.8	23.0	24.7	59.2	66.4	90.7	96.6
HB6-U1	6.0	800	22.06	22.86	15.0	15.5	16.6	17.8	68.0	68.6	75.0	77.8
HB6-P1	6.0	800	24.29	25.71	15.0	16.1	20.9	22.4	61.7	66.4	85.9	87.2

- 콘크리트 강도는 size effect를 고려하여 각 3개의 공시체 평균값에 보정계수 0.94를 곱함.
- 1)식, 2)식 : ACI (II-3), ACI (II-6) (식ACI CODE318-83)
- 3)식 Zsutty : $59(f'c p d/a)^{1/3} - (\text{psi})$
- 4)식 Zsutty : $Vu = 63.4(f'c p d/a)^{1/3} - (\text{psi})$

5.3 새로운 제안식

고강도 콘크리트 보에 대한 현행 건설부 극한 강도 규준식이나 ACI (II-6)식은 전단강도 예측에 있어서 너무 안전적인 것으로 나타났기 때문에 보의 전단강도에 대하여 더 정확하고 합리적인 평가를 할 수 있는 새로운 제안식이 요구된다.

본 실험에 의하면 a/d가 낮을수록, 콘크리트 강도가 높을수록, 그리고 주근비가 클수록 전단응력이 예상값보다 크게 나타나므로 이러한 점들이 고려되어야 한다. 또한 ACI(II-6)식을 사용할 때 전단파괴에 대한 안전계수비는 f'c가 210 kg/cm²일 때 1.64이나 f'c가 1050 kg/cm²일 때 1.2로 감소하기 때문에 콘크리트강도에 매우 민감하다. 따라서 이식은 전단응력 평가에는 실제적이나 반면 전단파괴에 대한 안전계수로는 적당하지 않다.

위의 모든 점들을 고려해 볼 때 실험값으로 얻은 자료를 바탕으로 새로운 $\sqrt{f'c}$ 에 관계되는 식을 제안할 수 있다. 즉 ACI (II-6)식에서 과소평가한 a/d, 그리고 주근비(ρ_v)와 관계를 고려한 새로운 제안식은 다음과 같다.

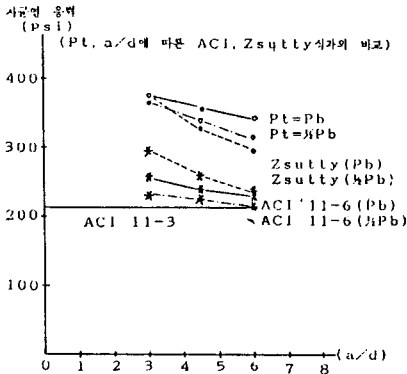


그림 6. 전단스팬비에 따른 사균열 응력

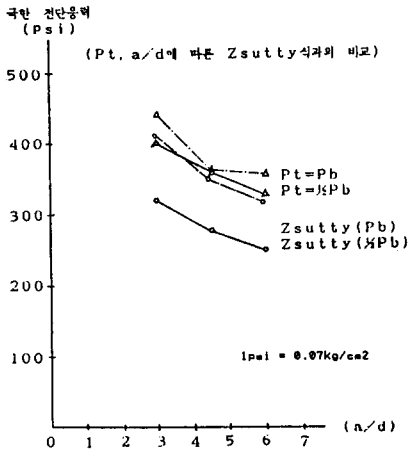


그림 7. 전단스팬비에 따른 극한 전단 응력

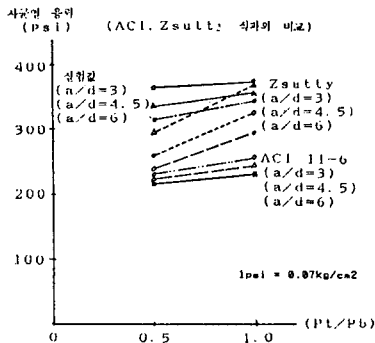


그림 8. 주근비에 따른 사균열 응력

$$V_{cr} = 2.9\sqrt{f'_c} + 3500 \cdot \rho \cdot d/a \text{ (psi)}$$

$$= 0.77\sqrt{f'_c} + 245 \cdot \rho \cdot d/a \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (5)$$

윗 식의 실험값 자료에 의한 표준편차는 0.476 kg/cm² (6.8psi)이다.

이 식은 그림 9에서 ACI식들과 비교되었는데 콘크리트 강도가 증가할 수록 ACI (II-6)식이 보다 안전측인 것으로 나타났다. 위 제안은 다시 Zsutty의 (3)식과 ACI (2)식과 함께 그림 10에서 비교되었는데, 기존의 두 식들이 강도가

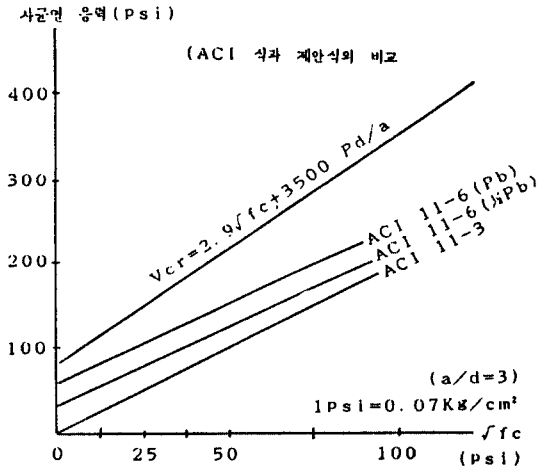


그림 9. $\sqrt{f'_c}$ 의 식에 따른 전단응력

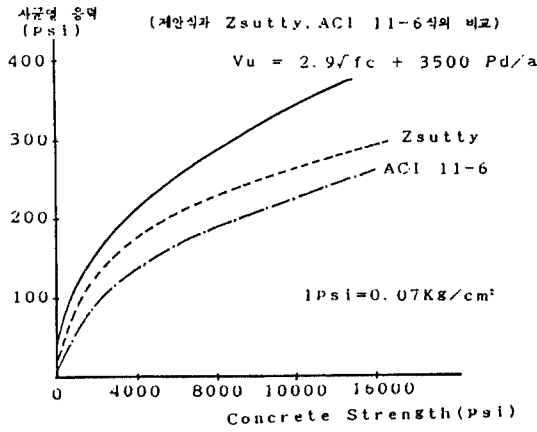


그림 10. 제안식에 대한 전단응력 비교

증가할수록 실제 콘크리트의 사인장 균열응력을 보다 낮게 평가하고 있음을 보여준다.

그림 7에는 Zsutty의 (3)식이 극한전단응력 예측시 주근비(Pt)가 큰 경우에 실험값과 잘 일치하고 있다. 이에 Zsutty가 제안한 $(f'_c)^{1/3}$ 에

대하여 실험자료를 근거로 회기분석하여 다음과 같은 식을 얻었다.

$$V_u = 13.8(f'_c)^{1/3} + 3300 \cdot \rho \cdot d/a \text{ (psi)}$$

$$= 2.34(f'_c)^{1/3} + 231 \cdot \rho \cdot d/a \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (6)$$

윗 식의 실험값 자료에 의한 표준편차는 0.49 kg/cm² (7psi)이다.

제안식 (6)과 Zsutty의 (3)식과의 비교는 그림 11에 나타나 있다. 대체로 적은 표준 편차로 Zsutty식과 같은 경향을 보이고 있다.

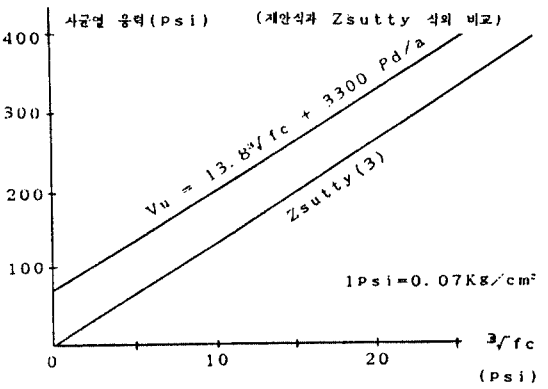


그림 11. $\sqrt[3]{f'_c}$ 의 식에 따른 전단응력 비교

6. 결 론

본 연구는 전단보강이 없는 고강도 철근 콘크리트($f'_c=800 \text{ kg/cm}^2$)부재의 전단강도에 대한 시험결과를 전단스팬비($a/d=3,4,5,6$), 그리고 주근비($\rho_t=0.5\rho_n, \rho_n$)에 따라 고찰한 것으로 중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 전단스팬비(a/d)가 3과 6사이의 보에 대한 현재의 ACI (II-3)과 (II-6)식은 고강도 콘크리트의 경우 각각 실험값의 1.7배와 1.61배에 달하고 있어 너무 안전측인 것으로 보인다. 그러나 이러한 지나친 안전율은 콘크리트 강도가 낮을 수록 낮아지고 있다.

2) ACI (II-6)은 a/d 와 주근량의 효과를 과소평가하고 있고 콘크리트 강도의 증가에 대한 잇점은 과대평가하고 있다.

3) 고강도 콘크리트를 사용한 보의 전단강도를 추정하기 위한 새로운 회기 분석식이 제안되

었다.

4) 사인장 균열 이후 극한 파괴에 이르는 보유강도(Reserve Strength)는 보통강도의 그것보다 현저히 낮아 부재의 안전성에 대한 문제를 던져주고 있어 그에 대한 대책이 요구된다.

감사의 글

이 論文은 과학기술처의 1988년도 특정연구과제지원에 의하여 연구되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) ACI 363, "State of the Art Report on High Strength Concrete", ACI Report No. ACI 363R-84, July/Aug., 1984.

(2) Shin, Sung-Woo, Ghosh S.K., Moreno J., "Flexural Ductility of Ultra-High Strength Concrete Members", ACI Structural Journal, July/Aug. 1989.

(3) 건설부, "극한강도 설계법에 의한 철근 콘크리트 구조계산 기준 및 해설", 대한 건축학회, 1988. 12.

(4) ACI 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)", ACI, Detroit, 1983.

(5) Elzanaty, A. H., Nilson, A.H., Slate, F.O., "Shear Capacity of Reinforced Concrete," Journal of ACI., Mar./April, 1986.

(6) Andrew G. Mphonde, Gregory C. Frantz, "Shear Test of High and Low Strength Concrete Beams with Stirrup", Journal of ACI, 1984.