

스터럽이 없는 고강도 철근콘크리트 보의 전단강도 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Shear Strength of Reinforced High Strength Concrete Beams without Stirrups

김진근* 박연동**
Kim, Jin Keun Park, Yon Dong

요약

일반적으로 스테럽이 없는 철근콘크리트 보의 전단강도는 콘크리트 압축강도, 주철근비, 전단스팬비 및 보 유효깊이에 좌우된다는 것이 많은 연구를 통하여 밝혀지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 거동 및 전단강도 특성을 분석하기 위하여 주철근비, 전단스팬비 및 보 유효깊이를 변수로 두고 총 22개의 단철근 보 실험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험 결과는 ACI 규준식, Zsutty 식 및 Bazant & Kim 식의 예측값들과 함께 비교, 분석되었는데, ACI 규준식은 주철근비 및 전단스팬비의 효과를 과소평가할 뿐만 아니라 유효깊이가 915mm 인 큰 보의 경우 안전측이 아니어서 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. Zsutty 식은 주철근비의 효과를 적절하게 평가하는 것으로 나타났으며, Bazant & Kim 식은 유효깊이 증가에 따른 전단강도 감소 경향을 잘 예측하는 것으로 나타났다. 또한, 다른 연구자들의 실험치와 비교, 분석해 본 결과 주철근비 및 전단스팬비의 효과는 콘크리트 압축강도 수준에 따라 큰 변화가 없는 것으로 판단된다.

Abstract

In general, shear strength of reinforced concrete beams without stirrups is dependent on the compressive strength of concrete, the longitudinal steel ratio, the shear span to depth ratio and the effective depth. In this study, twenty two singly reinforced high strength concrete beams without stirrups were tested to investigate their behavior and to determine their ultimate shear stresses. Test variables were longitudinal steel ratio, shear span to depth ratio and effective depth. Test results were analyzed and compared with strengths predicted by ACI code equation, Zsutty's

* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

** 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1993년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 1993년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

equation and Bazant & Kim's equation. As the results, ACI code equation underestimated the effects of ρ and a/d and was seriously unconservative for beams with d of 915mm. Zsutty's equation predicted well the trend of test data with variation of ρ . Bazant & Kim's equation predicted well the trend of test data with variation of d . There was no clear difference in the effects of longitudinal steel ratio and shear span to depth ratio on the shear strength of reinforced concrete beams with increasing of compressive strength of concrete.

Keywords : high strength concrete, shear strength, longitudinal steel ratio, shear span to depth ratio, effective depth, compressive strength, size effect

1. 서 론

콘크리트 관련 기술의 발전과 더불어 건설 구조물에 사용되는 콘크리트의 강도수준은 점점 더 높아지고 있다. 또한, 각종 특수, 대형 구조물의 출현 및 이에 따른 건설 재료의 고성능화 추세로 인하여 고강도 콘크리트 사용에 대한 요구가 크게 증가하고 있는 실정이며, 실제로 많은 구조물들이 고강도 콘크리트를 사용하여 건설되고 있다. 그러나 현재의 구조 부재에 대한 설계 기준식들은 대부분 보통강도 콘크리트를 사용한 실험 결과에 근거하고 있으며, 고강도 콘크리트를 사용함에 따른 변동요인을 고려해주지 못하고 있다. 또한, 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트보다 취성이 높아 부재의 연성 확보에 불리한 영향을 미치므로 고강도 콘크리트를 사용한 부재의 사용성과 안전성을 확보하기 위해서는 그 역학적 거동에 관한 정확한 규명과 더불어 설계 기준식에 대한 재검토가 이루어져야 하겠다.

철근콘크리트 보의 전단강도는 콘크리트 압축강도(f_c'), 전단스팬비(a/d), 주철근비(ρ) 및 보 유효깊이(d) 등의 함수이다. 현재의 전단강도에 대한 ACI 기준식⁽¹⁾은 대부분 압축강도 41MPa(420 kg/cm²) 이하의 보통강도 콘크리트 보에 대한 실험결과에 근거하고 있으며, 이를 고강도 콘크리트 보에 적용할 경우 일반적으로 안전율이 감소한다고 한다.⁽²⁾ ACI 기준에서는 이의 부분적인 보완 방법으로 압축강도 69MPa(700kg/cm²) 이상의 고강도 콘크리트 부재에는 69MPa(700kg/cm²)

일 때의 전단강도 값을 사용하도록 권장하고 있다. 또한, ACI 기준식은 보 유효깊이가 전단강도에 미치는 효과를 고려해주지 않고 있으며, 주철근비 및 전단스팬비의 효과를 제대로 고려해주지 못하고 있는 것으로 나타나 있다.^(3,4) Zsutty 식⁽⁵⁾ 및 Bazant & Kim 식⁽⁶⁾의 경우, 전단강도를 비교적 정확하게 예측하는 것으로 알려져 있으나 두 식 모두 보통강도 콘크리트 보에 대한 실험 결과에 근거하고 있어 고강도 콘크리트 보의 전단강도 예측 모델식으로 사용하기 위해서는 이의 검증 및 보완이 필요할 것으로 사료된다.

철근콘크리트 구조물의 대표적인 취성파괴의 일종인 보 전단파괴는 유효깊이가 증가함에 따라 강도가 감소하는 뚜렷한 크기효과(size effect)를 나타내며, 이러한 현상은 다수의 연구자들에 의해 실험적 또는 이론적으로 연구되어 왔다.^(6~12) 그러나, 보 전단강도의 크기효과에 관한 대부분의 연구가 보통강도 콘크리트를 사용한 경우에 대해서 수행되어 왔으며 고강도 콘크리트를 사용한 경우에 대해서는 그 연구결과가 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 위와 같은 사실에 기초하여 주철근비, 전단스팬비 및 유효깊이를 실험 변수로 두고 실험을 수행하여 각 변수에 따른 전단강도 특성 및 파괴 양상을 실험적으로 분석하고 이를 토대로 하여 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 전단강도 특성을 규명해 보고자 한다.

2. 실험

2.1 실험체 개요

주철근비, 전단스팬비 및 유효깊이의 변화에 따른 전단강도 특성을 파악하기 위하여 1종류의 표준 실험체에 대하여 주철근비와 전단스팬비를 각각 4종류, 유효깊이를 5종류로 변화시켜 각 변수에 대하여 2개씩 총 22개의 보 실험체를 제작하였다. 모든 실험체는 복부를 보강하지 않은 단철근 보이며, 부착과피가 발생하지 않도록 주철근의 부착길이를 충분히 확보하였다. 표준 실험체는 폭 170mm, 높이 300mm 크기의 단면에, 주철근비 0.019, 전단스팬비 3.0으로 설계되었다. 실험체의 상세는 Table 1 및 Fig. 1과 같다.

2.2 실험 재료

시멘트는 보통 포트랜드 시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 일반 강모래를 사용하였고, 굵은골재는 최대크기 25mm의 쇄석을 사용하였다. 고강도 콘크리트의 작업성을 확보하기 위하여 ASTM C494 Type A 및 F에 해당하는 감수제 및 고유동화제를 병용하였다. 콘크리트는 현장 B/P에서 강제식 믹서와 레미콘 트럭을 사용하여 제조하였으며, 그 배합비는 Table 2에 나타내었다. 모든 보 실험체는 동시에 타설되었고, 타설 도중 대표적인 시료를 채취하여 $\phi 100 \times 200$ mm의 압축강도 측정용 공시체를 제작하였다. 사용된 고강도 콘크리트의 압축강도는 Table 2에 나타난 바와 같이 53.7MPa(547kg/cm^2)이었으며, 8개의 공시체를 실험하여 그 평균값으로 취하였다. 철근은 비교적 고강도인 SD 40 철근을 사용하였으며, 측정된 항복강도는 $477\text{MPa}(4,862\text{kg/cm}^2)$ 이었다.

2.3 가력 장치 및 재하 방법

B-5, B-8, B-10, B-11 실험체를 제외한 모든 실험체에 대해서 가력 프레임에 500kN 용량의 유압잭을 설치하여 가력하였으며, 하중은 250kN

Table 1 Specimen details and test results

specimen No.	d (mm)	L (mm)	a/d	ρ	shear strength (MPa)
B-1-1	272	2300	3.0	0.010	1.26
B-1-2	272	2300	3.0	0.010	1.22
B-2-1	270	2300	3.0	0.019	1.54
B-2-2	270	2300	3.0	0.019	1.56
B-3-1	267	2700	3.0	0.034	1.72
B-3-2	267	2700	3.0	0.034	1.73
B-4-1	255	2700	3.0	0.046	2.07
B-4-2	255	2700	3.0	0.046	2.20
B-5-1	270	1500	1.5	0.019	4.63
B-5-2	270	1500	1.5	0.019	4.69
B-6-1	270	3100	4.5	0.019	1.45
B-6-2	270	3100	4.5	0.019	1.39
B-7-1	270	3900	6.0	0.019	1.29
B-7-2	270	3900	6.0	0.019	1.33
B-8-1	67	900	3.0	0.019	2.42
B-8-2	67	900	3.0	0.019	2.84
B-9-1	142	1400	3.0	0.019	1.70
B-9-2	142	1400	3.0	0.019	1.63
B-10-1	550	4300	3.0	0.019	1.37
B-10-2	550	4300	3.0	0.019	1.30
B-11-1	915	8200	3.0	0.019	0.99
B-11-2	915	8200	3.0	0.019	1.21

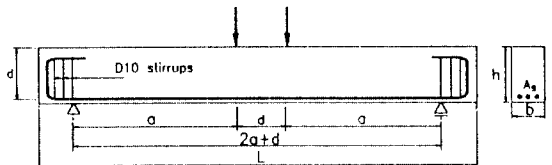


Fig. 1 Details of test specimen

Table 2 Mix proportions and compressive strength of concrete

cement content (kg/m ³)	w/c (%)	s/a (%)	retarder (%)	S.P. (%)	Slump (mm)	comp. strength (MPa)
500	30	34	0.2	1.0	168	53.7

용량의 로드셀을 사용하여 측정하였다. B-5, B-10, B-11 실험체의 경우는 극한하중이 높을 것으로 예상되어 1,000kN 용량의 유압잭 및 로드셀을 사용하여 실험을 수행하였으며, B-8 실험체의 경우는 실험체의 크기 및 재하 조건 등을 고려하여 만능실험기(U.T.M.)를 사용하여 실험을 수행하였다.

하중은 Fig. 1에 나타나 있는 바와 같이 보의 중앙으로부터 각각 $d/2$ 만큼 떨어진 지점에서 2점 가력하였으며, 가력 방식은 하중 조절로 하였다(B-7 실험체 제외). B-7 실험체의 경우는 휨파괴가 발생할 것으로 예상되었기 때문에 예상 극한하중의 80% 정도까지는 하중 조절 방식으로 실험을 수행하다가 그 이후에는 보 중앙점의 변위를 기준으로 하는 변위 조절 방식으로 바꾸어 실험을 수행하였다.

각 하중단계마다 보 중앙부의 처짐, 보 중앙부 및 양단에서의 철근의 변형도가 측정되었으며, 균열 발생 양상을 도시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 일반적 파괴 양상

전단스팬비가 3.0인 보들의 경우, 초기 하중단계에서는 순수 휨 구간에서 먼저 휨 균열이 발생하였다. 하중이 증가함에 따라 순수 휨 구간에서의 균열이 진전되었으며, 전단스팬 구간에서도 휨 균열이 발생하기 시작하였다. 계속적인 하중의 증가에도 불구하고 중앙부 휨 균열의 진전은 크지 않았으나 전단스팬에 발생한 휨 균열의 선단 부분 또는 새로운 위치에서 가력점을 향하여 기울어지는 사인장 균열이 발생하였으며, 이 사인장 균열이 발전하면서 보의 파괴로 이어졌다. 모든 실험체는 사인장 균열이 뚜렷하게 발전한 직후 파괴되었으나 유효깊이가 가장 작은 B-8 실험체의 경우는 사인장 균열이 완전히 발전한 이후에도 상당한 보유강도(reserve strength)를 보이다가 파괴로 이어졌다.

Fig. 2는 주철근비에 따른 보의 균열 형태 및 파괴 양상을 나타내고 있는데, 주철근비가 감소함에 따라 초기 휨 균열이 발생하는 하중이 낮아지고 균열의 진전이 빨라지는 경향을 보여주었다. 그러나 균열 간격이나 극한강도까지의 균열 진전 형태등은 모든 실험체에서 유사한 경향을 보여주었다. 한편, 파괴면의 형태에 있어서는 주철근비가 증가할수록 파괴를 유발시킨 주 사인장 균열이

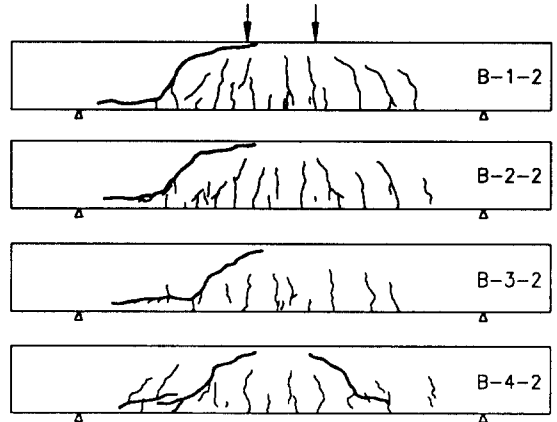


Fig. 2 Crack patterns and failure types with ρ

보의 중앙부에 접근하여 발생하였으며, 균열의 기울기도 증가하였다.

Fig. 3은 주철근비에 따른 고강도 철근콘크리트 보의 하중-처짐 관계를 도시한 것인데, 그림에 나타나 있는 바와 같이 기울기의 차이는 있으나 모든 보가 휨 균열 발생 이후 하중이 거의 선형적으로 증가하다가 극한하중에 도달하면 파괴가 발생하는 취성파괴 현상을 보여주었다.

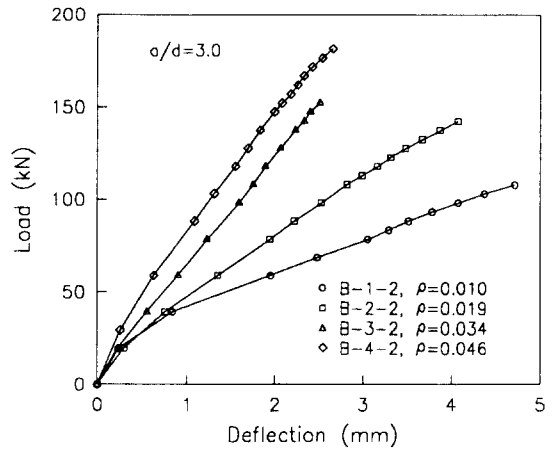


Fig. 3 Load-deflection curves with increasing ρ

Fig. 4는 전단스팬비에 따른 균열 형태 및 파괴 양상을 보여주고 있다. 전단스팬비가 1.5인 B-5 실험체의 경우, 전단스팬비가 3.0, 4.5인 실험체와는 상이한 균열 발생 및 진전 양상을 보여주었

다. 즉, 초기 하중단계에서는 순수 휨 구간에서 먼저 휨 균열이 발생하였으나 하중이 증가함에 따라 낮은 하중단계(극한하중에 비교하여)에서 휨 균열과는 독립적으로 전단스팬내의 실험체 복부에 전단 균열이 발생하였다. 하중이 증가함에 따라 전단 균열이 발전하였으며, 전단스팬 내에도 휨 균열이 발전하였다. 계속적인 하중의 증가에 따라 전단 균열은 더욱 발전하였으나 휨 균열은 그다지 발전하지 않았으며, 전단 균열이 발생한 이후 하중이 상당히 증가한 다음 전단-압축 파괴의 형태로 실험체가 파괴되었다. 전단스팬비가 4.5인 B-6 실험체의 경우, 균열 발생 및 진전 단계는 전단스팬비가 3.0인 실험체들과 유사하였다. 그러나, 휨 균열이 좀 더 복잡하게 많이 발생하여 진전되었으며, 전단 균열은 좀 더 낮은 하중단계에서 나타나, 나타난 직후 바로 실험체의 파괴로 이어졌다. 전단스팬비가 6.0인 B-7 실험체의 경우는 순수 휨 구간 및 전단스팬 구간에 휨 균열이 발생한 이후 계속적인 하중의 증가에도 전단 균열이 발전하지 않아 전단파괴가 발생하지 않았으며, 극한하중에 도달한 다음 하중이 서서히 감소하면서 변형이 상당히 증가한 후 압축부 콘크리트가 파괴되는 휨 파괴가 발생하였다.

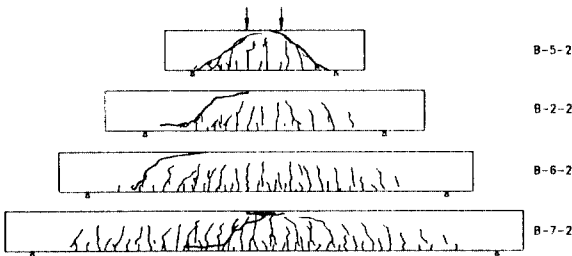


Fig. 4 Crack patterns and failure types with a/d

Fig. 5는 전단스팬비에 따른 보의 하중-처짐 관계를 도시한 것인데, 그림에 나타나 있는 바와 같이 전단파괴가 발생한 실험체의 경우는 전단스팬비에 따라 기울기의 차이는 있으나 하중이 거의 선형적으로 증가하다가 극한하중에 도달하면 갑자기 파괴가 발생하는 취성파괴 현상을 보여주었으며, 휨 파괴가 발생한 B-7 실험체의 경우는 극한

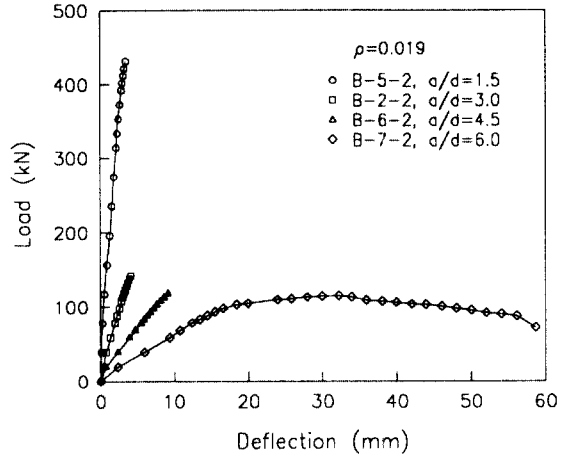


Fig. 5 Load-deflection curves with increasing a/d

하중에 도달한 이후에도 변형이 상당히 많이 증가한 다음 파괴가 발생하는 연성파괴 현상을 보여주었다.

Fig. 6은 유효깊이에 따른 보의 균열 양상을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 유효깊이가 증가함에 따라 주균열의 간격이 커지고 있는데, 이러한 주균열 간격의 증가는 유효깊이의 증가에 비례하여 모든 보에서 비슷한 갯수의 주균열이 관찰되었다.

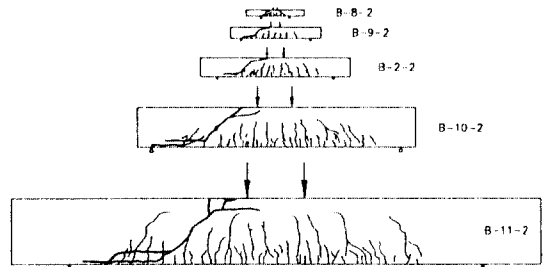


Fig. 6 Crack patterns and failure types with d

Fig. 7은 유효깊이에 따른 각 실험체의 하중-처짐 관계를 도시한 것인데, 이론적으로 동일한 강성(stiffness)를 보유한 B-9 실험체와 B-2 실험체, B-10 실험체와 B-11 실험체는 각각 거의 유사한 기울기를 나타내었다. 한편, 동일한 강성을 보유한 경우 유효깊이가 작은 보가 큰 보에 비하여 약간 완만한 기울기를 보여주었는데, 그 이유

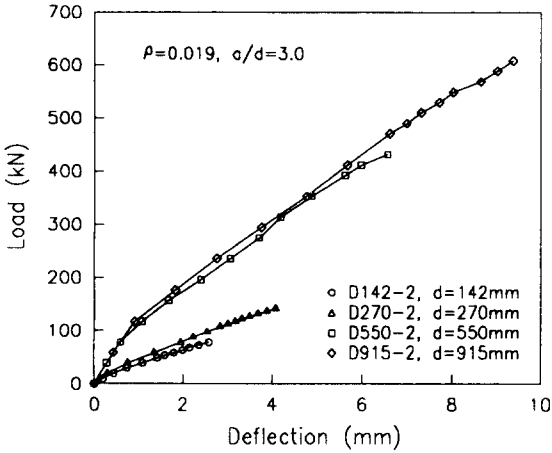


Fig. 7 Load-deflection curves with increasing d

는 동일한 하중 하에서는 유효깊이가 작은 보가 큰 보에 비하여 높은 응력 수준을 유지하게 되므로 상대적으로 균열이 많이 발달하여 강성이 저하되었기 때문으로 판단된다.

3.2 전단강도

기존의 많은 연구자들이 철근콘크리트 보의 전단강도를 정확하게 예측하기 위한 많은 연구를 수행하였으며, ACI 규준식과 더불어 보의 전단강도를 예측하는 대표적인 모델식으로는 Zsutty 식 및 크기효과(size effect)를 고려한 Bazant & Kim 식이 있다. 각 모델식의 형태는 다음과 같다.

ACI 규준(11-6) 및 (11-30) 식 (단위: MPa);

$$v_c = 0.157 \sqrt{f'_c} + 17.25 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \quad \left(\frac{a}{d} \geq 2.5\right) \quad (1)$$

$$v_c = (3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d}) \times [\text{eq.}(1)] \quad \left(\frac{a}{d} < 2.5\right) \quad (2)$$

Zsutty 식 (단위: MPa);

$$v_u = 2.1746 (f'_c \rho \frac{d}{a})^{1/3} \quad \left(\frac{a}{d} \geq 2.5\right) \quad (3)$$

$$v_u = (2.5 \frac{d}{a}) \times [\text{eq.}(3)] \quad \left(\frac{a}{d} < 2.5\right) \quad (4)$$

Bazant & Kim 식 (단위: MPa);

$$v_u = \frac{0.831 \sqrt[3]{\rho}}{\sqrt{1+d/(25d_a)}} \times (\sqrt{f'_c} + 249 \sqrt{\frac{\rho}{(a/d)^5}}) \quad (5)$$

여기서, d_a = 최대골재크기

그러나 위의 식들은 보통강도 콘크리트 보의 실험 결과를 근거로 하여 모델링한 식들이기 때문에 이들을 고강도 콘크리트 보에 적용할 경우에는 적절한 검토가 선행되어야 할 것이다.

최근의 고강도 콘크리트 보의 전단강도 특성에 관한 연구에 의하면,^(2,4,13-18) 일반적으로 콘크리트가 고강도화될수록 전단파괴는 더욱 갑작스럽게 발생하여 취성화되는 경향을 나타내며, 파괴면은 보통강도 콘크리트보의 경우보다 더 매끈해진다. 또한, 콘크리트 강도 증가에 의한 전단강도 증가의 효과는 전단스팬비가 감소할수록 증가하는 경향이 있다. 사인장 파괴의 경우, ACI 규준식은 콘크리트 압축강도 증가에 의한 효과를 과대평가하고 있으며, 실제로 전단강도는 Zsutty 식에서와 같이 압축강도의 1/3 제곱에 근접하여 비례함을 보여주고 있다.

3.2.1 주철근비에 따른 특성

Fig. 8은 주철근비에 따른 전단강도 실험 결과를 ACI 규준식, Zsutty 식 및 Bazant & Kim 식과 비교 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 ACI 규준식은 주철근비의 증감에 따른 전단강도 증감의 효과를 적절하게 고려해주지 못하고 있어, 주철근비가 높은 경우에는 안전율이 증가하고 있으나 주철근비가 0.01 이하의 경우에는 안전율이 1.0 이하로 떨어지는 경향을 보여주고 있다. 이러한 실험 결과는 고강도 콘크리트 보의 경우, ACI 규준식이 콘크리트 강도 증가의 효과를 과대평가하여 전단스팬비가 크고 주철근비가 낮은 경우에는 안전율이 1.0 이하로 떨어진다는 다른 연구자들의 연구결과^(3~4)와 유사한 경향을 보여주고 있다. 본 실험의 결과만을 놓고 판단할 때, 고강도 콘크리트 보의 경우 Bazant & Kim 식은

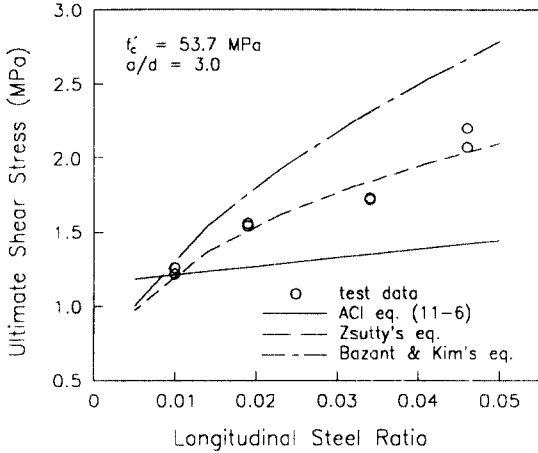


Fig. 8 Effect of ρ on the shear strength

주철근비의 증가가 전단강도 증가에 미치는 영향을 과대평가하고 있으며, Zsutty 식은 이 효과를 적절하게 평가하고 있는 것으로 나타났다. 즉, 고강도 콘크리트 보의 전단강도는 주철근비의 1/3 제곱 정도에 비례하고 있는 것으로 판명되었다.

Fig. 9는 주철근비가 전단강도에 미치는 영향을 보통강도 콘크리트의 경우에 대해서 실험한 Krefeld 등⁽¹⁹⁾의 실험 결과와 고강도 콘크리트의 경우에 대해서 실험한 Elzanty 등⁽²⁰⁾의 실험 결과와 함께 도시한 것이다. 압축강도 이외의 요인(전단스팬비, 유효깊이 등)의 차이에 의해서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해서 현재까지 발표된 많은 실험치들 중에서 비교적 본 실험의 조건과 유사한 실험치들을 선택하여 비교하였는데, Krefeld 등의 실험치는 압축강도가 20.0MPa (204kg/cm²)인 경우, a/d=3.8, d=240mm 이고, 압축강도가 21.0MPa(214kg/cm²)인 경우는 a/d=4.8, d=255mm이다. 콘크리트의 압축강도가 65.6MPa(669kg/cm²)인 Elzanty 등의 실험치는 a/d=4.0, d=271mm이다. 그림에 나타나 있는 바와 같이, 주철근비의 증가에 따른 전단강도 증가의 경향이나 크기가 압축강도 수준에 관계없이 유사하여, 주철근비가 전단강도에 미치는 영향은 콘크리트의 강도 수준과는 거의 상관이 없는 것으로 판단된다.

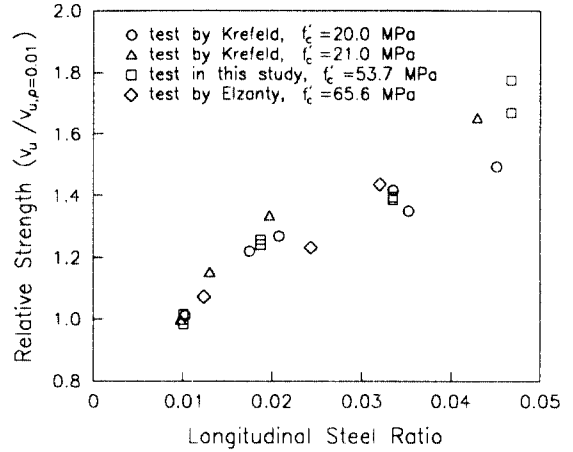


Fig. 9 Effect of ρ with strength level

3.2.2 전단스팬비에 따른 특성

Fig. 10은 전단스팬비에 따른 전단강도 실험의 결과를 ACI 규준식, Zsutty 식 및 Bazant & Kim 식과 비교, 도시한 것이다. 그림에 나타나 있는 바와 같이 ACI 규준식은 전단스팬비의 감소에 따른 전단강도 증가의 효과를 적절하게 고려해주지 못하고 있음을 알 수 있다. Zsutty 식 및 Bazant & Kim 식의 경우는 전단스팬비의 감소에 따른 전단강도 증가의 경향을 비교적 적절하게 평가하고 있는 것으로 나타났는데, 예측값의 크기에 있어서는 전단스팬비가 3.0 이상인 경우에는 Zsutty 식이 더 정확하였으며, 전단스팬비가

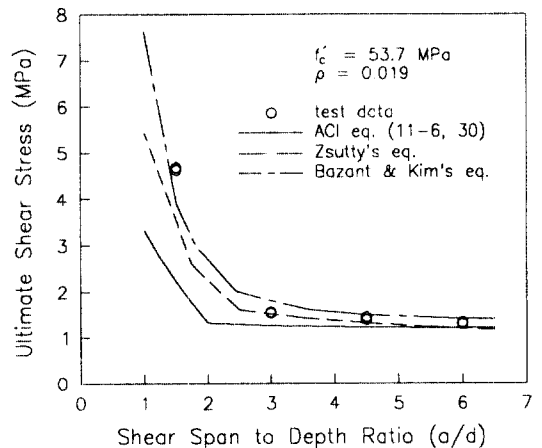


Fig. 10 Effect of a/d on the shear strength

1.5인 경우에는 Bazant & Kim 식이 더 정확하게 실험 결과를 예측하였다. 또한, ACI 규준식의 경우 예측값이 모든 전단스팬비에 대해서 안전측이었으며, 전단스팬비가 감소함에 따라 안전율이 점점 증가하여 전단스팬비가 1.5인 경우 안전율이 2.0 이상으로 증가하였다.

일반적으로 보 단면의 이론적인 휨강도에 대한 파괴시의 극한강도의 비율로 나타내는 상대강도 (M_i/M_{fi})는 전단스팬비가 작아짐에 따라 전단스팬비 6.0 부근에서부터 감소하기 시작하여 전단스팬비 2.5 부근에서 최소값을 가진다. 2.5 이하의 전단스팬비에서는 아치 작용의 영향으로 인해 전단스팬비가 작아짐에 따라 상대강도가 증가하여 전단스팬비 1.0 부근에서 이론적 최대값인 1에 이른다. Fig. 11은 전단스팬비에 따른 본 실험의 결과 및 본 실험과 유사한 조건에서 보통강도 콘크리트를 사용하여 실험한 Kani⁽²⁰⁾의 실험 결과를 상대강도로 나타낸 것인데, 최소값 0.55 정도의 전형적인 전단 계곡(shear valley) 형태를 보여주고 있다. 또한, 콘크리트 강도 수준의 차이에도 불구하고 두 실험의 결과가 매우 유사함을 알 수 있다.

전단스팬비가 보의 전단강도에 미치는 영향을 콘크리트 강도 수준에 따라 분석해 보기 위하여 본 실험의 결과를 보통강도 콘크리트를 사용한 경우에 대해서 실험한 Kani⁽⁶⁾ 및 Leonhardt 등⁽⁷⁾의 실험 결과와 고강도 콘크리트를 사용한 경우에 대해서 실험한 Ahmad 등⁽⁴⁾의 실험 결과와 함께 Fig. 12에 도시하였다. 주철근비의 영향을 비교한 Fig. 9의 경우에서와 같이 압축강도 이외의 요인(주철근비, 유효깊이)의 차이에 의해서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해서 본 연구와 유사한 조건에서 수행된 연구들의 실험치를 선택하여 비교하였다. 비교된 실험치 중 Kani의 실험치는 $\rho=0.026$, $d=274\text{mm}$ 이고, Leonhardt 등의 실험치는 $\rho=0.021$, $d=270\text{mm}$ 이며, Ahmad 등의 실험치는 $\rho=0.023$, $d=208\text{mm}$ 이다. 그림에서 알 수 있듯이, 아치 작용에 의해 전단스팬비 2.5 부근에서부터 전단스팬비가 감소함에 따라 전단강도가 매우 급격히 증가하였으며, 3.0 이상에서는 전단스팬비가 증가함에 따라 전단강도가 서서히 감소하였다. 이러한 전단강도 증감의 경향

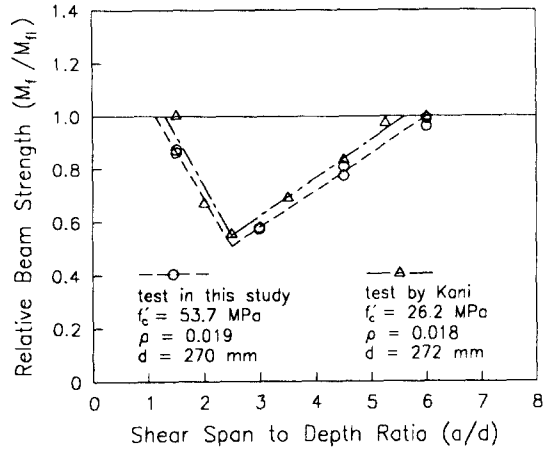


Fig. 11 Effect of a/d on the relative beam strength

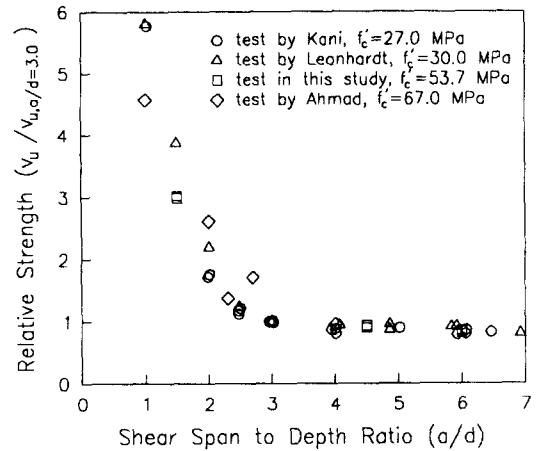


Fig. 12 Effect of a/d with strength level

및 크기는 콘크리트의 압축강도 수준에 관계없이 유사하여, 보 전단강도에 있어서의 전단스팬비 효과는 콘크리트 강도 수준에 따라 거의 차이가 없을 것으로 판단된다.

3.2.3 유효깊이에 따른 특성

스터립을 보강하지 않은 철근콘크리트 보의 전단강도에 대한 크기효과는 Leonhardt,⁽⁷⁾ Kani,⁽⁶⁾ Taylor,⁽⁹⁾ Iguro,⁽¹⁰⁾ Bazant⁽¹¹⁾ 등에 의해서 실험적으로 연구되었는데, 이들은 모두 보통강도 콘크리트를 사용하여 실험을 수행하였다. 실험결과에 의하면, 보의 유효깊이가 증가할수록 전단강도는

뚜렷하게 감소하여 명백한 크기효과를 나타내었다.

Fig. 13은 본 연구에서 수행한 고강도 철근콘크리트 보의 전단강도 실험 결과를 각 모델식과 비교하여 도시한 것인데, ACI 규준식과 Zsutty 식의 경우, 유효깊이 증가에 대한 전단강도 감소의 효과를 고려해주지 않고 있어 동일한 예측값을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 유효깊이가 증가함에 따라 전단강도는 감소하여 유효깊이가 915mm인 큰 보의 경우, ACI 규준식이 안전측이 아니어서 대형 고강도 콘크리트 구조 부재의 전단강도를 판정할 경우 이에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다. Zsutty 식의 경우, 유효깊이가 270mm인 보와 그 결과가 가장 근접하였는데, 그 이유는 실험실에서 전단강도 예측을 위하여 수행된 실험들은 대부분 이 정도 크기의 실험체를 사용하여 수행되었으며, Zsutty 식은 그 결과들을 조합하여 회기분석한 모델식이기 때문인 것으로 판단된다. Bazant & Kim 식의 경우, 예측값의 크기에 있어서는 실측치보다 다소 크게 평가하고 있는 것으로 나타났으나 (3.2.1에서 설명한 바와 같이 주철근비의 효과를 과대평가하기 때문인 것으로 사료됨), 유효깊이 증가에 따른 전단강도 감소의 경향에 있어서는 실험 결과를 잘 예측하고 있는 것으로 드러났다.

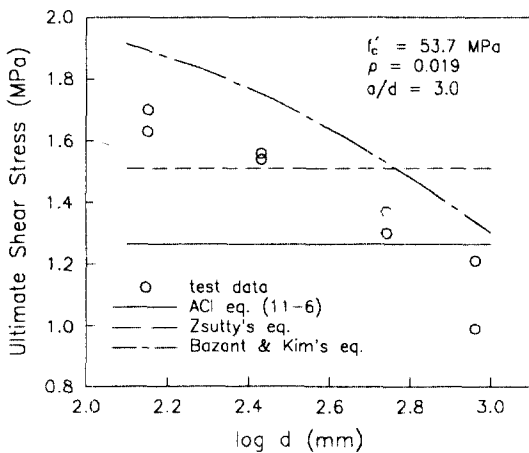


Fig. 13 Effect of d on the shear strength

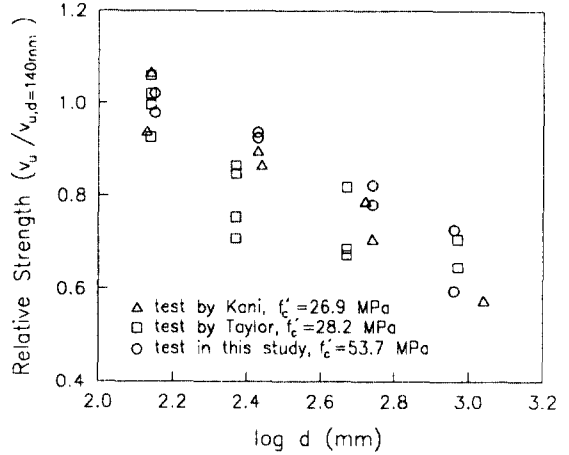


Fig. 14 Effect of d with strength level

Fig. 14는 유효깊이 증가에 따른 철근콘크리트 보 전단강도 감소의 효과를 보통강도 콘크리트의 경우에 대하여 실험한 Kani 및 Taylor의 실험 결과와 함께 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 실험 결과가 뚜렷한 크기효과를 나타내었으나, 강도 수준에 따라서는 유의할만한 차이가 나타나지 않았다.

4. 결론

고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 전단강도 특성을 실험적으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구의 실험 결과를 다른 연구자들의 실험치와 비교해 본 결과, 철근콘크리트 보 전단강도에 있어서의 주철근비 및 전단스팬비의 효과는 콘크리트의 압축강도 수준에 따라 뚜렷한 차이가 나타나지 않아, 서로간의 상관관계는 거의 없는 것으로 판단되었다.
- 2) 본 연구의 범위에서는 전단강도의 크기효과에 있어서 강도 수준에 따른 유의할만한 차이가 나타나지 않았다.
- 3) 유효깊이가 915mm인 큰 보의 경우, ACI

기준식이 안전측이 아니어서 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

- 4) 전단스팬비가 1.5인 보의 경우, 아치 작용에 의해 상당히 큰 보유 강도를 보여주었으며, 전단-압축 파괴의 형태로 파괴되었다. 또한, 전단강도는 모델식들의 예측값보다 크게 측정되었다.
- 5) ACI 기준식을 사용할 경우, 주철근비가 낮을 때에는 안전율이 1.0 이하로 떨어지는 경향을 나타내어 기준식에 대한 재검토가 필요할 것으로 사료된다. 또한, ACI 기준식은 전단스팬비 감소에 따른 전단강도 증가의 효과를 제대로 평가하지 못하는 것으로 판정되었다. 그러나, 그 예측값에 있어서는 모든 전단스팬비에 대해서 안전측이었다.
- 6) 주철근비가 전단강도에 미치는 영향은 Zsutty 식이 가장 잘 평가하는 것으로 나타났다. 한편, Bazant & Kim 식은 유효깊이의 증가에 따르는 전단강도 감소의 경향에 있어서 실험 결과를 잘 예측하고 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 1991년도 과학기술처에서 시행한 첨단요소과제의 연구비 지원으로 일부 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한, 실험체 제작에 많은 도움을 주신 (주)대우 건설기술연구소 소장님 이하 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-89), American Concrete Institute, Detroit, 1989, 353 pp.
2. Mphonde, A.G., and Frantz, G.C., Shear Tests of High- and Low-Strength Concrete Beams Without Stirrups, ACI J., Proceedings V.81, No.4, July-Aug. 1984, pp.350-357.
3. Elzanty, A.H., Nilson, A.H., and Slate, F.O., Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Using High-Strength Concrete, ACI J., Proceedings V.83, No.2, Mar-Apr. 1986, pp.290-296.
4. Ahmad, S.H., Khaloo, A.R., and Poveda, R., Shear Capacity of Reinforced High-Strength Concrete Beams, ACI J., Proceedings V.83, No.2, Mar-Apr. 1986, pp.297-305.
5. Zsutty, T.C., Beam Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data, ACI J., Proceedings V.65, No.11, Nov. 1968, pp.943-951.
6. Bazant, Z.P., and Kim, J.K., Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams, ACI J., Proceedings V.81, No.5, Sept-Oct. 1984, pp.456-467.
7. Leonhardt, F., and Walther, R., Beitrage zur Behandlung der Schubprobleme in Stahlbetonbau, Beton-und Stahlbetonbau(Berlin), Mar. 1962, pp.32-44, and pp.54-64.
8. Kani, G.N.J., "How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams?," ACI J., Proceedings V.64, No.3, Mar. 1967, pp.128-141.
9. Taylor, H.P.J., "Shear Strength of Large Beams," Proceedings, ASCE, V.98, ST11, Nov. 1972, pp.2473-2490.
10. Iguro, M., Shioya, T., Nojiri, Y., and Akiyama, H., Experimental Studies on the Shear Strength of Large Reinforced Concrete Beams Under Uniformly Distributed Load, Proceedings, JSCE, NO.348, Aug. 1984, pp.175-184.
11. Bazant, Z.P., and Kazemi, M.T., Size Effect on Diagonal Shear Failure of Beams without Stirrups, ACI Structural J., Proceedings V.88, No.3, May-June 1991, pp.268-276.
12. Bazant, Z.P., and Sun, H.H., Size Effect in Diagonal Shear Failure : Influence of Aggregate Size and Stirrups," ACI Materials J., Proceedings V.84, No.4, July-Aug. 1987, pp.259-272.
13. 신성우, 이광수, 권영호, 오정근, "전단보강이 없는 고강도 철근 콘크리트 보의 전단역학적 거동에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, 제1권, 제1호, 1989년 9월, pp.67-74.
14. 고광일, 김 우, "고강도 철근 콘크리트 보의 전단강도에 관한 연구", 대한토목학회논문집.

제9권, 제4호, 1989년 12월, pp.63-71.

15. 신성우 외 5인, "전단-스팬비가 작은 고강도 철근콘크리트 보의 전단성능에 관한 실험적 연구," 콘크리트학회 논문집, 제 4 권 제 4 호, 1992년 12월, pp.171~179.
16. Ahmad, S.H., and Lue, D.M., Flexure-Shear Interaction of Reinforced High-Strength Concrete Beams, ACI J., Proceedings V.84, No. 4, July-Aug. 1987, pp.330-341.
17. Salandra, M.A., and Ahmad, S.H., Shear Capacity of Reinforced Lightweight High-Strength Concrete Beams, ACI J., Proceedings V.86, No.6, Nov.-Dec. 1989, pp.697-704.
18. Elzanty, A.H., Nilson, A.H., and Slate, F.O.,

Shear Capacity of Prestressed Concrete Beams Using High-Strength Concrete, ACI J., Proceedings V.83, No.3, May-June 1986, pp.359-368.

19. Krefeld, W.J., and Thurston, C.W., Studies of the Shear and Diagonal Tension Strength of Simply Supported Reinforced Concrete Beams, ACI J., Proceedings V.63, No.4, Apr. 1966, pp.451-476.
20. Kani, G.N.J., "Basic Facts Concerning Shear Failure," ACI J., Proceedings V.63, No.6, June 1966, pp.675-692.

(접수일자 : 1992. 12. 23)