

고강도 철근콘크리트 보의 전단강도에 관한 크기효과

Size Effect on Shear Strength of Reinforced High Strength Concrete Beams

김진근*
Kim, Jin Keun

박연동**
Park, Yon Dong

ABSTRACT

In this study, the size effect on diagonal shear failure of reinforced high strength concrete beams was investigated. For this purpose, ten singly reinforced high strength concrete beams without web reinforcement were tested for five different dimensions of effective depth which were varied from 67mm to 915mm. The compressive strength of concrete used in this study was 53.7 MPa. One type of reinforcing bar with nominal yield strength of 400 MPa was used. Test results were analyzed and compared with strength predicted by ACI code equation, Zsutty's equation and Bazant & Kim's equation. As the results, ACI code equation was seriously unconservative for beams with d of 915mm. Bazant & Kim's equation predicted well the trend of test data. Within the scope of this study, there was no clear difference in size effect with variation of compressive strength of concrete.

1. 서론

최근에 들어, 건설 구조물의 고기능화에 따른 건설 재료의 고성능화 추세로 인하여 고강도 콘크리트 사용에 대한 요구가 크게 증가하고 있는 실정이며, 실제로 많은 구조물들이 고강도 콘크리트를 사용하여 건설되고 있다. 그럼에도 불구하고 현재의 설계 기준식들은 대부분 보통강도 콘크리트를 사용한 실험 결과에 근거하고 있으며, 고강도 콘크리트를 사용함에 따른 변동 요인을 고려해주지 못하고 있다.

일반적으로, 철근콘크리트 보의 전단강도는 콘크리트 압축강도(f_c'), 전단스팬비(a/d), 주철근비(ρ) 및 보 유효깊이(d)의 함수이다. 현재의 전단강도에 대한 ACI 기준식⁽¹⁾은 대부분 압축강도 41 MPa 이하의 보통강도 콘크리트 보에 대한 실험 결과에 근거하고 있으며, 이를 고강도 콘크리트 보에 적용할 경우 일반적으로 안

전율이 감소한다고 한다.⁽²⁾ ACI 기준에서는 이의 부분적 보완 방법으로 70 MPa 이상의 고강도 콘크리트 부재에서는 70 MPa일 때의 전단강도 값을 사용하도록 권장하고 있다. 또한, ACI 기준식은 보 유효깊이가 전단강도에 미치는 효과를 고려해주지 않고 있다.

철근콘크리트 구조물의 대표적인 취성파괴의 하나인 보의 전단파괴는 유효깊이가 증가함에 따라 강도가 감소하는 뚜렷한 크기효과(size effect)를 나타내며, 이러한 현상은 다수의 연구자들에 의해 실험적 또는 이론적으로 연구되어 왔다.⁽³⁾⁻⁽⁹⁾ 그러나, 보 전단강도의 크기효과에 관한 대부분의 연구가 보통강도 콘크리트를 사용한 경우를 대상으로 하여 수행되어 왔으며, 고강도 콘크리트를 사용한 경우에 대해서는 그 연구 결과가 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 위와 같은 사실에 기초하여 보 유효깊이를 실험 변수로 두고 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 전단강도에 관한 실험을 수행하여 그 크기효과 및 파괴 양상을 실험적으로 규명해 보았다.

* 정희원, KAIST 토목공학과 부교수, 공학박사

** 정희원, KAIST 토목공학과 박사과정

2. 실험

표 1. 실험체 종류 및 전단강도

2.1 실험체 개요

유효깊이에 따른 전단강도 특성을 분석하기 위하여 유효깊이를 5 종류로 변화시켜 각 변수에 대하여 2개씩 총 10개의 보 실험체를 제작하였다. 모든 실험체는 스티럽을 보강하지 않은 단철근 보이며, 부착파괴가 발생하지 않도록 주철근의 부착길이를 충분히 확보하였다. 주철근 비와 전단스팬비는 각각 0.019와 3.0으로 설계되었다.

실험체의 상세는 표 1 및 그림 1과 같다.

2.2 실험 재료

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 일반 강모래를 사용하였고, 굵은골재는 최대크기 25mm의 쇄석을 사용하였다. 작업성을 확보하기 위하여 ASTM C494 Type A 및 F에 해당하는 감수제 및 고유동화제를 병용하였다. 사용된 고강도 콘크리트의 배합비 및 압축강도 실험 결과는 표 2와 같다.

철근은 비교적 고강도인 SD 40 철근을 사용하였다.

기호	b (mm)	d (mm)	h (mm)	L (mm)	전단강도 (MPa)
D67-1	170	67	95	900	2.42
D67-2	170	67	95	900	2.84
D142-1	170	142	170	1400	1.70
D142-2	170	142	170	1400	1.63
D270-1	170	270	300	2300	1.54
D270-2	170	270	300	2300	1.56
D550-1	300	550	620	4300	1.37
D550-2	300	550	620	4300	1.30
D915-1	300	915	1000	8200	0.99
D915-2	300	915	1000	8200	1.21

주) 모든 실험체는 $\rho=0.019$, $a/d=3.0$ 임.

표 2. 배합비 및 압축강도

2.3 가력장치 및 재하 방법

D142, D270 보의 경우, 가력 프레임에 500kN 용량의 유압잭을 설치하여 가력하였으며, 하중은 250kN 용량의 로드셀을 사용하여 측정하였다. D550, D915 보의 극한하중이 높을 것으로 예상되어 1000kN 용량의 유압잭 및 로

시멘트량 (kg/m ³)	w/c (%)	s/a (%)	혼화제 (%)	슬럼프 (mm)	압축강도 (MPa)
500	30	34	1.2	168	53.7

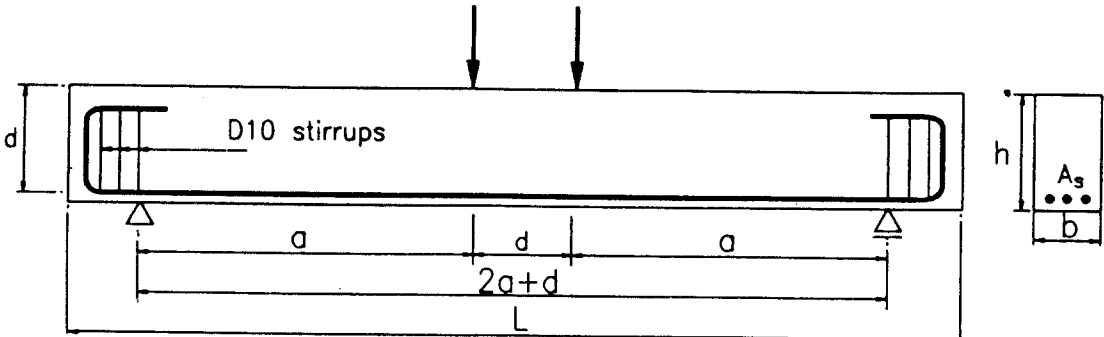


그림 1. 실험체 상세

드셀을 이용하여 실험을 수행하였다. D67 보의 경우는 실험체의 크기 및 재하 조건 등을 고려하여 만능실험기(U.T.M.)를 사용하여 실험을 수행하였다. 하중은 그림 1에 나타나 있는 바와 같이 보의 중앙으로부터 각각 $d/2$ 만큼 떨어진 지점에서 2점 가력하였다. 가력방식은 하중 조절로 하였으며, 하중 증분은 D270 보의 경우, 예상 극한하중의 50% 정도까지는 20kN, 80% 정도까지는 10kN, 그 이후에는 5kN으로 하였다. D67 보의 경우는 각각 5kN, 5kN, 2.5kN, D142 보의 경우는 각각 10kN, 5kN, 2.5kN, D550 보의 경우는 각각 40kN, 40kN, 10kN, D915보의 경우는 각각 60kN, 60kN, 20kN 으로 하였다.

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

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 일반적 파괴 양상

모든 실험체에 대하여 초기 하중단계에서는 순수 휨 구간에서 먼저 휨균열이 발생하였다.

하중이 증가함에 따라 순수 휨 구간에서의 균열이 진전되었으며, 전단스팬 구간에도 휨균열이 발생하기 시작하였다. 계속적인 하중의 증가에도 중앙부 휨균열의 진전은 크지 않았으나 전단스팬에 발생한 휨균열의 선단 부분에서 가력점을 향하여 기울어지는 사인장균열이 발생하였으며, 이 사인장균열이 발전하면서 보의 파괴로 이어졌다. 모든 실험체는 사인장균열이 뚜렷하게 발전한 직후에 파괴되었으나 유효깊이가 가장 작은 D67 보의 경우는 사인장균열이 완전히 발전한 이후에도 상당한 보유강도(reserve strength)를 보이다가 파괴로 이어졌다.

그림 2는 유효깊이에 따른 보의 균열 양상을 보여주고 있는데, 그림에서 알 수 있듯이 유효깊이의 대소에 관계없이 균열 간격이 모든 보에서 거의 동일하였다. 한편, 주균열만을 고려할 경우에는 유효깊이가 증가함에 따라 균열 간격이 커지고 있음을 알 수 있는데, 이러한 균열 간격의 증가는 유효깊이의 증가에 비례하여 모든 보에서 비슷한 갯수의 주균열이 관찰되었다.

그림 3은 유효깊이에 따른 각 실험체의 하중-처짐 관계를 도시한 것인데, 그림에 나타나 있는 바와 같이 기울기의 차이는 있으나 모든

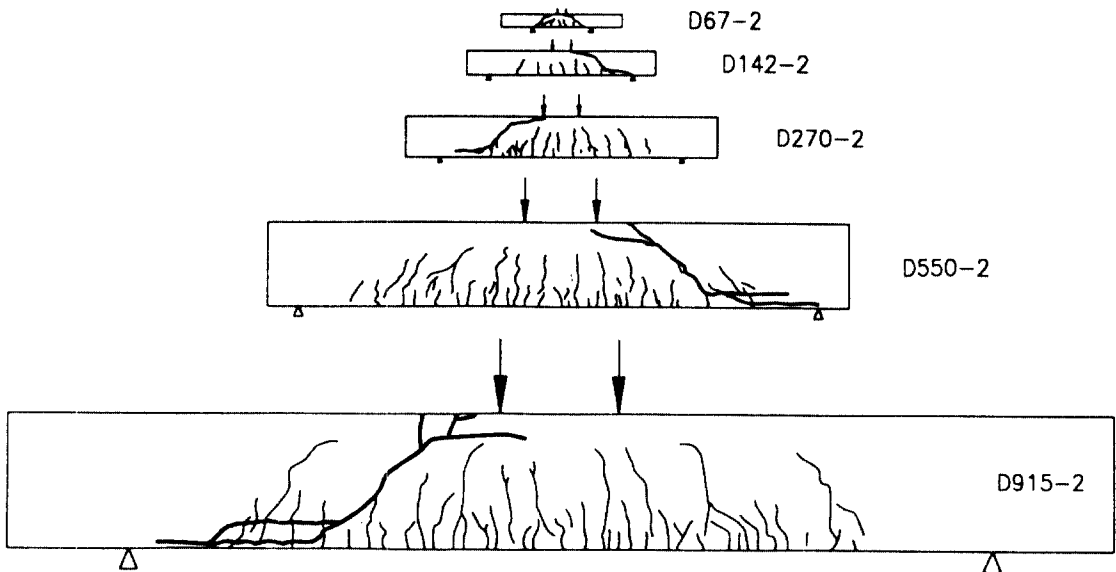


그림 2. 균열 형태 및 파괴 형상

보가 휨균열 발생 이후 하중이 거의 선형적으로 증가하다가 극한하중에 도달하면 갑자기 파괴가 발생하는 취성파괴 현상을 보여주었다. 또한, 이론적으로 동일한 강성(stiffness)를 가지는 D142 보와 D270 보, D550 보와 D915 보는 거의 유사한 기울기를 나타내었다. 한편, 동일한 강성일 경우 유효깊이가 작은 보가 큰 보에 비하여 약간 완만한 기울기를 보여주었는데, 그 이유는 동일한 하중 하에서는 유효깊이가 작은 보가 큰 보에 비하여 높은 응력 수준을 유지하게 되므로 상대적으로 균열이 많이 발달하여 강성이 저하되었기 때문인 것으로 판단된다.

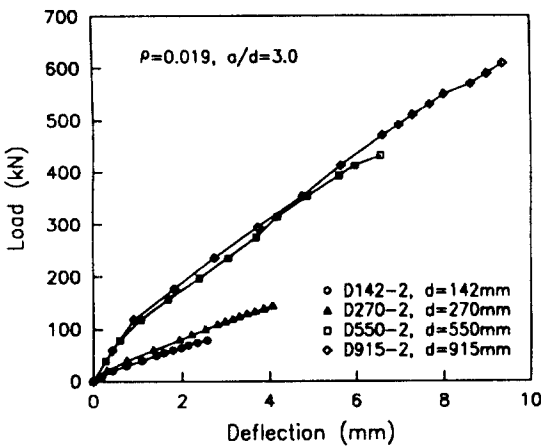


그림 3. 유효깊이에 따른 하중-처짐 관계

3.2 전단강도

기존의 많은 연구자들이 철근콘크리트 보의 전단파괴 특성을 정확하게 규명하기 위하여 많은 연구를 수행하였으며, ACI 규준식과 더불어 보의 전단강도를 예측하는 대표적인 모델식으로는 Zsutty 식⁽¹⁰⁾ 및 크기효과를 고려한 Bazant & Kim 식⁽⁸⁾이 있다. 각 모델식의 형태는 다음과 같다.

ACI 규준 (11-6) 식 ;

$$v_c = 0.1578\sqrt{f'_c} + 17.25\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

Zsutty 식 ;

$$v_u = 2.1746 (f'_c \rho d / a)^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

Bazant & Kim 식 ;

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

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

스터럽을 보강하지 않은 철근콘크리트 보의 전단강도에 대한 크기효과는 Leonhardt,⁽³⁾ Kani,⁽⁴⁾ Taylor,⁽⁵⁾ Iguro,⁽⁶⁾ Bazant⁽⁷⁾ 등에 의해서 실험적으로 연구되었는데, 이들은 모두 보통강도 콘크리트를 사용하여 실험을 수행하였다. 실험 결과에 의하면, 보의 유효깊이가 증가할수록 전단강도는 뚜렷하게 감소하여 명백한 크기효과를 나타내었다.

그림 4는 본 연구에서 수행한 고강도 철근콘크리트 보의 극한 전단강도 실험 결과를 각 모델식과 비교하여 도시한 것인데, ACI 식과 Zsutty 식의 경우, 보의 유효깊이 증가에 대한 전단강도 감소의 효과를 고려해주지 않고 있어 동일한 예측값을 나타내고 있다. 그림에 나타나 있는 바와 같이 유효깊이가 증가함에 따라 전단강도는 감소하여 유효깊이가 915mm인 대형 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 크

기에 있어서는 실험치보다 다소 크게 평가하고 있는 것으로 나타났으나, 유효깊이 증가에 따르는 전단강도 감소의 경향에 있어서는 실험 결과를 잘 예측하고 있는 것으로 드러났다.

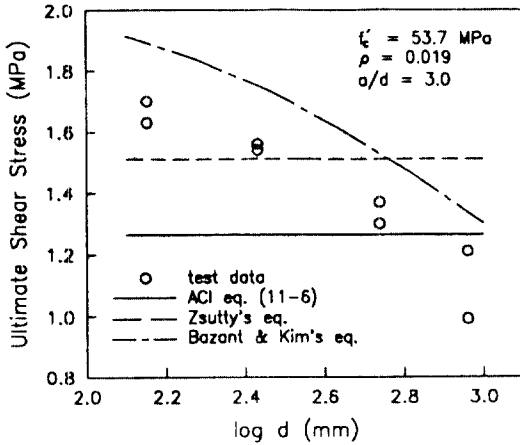


그림 4. 유효깊이에 따른 전단강도

그림 5는 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.

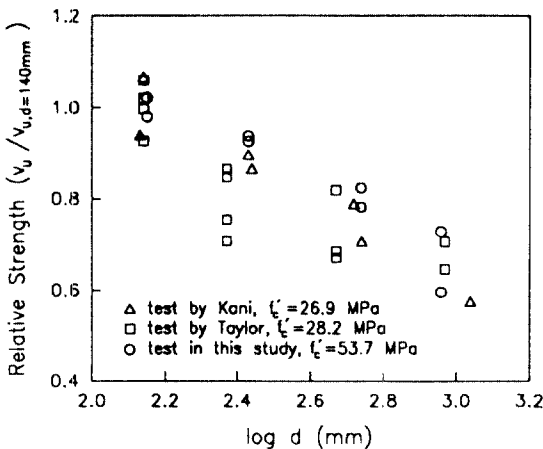


그림 5. 강도 수준에 따른 크기 효과

4. 결 론

유효깊이의 변화에 따른 고강도 철근콘크리트 보의 전단강도에 관한 크기효과를 실험적으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유효깊이의 대소에 관계없이 모든 보에서 거의 동일한 균열 간격이 관찰되었다. 반면, 주균열만을 고려한 경우에는 모든 보에서 비슷한 갯수의 주균열이 관찰되었다.
- 2) 모든 보는 휨균열 발생이후 하중이 거의 선형적으로 증가하다가 갑자기 파괴가 발생하는 취성파괴 현상을 보여주었다.
- 3) 유효깊이가 915mm인 대형 보의 경우 ACI 규준식이 안전측이 아니어서 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 한편, Bazant & Kim 식은 유효깊이 증가에 따르는 전단강도 감소의 경향에 있어서 실험 결과를 잘 예측하고 있는 것으로 나타났다.
- 4) 다른 연구자들의 실험치와 비교한 결과, 본 연구의 범위에서는 전단강도의 크기효과에 있어서 강도 수준에 따른 유의할만한 차이가 나타나지 않았다.

감사의 글

본 연구는 1991년도 과학재단 목적기초 연구의 연구비 지원으로 일부 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한, 실험체 제작에 협조해주신 (주)대우 건설기술연구소 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-89)," American Concrete Institute, Detroit, 1989, 353 pp.
2. Mphonde, A.G., 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. Leonhardt, F., Walther, R., "Beitrage zur Behandlung der Schubprobleme in Stahlebetonbau," *Beton- und Stahlbetonbau*(Berlin), Mar. 1962, pp. 32-44, and pp. 54-64.
 4. Kani, G.N.J., "How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams?," *ACI J., Proceedings* V. 64, No. 3, Mar, 1967, pp. 128-141.
 5. Taylor, H.P.J., "Shear Strength of Large Beams," *Proceedings, ASCE*, V. 98, ST11, Nov. 1972, pp. 2473-2490.
 6. Iguro, M., Shioya, T., Nojiri, Y., 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
 7. Bazant, Z.P., 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.
 8. Bazant, Z.P., 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.
 9. Bazant, Z.P., 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.
 10. Zsutty, T.C., "Beam Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data," *ACI J., Proceedings* V. 65, No. 11, Nov. 1968, pp. 943-951.