

전단경간비가 다른 철근콘크리트 보의 최소전단철근비 예측에 관한 실험적 연구

An Experimental Study to Predict Minimum Shear Reinforcement Ratio of RC Beams with Various Shear Span-to-Depth Ratios

김 옥 연*
Kim, Uk Yeon

김 상 우**
Kim, Sang Woo

이 정 윤***
Lee, Jung Yoon

ABSTRACT

The purpose of this experimental study is to investigate the influence of shear span-to-depth ratio on the minimum shear reinforcement ratio of reinforced concrete beams. In this study, 7 reinforced concrete beam specimens were tested. The parameters of experiment are shear span-to-depth ratio($a/d = 2.0, 3.0, 4.0$) and shear reinforcement ratio($\rho_v = 0\%, 0.183\%,$ and 0.233%). The section of all specimens was 350mm width and 450mm depth.

The observed results were compared with the calculated results by the current ACI 318-02 Building Code and the proposed equation. The safety rate of the specimens, L5S2A, L5S3A, L5S4A, and L5S4P specimens were 1.80, 1.25, 1.38, and 1.56 respectively. The test results indicated that the shear behavior of reinforced concrete beams with the minimum shear reinforcement was influenced by the shear span-to-depth ratio.

1. 서론

전단력이 작용하는 철근콘크리트 부재에 배근된 전단보강근은 사인장 균열이 한 곳에 집중되어 균열폭이 증대되는 것을 억제하여 부재의 연성을 증대시킨다. 만일, 철근콘크리트 부재에 전단보강근이 없거나 부족할 경우에는 그 부재에 사인장 균열이 발생함과 동시에 부재내력이 급격히 저하하는 취성적인 파괴를 일으킨다. 따라서, 현행 구조설계기준에서는 모든 철근콘크리트 휨부재에 대하여 계수전단력 V_u 가 콘크리트에 의한 전단강도 ϕV_c 의 1/2을 초과할 경우에 최소전단보강근을 배근하도록 규정

* 정회원, 성균관대학교 건축공학과 석사과정

** 정회원, 성균관대학교 건축공학과 박사과정

*** 정회원, 성균관대학교 건축공학과 조교수

하고 있다. ACI 318-99 규준에서는 최소전단보강근비(ρ_{\min}) 평가식을 식(1)과 같이 규정하였다.¹⁾

$$\rho_{\min} = \frac{3.5}{f_y} \quad (1)$$

여기서, f_y 는 전단보강근의 항복응력(kgf/cm^2)이다. 그러나 식(1)에 의하여 계산된 최소전단보강근비는 전단보강근의 항복응력만에 의하여 달라지며, 콘크리트 압축강도에 무관하게 일정하다. 이런 이유로, 최근에 개정된 ACI 318-02 규준에서는 콘크리트 압축강도의 영향을 고려하여 식(2)에 의하여 최소전단보강근비를 구한다²⁾. 식(2)에서 최소전단보강근비는 콘크리트 압축강도의 제곱근($\sqrt{f_{ck}}$)에 비례하여 변화한다.

$$\rho_{\min} = 0.199 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_y} \quad (2)$$

여기서, f_{ck} 는 콘크리트의 설계기준강도(kgf/cm^2)이다.

그러나 개정된 ACI 318-02 규준의 식(2)는 실험결과에 근거하여 제안된 평가식으로써 그 이론적 근거가 부족하다. 따라서, 설계대상이 실험범위를 벗어날 경우 적용의 한계가 있으며, 최소전단보강근비에 영향을 줄 수 있는 주인장철근비, 전단경간비에 따른 휨모멘트 효과를 무시하고 있다.

2. 최소전단보강근비 평가식

그림 1은 휨모멘트와 전단력에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 보와 보요소를 나타내고 있다. 여기서, σ_1^c, σ_2^c 는 각각 1, 2방향의 콘크리트 직응력, ρ_l 는 t 방향의 철근비, f_t 는 t 방향의 철근응력, α 는 주압축응력과 l 축이 이루는 경사각이고 1, 2방향은 주인장응력과 주압축응력의 방향을 나타낸다.

본 연구에서는 아래 그림과 같이 트러스 이론과 사인장균열이 발생한 철근콘크리트 보요소의 응력 조건을 이용하여 휨모멘트 효과를 고려한 철근콘크리트 보의 최소전단보강근비를 식(3)과 같이 이론적으로 유도하였다.⁴⁾

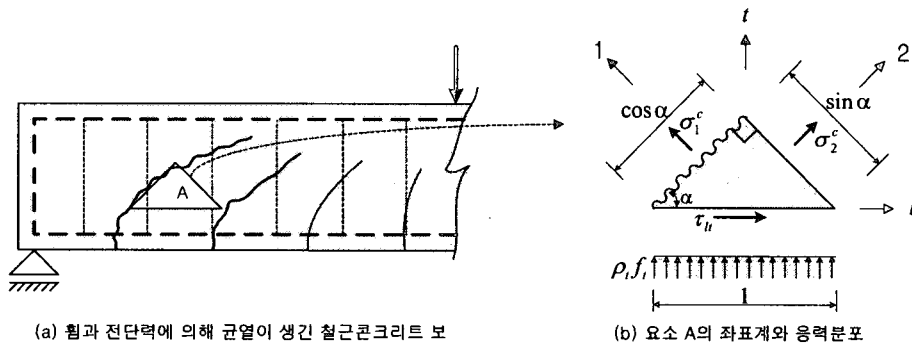


그림 1 휨 모멘트와 전단력에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 보

$$\rho_{\min} = 0.04 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{ty}} \left(\frac{a}{\rho_l d} \right)^{0.1} \quad (3)$$

여기서, f_{ty} 는 수직 전단보강근의 항복강도이고, ρ_l 은 주인장철근비, a/d 는 전단경간비이다.

제안식은 철근콘크리트 보의 최소전단철근비를 전단보강근의 항복강도, 콘크리트 압축강도, 주인장철근비, 전단경간비의 영향을 고려하여 평가하였다. 최소전단보강근비는 전단경간비와 주인장철근의 영향을 받지만, 식(3)과 같이 $(1/\rho_l \times a/d)^{0.1}$ 의 항에 비례하는 매우 작은 영향임을 알 수 있다.

최소전단보강근비에 대한 기존의 실험은 실험체의 수가 적고, 대부분의 실험체 변수가 콘크리트 압축강도에 국한되어 있기 때문에 주인장철근비와 전단경간비의 요소를 검증하기 어렵다. 따라서, 이 연구에서는 철근콘크리트 보의 실험을 통해 전단경간비가 최소전단보강근비에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

3. 실험

3.1 실험체 계획

본 연구에서는 철근콘크리트 보의 전단경간비가 최소전단보강근비에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실험체의 주요변수를 전단경간비(a/d), 수직 전단보강근비(ρ_v)로 하였다. 실험체의 전단경간비는 2.0, 3.0, 4.0의 3종류이며, 수직 전단보강근비는 ACI 318-02 규준에 따라 전단경간비가 변해도 최소전단보강근이 일정한 0%, 0.183%의 값과, 제안된 식에 따른 0.233%(전단경간비 4.0인 경우)로 하였다. 전단경간비가 2.0과 3.0인 보에 대하여 제안된 식에 의해 유도된 최소전단보강근비와 ACI 318-02 규준에 의한 최소전단보강근비의 값이 매우 유사하지만, 전단경간비 4.0인 경우 제안된 식에 의하여 계산된 전단보강근비는 다소 증가한다. 총 7개의 철근콘크리트 보 실험체의 특성은 표 1과 같다.

실험체는 그림 2와 같이 전단경간비에 따라 각각 820, 1230, 1640 mm이며, 모든 실험체 보 단면의 폭과 높이는 각각 350, 450 mm로 동일하다.

3.2 실험체 제작

철근은 전단파괴를 유도하기 위하여 주인장철근과 주압축철근을 각각 D29(SD50) 및 D22 (SD40)를 사용하였고 수직 전단보강근은 $\phi 5.6$ 원형철선을 사용하였다. D29, D22 이형철근 및 $\phi 5.6$ 원형철선의 항복강도는 각각 5,350, 3,930, 그리고 2,200 kgf/cm²이었다.

표 1. 실험체 상세

| Specimens | f_{ck} (kgf/cm ²) | b (cm) | d (cm) | a (cm) | a/d | s (cm) | ρ_l (%) | ρ_v (%) | *L5S2N L5 : 인장철근(D29) 5대 S2 : 전단경간비(a/d) = 2 N : 수직 전단보강근이 배근되지 않은 시험체 A : ACI 규준에 따른 시험체 P : 제안식을 고려한 시험체 s = 보강근의간격 ρ_l = 주인장철근비 ρ_v = 전단보강근비 |
|-----------|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------------|-----------------|-----------------|---|
| *L5S2N | 400 | 35 | 41 | 82 | 2 | - | 2.24 | - | |
| L5S2A | | | | | | 7.7 | | 0.183 | |
| L5S3N | | | | 123 | 3 | - | | - | |
| L5S3A | | | | | | 7.7 | | 0.183 | |
| L5S4N | | | | | | - | | - | |
| L5S4A | | | | 164 | 4 | 7.7 | | 0.183 | |
| L5S4P | | | | | | 6.0 | | 0.233 | |

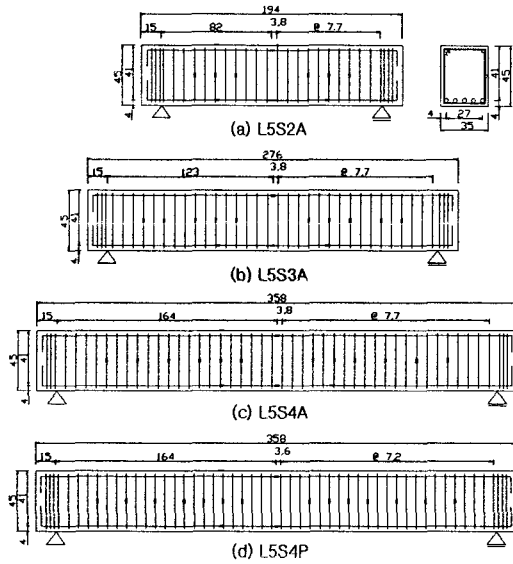


그림 2 실험체 상세도 (cm)

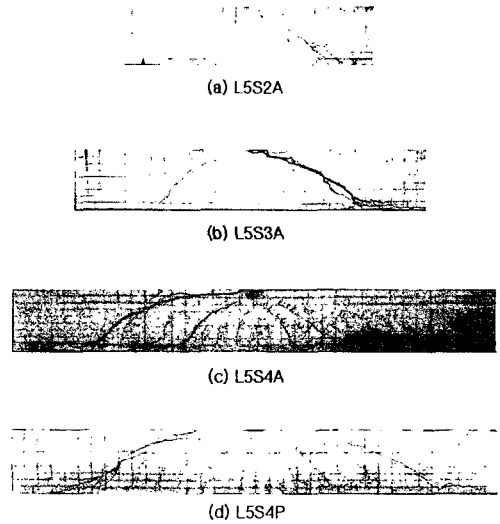


그림 3 실험체 균열 형상(사진)

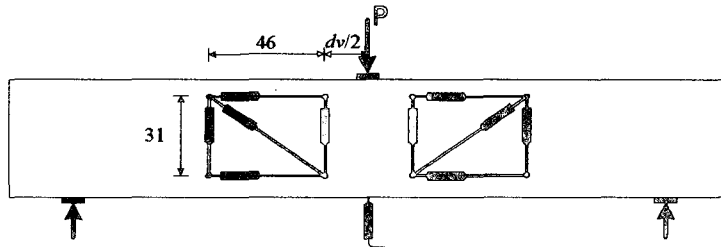


그림 4 전단변형량 측정 및 중앙부 처짐 측정을 위한 LVDT 설치현황 (cm)

콘크리트는 압축강도 400 kgf/cm^2 , 슬럼프 18 cm , 굵은 골재의 최대치수 25 mm 인 보통강도 콘크리트를 사용하였으며, 상용레미콘을 이용하여 배합 30분 경과 후 콘크리트를 타설하였다.

3.3 가력 및 측정방법

가력은 그림 4와 같이 실험체 중앙 상부에서 1점 재하를 하였으며, 100 tonf 용량의 만능시험기 (U.T.M.)를 사용하여 $300 \sim 500 \text{ kgf/min}$ 의 속도로 가력하였다. 실험체의 지압파괴를 방지하기 위하여 폭 10 cm 의 가력판과 지점판을 설치하였고, 재하시 편심을 최소화시키기 위하여 가력면 상부에 시멘트 모르타르를 얇게 바르고, 지점과 지점판 사이에는 얇은 고무판을 설치하였다.

전단위험단면의 변형을 측정하기 위하여 보 중앙 가력점에서 d_v (단면의 유효높이)만큼 떨어진 위치에 각 5개의 LVDT를 설치하여 전단위험단면에서 발생하는 부재축방향, 부재 축과 직각방향 및 전단 변형률을 측정하였다. 또한 주근 및 전단보강근에 게이지를 부착하여 보의 전단파괴 여부 및 각 전단 보강근의 변형률을 측정하였다. 실험체 중앙부의 처짐을 측정하기 위하여 실험체의 중앙하부에 LVDT를 설치하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험체의 파괴양상

그림 3의 파괴형상에서 알 수 있듯이 모든 실험체는 전단파괴되었다. 실험체는 초기 휨균열 발생 이후, 하중의 증가와 함께 휨균열이 휨-전단균열로 진전되어 균열폭의 증가와 함께 전단파괴되거나 휨-전단균열 발생 이후, 복부전단균열이 발생하여 전단파괴되었다. 수직 전단보강근이 배근되지 않은 실험체의 경우 휨-전단균열이 진전되면서 실험체가 취성적으로 파괴되었다. 전단경간비가 클수록 균열 간격은 넓게 퍼지고, 전단보강근비가 높을수록 균열은 한 곳에 집중되지 않고 다수의 균열이 발생하였다. 전단경간비가 큰 실험체 L5S4A와 L5S4P의 전단균열 발생위치는 가력점에서 d_v 만큼 떨어진 전단위험단면에서 발생하지 않고 $2d_v$ 만큼 떨어진 지점에서 발생하였다. L5S2A 실험체의 경우 콘크리트 전단강도에 대한 최대하중의 비가 1.80으로 사인장균열발생 이후 압축대의 영향에 의해 강성이 매우 높게 나타났다. L5S3A 실험체는 ACI 규준에 의한 예상하중과는 거의 일치하지만 전단경간비(a/d)가 2, 4인 다른 실험체들의 파괴하중과 비교해서 약간 낮은 하중을 나타내었다.

4.2 하중-처짐 관계

수직 전단보강근이 배근되지 않은 실험체는 그림 5와 같이 전단경간비가 클수록 최대하중은 낮아지고 처짐량은 증가하였다. 수직 전단보강근이 배근된 실험체는 사인장균열 발생 이후 실험체의 강성이 저하되어 하중-처짐곡선의 기울기가 낮아졌으며 전단변형률도 더 커졌다. 최대하중시의 처짐은 사인장균열 발생시 처짐의 약 2배였다.

4.3 안전율

이 논문에서는 수직 전단보강근이 배근되지 않은 실험체의 전단강도와 전단보강근이 배근된 보의 강도의 비를 전단거동의 안전율로 규정하였다. 콘크리트의 전단강도에 대한 최대하중의 비를 살펴보면 L5S2A 실험체는 콘크리트 압축대의 영향으로 1.80의 높은 안전율을 나타내었고, L5S3A 실험체는 다른 실험체에 비해 비교적 낮은 1.25이었다.

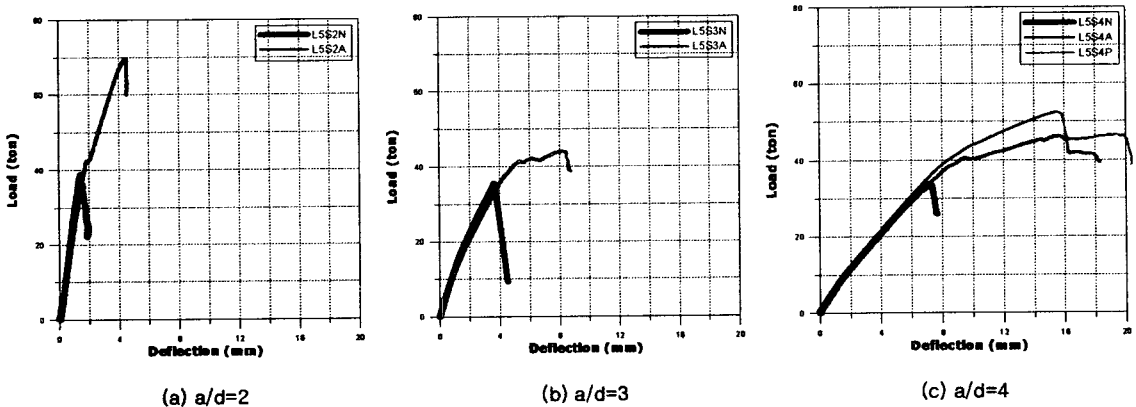


그림 5 하중-처짐 곡선

표 2. 실험결과

| Specimens | $V_{c, test}$ (ton) | $V_{c, ACI}$ (ton) | $V_{n, test}$ (ton) | $V_{n, ACI}$ (ton) | $\frac{V_{n, test}}{V_{c, test}}$ | $\frac{V_{n, test}}{V_{n, ACI}}$ | 최종파괴모드 |
|-----------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------|
| L5S2N | 38.7 | 34.4 | 38.7 | 34.4 | 1.00 | 1.13 | D.T. |
| L5S2A | 38.7 | 34.4 | 69.7 | 45.9 | 1.80 | 1.52 | D.T. |
| L5S3N | 35.4 | 32.5 | 35.4 | 32.5 | 1.00 | 1.09 | D.T. |
| L5S3A | 35.4 | 32.5 | 44.2 | 44.0 | 1.25 | 1.00 | S.C. |
| L5S4N | 33.4 | 31.5 | 33.4 | 31.5 | 1.00 | 1.06 | D.T. |
| L5S4A | 33.4 | 31.5 | 46.1 | 43.1 | 1.38 | 1.07 | S.C. |
| L5S4P | 33.4 | 31.5 | 52.3 | 46.3 | 1.56 | 1.13 | S.C. |

* V_c = 콘크리트의 전단강도, V_n = 철근콘크리트 보의 전단강도

** D.T. : Diagonal-tension, S.C. : Shear-compression

또한, 표 2와 같이 L5S4A 실험체는 1.38, 그리고 전단보강근이 더 많이 배근된 L5S4P 실험체의 경우 L5S4A 실험체 보다 높은 1.56의 안전율을 보였다.

5. 결론

이 논문에서는 전단경간비가 다른 철근콘크리트 보 실험결과와 이론적으로 유도하여 제안된 평가식, 그리고 ACI 기준식과 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제안된 철근콘크리트 보의 최소전단보강근비 평가식에서 주인장철근비가 증가할수록 최소전단보강근비는 감소하고, 전단경간비가 증가할수록 최소전단보강근비는 증가하는 경향을 나타내었다.
- 2) 제안된 철근콘크리트 보의 최소전단보강근비 평가식은 전단경간비와 주인장철근비의 영향을 고려하지 않고, 콘크리트 인장강도와 전단보강근의 영향에 대해서만 고려한 ACI 318-02 기준과 CSA A23.3-94 기준과 유사한 경향을 보였다.
- 3) ACI 기준에 따른 최소전단보강근비로 배근된 실험체 L5S2A, L5S3A, L5S4A의 안전율은 각각 1.80, 1.25, 1.38로, 전단경간비가 철근콘크리트 보의 최소전단보강근비에 영향을 주고 있음이 판명되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R05-2002-000-00120-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (ACI 318R-99)," ACI, 1999.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)," ACI, 2002.
3. Canadian Standards Association, "Design of Concrete Structures," CSA A23.3-94, Rexdale, Ontario, 1994.
4. 윤성현, "철근콘크리트 보의 최소전단철근비에 관한 연구," 성균관대학교 석사학위논문, 2002.