

콘크리트의 휨압축강도에 미치는 부재길이의 영향

Effects of Specimen Length on Flexural Compressive Strength of Concrete

김진근* 이성태**
Kim, Jin Keun Yi, Seong Tae

ABSTRACT

In evaluating the ultimate strength of a section for a concrete flexural member, the effect of member length is not usually considered, even though the strength tends to decrease with increase of member length.

In this paper the influence of specimen length on flexural compressive strength of concrete was evaluated. For this purpose, a series of C-shaped specimens subjected to axial compression and bending moment were tested using four different length-to-depth ratios(from 1, 2, 3 and 4) of specimens with compressive strength of 58 MPa.

Results indicate that the reduction in flexural compressive strength with increase of length-to-width ratios was apparent. A model equation was derived using regression analyses on the experimental data. It was also founded that the effect of specimen length on ultimate strain was negligible, but its effect on the ultimate load and the displacement at center of specimen was distinct. Finally more general model equation is also suggested.

1. 서론

콘크리트의 파괴역학에 대한 많은 연구결과로부터 인장력을 받는 콘크리트의 파괴가 특정 파괴영역(fracture zone)에 국한된다는 사실은 주지하는 바와 같다. 또한 최근 몇 년 전부터는 압축력을 받는 콘크리트에서도 파괴가 특정영역에서 발생한다는 연구결과가 발표되기 시작하였다. 압축파괴는 인장파괴에 비하여 상대적으로 넓은 영역에서 발생하지만 여전히 제한된 영역에서 발생한다. 그리고 압축파괴는 부재의 길이 방향으로 분포된 조깅균열과 연관이 있으며 파괴가 진행되는 동안에 형성되고 확대되는 횡방향 변형을 항상 수반하기 때문에 인장파괴보다 복잡하며 발생영역이 좁은 인장파괴에 비하여 미세균열이 넓은 영역에 고르게 분산되어 발생하므로 크기효과가 인장파괴보다 작게 일어난다.

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정,
한국전력기술(주) 책임연구원

콘크리트 구조물의 설계에 사용되는 대부분의 설계규준에서는 콘크리트의 압축강도에 대한 크기효과를 고려하지 않고 있으나, 취성 파괴에서 이 효과는 뚜렷이 나타나고 있다. 특히 콘크리트, 암석, 얼음, 세라믹 및 복합체와 같은 유사취성(quasi-brittle)재료의 압축 파괴에서도 크기효과는 현저히 나타나고 있다. 이러한 압축 파괴는 누적된 에너지의 이완이 주요 원인인데 그 전반적인 거동은 과거부터 광범위하게 연구되어 왔으나 현재까지도 인장 파괴에 비하여 충분히 밝혀지지 않고 있는 상태이며 이에 대한 크기효과의 연구도 크게 부족한 실정이다.

따라서 참고문헌⁽¹⁾에서는 압축강도의 크기효과에 대한 연구를 수행하는 일환으로서 공시체의 크기비에 따른 휨압축강도의 변화를 연구하고 모델식을 제시한 바 있다. 그러나 이는 공시체의 길이/깊이의 비가 2/1인 경우에 한해 제한적으로 적용 가능하다. 따라서 이 연구에서는 공시체의 깊이(c)는 일정하게 하고 길이(h)만을 변화시킨 경우에 대하여 휨압축강도를 예측할 수 있는 모델식을 실험을 통해 구한 후, 이 경우와 기존의 자료⁽¹⁾인 부재의 길이/깊이의 비가 2/1인 경우에도 동시에 적합한 보다 일반적인 모델식을 구하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 실험변수

휨하중을 받는 철근콘크리트 보의 크기효과에 대한 대부분의 실험에 사용되는 보에 있어서 중립축의 위치는 부재의 크기, 철근비, 가해진 하중의 크기 및 하중 가력점의 위치 등에 따라 변할 수 있으므로 이 실험에서는 이를 제어할 수 있는 C형 공시체를 선택하였다. 실험시에는 Hognestad 등⁽²⁾이 사용한 실험절차가 채택되었으며 주요 실험변수는 콘크리트 압축강도가 590 kgf/cm²일 때 그림 1과 같은 C형 공시체의 길이/깊이의 비($h/c=1, 2, 3$ 및 4)이다. 여기서 공시체의 깊이는 10.0 cm로 하였으며, 공시체의 두께(b)는 12.5 cm로 일정하게 하였다.

2.2 배합설계

C형 공시체를 만들기 위해 선택된 콘크리트 배합표는 표 1에 주어져 있다. 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 잔골재는 일반 강모래를 사용하였고 굵은골재는 최대치수(d_a) 13 mm의 쇄석을 사용하였다. 콘크리트는 수평으로 치기하였으며 작업성을 향상시키기 위하여 고성능 감수제와 진동기를 사용하였다. 모든 원주 공시체와 C형 공시체는 치기 후 24시간이 경과하여 탈형했으며, 실험 수행시까지 20±3℃의 온도가 유지되는 양생실에서 습윤포를 덮어 28일 이상 기건양생하였다.

표 1 콘크리트 배합표

| W/C (%) | S/A (%) | unit weight(kgf/m ³) | | | | S.P.* (%) | (kgf/cm ²) | | |
|---------|---------|----------------------------------|-----|-----|------|-----------|------------------------|----------|------------------------|
| | | W | C | S | G | | f_{cu} | f_{sp} | E_c |
| 37 | 40 | 178 | 480 | 676 | 1014 | 1 | 590 | 56 | 3.04 × 10 ⁵ |

* superplasticizer(ratio for cement weight)

2.3 공시체의 크기, 형상 및 실험절차

그림 1에는 C형 공시체의 형상, 치수 및 하중 가력점 등이 나타나 있다. 실험의 주요 고려 대상 부위인 공시체의 중앙부는 무근으로 하였으며, 양쪽 단부는 가력 장비로부터의 하중을 이 중앙부에 전달하기 위하여 휨철근과 전단철근으로 보강하였다. 공시체 당 12개의 변형률 게이지를 공시체의 중앙부에 부착하였으며, 실험을 수행하기 시작한 때부터 공시체가 파괴될 때까지 변형률을 측정하였다. 또한 2개의 LVDT를 공시체의 단부에 대한 중앙부의 상대적 변위(수평방향)를 측정하기 위하여 공시체의

압축 축에 설치하였다.

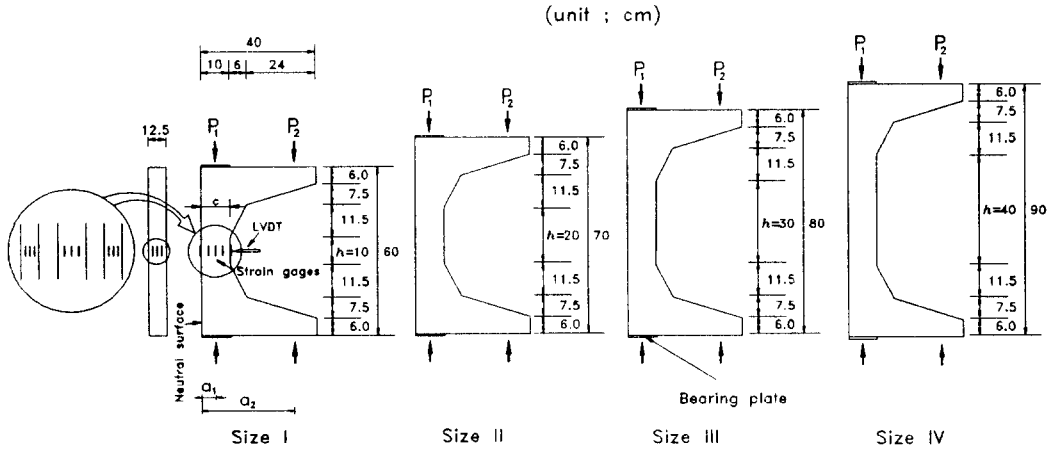


그림 1 공시체의 크기 및 형상

하중은 먼저 공시체 인장연단의 변형률 게이지 값이 특정한 값(50×10^{-6})이 될 때까지 주 하중(P_1)을 가한 후 이를 정지시키고 이후 종 하중(P_2)을 서서히 증가시키는데, 인장연단의 변형률 게이지 값이 0에 도달하면 P_2 를 정지시켰다. 공시체가 파괴될 때까지 이 절차를 반복 수행하는데, 콘크리트의 비탄성영역에서는 정확한 실험자료를 얻기 위하여 인장연단 게이지 값의 증분을 더욱 작게 취하였다. 각 공시체에 부착된 12개의 변형률 게이지 및 2개의 LVDT의 측정값은 전 실험과정에 걸쳐 연속적으로 자료를 축적시키는 계측기기로 취하였다.

축력을 유발시키는 P_1 은 유압으로 조작되는 250 tonf 용량의 만능재료시험기에 의해 가해졌는데 제어방식으로는 변위제어법을 이용했으며, 축력과 휨력을 유발시키는 P_2 는 20 tonf 용량의 수동식으로 조작되는 유압잭을 이용하여 가했다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험결과

C형 공시체와 원주 공시체의 압축강도의 측정은 동일 재령에서 실시되었다. 표 2의 공시체 번호에서 I, II, III 및 IV는 공시체의 크기를, 그리고 아라비아 숫자는 각 공시체의 일련번호를 나타낸다. 표 2에 주어진 콘크리트 압축강도(f_{cu})는 시리즈 당 3개의 $\phi 10 \times 20$ cm 원주 공시체에서 얻은 값을 평균한 결과이며 590 kgf/cm^2 의 값을 얻었다. P_u , ϵ_u , χ_u 및 δ 는 각각 공시체가 파괴될 때의 주 하중과 종 하중의 합(P_1+P_2), 콘크리트 압축연단의 극한변형률, 단면의 곡률과 공시체 중앙부의 수평방향 변위를 의미한다.

실험 시 모든 공시체 중 11개의 공시체가 실험영역 중앙부의 압축연단에서 파괴되었으며, 공시체 전체의 파괴에 앞서 중앙부에서 파쇄(spalling)가 발생했다. 공시체 I-3의 경우에는 극한하중에 도달하기 전에 공시체의 단부에서 먼저 균열이 발생하여 파괴에 도달하였다. 이는 단부에 설치된 철근이 제 기능을 발휘하지 못해 발생한 것으로 판단되며, 극한하중도 동일 크기의 다른 공시체 보다 작게 나왔

다. 따라서 여기에 해당하는 실험값은 결과 분석에서 제외하였다.

3.2 공시체 길이에 따른 강도의 크기효과

Bazant의 크기효과 법칙이 발표된 이후, 김진근 등⁽³⁾은 부재의 크기와 무관한 항인 σ_0 항을 고려함으로써 초기 균열이 없는 경우 혹은 비유사 균열을 가진 콘크리트 부재의 강도 예측을 위한 수정된 크기효과 법칙을 제안하였다. 이에 대한 응용으로서 축압축력을 받는 원주 공시체⁽⁴⁻⁵⁾ 및 휨압축력을 받는 C형 공시체⁽¹⁾에 대한 연구결과가 발표된 바 있다.

한편 Markeset 등⁽⁶⁾은 원주 공시체에서 “손상이 가능한 영역 길이(l_d)와 공시체 폭의 비가 2.5 이상일 경우에 단위면적 당 post-peak 에너지는 공시체의 길이와 무관하다”라고 하였는데, 이 연구에서 얻어진 C형 공시체에 대한 실험자료로부터는 이 비가 약 3.0 이상일 때 휨압축강도에 대한 크기효과에 변화가 없음을 알 수 있었다. 여기서는 파괴시 C형 공시체의 길이에 대한 휨압축강도를 예측할 수 있는 모델을 얻기 위해 수정된 크기효과 법칙과 $l_d=3.0c$ 로 취하여 11개(표 2)의 실험값에 대한 회귀분석을 수행하여 식(1.a)와 (1.b)를 얻었으며, 그 결과는 그림 2에 나타나 있다.

$$f_{cu}(h/c) = \frac{0.54f_{cu}}{\sqrt{1+4.0(h/c)}} + 0.60f_{cu} \quad (h/c \leq 3.0) \quad (1.a)$$

$$f_{cu}(h/c) = 0.75f_{cu} \quad (h/c \geq 3.0) \quad (1.b)$$

여기서 $f_{cu}(h/c)$ 는 P_u/bc 에 의해 계산된 C형 공시체의 압축강도이고, f_{cu} 는 원주 공시체에 대한 콘크리트의 압축강도를 각각 나타내는데 단위는 kgf/cm^2 이다.

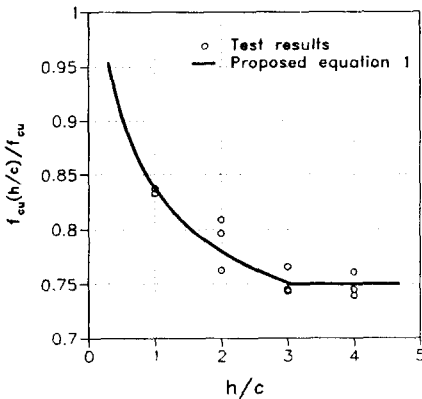


그림 2 $f_{cu}(h/c)/f_{cu}$ 와 h/c 의 관계

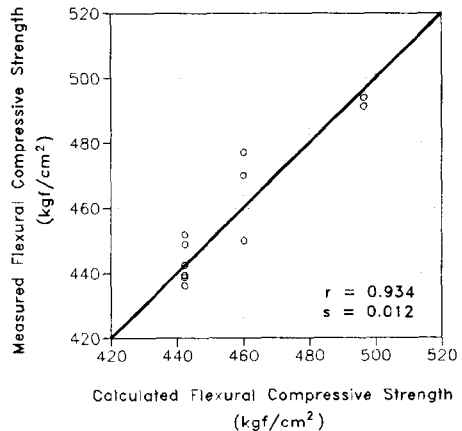


그림 3 휨압축강도의 계산된 값과 실험 값의 비교

그림 2에서 원은 C형 공시체에서 얻은 실험자료를, 굵은 실선은 식(1.a)와 (1.b)로부터의 결과를 나

표 2 C형 공시체에 대한 실험결과

| No. of specimen | P_u (tonf) | ϵ_u ($\times 10^{-3}$) | x_u ($\times 10^{-3}/\text{cm}$) | δ (mm) |
|-----------------|--------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------|
| I-1 | 61.75 | 3.64 | 0.36 | 1.06 |
| I-2 | 61.42 | 3.79 | 0.38 | 0.87 |
| I-3* | 54.51 | 3.88 | 0.39 | 0.95 |
| II-1 | 58.74 | 3.94 | 0.39 | 1.70 |
| II-2 | 59.64 | 3.75 | 0.38 | 1.91 |
| II-3 | 56.24 | 4.08 | 0.41 | 1.81 |
| III-1 | 54.92 | 3.36 | 0.34 | 2.33 |
| III-2 | 56.48 | 3.96 | 0.40 | 2.39 |
| III-3 | 54.83 | 4.21 | 0.42 | 2.55 |
| IV-1 | 54.93 | 3.17 | 0.32 | 2.78 |
| IV-2 | 56.10 | 3.37 | 0.34 | 3.17 |
| IV-3 | 54.52 | 4.04 | 0.40 | 3.08 |

* fails due to collapse of bearing region

타낸다. 이 그림은 부재의 길이가 증가함에 따라 파괴시의 휨압축강도는 점점 감소하며, h/c 가 큰 경우에는 휨압축강도가 일정한 값에 수렴하게 됨을 나타내고 있다.

위의 식(1.a)와 (1.b)를 실험자료와 직접 비교하기 위한 통계분석 결과가 그림 3에 나타나 있다. 이 그림에서 가로축과 세로축은 각각 식(1)에 의해 계산된 값과 실험결과에서 얻은 값을 나타내는데, 상관계수(r)는 0.934였으며 표준편차(s)는 0.012이었다. 또한 이 그림에 의하면 예측 값과 실험 값 사이에 근사적으로 선형관계가 성립함을 알 수 있다. 따라서 중립축 거리가 압축연단에서 10 cm인 부재에 있어서 임의의 부재길이를 갖는 보의 단면에 대한 휨압축강도는 이 부재의 길이 h 및 원주 공시체의 압축강도를 식(1.a)와 (1.b)에 대입시키면 얻을 수 있다.

3.3 극한변형률, 극한하중 및 공시체 중앙부의 변위에

대한 검토

직사각형 단면보가 휨압축을 받아 파괴에 이를 때 압축연단 콘크리트의 극한변형률은 대개 0.003~0.004의 범위에 있다는 사실은 보의 실험을 통하여 널리 알려져 있으며 이 C형 공시체 실험에 의해서도 비슷한 결과를 얻었다. 그림 4에서 수평으로 그려진 굵은 파선은 ACI에 제시된 0.003을 의미하는데, 이 그림은 실험결과 값이 0.003에 비하여 어떻게 변하는 지를 보이고 있다. 이로부터 모든 공시체의 극한변형률은 0.003보다 크며, 부재의 길이가 20 cm를 넘어서는 경우에 이 값이 조금 감소하는 경향을 보이지만 큰 차이는 없음을 알 수 있다.

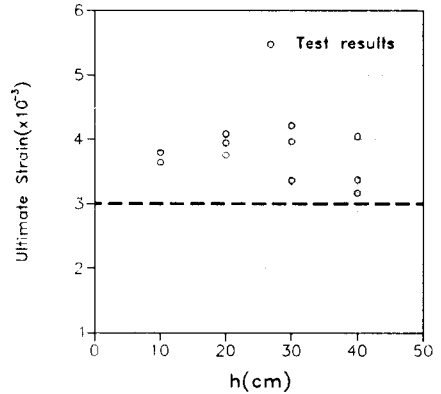


그림 4 극한변형률과 부재길이의 관계

그림 5에는 재하 초기단계에서부터 파괴시까지 각 공시체의 길이에 대한 하중($P_1 + P_2$)과 LVDT로부터 얻은 공시체 중앙부의 수평방향 변위와의 관계가 나타나 있다.

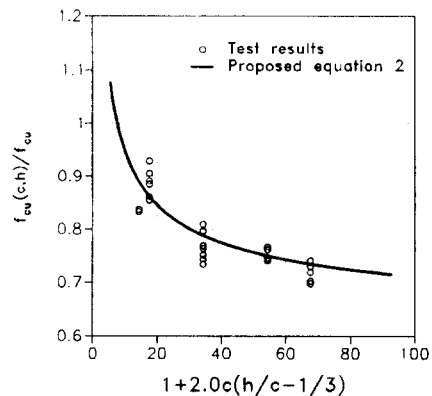
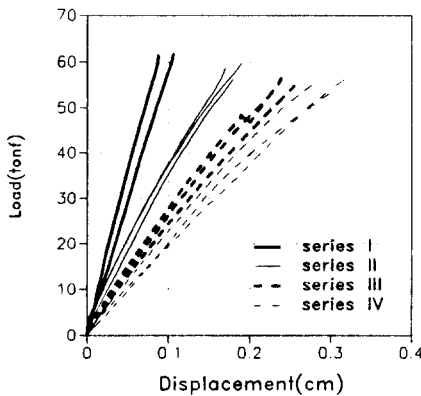


그림 5 하중과 공시체 중앙부의 변위와의 관계 그림 6 $f_{cu}(c, h)/f_{cu}$ 와 $1+2.0c(h/c-1/3)$ 의 관계

따라서 공시체의 길이가 길어질 수록 각 단계의 하중은 조금씩 줄어들고 변위는 조금씩 늘어나지

만, 공시체의 길이가 증가함에 따라 결국에는 하중과 변위는 일정한 값에 수렴해 감을 알 수 있다.

3.4 C형 공시체에 대한 크기효과 법칙의 일반화

식(2)는 이 연구의 실험결과와 기존의 연구결과⁽¹⁾를 동시에 만족할 수 있는 총 31개의 C형 공시체에 대한 일반화된 모델식으로서 회귀분석을 통해 얻어졌다.

$$f_c(c, h) = \frac{1.1f_{cu}}{\sqrt{1+2.0c(h/c-1/3)}} + 0.60f_{cu} \quad (2)$$

여기서 $h/c \geq 3$ 이면 $h/c = 3$ 으로 한다. 그림 6에서 원은 C형 공시체에서 얻은 실험 값을 굵은 실선은 식(2)로부터의 결과를 나타내는데 식(2)가 실험결과를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 상관계수(r)는 0.932였으며 표준편차(s)는 0.023이었다. 따라서 임의의 부재 두께와 길이를 갖는 보의 휨압축강도는 이 부재의 중립축 깊이 및 부재길이를 식(2)에 대입시키면 얻을 수 있다.

4. 결론

휨을 받는 철근콘크리트 부재에서 휨압축강도의 크기효과에 부재의 길이가 미치는 영향을 검토한 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

- (1) 부재의 길이가 증가함에 따라 파괴시의 휨압축강도가 감소하는 현상이 뚜렷이 나타나고 있으며 실험결과를 이용하여 이를 예측할 수 있는 모델식을 제시하였다. 또한 기존의 실험 값을 이용하여 보다 일반적인 휨압축강도에 대한 크기효과 모델식을 제안하였다.
- (2) 부재의 길이와 중립축 깊이의 비가 3.0 이상이면 C형 공시체의 휨압축강도에 대한 크기효과에 영향을 미치지 않는다는 사실을 알 수 있었다.
- (3) C형 공시체에서 부재의 길이가 증가함에 따라 극한변형률에는 큰 차이가 없었다. 그러나 극한하중은 조금씩 줄어들고 수평방향 변위는 조금씩 늘어나는데 부재의 길이가 더 길어지면 이들 값이 일정한 값에 수렴하게 됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김진근, 이성태, 양은익, "콘크리트의 휨압축강도의 크기효과", 한국콘크리트학회, 제11권 2호, 1999, pp.-(인쇄 중)
2. Hognestad, E., Hanson, N.W. and McHenry, D., "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design", Journal of ACI, V.27, No.4, Dec. 1955(Proceedings V.52), pp.455-479.
3. Kim, J.K. and Eo, S.H., "Size Effect in Concrete Specimens with Dissimilar Initial Cracks", Magazine of Concrete Research, V.42, No.153, Dec. 1990, pp.233-238.
4. 김진근, 어석홍, 이성태, "비표준형 실린더 공시체에 대한 압축강도의 크기효과", 콘크리트학회지, 제9권 1호, 1997, pp.105-113.
5. Kim, J.K., Yi, S.T., Park, C.K. and Eo, S.H., "Size Effect on Compressive Strength of Plain and Spirally Reinforced Concrete Cylinders", ACI Structural Journal, V.96, No.1, Jan.-Feb. 1999, pp.88-94.
6. Markeset, G. and Hillerborg, A., "Softening of Concrete in Compression Localization and Size Effects", Cement and Concrete Research, V.25, No.4, 1995, pp.702-708.