

휨 · 압축 하중을 받는 콘크리트 부재의 크기효과

Size Effect for Flexural Compression of Concrete Specimens

김진근^{*} 이성태^{**} 양은익^{***} 김민욱^{****} 이상순^{*****}
Kim, Jin-Keun, Yi, Seong-Tae, Yang, Eun-Ik, Kim, Min-Wook, Lee, Sang-Soon

ABSTRACT

In this study, the size effect of concrete members subjected to the axial load and bending moment is investigated using a series of C-shaped specimens of which test procedure is similar to those of Hognestad, Hanson, and McHenry's. Main test variable is a size ratio of the specimens(1:1/2:1/4) at the concrete compressive strength of 500kg/cm².

Test results show that the flexural compression strength at failure decreases as the size of specimen increases, that is, the size effect law is present. Model equation is derived using regression analyses with experimental data and it is compared with formulas for compressive strength of cylinders and shear strength of beams without stirrups. Size effects is distinct the following sequence; shear strength of beams without stirrups, compressive strength of C-shaped specimens, compressive strength of cylinders.

1. 서론

콘크리트 휨부재의 압축영역에서 비선형 응력분포를 측정하거나 수학적인 형태로 표현하기는 매우 어렵다. 1955년에 Hognestad 등¹⁾은 원점에서 최대응력까지는 상승하는 곡선과 이 최대응력을 넘어서서는 감소하는 곡선으로 극한 강도설계에서의 콘크리트 응력분포를 나타내었다. 이때 개발된 편심하중을 받는 C형 공시체에 대한 실험방법이 현재 ACI 규준에 채택되어 있다.

이들은 Kaar 등²⁾과 Swartz 등³⁾에 의해 동일한 실험절차를 이용하여 실험적으로 뒷받침되었으며, 극한강도 설계이론의 적용은 등가 사각형 응력분포에 근거를 둔 Mattock 등⁴⁾에 의해 개선되었다.

그러나, 현재까지도 실험을 수행함에 있어서 발생하는 각종 어려움으로 인하여 소수의 제한된 논문만이 출판된 상태이다.

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

** 정회원, 한국전력기술(주) 토목구조기술처 책임기술원

*** 정회원, 한국해양연구소 선임연구원

**** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

***** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

1984년에 Bazant⁵⁾는 콘크리트의 균열 전진시 에너지 평형 개념을 고려하여 기하학적으로 유사한 공시체에 대하여 식 (1)에 주어진 이른바 크기효과 법칙(size effect law)을 유도하였다.

$$\sigma_n = \frac{P}{bd} = \frac{Bf_t'}{\sqrt{1 + \frac{d}{\lambda_0 d_a}}} \quad (1)$$

여기서, σ_n = 파괴시의 공칭강도, P = 최대하중, b = 부재의 두께 또는 폭, d = 부재의 특성길이, f_t' = 콘크리트의 인장강도, d_a = 최대골재크기, B, λ_0 = 실험상수를 각각 나타낸다.

일반적으로, 크기효과는 휨·압축 하중조건이 아닌 순수 인장이나 압축 및 순수 휨 등에 대해 검토되어 왔으며, C형 공시체의 크기 별 콘크리트 압축강도와 응력-변형률 곡선의 감소현상이 매우 흉미로운 현상이나 현재까지도 적절한 해석 혹은 실험 방법이 없는 실정이다.

본 연구에서는, 휨·압축 부재의 압축연단에서 크기효과 법칙의 적용성을 검토하기 위하여 축하중과 휨모멘트를 동시에 받는 콘크리트 부재에 대한 검토가 수행되었다. 실험시에는 McHenry 등이 사용한 실험절차가 채택되었으며 주요 실험변수는 콘크리트의 압축강도가 500kg/cm²일 때 McHenry 등이 사용한 C형 공시체의 크기 비(1:1/2:1/4)였다. 한편, 모든 공시체는 12.5cm의 두께를 가졌다.

2. 실험 공시체 및 절차

2.1 배합설계

C형 공시체를 만들기 위해 선택된 콘크리트 배합표는 표 1에 주어져 있다. 공시체는 수평으로 타설되었으며, 굵은골재 최대치수는 13mm였고 콘크리트를 치밀하게 하기 위하여 고성능 감수제와 진동기가 사용되었다.

표 1 콘크리트 배합표

물시멘트비 (%)	물	시멘트	모래	자갈	Sp* (%)
	(kg/m ³)				
37	177.6	480.0	676.0	1014.0	0.5

* 고성능 AE 감수제(시멘트에 대한 중량비)

콘크리트의 비빔에 사용된 믹서는 공칭용량 80리터의 강제식 믹서이며, 재료를 굵은골재, 잔골재, 시멘트 및 혼화재료의 순으로 투입하여 1분간 건비빔한 다음 물과 고성능 감수제를 동시에 투입하여 3분간 비벼 공시체를 제작하였다. 모든 실린더와 공시체는 타설 후 24시간이 경과하여 탈형했으며, 실험 수행시 까지 습윤포(wet burlap/towel)하에서 기근양생되었다.

표 2에 주어진 콘크리트 압축강도는 9개의 10×20cm 실린더에서 얻은 값을 평균한 결과이다. 실린더의 실험은 공시체와 유사한 재령에 실시되었는데, 이 재령은 표 2에 나타나 있다.

실험시 공시체 중 8개가 성공적으로 수행되었으며, 즉, 실험영역중 중앙부에서 파괴가 발생했으며, 공시체 전체의 파괴에 앞서 쪼개짐(spalling)이 발생했다. 공시체 번호 500-III-1의 경우, 실험 도중에 공시체의 하단에서 지압파괴가 발생했다. 따라서, 여기에 해당하는 자료는 의미가 없었다.

표 2 실험 결과

공시체 번호	재령(days)	f'_c (kg/cm ²)	$P_{1,ult}$ (ton)	비고
500-I-1	85	574	111.00	
500-I-2	87		113.63	
500-I-3	89		107.93	
500-II-1	106		59.66	
500-II-2	113		60.99	
500-II-3	116		57.15	
500-III-1	46		-	지압 파괴
500-III-2	56		32.35	
500-III-3	56		34.53	

큰 공시체 일수록 더욱 취성적인 상태로 파괴되는 경향이 있었는데, 이는 실험장비에 누적되는 에너지 해방률과 관계가 있다. 또한, 이것은 장비의 강성과도 관련이 있다.

2.2 공시체의 상세 및 실험절차

그림 1에는 공시체의 형상 및 설치가 개략적으로 나타나 있다. 실험시의 주요 고려대상 부위인 공시체의 중앙부는 철근으로 보강되지 않았으며, 양쪽 단부는 장비로부터의 하중을 이 중앙부에 전달하기 위하여 휨철근과 전단철근으로 보강하였다.

실험을 수행하는 동안에 12개의 변형률 게이지(15.24cm)를 공시체의 중앙부에 설치하여 변형률을 측정하였다. 또한, 2개의 LVDT가 공시체의 단부에 대한 중앙부의 상대적 처짐을 측정하기 위하여 설치되었다. 여기서 얻은 자료는 휨모멘트의 계산시 사용되는 하중팔(load level arm)인 a_1 과 a_2 를 보정하는데 사용되었다.

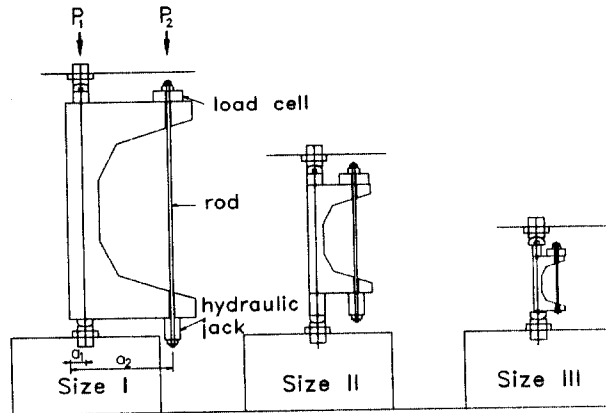


그림 1 공시체 설치

주하중 P_1 은 유압으로 조작되는 250ton용량의 변위제어 장비(UTM)를 통하여 가해졌으며, 부하중 P_2 는 20ton 용량의 손으로 조작되는 hydraulic jack을 이용하여 가해졌는데 크기 III의 경우에는 볼트,

너트 및 강봉으로 구성되는 회전집합체(rotating assembly)를 이용하였다.

실험절차는 다음과 같다. 즉, 인장연단에서의 변형률 게이지 값이 50μ 가 될 때 까지 P_1 을 가한 후 유지시키는 반면, P_2 를 서서히 증가시키면서 공시체 인장단에서의 변형률 게이지 값을 읽는다. 여기서의 변형률 값이 0에 도달하면 P_2 를 고정시킨 후 P_1 을 다시 증가시킨다. 공시체가 파괴될 때까지 이 절차를 반복 수행한다. 각 공시체에 설치된 12개의 변형률 게이지에서의 값은 전 실험과정에 걸쳐 1초 간격으로 자료를 축적시키는 장비에 기록한다.

3. 실험 결과

실험에서 얻어진 자료에 Hognestad 등이 제안한 다음의 식을 이용하면 응력과 변형률 관계를 얻을 수 있다. 이 식들은 선형 변형률 분포를 가정하여 내·외부의 하중 평형상태를 고려하여 얻어졌다.

$$f_c = \epsilon_c \frac{df_o}{d\epsilon_c} + f_o \quad (2-1)$$

$$f_c = \epsilon_c \frac{dm_o}{d\epsilon_c} + 2m_o \quad (2-2)$$

여기서, f_c =콘크리트의 압축강도, ϵ_c =콘크리트의 변형률, f_o =콘크리트의 평균 압축응력, m_o =가해진 모멘트/ bc^2 , b =사각형 부재의 폭, 그리고 c =부재의 중립축으로부터 압축연단까지의 거리이다.

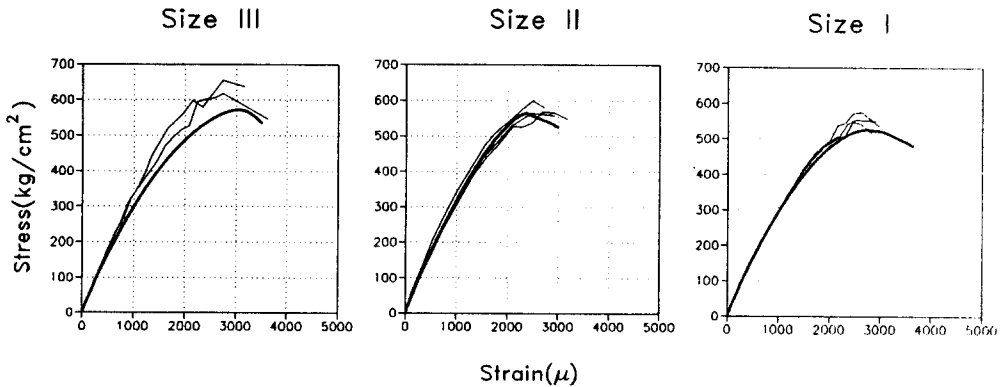


그림 2 공시체와 실린더에서 압축 응력-변형률 곡선의 비교

그림 2에는 식 (2-1)과 (2-2)의 결과를 평균하여 얻은 공시체 압축연단에서의 응력(f_c)이 변형률(ϵ_c)에 대해 나타나 있는데, 일반적으로 식 (2-1)과 (2-2)의 값은 유사하다고 알려져 있다. 여기서 얻어진 응력-변형률 관계는 보의 모든 영역에서 유효하다고 할 수 있으며, 이 곡선과 어떤 변형률 값을 안다면 그 변형률에 해당하는 응력은 이 곡선으로부터 얻을 수 있다.

그림 2에는 공시체 및 이와 같이 타설된 실린더의 압축 응력-변형률 곡선이 그려져 있는데 얇은 실선과 굵은 실선은 각각 공시체와 실린더에서 얻은 결과를 나타내고 있다. 크기 III의 경우에는 차이가

좀 있으나 f_c' 까지는 이들이 전반적으로 일치하고 있다. 이로부터, 실린더의 응력-변형률을 이용하여 공시체의 거동을 상당한 정확성을 가지고 예측하는 것이 가능함을 알 수 있다.

또한, 이 그림으로부터 C형 공시체의 탄성계수는 실린더에서 얻어진 탄성계수 보다 조금 크며, C형 공시체의 최대응력에 대응하는 변형률은 실린더의 해당 값과 비교할 때 조금 작음을 알 수 있다.

김진근 등⁶⁾은 식 (1)의 오른쪽에 강도와 무관한 항인 $\sigma_o (=af_c')$ 을 추가함으로써 다음과 같은 수정된 크기효과 법칙을 제안하였다.

$$\sigma_n = \frac{Bf_c'}{\sqrt{1 + \frac{D}{\lambda_o d_a}}} + af_c' \quad (3)$$

파괴시 C형 공시체의 휨·압축 강도를 예측할 수 있는 모델식을 얻기 위해 8개의 실험자료에 대한 회귀분석을 수행하여 식 (4)를 얻었으며 그 결과는 그림 4에 나타나 있다.

$$\sigma_n = \frac{9.9f_c'}{\sqrt{1 + 256 \frac{d}{d_a}}} + 0.6f_c' \quad (4)$$

여기서, σ_n 와 f_c' 의 단위는 kg/cm^2 이고, d 와 d_a 의 단위는 cm이다.

앞선 연구에서 김진근 등⁷⁻⁸⁾은, 파괴진행영역에 미치는 최대골재 크기의 영향을 고려하고 특성길이의 개념이 새로이 도입하여 다양한 직경과 높이/직경의 비를 가지는 콘크리트 실린더의 압축강도를 얻기 위한 다음과 같은 식 (5)를 제안하였다.

$$\sigma_n = \frac{0.4f_c'}{\sqrt{1 + 0.2(h-d)}} + 0.8f_c' \quad (5)$$

여기서, σ_n 와 f_c' 의 단위는 kg/cm^2 이고, h 와 d 의 단위는 cm이다.

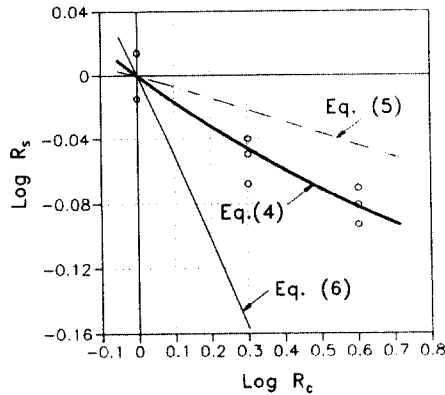


그림 3 식(4)와 (5) 및 (6)의 비교

또한, 스테럽이 없는 고강도 철근콘크리트 보의 전단강도 특성에 관한 실험적 연구⁹⁾를 통하여 이

전단강도를 예측하기 위한 다음의 식 (6)을 제안하였다.

$$v_u = 3.5f_c'^{1/3} \rho^{3/8} (0.4 + d/a) \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 0.008d}} + 0.18 \right) \quad (6)$$

여기서, f_c' 과 v_u 의 단위는 MPa이고 a 와 d 의 단위는 mm이다. 그림 4에서 크기 별 전단강도의 감소현상을 나타내기 위해 선택된 부재는 공시체 번호 D142였다.

그림 3은 R_s 를 부재의 중립축으로부터 압축연단 까지의 거리의 비인 R_c 의 함수로 나타내고 있다. 여기서, R_s 는 $P_{1,ult}/bc$ 로 정의되는 응력의 비이다. 이 그림에서 굵은 실선과 일점 쇄선 및 얇은 실선은 각각 식 (4), 식 (5) 및 식 (6)으로 부터의 결과를 나타낸다.

이로부터 스티럽이 없는 보의 전단강도, 휨·압축을 받는 C형 공시체의 압축강도 그리고 실린더의 압축강도 순으로 크기효과가 두드러 짐을 알 수 있다.

4. 결 론

휨·압축 부재의 크기효과를 검토하기 위해 콘크리트 압축강도가 500kg/cm²인 무근의 C형 콘크리트 공시체와 실린더에 대한 실험적 연구가 수행되었으며 그 결과 다음의 결과가 도출되었다.

- 1) 공시체의 크기가 증가함에 따라 파괴시의 휨·압축 강도가 감소하는 크기효과가 뚜렷이 나타나고 있다.
- 2) 각종 공시체에 대한 크기효과를 검토한 결과, 스티럽이 없는 보의 전단강도, 휨·압축을 받는 C형 공시체의 압축강도 그리고 실린더의 압축강도의 순으로 크기효과가 두드러 짐을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) 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, also PCA Development Bulletin D6.
- 2) Kaar, P. H., Hanson, N. W. and Capell H. T., "Stress-Strain Characteristics of High-Strength Concrete", PCA Research and Development Bulletin RD051.01D, 1977, pp.1-10.
- 3) Swartz, S.E., Nikaeen, A., Narayan Babu, H.D., Periyakaruppan, N., Refai, T.M.E., "Structural Bending Properties of Higher Strength Concrete", High-Strength Concrete, SP-87, ACI, 1985, pp.147-178.
- 4) Mattock, A. H., Kriz, L. B. and Hognestad, E., "Rectangular Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design", Journal of ACI, V.32, No.8, Feb. 1961, (Proceedings V.57), pp.875-928, also PCA Development Bulletin D49.
- 5) Bazant, Z.P., "Size Effect in Blunt Fracture; Concrete, Rock", Metal, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, V.110, No.4, Apr. 1984, pp.518-535.
- 6) 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.
- 7) 김진근, 어석홍, 이성태, "비표준형 실린더 공시체에 대한 압축강도의 크기효과", 콘크리트학회지, 제9권 1호, 1997, pp.105-113.
- 8) Kim, J.K., Yi, S.T., Park, C.K., and Eo, S.H., "Size Effect on the Compressive Strength of Plain and Spirally-Reinforced Concrete Cylinders", ACI Structural Journal, Oct. 1997(accepted).
- 9) Kim, J.K. and Park, Y.D., "Prediction of Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement", ACI Materials Journal, V.93, No.3, May-June, 1996, pp.213-222.