

# 콘크리트의 휨압축강도에 미치는 부재깊이의 영향

## Effects of Specimen Depth on Flexural Compressive Strength of Concrete

이 성 태\*      김 진 근\*\*      이 윤\*\*\*      김장호\*\*\*\*      양은익\*\*\*\*\*  
Yi, Seong Tae    Kim, Jin Keun    Lee, Yun    Kim, Jang-Ho    Yang, Eun Ik

### ABSTRACT

Currently, in evaluating a flexural strength of a concrete member, the effect of specimen depth has not been systematically studied, even though its effect on ultimate strength of a section is very important. For all types of loading conditions, the trend is that the strength of a member tends to decrease when the member depth increases.

In this study, the influence of specimen depth on flexural compressive strength of concrete member was examined experimentally. A series of C-shaped specimens subjected to axial compressive force and bending moment were tested using three geometrically similar specimens with different length-to-depth ratios ( $h/c = 1, 2$  and  $4$ ) which have compressive strength of 55 MPa.

The results indicate that the flexural compressive strength decreased as the specimen depth increased. A model equation was derived based on regression analyses of the experimental data. Also, the results show that ultimate strain decreases as the specimen depth increases. Finally, a general model equation for the depth effect is proposed.

### 1. 서론

콘크리트 구조물의 설계에 사용되는 대부분의 설계기준에서는 콘크리트의 압축강도에 대한 크기효과를 고려하지 않고 있으나, 취성파괴에서 이 효과는 뚜렷이 나타나고 있다. 특히 콘크리트, 암석, 얼음, 세라믹 및 복합체와 같은 유사취성(quasi-brittle) 재료의 압축파괴에서는 크기효과가 현저히 나타나고 있다. 이러한 압축파괴는 누적된 에너지의 이완이 주요 원인인데 그 전반적인 거동은 과거부터 광범위하게 연구되어 왔으나 현재까지도 인장파괴에 비하여 충분히 밝혀지지 않고 있는 상태이며 이에 대한 크기효과의 연구도 크게 부족한 실정이다.

\* 정회원, 한국전력기술(주) 토목건축기술처 책임기술원

\*\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

\*\*\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

\*\*\*\* 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 교수

\*\*\*\*\* 정회원, 강릉대학교 토목공학과 교수

한편 2점 재하되는 철근콘크리트 보 단면의 휨압축강도는 참고문헌 1에서 언급한 바와 같이 두 연직하중과 중립축 사이 부분의 콘크리트 강도와 직접적인 연관이 있다. 따라서 보 단면의 크기효과를 검토할 때는 중립축 깊이( $c$ )를 정확하게 알아야 한다. 그러나 실험체의 중립축 깊이는 부재의 크기, 철근비, 가해진 하중의 크기 및 하중 가력점의 위치 등에 따라 변할 수 있어서 이를 정확하게 알기는 매우 어려운 일이다. 따라서 본 논문에서는 두 연직하중 사이의 거리, 즉 콘크리트 부재의 길이( $h$ )는 일정하게 하고 중립축 깊이만을 실험변수로 하여 이 값이 단면의 휨압축강도에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

참고문헌<sup>(1)</sup>에서는 휨압축강도의 크기효과에 대한 연구를 수행하는 일환으로서 실험체의 크기 비에 따른 휨압축강도의 변화를 연구하고 모델식을 제시한 바 있다. 그러나 이는 실험체의 길이/깊이의 비가 2/1인 경우에 한해 제한적으로 적용 가능하다. 그리고 참고문헌<sup>(2)</sup>에서는 부재의 깊이는 일정하게 하고 길이만을 변화시킨 경우에 대하여 휨압축강도를 예측할 수 있는 모델식을 실험을 통하여 구하였다. 따라서 이 연구에서는 그림 1에서와 같이 실험체의 길이는 일정하게 하고 깊이만을 변화시킨 경우에 대하여 휨압축강도를 예측할 수 있는 모델식을 실험을 통해 구한 후, 이 경우와 기존의 자료<sup>(1,2)</sup>의 경우에도 동시에 적합한 보다 일반적인 모델식을 제시하고자 한다.

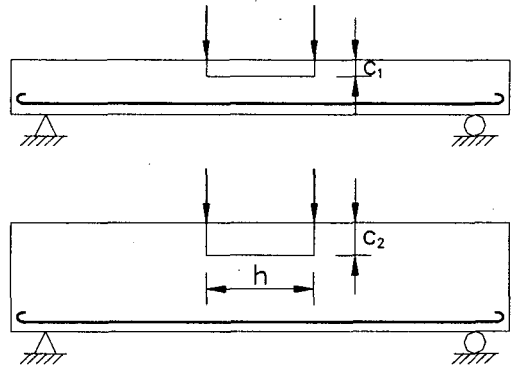


그림 1 철근콘크리트 보

## 2. 실험개요

### 2.1 실험변수

휨하중을 받는 철근콘크리트 보의 크기효과를 구명하기 위해 사용되는 대부분의 실험체에 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 실험체를 선택하였다. 실험시에는 Hognestad 등<sup>(3)</sup>이 사용한 실험절차가 채택되었으며 주요 실험변수는 콘크리트의 압축강도가 55 MPa일 때 그림 2와 같은 C형 실험체의 길이/깊이의 비( $h/c=1, 2$  및 4)로 하였다. 그리고 실험체의 길이와 두께( $b$ )는 각각 20.0 cm와 12.5 cm로 일정하게 하였다.

### 2.2 배합설계

C형 실험체를 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 치기를 하였으며 작업성을 향상시키고 다짐을 원활히 하기 위하여 고성능 감수제와 진동기를 사용하였다. 모든 원주형 실험체와 C형 실험체는 치기를 한 후 24시간이 경과하여 탈형했으며, 실험 수행시까지 습윤포를 덮어 28일 이상 기건양생하였다.

### 2.3 실험체의 크기, 형상 및 실험절차

그림 2에는 C형 실험체의 크기, 형상 및 하중 가력점 등이 나타나 있다. 실험의 주요 고려 대상 부

위인 실험체의 중앙부는 무근으로 하였으며, 양쪽 단부는 가력 장비로부터의 하중을 이 중앙부에 전달하기 위하여 휨철근과 전단철근으로 보강하였다. 실험체 당 8개의 변형률 게이지를 실험체의 중앙부에 부착하였으며, 실험을 수행하기 시작한 때부터 실험체가 파괴될 때까지 변형률을 측정하였다. 또한 2개의 LVDT를 실험체의 단부에 대한 중앙부의 상대적 변위(수평방향)를 측정하기 위하여 실험체의 압축 측에 설치하였다.

표 1 콘크리트 배합표

w/c (%)	s/a (%)	unit weight(kgf/m <sup>3</sup> )				S.P.* (%)	MPa		
		W	C	S	G		$f_{cu}$	$f_{sp}$	$E_c$
37	40	178	480	676	1014	1	55	5	$3.1 \times 10^4$

\* superplasticizer(ratio for cement weight)

(unit ; cm)

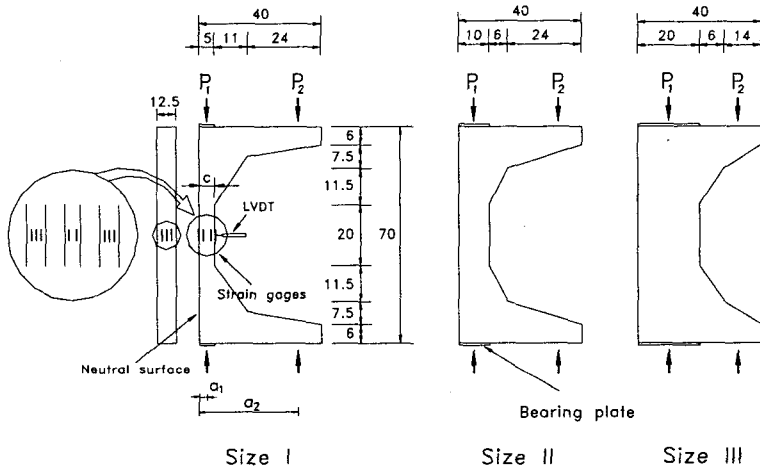


그림 2 실험체의 크기 및 형상

하중은 먼저 실험체 인장연단의 변형률 게이지 값이 특정한 값( $50 \times 10^{-6}$ )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 정지시키고 다시  $P_1$ 을 증가시켰다. 실험체가 파괴될 때까지 이 절차를 반복 수행하는데, 콘크리트의 비탄성영역에서는 정확한 실험자료를 얻기 위하여 변형률 게이지에서의 값을 더욱 작게 취하였다. 각 실험체에 부착된 8개의 변형률 게이지 및 2개의 LVDT의 측정값은 전 실험과정에 걸쳐 연속적으로 자료를 축적시키는 계측기로 취하였다.

축력을 유발시키는  $P_1$ 은 유압으로 조작되는 2500 kN 용량의 만능재료시험기에 의해 가해졌는데 제어방식으로는 변위제어법을 이용했으며, 축력과 휨력을 유발시키는  $P_2$ 는 200 kN 용량의 수동식으로 조작되는 유압재를 이용하여 가했다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 실험결과

C형 실험체와 원주형 실험체의 압축강도의 측정은 동일 재령에서 실시되었다. 표 2의 실험체 번호

에서 I, II 및 III은 실험체의 크기를, 그리고 아라비아 숫자는 각 실험체의 일련번호를 나타낸다. 표 2에 주어진 콘크리트의 압축강도( $f_{cu}$ )는 시리즈 당 3개의  $\phi 10 \times 20$  cm 원주 실험체에서 얻은 값을 평균한 결과이며 55 MPa의 값을 얻었다.

$P_u$ ,  $\epsilon_u$ ,  $x_u$  및  $\delta$ 는 각각 실험체가 파괴될 때의 주 하중과 종 하중의 합( $P_1 + P_2$ ), 콘크리트 압축연단의 극한변형률, 단면의 곡률과 실험체 중앙부의 수평방향 변위를 의미한다.

실험 시 모든 실험체 중 8개의 실험체가 실험영역 중앙부의 압축연단에서 파괴되었으며, 실험체 전체의 파괴에 앞서 중앙부에서 파쇄(spalling)가 발생했다. 실험체 III-1의 경우에는 극한하중에 도달하기 전에  $P_2$  하중용 붐이 파괴되어 재 실험에 들어갔으며, 이 장치들을 보완한 후 다시 동일한 실험을 수행한 결과 같은 크기의 타 실험체 보다 작은 극한하중을 얻었다. 따라서 여기에 해당하는 실험값은 결과 분석에서 제외하였다.

표 2 C형 실험체에 대한 실험결과

No. of specimen	$P_u$ (kN)	$\epsilon_u$ ( $\times 10^{-3}$ )	$x_u$ ( $\times 10^{-3}$ /cm)	$\delta$ (mm)
I-1	283	3.37	0.67	2.33
I-2	272	3.68	0.74	2.13
I-3	279	3.53	0.71	1.96
II-1	531	3.77	0.38	1.81
II-2	532	3.27	0.33	1.43
II-3	518	3.47	0.35	1.26
III-1*	-	-	-	-
III-2	1006	2.94	0.15	1.03
III-3	1004	3.13	0.16	0.90

\* 극한하중에 도달하기 전에  $P_2$ 용 붐이 파괴

### 3.2 실험체 길이에 따른 강도의 크기효과

Bazant의 크기효과법칙(SEL)이 발표된 이후, 김진근 등<sup>(4)</sup>은 부재의 크기와 무관한 항인  $\sigma_0$  항을 고려함으로써 초기 균열이 없는 경우 혹은 비유사 균열을 가진 콘크리트 부재의 강도 예측을 위한 수정된 크기효과법칙(MSEL)을 제안하였다. 이에 대한 응용으로서 축압축력을 받는 원주형 실험체<sup>(5)</sup> 및 휨압축력을 받는 C형 실험체<sup>(1,2)</sup>에 대한 연구결과가 발표된 바 있다.

여기서는 파괴시 C형 실험체의 길이에 따라 휨압축강도를 예측할 수 있는 모델식을 얻기 위해 수정된 크기효과법칙과 본 실험에서 얻은 8개(표 2)의 실험값에 대한 회귀분석을 수행하여 식(1)을 얻었으며, 그 결과는 그림 3에 나타나 있다.

$$f_{cu}(c) = \frac{0.70 f_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{c}{2.6} \left\{ 4.17 \left( \frac{1}{c} \right)^{0.53} \right\}}} + 0.47 f_{cu} \quad (1)$$

여기서  $f_{cu}(c)$ 는  $P_u/bc$ 에 의해 계산된 C형 실험체의 휨압축강도이고,  $f_{cu}$ 는 원주형 실험체에 대한 콘크리트의 압축강도를 각각 나타내는데 단위는 MPa이다.

그림 3에서 원은 C형 실험체에서 얻은 실험자료, 굵은 실선은 식(1)로부터의 결과를 나타낸다. 이 그림은 부재의 길이가 증가함에 따라 파괴시의 휨압축강도는 점점 감소함을 나타내고 있다. 위의 식(1)을 실험자료와 직접 비교하기 위한 통계해석을 수행했는데 그 결과, 상관계수( $r$ )는 0.953였으며 표준편차( $s$ )는 0.011이었다. 따라서 길이가 20 cm인 부재에 있어서 임의의 중립축 깊이를 갖는 보의 단면에 대한 휨압축강도는 이 부재의 길이 및 콘크리트의 압축강도를 식(1)에 대입시키면 얻을 수 있다.

### 3.3 극한변형률에 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 실험체 실험에 의해서도 비슷한 결과를 얻었다. 그림 4에서 수평으로 그려진 굵은 파선은 ACI에 제시된 0.003을 의미하는데, 이로부터 모든 실험체의 극한변형률은 0.003보다 크며 이 극한변형률에도 부재의 깊이에 따른 크기효과가 존재함을 알 수 있었다.

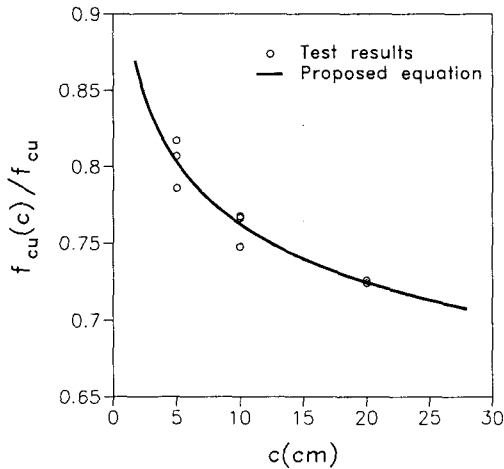


그림 3  $f_{cu}(c)/f_{cu}$ 와  $c$ 의 관계

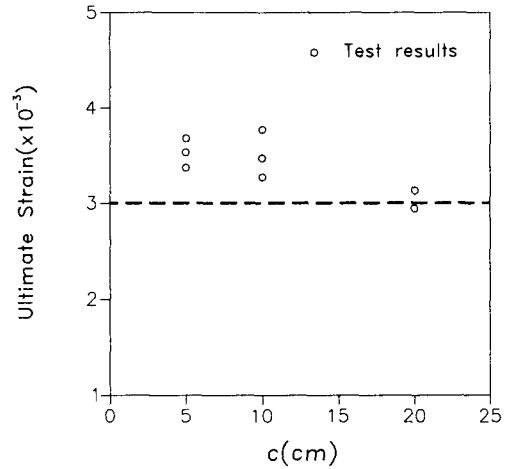


그림 4 극한변형률과 부재깊이의 관계

### 3.4 응력-변형률 관계

그림 5에는 C형 실험체 압축연단에서의 응력( $f_c$ )과 변형률( $\epsilon_c$ )의 관계가 나타나 있다. 얇은 실선은 실험결과에 3차의 비선형 다항식을 이용한 회귀분석을 통해 얻었으며 굵은 실선은 원주실험체에서 얻은 결과이다. 깊이효과에서도  $f_{cu}$ 까지는 원주실험체와 C형 실험체의 거동이 유사함을 알 수 있다.

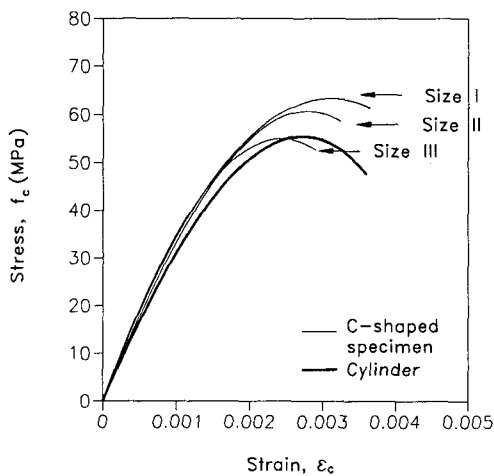


그림 5 응력-변형률 관계

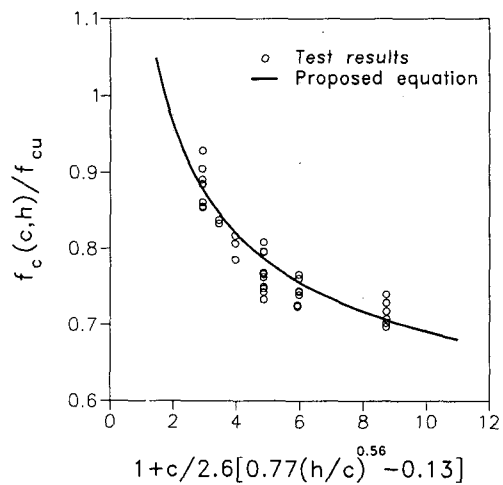


그림 6  $f_{cu}(c, h)/f_{cu}$ 와  $1+c/2.6[0.77(h/c)^{0.56}-0.13]$ 의 관계

그러나 이 영역을 넘어서면 부재의 깊이가 줄어들수록 C형 실험체의 최대 응력 및 이 최대 응력에 대응하는 변형률은 커지며, 더욱 연성적인 거동을 보이고 있음을 알 수 있다.

### 3.5 C형 실험체에 대한 크기효과 법칙의 일반화

식(2)는 이 연구의 실험결과와 기존의 연구결과<sup>(1,2)</sup>를 동시에 만족할 수 있는 총 39개의 C형 실험체에 대한 일반화된 모델식으로서 회귀분석을 통해 얻어졌다.

$$f_c(c, h) = \frac{0.70f_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{c}{2.6} \left\{ 0.77 \left( \frac{h}{c} \right)^{0.56} - 0.13 \right\}}} + 0.47f_{cu} \quad (2)$$

여기서  $h/c \geq 3$ 이면  $h/c = 3$ 으로 해야 한다. 그림 6에서 원은 C형 실험체에서 얻은 실험 값을 굵은 실선은 식(2)로부터의 결과를 각각 나타내는데 식(2)가 실험결과를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 상관계수( $r$ )는 0.931이었으며 표준편차( $s$ )는 0.023이었다. 따라서 임의의 부재 깊이와 길이를 갖는 보의 휨압축강도는 이 부재의 중립축 깊이, 길이 및 콘크리트의 압축강도를 식(2)에 대입시키면 얻을 수 있다.

## 4. 결 론

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

- (1) 부재의 깊이가 증가함에 따라 파괴시의 휨압축강도가 감소하는 현상이 뚜렷이 나타나고 있으며 실험결과를 이용하여 이를 예측할 수 있는 모델식을 제시하였다. 또한 이 실험에서 얻은 실험결과와 기존의 실험결과<sup>(1,2)</sup>를 동시에 고려하여 보다 일반적인 휨압축강도에 대한 크기효과 모델식을 제안하였다.
- (2) C형 실험체에서 극한변형률에도 부재의 깊이에 따른 크기효과가 존재함을 확인했으며, 응력-변형률 곡선에서 부재의 깊이가 작을 수록 최대압축강도와 이 최대압축강도에 대응하는 변형률이 부재의 깊이가 큰 실험체에 대한 값보다 더 커짐을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Kim, J.K., Yi, S.T. and Yang, E.I., "Size Effect on Flexural Compressive Strength of Concrete Specimens", ACI Structural Journal, V.97, No.2, Mar.-Apr. 2000, pp.291-296.
2. 김진근, 이성태, 이태규, "부재의 깊이가 콘크리트의 휨압축강도에 미치는 영향", 콘크리트학회논문집, 제 11권 4호, 1999, pp.63-71.
3. 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.
4. 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.
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.