

# 철근콘크리트 보의 휨압축강도 및 변형률에 대한 크기효과

## Size Effect on Flexural Stress-Strain Relationship of Reinforced-Concrete Beams

김민수\*      김진근\*\*      김장호\*\*\*  
Kim, Min Su      Kim, Jin Keun      Kim, Jang Ho

### ABSTRACT

It is important to consider the effect of depth when estimating the ultimate strength of a concrete flexural member because the strength always decreases with an increase of member size.

In this study, the size effect of reinforced concrete beam was experimentally investigated. For this purpose, a series of beam specimens subjected to 2-point bending load were tested. More specifically, three different depth ( $d=15, 30,$  and  $60$  cm) of reinforced concrete beams were tested to investigate the size effect. The shear-span to depth ratio ( $a/d=3$ ) and thickness ( $20$  cm) of the specimens were kept constant where the size effect in out-of-plan direction is not considered.

The test results are fitted using least square method (LSM) to obtain parameters for modified size effect law (MSEL). The analysis results indicate that the flexural compression strength and ultimate strain decreases as the specimen size increases. Finally, more general parameters for MSEL are suggested.

### 1. 서론

콘크리트의 파괴역학에 대한 연구결과로부터 인장력을 받는 콘크리트의 파괴가 특정 파괴영역 (fracture zone)에 국한된다는 사실이 밝혀졌다. 또한 최근에는 압축력을 받는 콘크리트에서도 파괴가 특정영역에서 발생한다는 연구결과<sup>(1),(2)</sup>가 발표되기 시작했다. 압축파괴는 인장파괴에 비해 상대적으로 복잡하고 미세균열이 넓은 영역에 고르게 분포되어 발생하므로 크기효과도 작게 일어난다. 하지만 구조물의 설계에 사용되는 대부분의 설계기준에서는 콘크리트의 압축강도에 대한 크기효과를 고려하지 않고 있는 실정이다. 콘크리트 휨부재의 압축영역에서 비선형적인 응력분포를 측정하거나 적절한 모델 식으로 표현하기는 쉽지 않다. 1955년에 Hognestad 등<sup>(3)</sup>은 실험을 통하여 원점에서 최대응력까지 상승하는 곡선과 최대응력 이후로는 감소하는 곡선으로 강도설계에서의 콘크리트 응력분포를 나타내었다. 이 때 제안된 편심하중을 받는 C형 공시체에 대한 실험방법이 현재 ACI 기준식의 유도에 채택되어 있다. 그러나 지금까지도 휨압축력을 받는 콘크리트 부재의 응력분포를 나타내기 위해서 휨압축실

\* 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, 박사과정

\*\* 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, 교수

\*\*\* 정회원, 세종대학교 토목환경공학과, 전임강사

험을 수행함에 있어서 발생하는 각종 어려움 등으로 소수의 제한된 연구결과만이 발표되고 있으며, 실제 철근콘크리트 보를 사용한 실험결과는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 철근콘크리트 보의 실험을 통해 유효깊이에 따른 휨압축강도-변형률의 크기 효과를 구명하고 휨압축강도에 대한 모델식을 구하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험체

시편을 제작하기 위해 설계강도  $300 \text{ kgf/cm}^2$ , 슬럼프 12 cm, 굵은골재의 최대치수 20 mm인 레미콘으로 타설하였으나, 실험시의 압축강도는 측정결과  $375 \text{ kgf/cm}^2$ 였다. 크기에 따라 2개씩 총 6개의 보를 제작하였으며,  $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$  원주형 공시체도 함께 제작하여 압축강도 및 조깅인장강도 측정에 사용하였다. 그림 1과 표 1은 실험변수에 따른 시편의 형상, 시편명 및 배근상세를 나타낸 것이다. 주요 실험변수는 보의 유효깊이( $d \approx 15, 30, 60 \text{ cm}$ )로 하였으며 시편의 폭은 20 cm로 일정하게 하였다. 그리고 중앙의 압축부는 순수한 콘크리트의 압축거동을 보기 위해 압축철근을 배근하지 않았다. 공시체는 타설 후 24시간이 경과한 다음 탈형하였으며, 실험수행시까지 습윤포를 덮어 기건양생하였다.

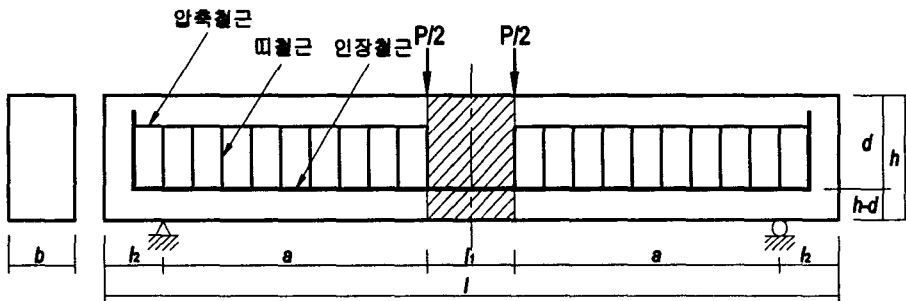


그림 1 시편의 형상

표 1 시편의 크기 및 배근상세

시편번호	$h$ (cm)	$d$ (cm)	$l_1$ (cm)	$l$ (cm)	$a$ (cm)	$l_2$ (cm)	인장철근	압축철근	띠철근	인장철근비 (%)	인장철근비/ 균형철근비
I	65	58.5	60	125	180	20	2-D25+D19	2-D10	D10@200	1.33	0.45
II	35	30.0	30	230	90	20	2-D16+D19	2-D10	D8@100	1.14	0.44
III	20	15.3	15	460	45	20	3-D13	2-D10	D6@50	1.11	0.42

표 2 철근의 인장시험결과

시편에 따라서 인장철근비가 다른 것은 표 2에서 볼 수 있듯이 철근의 지름에 따라 항복강도가 틀리기 때문에 인장철근의 항복시에 동일한 거동을 나타낼 수 있도록 인장철근비를 조절하였다.

	항복강도, $f_y$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	인장강도, $f_u$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	$f_u / f_y$	연신율 (%)
D13	3984	5936	1.49	23.3
D16	4539	6792	1.50	29.1
D19	4824	7067	1.46	26.9
D25	4766	7106	1.49	24.9

## 2.2 실험방법

하중가력 방법은 250톤 용량의 만능재료시험기를 사용하여 그림 1과 같이 2점 휨하중을 변위제어법으로 가하여 실험을 수행하였다. 계측은 로드셀을 사용하여 하중을 측정하고 시편 I, II, III에서 각각 시편 중앙부에 22, 22, 18개의 스트레인 게이지로 변형률을 측정하고, 16, 12, 12개의 LVDT를 사용하여 처짐을 측정하였다. 그리고 스트레인 게이지는 인장측보다 압축측에 조밀하게 부착하였다.

## 3. 실험 결과

표 3은 각 시편의 실험결과를 요약한 것이다. 시편번호에서 I, II, 및 III은 시편의 크기를, 그리고 숫자는 시편의 일련번호를 나타낸다.  $f_{cu}$ ,  $f_{sp}$ ,  $f_{cu}(d)$ ,  $\epsilon_{u, test}$  그리고  $\epsilon_{u, anal}$ 는 각각 시편과 함께 제작한  $\phi 10 \times 20$  cm 원주형 공시체의 압축강도를 평균한 값, 조깅인장강도를 평균한 값, 해석결과 얻어진 철근콘크리트 보 압축연단의 휨압축강도, 실험결과 얻어진 압축연단의 변형률, 그리고 해석결과 얻어진 압축연단의 극한변형률이다. 여기서  $\epsilon_{u, test}$ 는 최대응력에서의 변형률이나 극한 변형률이 아니라 압축연단에 부착된 스트레인 게이지의 측정값에서 신뢰성이 있다고 판단되는 최대변형률이다. 이는 압축연단에서는 최대응력 이후 하강부분의 변형률이 압축연단에서 파쇄가 일어나기 시작하면 스트레인 게이지가 콘크리트의 변형률을 적절히 구현하지 못하기 때문이다. 그리고  $\epsilon_{u, anal}$ 는 해석적으로 얻어진 응력-변형률 관계에서 단면모멘트가 가장 클 때의 변형률이다.

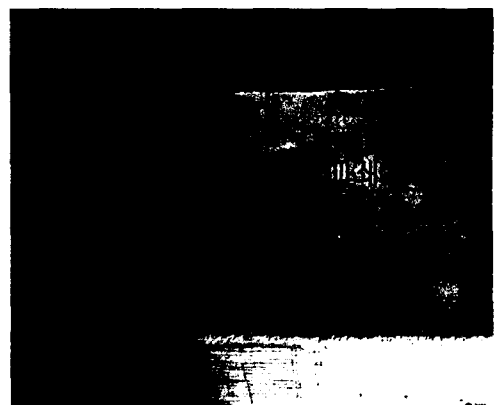
실험시 모든 시편은 초기에 받침과 하중 사이에서 사인장 균열이 발생한 후 중앙부에도 균열이 발생하기 시작하며 그림 2와 같이 중앙부의 압축연단에서 파쇄가 일어나며 파괴에 도달하였다. 그리고 균열의 개수는 시편의 크기가 클수록 많이 발생하였다. 그림 3은 압축연단의 변형률 변화에 따른 중립축의 변화를 평균하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 시험체에서 변형률이 증가함에 따라서 중립축의 위치는 압축연단쪽으로 올라가며 시편의 크기에 따라서는 차이가 크게 나타나지 않지만 변형률  $2000 \times 10^{-6}$  이상에서는 크기가 작은 시편의 중립축이 조금 더 위에 있는 것으로 나타났다. 그림 4와 5는 3차의 비선형 다항식을 이용한 회귀분석으로부터 구한 휨압축응력과 변형률의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 구해진 휨압축응력-변형률의 관계는 보

표 3 각 시편에 대한 실험결과

시편번호	$f_{cu}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$f_{sp}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$f_{cu}(d)$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$P_u$ (tonf)	$\epsilon_{u, test}$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_{u, anal}$ ( $\times 10^{-6}$ )
I - 1	375	38	383	49.6	2200	2825
I - 2			368	48.9	2270	2720
II - 1			405	25.2	3080	3245
II - 2			412	24.8	2990	3130
III - 1			443	13.1	3370	4110
III - 2			435	12.9	3410	4420



(a) 옆면



(b) 윗면

그림 2 실험 후의 시험체 중앙부의 파괴 모습

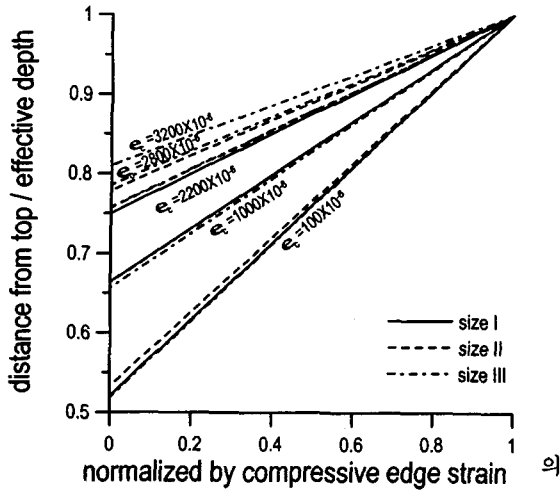


그림 3 압축연단의 변형률에 따른 중립축의 변화

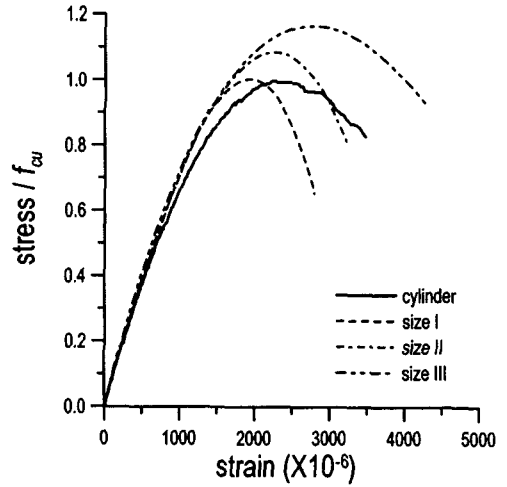


그림 4 시편크기에 따른 휨압축응력-변형률의 관계

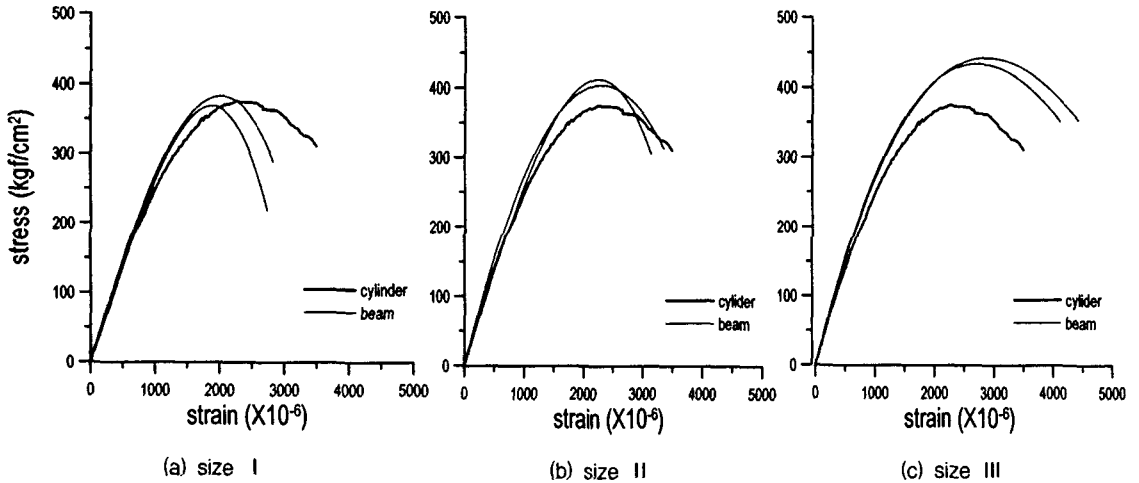


그림 5 휨압축 응력-변형률 관계

모든 위치에서 유효하므로 임의의 압축응력은 이 곡선과 특정 변형률을 알면 구할 수 있다. 응력-변형률 곡선을 구하기 위해서는 압축연단의 변형률과 중립축의 위치가 필요한데  $\epsilon_{u, test}$  이후에는 모멘트와 변위로 부터 구한 곡률로 변형률을 구하였으며 중립축의 위치는  $\epsilon_{u, test}$  이후에 일정한 것으로 가정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 시편의 크기가 작을수록 휨압축강도의 크기와 그때의 변형률 및 극한변형률도 증가하여 연성적인 거동을 하는 것으로 나타났다. 즉, 상승부에서는 크기의 차이에 따라 거의 차이가 없지만 하강부에서 그 차이가 뚜렷하게 나타났다. 여기서 극한변형률  $\epsilon_{u, anal}$  는 앞서 언급하였듯이 단면의 모멘트가 가장 클때의 변형률을 의미한다. 이로부터 휨압축응력-변형률 관계에서 크기효과가 존재함을 알 수 있다.

그림 6은 보의 유효깊이에 따른 극한변형률을 나타낸 것이다. 직사각형 단면의 철근콘크리트 보가 휨

압축을 받아 파괴에 이를 때, 압축연단 콘크리트의 극한변형률은 대개  $3000 \sim 4000 \times 10^{-6}$ 의 범위에 있다고 알려져 있다. 그림 6에서 수평의 실선은 ACI 및 국내의 설계기준에서 제시된  $3000 \times 10^{-6}$ 을 의미하는데, 해석결과 size I의 경우  $2800 \times 10^{-6}$  정도로 이 값보다 작으며 size II와 III는 각각 3200,  $4250 \times 10^{-6}$  정도로 기준보다는 큰 것으로 나타났다. 따라서 보의 크기가 큰 경우에는 이 값에 대한 검토가 필요하다고 판단된다.

그림 7은 그림 4에서 구한 휨압축응력-변형률 곡선을 이용하여 최대 휨압축응력과 평균 휨압축응력의 비( $\beta_1$ )에 대해 검토한 결과이다. 수평의 실선은 ACI 및 국내의 설계기준에서 등가응력으로  $0.85 f_{cu}$ 를 택하였을 때의  $\beta_1$  값인 0.78을 나타낸다. 이로부터  $\beta_1$  값은 유효깊이가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이지만 설계기준에서 제시하는 값보다는 큰 값을 보이고 있다. 하지만 설계기준에서  $\beta_1$  값을 정할 때 근거한 참고문헌<sup>(4)</sup>의  $\beta_1$  값도 상당히 보수적인 값이라고 언급하고 있다.

Bazant의 크기효과법칙(SEL)<sup>(6)</sup>이 발표된 이후, 김진근 등<sup>(6),(7)</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. 표 3의 실험결과를 SEL과 MSEL을 이용하여 회귀분석을 수행하였으며 아래와 같은 식을 얻었고, 그 결과는 그림 8에 나타나 있다.

$$f_{cu}(d) = \frac{1.25f_{cu}}{\sqrt{1+0.01d}} \quad (\text{SEL}) \quad (1)$$

$$f_{cu}(d) = \frac{1.07f_{cu}}{\sqrt{1+0.45d}} + 0.80f_{cu} \quad (\text{MSEL}) \quad (2)$$

여기서,  $f_{cu}(d)$ ,  $f_{cu}$ , 그리고  $d$ 는 각각 휨압축강도( $\text{kgf/cm}^2$ ), 원주공시체의 압축강도( $\text{kgf/cm}^2$ ), 그리고 보의 유효깊이( $\text{cm}$ )를 나타낸다.

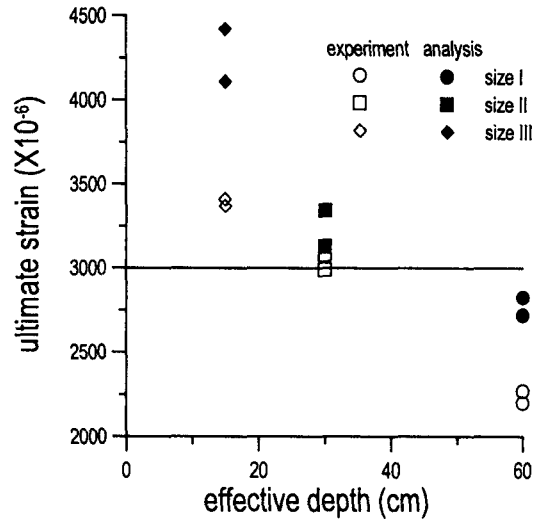


그림 6. 유효깊이에 따른 극한변형률의 변화

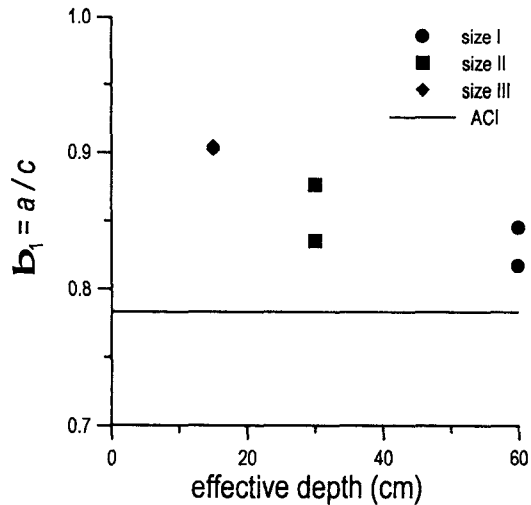


그림 7. 보의 유효깊이에 따른  $\beta_1$  변화

### 3. 결론

휨하중을 받는 철근콘크리트 보에서 휨압축강도 및 변형률에 보의 유효깊이가 미치는 영향을 검토하기 위한 실험결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 보의 유효깊이가 증가함에 따라 휨압축강도, 최대 휨압축응력에서의 변형률, 그리고 극한변형률이 감소하며 취성적인 파괴거동을 나타내므로 휨압축강도-변형률 관계에서 크기효과가 있는 것으로 나타났다.
- (3) 실험결과를 이용하여 보의 휨압축강도에 대한 다음과 같은 크기효과 모델식을 제안하였다.

$$f_{cu}(d) = \frac{1.07f_{cu}}{\sqrt{1 + 0.45d}} + 0.80f_{cu}$$

- (3) 설계기준에서 제시하고 있  $\beta_1$  는 값과 보의 극한 변형률 값은 크기에 따라 변화하며, 이에 대한 검토가 필요하다고 판단된다.

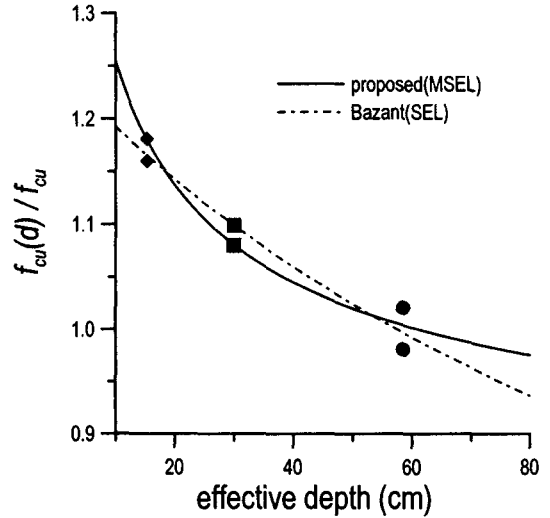


그림 8. 보의 유효깊이에 따른  $f_{cu}(d)/f_{cu}$ 의 변화

### 감사의 글

본 연구는 한국과학기술평가원의 “국가지정연구실 사업”의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Hillerborg, A., "Fracture Mechanics Concepts Applied to Moment Capacity and Rotational Capacity of Reinforced Beams," Proc. Int. Conf. Fracture and Damage Mechanics of Concrete and Rock, Vienna, 1988, pp.233~240.
2. Bazant, Z.P., "Identification of Strain-Softening Constitutive Relation from Uniaxial Tests by Series Coupling Model for Localization," Cement and Concrete Research, V19, 1989, pp.973~977.
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, pp.455~479.
4. Nilson, A.H. and Slate, F.O., " Structural Properties of Very High Strength Concrete." Second Progress Report, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, 1979, 62p.
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. Km, J.K. and Eo, S.H., "Size Effect in Concrete Specimens with Dissimilar Initial Cracks," Magazine Concrete Research, V.42, No.153, 1990, pp.233~238.
7. Km, J.K. and Eo, S.H., Park, H.K., "Size Effect in Concrete Structures without Initial Crack," Fracture Mechanics : Application to Concrete, SP-118, ACI, Detroit, 1989, pp.179~196.