

철근콘크리트 보의 휨압축강도에 대한 크기효과

김민수^{1)*} · 김진근¹⁾ · 이성태²⁾ · 김장호³⁾

¹⁾한국과학기술원 건설 및 환경공학과 ²⁾한국전력기술(주) ³⁾세종대학교 토목환경공학과

(2002년 6월 7일 원고접수, 2002년 9월 13일 심사완료)

Size Effect on Flexural Compressive Strength of Reinforced Concrete Beams

Min-Su Kim^{1)*}, Jin-Keun Kim¹⁾, Seong-Tae Yi²⁾, and Jang-Ho Kim³⁾

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon, 305-701, Korea

²⁾ Civil Engineering Dept., Korea Power Engineering Company Inc., Yongin, 449-713, Korea

³⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, 143-747, Korea

(Received June 7, 2002, Accepted September 13, 2002)

ABSTRACT

It is important to consider the effect of member size 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 a reinforced concrete (RC) beam was experimentally investigated. For this purpose, a series of beam specimens subjected to four-point loading were tested. More specifically, three different effective depth ($d \approx 15, 30, \text{ and } 60 \text{ cm}$) 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-plane direction is not considered.

The test results are curve fitted using least square method (LSM) to obtain parameters for the modified size effect law (MSEL). The analysis results show that the flexural compressive strength and the ultimate strain decrease as the specimen size increases. In the future study, since β_1 value suggested by design code and ultimate strain change with specimen size variation, a more detailed analysis should be performed. Finally, parameters for MSEL are also suggested.

Keywords : size effect, flexural member, flexural compressive strength, stress-strain relationship, modified size effect law (MSEL)

1. 서 론

콘크리트의 파괴역학에 대한 그 동안의 연구결과로부터 인장력을 받는 콘크리트의 파괴가 특정 파괴영역(fracture zone)에 국한(localized)된다는 사실이 밝혀졌다. 또한 최근 몇 년 전부터는 압축력을 받는 콘크리트에서도 파괴가 특정영역에서 발생한다는 연구결과^{1,2)}가 발표되기 시작했다. 압축파괴는 인장파괴에 비해 상대적으로 복잡하고 미세균열이 넓은 영역에 고르게 분포되어 발생하므로 크기 효과도 작게 일어난다. 하지만 구조물의 설계에 사용되는 대부분의 설계기준에서는 콘크리트의 압축강도에 대한 크기효과를 고려하지 않고 있는 실정이다.

콘크리트는 주로 압축력을 견디기 위한 재료이므로 압축파괴에 대한 연구가 충분히 이루어져야 하며 이러한 이유 때문에 최근에는 콘크리트의 압축파괴에 관한 연구가

활발히 수행되고 있다.

콘크리트 휨부재의 압축영역에서 비선형적인 응력분포를 측정하거나 적절한 모델식으로 표현하기는 쉽지 않다. 1955년에 Hognestad 등³⁾은 실험을 통하여 원점에서 최대 응력까지 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. 국내에서도 이성태 등⁴⁻⁶⁾의 C형 공시체에 대한 연구결과에 의하면 휨압축강도와 응력분포 등에 있어서 크기효과가 존재한다는 사실이 밝혀졌다. 그러나 지금까지도 휨압축력을 받는 콘크리트 부재의 경우, 응력분포를 나타내기 위한 실험을 수행함에 있어서 발생하는 각종 어려움으로 인하여 소수의 제한된 연구결과만이 발표되고 있다.

본 연구에서는 실제 현장에서 설계/시공되는 철근콘크리트 보의 크기효과에 대한 실험을 통해 보의 유효깊이가 휨압축강도의 크기효과에 미치는 영향을 살펴보고 이에 대한 모델식을 제시하고자 한다.

* Corresponding author

Tel : 042-869-3654 Fax : 042-869-3610

E-mail : kimms@kaist.ac.kr

2. 실험개요 및 방법

2.1 실험개요

공시체를 제작하기 위해 설계강도 300 kgf/cm², 슬립프 12 cm, 및 굵은골재 최대치수(d_a)가 20 mm인 레미콘으로 타설하였다. 공시체의 크기에 따라 2개 씩 총 6개의 보를 제작하였으며, $\phi 10 \times 20$ cm 원주공시체도 함께 제작하여 압축강도 및 조깅인장강도의 측정에 사용하였다. 실험 시 원주공시체의 압축강도는 375 kgf/cm²였다.

Fig. 1과 Table 1은 공시체의 형상, 공시체의 번호 및 배근상세를 나타내고 있다. 주요 실험변수는 보의 유효깊이($d \approx 15, 30, 60$ cm)로 하였으며 받침점과 하중간의 거리(a)는 전단파괴가 일어나지 않도록 유효깊이의 3배, 하중 사이의 거리(l)는 보의 유효깊이와 같도록 하였고, 시편의 폭(b)은 20 cm로 일정하게 하였다. 그리고 무근 콘크리트의 압축거동을 살펴보기 위해 중앙의 압축부는 압축철근을 배근하지 않았다.

공시체는 연직으로 타설하였고, 타설 후 24시간이 경과한 다음 탈형하였으며, 실험수행시까지 습윤포를 덮어 기건양생하였다. 여기서 공시체에 따라 인장철근비가 다른 것은 Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 철근의 지름에 따라 항복강도가 다르기 때문이며, 본 실험에서는 인장철근의 항복 시에 공시체가 동일한 거동을 나타낼 수 있도록 하기 위해 인장철근비를 조절하였다. 한편, 공시체를 만들기 위해 사용된 콘크리트 배합은 Table 3에 주어졌다.

2.2 실험방법

하중은 유압으로 조작되는 250 tonf 용량의 만능재료시험기(UTM)를 사용하여 Fig. 1과 같이 4점 하중을 가했는데 제어방법으로는 변위제어법을 이용했다. 계측은 로드셀을 사용하여 하중을 측정하고 Fig. 2와 같이 공시체 I, II, III 중앙부의 각 면에 각각 11, 11, 9개의 스트레인 게이지를 부착하였는데 인장측보다 압축측에 더 조밀하게 부착하여 변형률을 측정하였다. 그리고 양면에 게이지를

부착하였으므로 전체 스트레인 게이지의 수는 각각 22, 22, 18개였다. 처짐을 측정하기 위해서는 한면에 각각 8, 6, 6개의 LVDT를 설치하였으므로, 전체 개수는 각각 16, 12, 12개였다.

3. 실험결과 및 분석

Table 4는 각 시편의 실험결과를 요약한 것이다. 시편 번호에서 I, II, 및 III은 시편의 크기를, 그리고 숫자는

Table 1 Specimen size and reinforcement details

Specimen No.	I	II	III
h (cm)	65	35	20
d (cm)	58.5	30.0	14.3
l_1 (cm)	60	30	15
l (cm)	460	230	125
a (cm)	180	90	45
l_2 (cm)	20	20	20
Tension reinforcement	2-D25 +D19	2-D16 +D19	3-D13
Compression reinforcement	2-D10	2-D10	2-D10
Stirrup	D10@200	D8@100	D6@50
Tension reinforcement ratio ρ_t (%)	1.11	1.14	1.33
ρ_t /balanced reinforcement ratio	0.45	0.44	0.42

Table 2 Test results of reinforcement

	Yield strength, f_y (kgf/cm ²)	Ultimate strength, f_u (kgf/cm ²)	f_u / f_y
D13	3,984	5,936	1.49
D16	4,539	6,792	1.50
D19	4,824	7,067	1.46
D25	4,766	7,106	1.49

Table 3 Concrete mixture proportions

w/c (%)	s/a (%)	Unit weight (kgf/m ³)			
		W	C	S	G
45	41	186	409	643	1,017

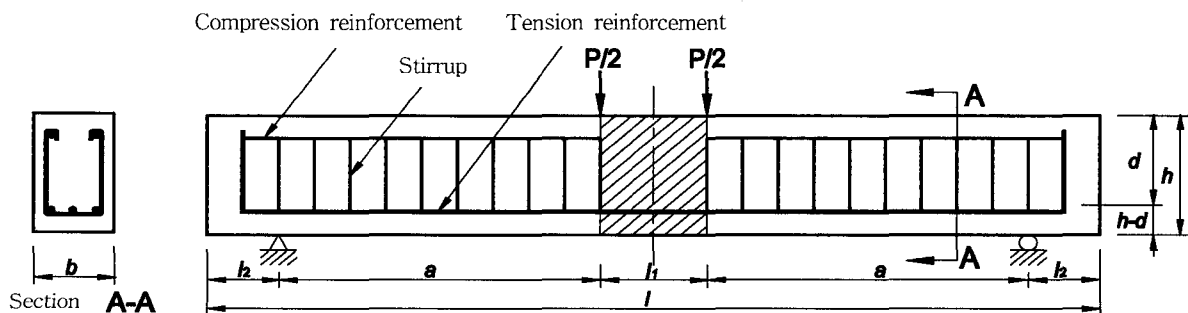
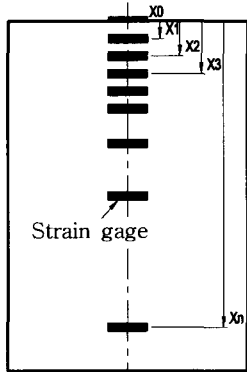


Fig. 1 Shape of specimens

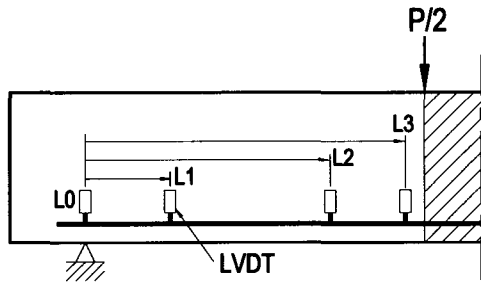
각 시편의 일련번호를 나타낸다. f_{cu} , f_{sp} , $f_{cu}(d)$, P_u , $\epsilon_{u, test}$ 그리고 $\epsilon_{u, anal}$ 는 각각 시편과 함께 제작한 $\phi 10 \times 20$ cm 원주공시체의 압축강도를 평균한 값, 조깅인장 강도를 평균한 값, 해석결과 얻어진 철근콘크리트 보 압축연단에서의 휨압축강도(휨압축강도-변형률 관계에서의 최대응력), 공시체가 파괴될 때의 하중, 실험결과 얻어진 압축연단의 변형률, 그리고 해석결과 얻어진 압축연단의 극한변형률이다. 여기서 $\epsilon_{u, test}$ 는 최대응력에서의 변형률이나 극한변형률이 아니라 압축연단에 부착된 스트레인 게이지로 부터의 측정값 중에서 가장 신뢰성이 있다고 판단되는 최대변형률이다. 이는 콘크리트 보의 압축연단에서 파쇄가 일어나기 시작하면 스트레인 게이지가 최대응력 이후 하강부분의 변형률을 적절히 나타내지 못하기 때문

Extreme compression fiber



Extreme tension fiber

(a) Strain gages



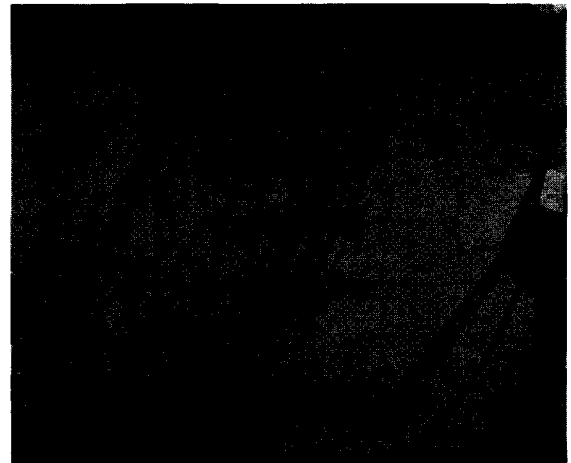
(b) LVDTs

Xi(cm) strain gage	I	0, 2, 4, 6, 8, 10, 14, 20, 30, 40, 60
	II	0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 30
	III	0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15
Li(cm) LVDT	I	0, 37, 115, 165, 255, 305, 383, 420
	II	0, 35, 85, 125, 175, 210
	III	0, 11, 39, 66, 94, 105

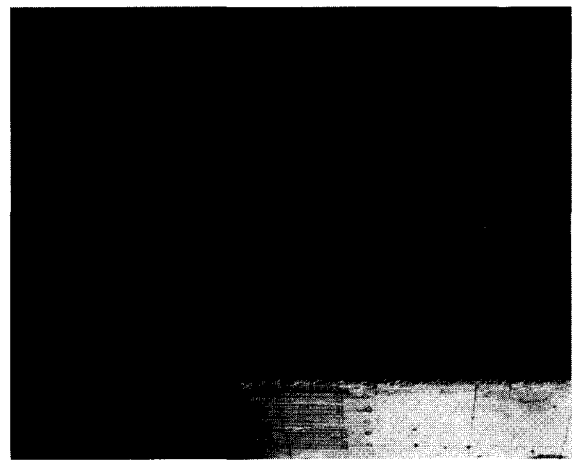
Fig. 2 Locations of strain gages and LVDTs

이다. 그리고 $\epsilon_{u, anal}$ 는 해석적으로 얻어진 응력-변형률관계에서 단면모멘트가 가장 클 때의 변형률이다. 실험시 모든 공시체는 초기에 받침과 하중 사이에서 사인장 균열이 발생한 후 중앙부에도 균열이 발생하기 시작하였으며, 최종적으로 Fig. 3과 같이 중앙부의 압축연단에서 파쇄(crushing)가 일어나면서 파괴에 도달하였다. 실험 진행 중 크기가 큰 공시체일수록 더욱 취성적인 상태로 파괴되는 경향이 있었는데, 이는 콘크리트 재료의 취성적인 성질과 실험장비에 누적되는 에너지해방률 및 장비의 강성과 관련이 있는 것으로 판단되었다.

Fig. 4는 각 시편의 균열도를 나타낸 것인데, 그림에서 알수 있는 바와 같이 시편 중앙부 균열의 개수는 시편의 크기가 클수록 많이 발생하였다. 하지만, 부재의 크기에 상대적 균열의 개수는 상대적으로 부재의 크기가 작을수록 많고 따라서 미세균열이 보다 넓은 영역에 고르게 분산되어 발생하므로 크기효과가 작게 일어날 것임을 예상할 수 있다.



(a) Side surface



(b) Top surface

Fig. 3 Crack patterns of specimen II-2 after testing

Fig. 5(a)는 압축연단의 변형률 변화에 대한 중립축 깊이의 변화를 평균하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 모든 공시체에서 변형률이 증가함에 따라 중립축의 위치는 압축연단쪽으로 올라가며 공시체의 크기에 따라서 차이가 크게 나타나지는 않지만 변형률 $2,000 \times 10^{-6}$ 이상에서는 크기가 작은 공시체의 중립축이 조금 더 위에 있는 것으로 나타났다. 이는 작은 공시체일수록 콘크리트 강도가 더 커진다는 것을 의미한다. Fig. 5(b)로부터 압축연단의 변형률이 $1,200 \sim 1,500 \times 10^{-6}$ 정도에서는 중립축의 위치가 급격히 변화함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 6과 같이 인장철근이 항복한 후 어느 정도 변형률까지 완전소성거동을 나타내는 구간에서 나타났다. 이는 휨압축응력은 변형률이 증가함에 따라 증가하지만 인장력의 증가가 거의 없기 때문에 압축력과 인장력이 평형을 이루기 위해 중립축의 위치가 급격히 상승하는 것으로 판단된다.

Fig. 7과 8에는 공시체 압축연단에서의 응력과 변형률의 관계가 나타나 있다. 이 곡선들은 3차의 비선형 다항식을 이용한 LSM (least square method) 회귀분석을 통해 얻었으며 여기서는 내/외적인 모멘트 들이 단면의 중

립축에서 평형을 이루도록 하였다. 한편, 굵은 실선은 원주공시체에서 얻은 실험결과이다. f_{cu} 까지는 원주공시체와 보의 거동이 유사함을 알 수 있다. 그러나 이 영역을 넘어서면 부재의 크기가 줄어들 수록 보의 최대응력 및 최대응력에 대응하는 변형률은 커지며, 더욱 연성적인 거동을 보이고 있다.

한편 구해진 응력-변형률의 관계는 보의 모든 위치에서 유효하므로 임의로 측정된 변형률에 대한 휨압축강도는 이 곡선과 특정 변형률을 알면 구할 수 있다.

응력-변형률 곡선을 구하기 위해서는 압축연단의 변형률과 중립축의 위치를 알아야 하는데 $\epsilon_{u, test}$ 이후에는 변형률과 중립축의 위치를 알 수 없으므로 모멘트와 변위로부터 얻은 곡률로부터 변형률을 구하였다. 여기서 곡률의 계산 시 $\epsilon_{u, test}$ 이후에는 보의 처짐이 매우 크기 때문에 선형탄성역학을 적용할 수 없으므로 다음의 식(1)을 사용하여 곡률을 구하였다.

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{v''}{[1 + (v')^2]^{3/2}} \quad (1)$$

Table 4 Test results of beam specimens

Specimen number	f_{cu} (kgf/cm ²)	f_{sp} (kgf/cm ²)	$f_{cu}(d)$ (kgf/cm ²)	P_u (tonf)	$\epsilon_{u, test} (\times 10^{-6})$	$\epsilon_{u, anal} (\times 10^{-6})$
I-1	375	38	383	49.6	2,200	2,825
I-2			368	48.9	2,270	2,720
II-1			405	25.2	3,080	3,245
II-2			412	24.8	2,990	3,130
III-1			443	13.1	3,370	4,110
III-2			435	12.9	435	12.9

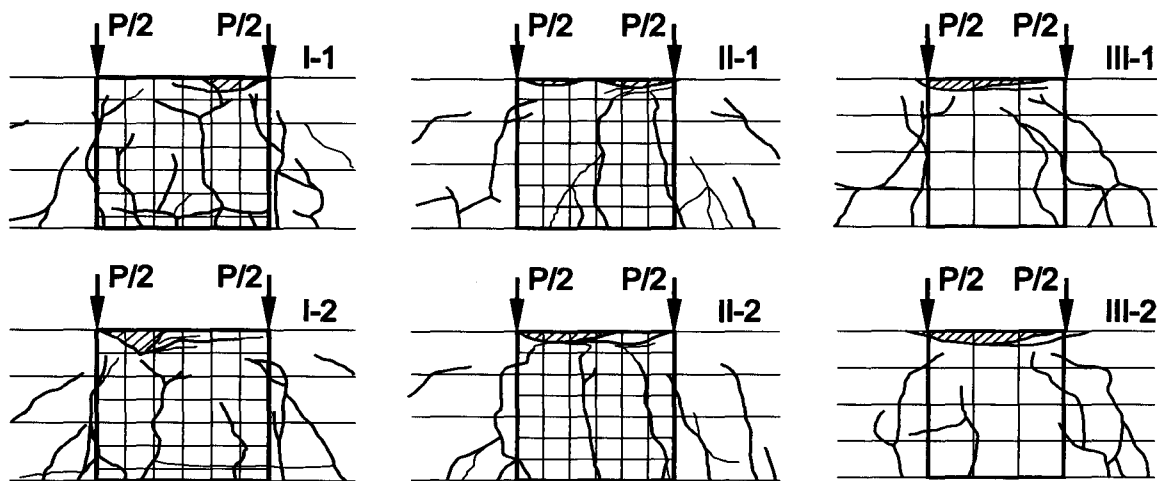


Fig. 4 Typical crack patterns at failure

여기서, v 는 보의 위치에 따른 변위로서 실험 시 Fig. 2(b)와 같은 위치에서 측정된 처짐을 3차의 다항식으로 회귀분석하여 사용하였다. 중립축의 위치는 Fig. 5(b)에서 알 수 있는 바와 같이 $\epsilon_{u, test}$ 근처에서 그 변화율이 줄어듦을 알 수 있다. 그리고 $\epsilon_{u, test}$ 이후에는 중립축의 위치를 변형률로부터 구할 수 없으므로 중립축의 위치를 조금씩 변화시켜 가며 응력-변형률 관계를 구해 본 결과, 상승부에서는 거의 차이가 없고 하강부에서 약간의 차이가 있었으나 그 차이가 그리 크지 않아 응력-변형률 관계는 일정한 것으로 가정하였다. 또한, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 공시체의 크기가 작을수록 휨압축강도의 크기와 그때의 변형률 및 극한변형률이 증가하여 연성적인 거동을 하는 것으로 나타났다. 즉, 상승부에서는 크기의 차이에 따라 이 둘 값 사이의 차이가 거의 없지만, 하강부에서 그 차이가 뚜렷하게 나타났다. 여기서 극한변형률 $\epsilon_{u, anal}$ 은 앞서 언급하였듯이 단면의 모멘트가 가장 클 때의 변형률을 의미한다. 이로부터 휨압축응력-변형률 관계에 크기효과가 존재함을 알 수 있다.

Fig. 9는 보의 유효깊이에 따른 극한변형률을 나타낸 것이다. 직사각형 단면의 철근콘크리트 보가 휨압축을 받아 파괴에 이를 때, 압축연단 콘크리트의 극한변형률은 대개 $3,000 \sim 4,000 \times 10^{-6}$ 의 범위에 있다고 알려져 있다⁷⁾. Fig. 9에서 수평의 실선은 ACI 및 국내의 설계기준⁸⁾에 제시되어 있는 $3,000 \times 10^{-6}$ 을 의미하는데, 실험결과는 Size I의 경우 $2,800 \times 10^{-6}$ 정도로 이 값보다 작으며 Size II와 Size III는 각각 $3,200 \times 10^{-6}$ 와 $4,250 \times 10^{-6}$ 정도로 기준보다 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 보의 크기가 큰 경우에는 이 값에 대한 추가적인 검토가 필요하다고 판단된다.

Fig. 10은 Fig. 8에서 구한 휨압축응력-변형률 곡선을 이용하여 평균 휨압축응력과 최대 휨압축응력의 비(β_1)에 대해 검토한 결과이다. 수평의 실선은 ACI 및 국내의 설계기준에서 등가응력으로 $0.85 f_{cu}$ 를 택하였을 때의 β_1 값인 0.78을 나타낸다. 이로부터 β_1 값은 유효깊이가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여 이 값도 크기효과를 나타냄을 알 수 있다. 그러나 모든 경우 설계기준에서 제시하는 값보다는 큰 값을 보이고 있으며, 참고문헌⁹⁾에서도 설계기준에서의 β_1 값은 상당히 큰 것으로 밝히고 있다.

Bazant의 크기효과법칙(SEL)¹⁰⁾이 발표된 이후, 김진근 등^{11,12)}은 부재의 크기와 무관한 항인 σ_0 항을 고려함으로써 초기 균열이 없는 경우 혹은 비유사 균열을 가진 콘크리트 부재의 강도 예측을 위한 수정된 크기효과법칙(MSEL)을 제안하였다.

SEL과 MSEL 및 본 실험에서 얻은 실험결과 (Table 3)에 대한 회귀분석 (levenberg-marquardt의 최소자승법, LSM^{13,14)}을 수행하여 아래의 식(2)와 (3)을 얻었으며, 그

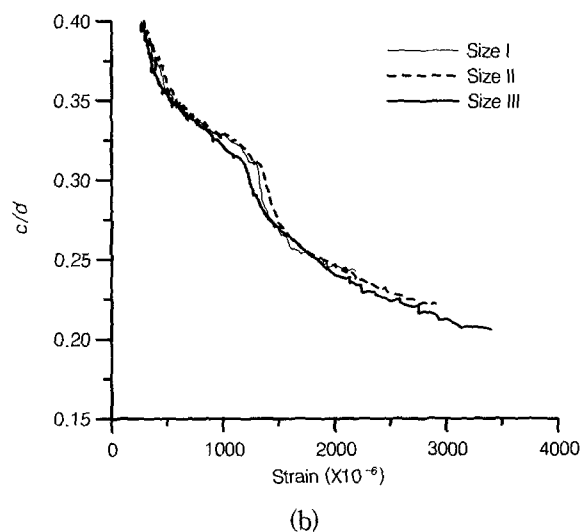
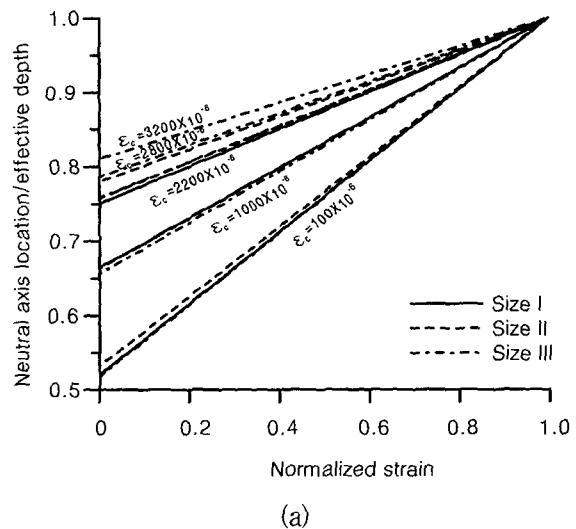


Fig. 5 Variations of neutral axis position with strain in the extreme compression fiber

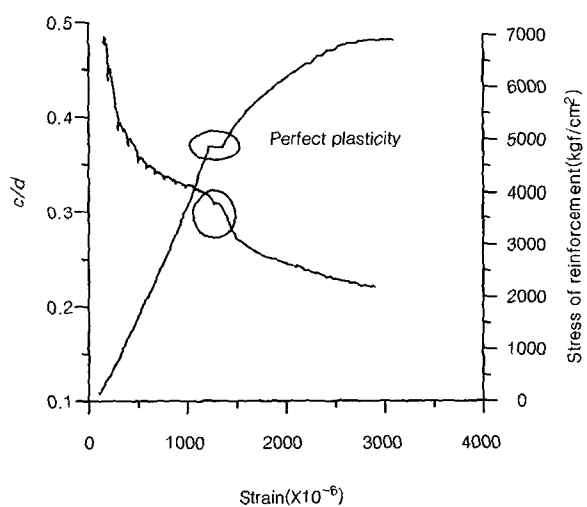


Fig. 6 Variations of neutral axis location due to perfect plasticity of reinforcement with strain

결과는 Fig. 11에 나타나 있다.

$$f_{cu}(d) = \frac{1.25f_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{d}{100}}} \quad (\text{SEL}) \quad (2)$$

$$f_{cu}(d) = \frac{0.83f_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{d}{4.0}}} + 0.79f_{cu} \quad (\text{MSEL}) \quad (3)$$

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

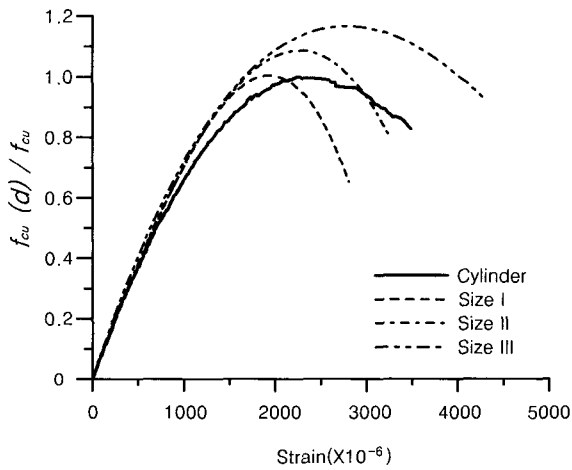


Fig. 7 Effect of specimen sizes on stress-strain curves

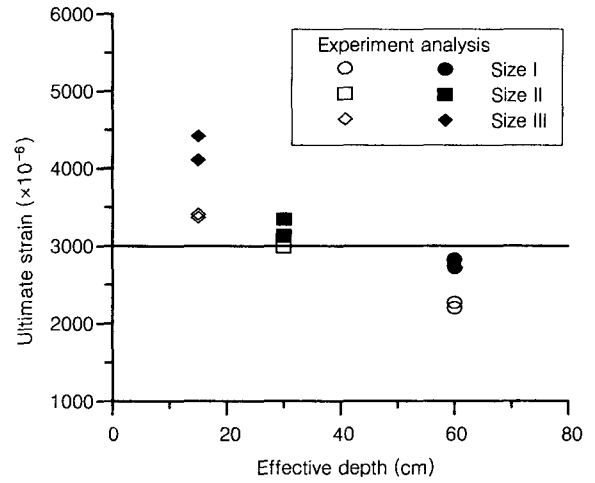


Fig. 9 Relationship between ultimate strain and effective depth

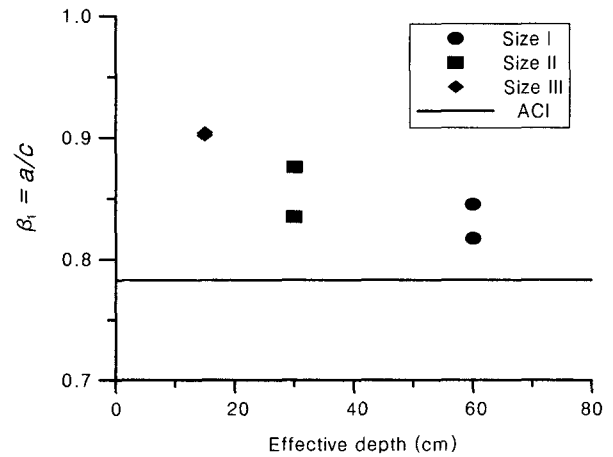


Fig. 10 Relationship between β_1 and effective depth

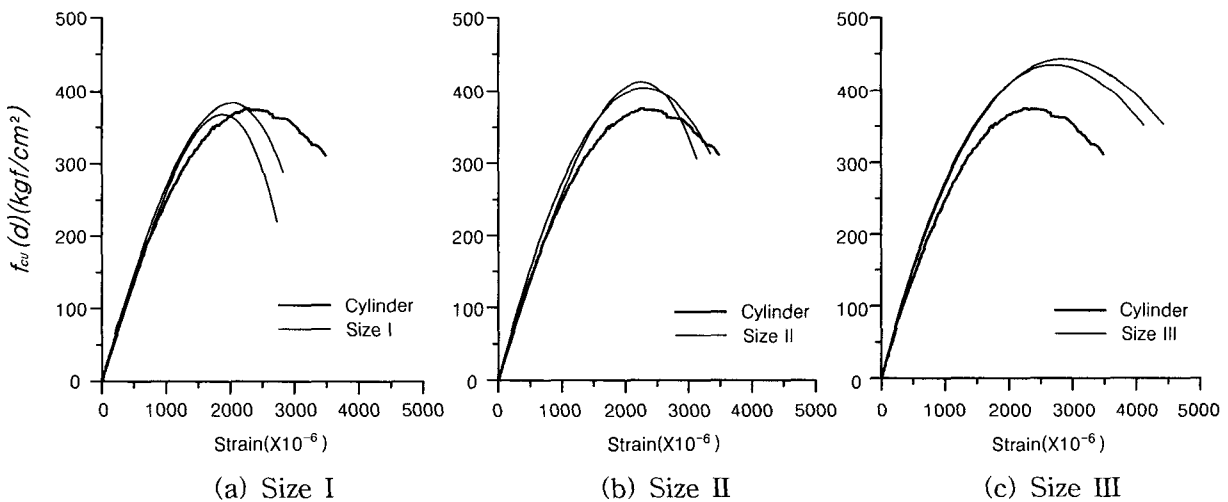


Fig. 8 Comparisons of stress-strain relationship

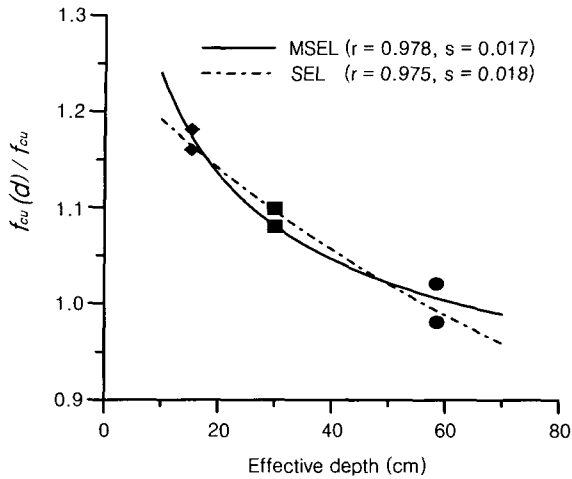


Fig. 11 Relationship between $f_{cu}(d)/f_{cu}$ and effective depth

Fig. 11에는 $f_{cu}(d)/f_{cu}$ 와 인장철근의 중심으로부터 압축연단까지의 거리인 d 의 관계를 나타내고 있는데, d 가 매우 큰 경우에는 실험결과로부터의 강도 비가 일정한 값에 수렴하게 됨을 알 수 있다. 이 그림에서 마름모, 사각형, 그리고 원은 각 크기의 공시체에서 얻은 실험자료를, 일점쇄선과 실선은 각각 식(2)와 식(3)으로부터의 결과를 나타낸다. 이로부터 부재의 크기가 증가함에 따라 파괴 시의 휨압축강도가 감소하는 크기효과가 현저히 나타남을 알 수 있다. 또한 식(2)와 식(3)의 비교에서 대부분의 보의 크기가 존재하는 영역에서는 그 차가 크지 않으나 이 범위를 벗어나면, 특히 부재의 크기가 매우 큰 경우에 식(3)이 크기효과를 예측하는데 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 그림에서 r 은 상관계수를 나타내는데, 실험치와 계산치 사이에 상관관계가 매우 높으며 모델식이 실험자료를 잘나타내고 있음을 알 수 있다.

이로부터 본 실험에서와 같이 초기균열이 없는 경우에는 수정된 이론식인 식(3)을 적용하는 것이 타당함을 알 수 있다. 그러나 부재가 초기 균열을 가지고 있다면 크기의 증가에 따라 계속적인 강도의 감소가 발생하므로 Bazant의 크기효과 식(2)를 사용해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

휨하중을 받는 철근콘크리트 보에서 휨압축강도에 보의 유효깊이가 미치는 영향을 검토하기 위해 실험적 연구를 수행하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

1) 보의 유효깊이가 증가함에 따라 휨압축강도, 최대 휨압축강도에서의 변형률, 그리고 극한변형률이 감소하는 크기효과와 취성적인 파괴거동을 나타내었다. 또한 보의 응

력-변형률 관계에서도 크기효과가 나타났다.

2) MSEL과 실험결과를 이용하여 보의 휨압축강도에 대한 크기효과 모델식을 제안하였다.

3) 극한변형률은 보의 크기에 따라 변화하며, 보의 크기가 매우 큰 경우에는 이 변형률이 설계기준에서 제시하고 있는 값보다 작은 것으로 나타났다. 즉, 충분한 연성을 보이지 못했다.

4) 등가 직사각형응력블럭의 깊이는 보의 크기가 증가함에 따라 점차 감소하지만 설계기준에서 제시하는 값보다는 큰 경향을 보였다.

5) 본 연구에서는 철근콘크리트 보에 대한 휨압축강도의 크기효과를 살펴보았지만 C형 공시체와의 차이점인 중립축 문제만 같게 한다면 서로 유사한 크기효과를 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

6) 앞으로의 연구에서는, 철근콘크리트 보에 대하여 설계기준에서 제시하고 있는 극한변형률과 등가 직사각형응력블럭의 깊이에 대한 평가, 그리고 C형 공시체와 철근콘크리트 보에 대한 연구를 접목시키는 것에 대한 기술적 검토가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술평가원의 “국가지정연구실 사업”의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 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.
- Bazant, Z. P., “Identification of Strain-Softening Constitutive Relation from Uniaxial Tests by Series Coupling Model for Localization,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 19, 1989, pp.973~977.
- Hognestad, E. Hanson, N. W., and McHenry, D., “Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design,” *Journal of ACI, Proceedings*, Vol. 27, No. 4, Dec. 1955, pp.455~479.
- Kim, J. K., Yi, S. T., and Yang, E. I., “Size Effect on Flexural Compressive Strength of Concrete Specimens,” *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 2, Mar.-Apr. 2000, pp.291~296.
- Kim, J. K., Yi, S. T., and Kim, J. H. J., “Effect of Specimen Sizes on Flexural Compressive Strength of Concrete,” *ACI Structural Journal*,

- Vol. 98, No. 3, May-Jun. 2001, pp.416~424.
6. Yi, S. T., Kim, J. H. J., and Kim, J. K., "Effect of Specimen Sizes on ACI Rectangular Stress Block for Concrete Flexural Members," *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 5, Sep.-Oct. 2002, pp.701~708
 7. Hubert, R., "Research towards a General Flexural Theory for Structural Concrete," *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 57, No. 1, July 1960, pp.1~28.
 8. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준", 1999, pp.222
 9. 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, pp.62
 10. Bazant, Z. P., "Size Effect in Blunt Fracture : Concrete, Rock Metal," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 110, No. 4. Apr. 1984, pp.518~535.
 11. Kim, J. K. and Eo, S. H., "Size Effect in Concrete Specimens with Dissimilar Initial Cracks," *Magazine Concrete Research*, Vol. 42, No. 153, 1990, pp.233~238.
 12. Kim, 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.
 13. IMSL, Library, Edition 8, IMSL, Inc., Sixth Floor, NBC Building, 7500 Bellaire Blvd., Houston, Texas 77036.
 14. Benjamin, J. R. and Cornell, C. A., "Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers," McGraw-Hill, New York, 1970, Section 4.3.

요 약

철근콘크리트 보 단면의 극한강도를 예측할 때에는 부재의 크기를 고려하지 않는 것이 일반적이다. 그러나 부재 단면의 휨압축강도는 부재의 크기가 증가함에 따라 항상 감소하게 된다.

본 연구에서는 철근콘크리트 보에 대한 실험적 고찰을 통해 휨압축강도의 크기효과를 살펴보고 이에 대한 적절한 모델식을 제시하고자 한다. 보의 유효깊이($d \approx 15, 30, 60$ cm)를 주요 매개변수로 하였으며 전단스팬/유효깊이(a/d)는 3.0으로 하였고 시편의 폭은 20 cm로 일정하게 하여 휨하중을 가하며 실험을 수행하였다.

실험에서 구한 하중, 변형률, 및 보의 처짐 등을 이용하여 휨압축응력-변형률 관계를 3차의 비선형 다항식을 이용한 회귀분석을 수행하여 구하였다. 분석 결과 보의 유효깊이가 증가함에 따라 휨압축강도, 최대 휨압축응력에서의 변형률, 그리고 극한변형률이 감소하며 취성적인 파괴거동을 나타내었다. 그리고 설계기준에서 제시하고 있는 β_1 값과 보의 극한 변형률 값에 대해서도 크기효과가 있으므로 이에 대한 검토가 필요하다고 판단된다. 마지막으로 수정된 크기효과법칙을 사용하여 철근콘크리트 보의 휨압축강도에 대한 크기효과모델식을 제시하였다.

핵심용어 : 크기효과, 휨부재, 휨압축강도, 응력-변형률 관계, 수정된 크기효과법칙