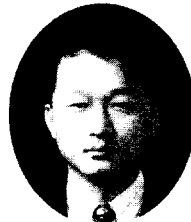


# 부재의 길이가 콘크리트의 휨압축강도에 미치는 영향

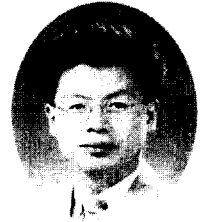
## Effects of Specimen Length on Flexural Compressive Strength of Concrete



김진근\*  
Kim, Jin-Keun



이성태\*\*  
Yi, Seong-Tae



이태규\*\*\*  
Lee, Tae-Gyu

### ABSTRACT

In evaluating the ultimate strength of a section for a reinforced 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  $590 \text{ kgf/cm}^2$ .

Results indicate that for the region of  $h/c \leq 3.0$  the reduction in flexural compressive strength with increase of length-to-depth ratios was apparent. A model equation was derived using regression analyses on the experimental data. In these experiments, the depth of an equivalent rectangular stress block was larger than that by ACI. It was also founded that the effect of specimen length on ultimate strain was negligible. Finally more general model equation is also suggested.

Keywords : size effect, specimen length, C-shaped specimen, flexural compressive strength, model equation

\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

\*\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정,  
한국전력기술(주) 책임연구원

\*\*\* 정희원, 우송대학교 건축토목환경공학부 교수

·본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 30일까지 학회로 보내 주시면 2000년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

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 연구결과<sup>(1~3)</sup>가 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.

한편 콘크리트 구조물의 설계에 사용되는 대부분의 설계기준에서 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 압축파괴에서도 크기효과는 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.

일반적으로 2점 재하되는 과다 철근콘크리트 보(over-reinforced concrete beam) 단면의 휨강도는 두 연직하중과 중립축 사이 부분의 콘크리트 강도와 직접적인 연관이 있고, 과소 철근콘크리트 보(under-reinforced concrete beam) 단면의 휨강도는 인장철근량에 주로 지배된다. 그리고 후자의 경우에는 하중이 증가하여 인장철근이 항복한 후에도 균열과 처짐이 크게 발달하여 중립축이 압축축으로 이동하면서 모멘트 팔길이가 길어져 콘크리트의 연단변형률이 극한변형률에 이를 때까지 모멘트가 증가한 후 보가 파괴에 이른다. 따라서 이 경우도 결국은 모멘트

팔의 길이에 영향을 주는 콘크리트의 압축강도와 관계가 있게 된다.

따라서 참고문헌<sup>(4~5)</sup>에서는 압축강도의 크기효과에 대한 연구를 수행하는 일환으로서 공시체의 크기 비에 따른 휨압축강도의 변화를 연구하고 모델식을 제시한 바 있다. 그러나, 이는 공시체의 길이/깊이의 비가 2/1인 경우에 한해 제한적으로 적용 가능하다.

한편 철근콘크리트 보 단면의 극한강도를 예측할 때는 Fig. 1에서와 같이 보의 단면은 같아도 길이가 다를 수 있으나 이를 설계에서 고려하지 않는 것이 일반적이다. 콘크리트의 압축강도, 철근량 및 중립축의 깊이 등이 같으면 보의 길이가 다른 경우에도 단면의 휨강도는 같아야 하지만 실제로 이와 같은 보에 가력 실험을 해 보면 부재의 길이가 증가함에 휨강도가 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 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<sup>(4~5)</sup>인 부재의 길이/깊이의 비가 2/1인 경우에도 동시에 적합한 모델식을 구하여 보다 일반적인 예측식을 제안하고자 한다.

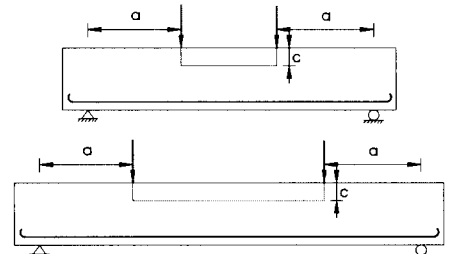


Fig. 1 철근콘크리트 보

또한 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 있으며 보의 압축 부분만을 대상으로 하는 C형 공시체를 선택하였다. 즉, 휨압축력을 받는 C형 공시체를 사용하여 부재의 길이가 크기효과에 미

치는 거동을. 실험을 통하여 비교·검토하였으며 여기서 얻어진 결과는 실제 설계시에도 반영할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 실험개요

### 2.1 실험변수

실험시에는 Hognestad 등<sup>(6~8)</sup>이 사용한 실험 절차가 채택되었으며 주요 실험변수는 콘크리트의 압축강도( $f_{cu}$ )가 590 kgf/cm<sup>2</sup>일 때 Fig. 2와 같은 C형 공시체의 길이/깊이의 비( $h/c=1, 2, 3$  및 4)이다. 여기서 공시체의 깊이( $c$ )는 10.0 cm로 하였으며, 공시체의 두께( $b$ )가 크기 효과에 미치는 영향은 크지 않으므로<sup>(9)</sup> 모든 공시체의 두께는 12.5 cm로 일정하게 하였다.

### 2.2 배합설계

C형 공시체를 만들기 위해 선택된 콘크리트 배합표는 Table 1에 주어져 있다. 시멘트는 보통 포트랜드 시멘트(1종 시멘트)를 사용하였으며 잔골재는 일반 강모래를 사용하였고 굵은골재는 최대치수( $d_a$ ) 13 mm의 쇄석을 사용하였다. 공시체의 콘크리트는 수평으로 치기하였으며 작업성을 향상시키기 위하여 고성능 감수제와 진동기를 사용하였다.

Table 1 Mix proportions and properties of concrete

W/C (%)	S/A (%)	unit weight(kgf/m <sup>3</sup> )				S.P.* (%)	(kgf/cm <sup>2</sup> )		
		W	C	S	G		$f_{cu}$	$f_{sp}$	$E_c$
37	40	178	480	676	1014	1	590	56	$3.04 \times 10^5$

\* superplasticizer(ratio for cement weight)

콘크리트의 비빔에 사용된 믹서는 공칭용량 80 리터의 강제식 믹서이며, 재료를 굵은골재, 잔골재 그리고 시멘트 순으로 투입하여 1분간 건비빔한 다음, 물과 고성능 감수제를 동시에 투입하여 3분간 비빔 후 미리 준비된 거푸집에 콘크리트의

치기를 하였다. 모든 원주 공시체와 C형 공시체는 치기를 한 후 24시간이 경과하여 탈형했으며, 실험 수행시까지 20±3℃의 온도가 유지되는 양생실에서 습윤포(wet burlap/towel)를 덮어 28일 이상 기건양생하였다.

### 2.3 공시체의 크기, 형상 및 실험절차

보의 휨압축 거동을 실험적으로 검토하기 위한 공시체를 Fig. 2에 나타내었는데, 이 그림에는 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. 휨철근으로는 항복강도가 437MPa(4,455 kgf/cm<sup>2</sup>)인 SD 40을 사용하였고, 전단철근으로는 D6 철근을 사용하였다.

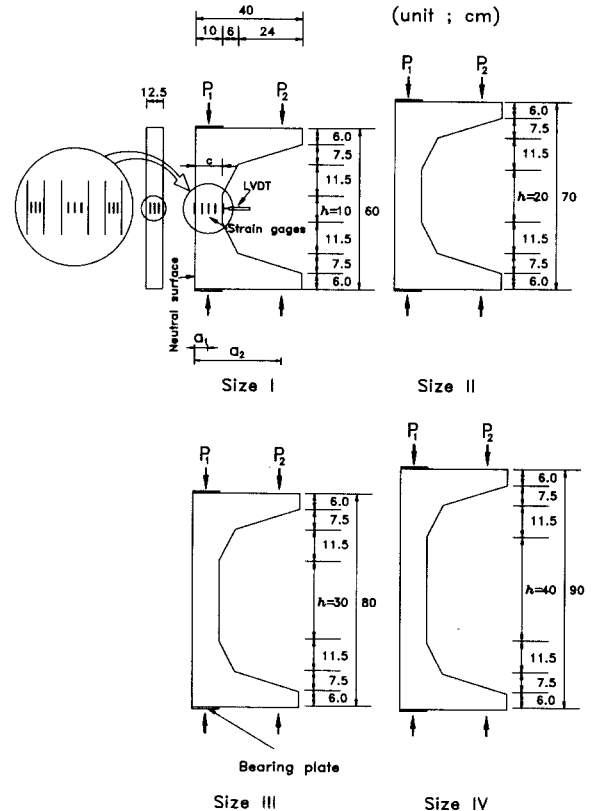


Fig. 2 Size and shape of specimens

Fig. 2와 같이 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 측에 설치하였는데, 여기서 얻은 평균 변위량을 휨모멘트의 계산시 이용되는 하중팔(load level arm,  $a_1$  과  $a_2$ )을 보정하는데 사용하였다.

하중은 먼저 공시체 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 정지시켰다. 공시체가 파괴될 때까지 이 절차를 반복 수행하는데, 콘크리트의 비탄성영역에서는 정확한 실험 자료를 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 계측기로 취하였다.

축력을 유발시키는  $P_1$ 은 유압으로 조작되는 250 tonf 용량의 만능재료시험기(UTM)에 의해 가해졌는데 제어방식으로는 변위제어법을 이용하였다. 축력과 휨모멘트를 유발시키는  $P_2$ 는 20 tonf 용량의 수동식으로 조작되는 유압잭을 이용하여 가했다. 그리고,  $P_2$ 의 가력치를 측정하기 위해서 20 tonf 용량의 로드셀을 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 실험결과

C형 공시체와 원주 공시체의 압축강도의 측정은 동일 재령에서 실시되었다. Table 2의 공시체 번호에서 I, II, III 및 IV는 공시체의 크기를, 그리고 아라비아 숫자는 각 공시체의 일련번호를 나타낸다. Table 2에 주어진 콘크리트 압축강도( $f_{cu}$ )는 시리즈 당 3개의  $\phi 10 \times 20$  cm 원주 공시체에서 얻은 값을 평균한 결과이며 590

kgf/cm<sup>2</sup>의 값을 얻었다.  $P_u$ ,  $\epsilon_u$ ,  $\chi_u$  및  $\delta$ 는 각각 공시체가 파괴될 때의 주 하중과 종 하중의 합( $P_1 + P_2$ ), 콘크리트 압축연단의 극한변형률, 단면의 곡률과 공시체 중앙부의 수평방향 변위를 의미한다.

실험을 할 때 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 공시체보다 작게 나왔다. 따라서 여기에 해당하는 실험값은 결과 분석에서 제외하였다.

Table 2 Experimental results of C shaped specimens

No. of specimen	$P_u$ (tonf)	$\epsilon_u$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\chi_u$ ( $\times 10^{-3}$ /cm)	$\delta$ (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

실험 진행 중 크기가 큰 공시체일수록 더욱 취성적인 상태로 파괴되는 경향이 있었는데, 이는 콘크리트 재료의 취성의 성질과 실험 장비에 누적되는 에너지해방률 및 장비의 강성과 관련이 있는 것으로 판단되었다.

#### 3.2 공시체 길이에 따른 강도의 크기효과

Bazant의 크기효과 법칙<sup>(10)</sup>이 발표된 이후,

김진근 등<sup>(11~12)</sup>은 부재의 크기와 무관한 항인  $\sigma_o$  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<sup>(13~14)</sup> 및 휨압축력을 받는 C형 공시체<sup>(4~5)</sup>에 대한 연구결과가 발표된 바 있다.

한편 Markeset 등<sup>(15~16)</sup>은 원주 공시체에서 “손상이 가능한 영역 길이( $l_d$ )와 공시체 직경의 비가 2.5 이상일 경우에 단위면적 당 post-peak 에너지는 공시체의 길이와 무관하다”라고 하였다. Jansen과 Shah<sup>(17)</sup>도 콘크리트 압축강도가 45 및 90 MPa인 원주형 공시체에 대한 실험을 수행했는데, 단위 면적당 pre-peak 에너지는 부재의 길이가 증가함에 따라 비례하여 증가하지만 post-peak 에너지는 부재의 길이/직경의 비가 2.0을 넘어서면 일정한 값을 갖는다고 보고하고 있다. 그러나 이 연구에서 얻어진 C형 공시체에 대한 실험자료로부터는 이 비가 약 3.0 이상일 때 휨압축강도에 대한 크기효과에 변화가 없음을 알 수 있었다. 따라서 일반적인 보의 경우,  $h/c$ 는 보통 3.0 보다 크므로 이 경우 부재의 길이가 보 단면의 극한강도의 크기효과에 미치는 영향은 크게 문제가 되지 않음을 알 수 있다.

여기서는 파괴시 C형 공시체의 길이에 대한 휨압축강도를 예측할 수 있는 모델을 얻기 위해 수정된 크기효과 법칙과  $l_d = 3.0c$ 로 취하여 11개(Table 2)의 실험값에 대한 회귀분석을 수행하여 식(1.a)와 (1.b)를 얻었으며, 그 결과는 Fig. 3에 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  $\text{kgf/cm}^2$ 이다.

Fig. 3에는  $f_{cu}(h/c)/f_{cu}$ 와 부재의 길이/깊이의 비인  $h/c$ 의 관계를 나타내고 있는데, 이 그림에서 원은 C형 공시체에서 얻은 실험자료, 굵은 실선은 식(1.a)와 (1.b)로부터의 결과를 나타낸다. 이 그림은 부재의 길이가 증가함에 따라 파괴시의 휨압축강도는 점점 감소하며,  $h/c$ 가 큰 경우에 휨압축강도가 일정한 값에 수렴하게 됨을 나타내고 있다.

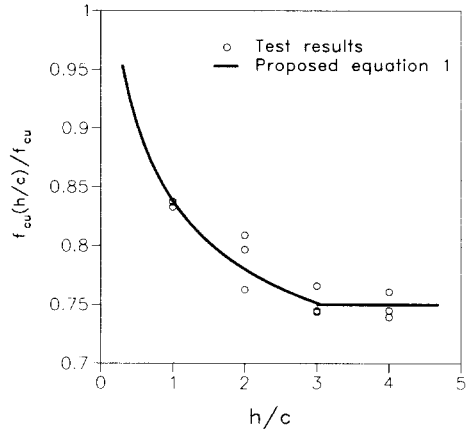


Fig. 3  $f_{cu}(h/c)/f_{cu}$  as function of the specimen length/depth ratio

위의 식(1.a)와 (1.b)를 실험자료와 직접 비교하기 위한 통계해석 결과가 Fig. 4에 나타나 있다.

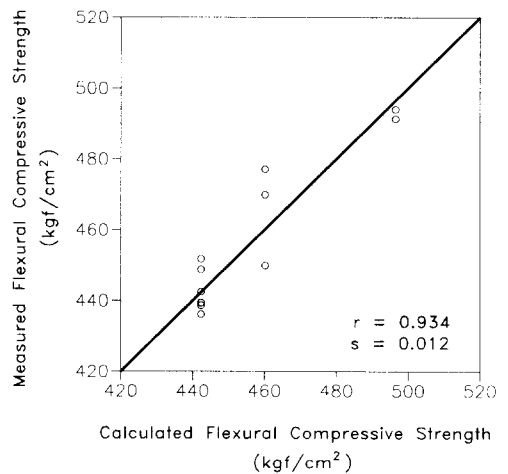


Fig. 4 Comparisons of the measured and calculated values of flexural compressive strength

이 그림에서 가로축과 세로축은 각각 식(1)에 의해 계산된 값과 실험결과에서 얻은 값을 나타내는데, 상관계수( $r$ )는 0.934였으며 표준편차( $s$ )는 0.012였다. 또한, 이 그림에 의하면 예측 값과 실험 값 사이에 흩어짐은 있으나 근사적으로 선형관계가 성립함을 알 수 있다. 따라서, 중립축 거리가 압축연단에서 10 cm인 부재에 있어서 임의의 부재길이를 갖는 보의 단면에 대한 휨압축 강도는 이 부재의 길이  $h$  및 원주 공시체의 압축강도를 식(1.a)와 (1.b)에 대입시키면 얻을 수 있다.

### 3.3 등가 직사각형응력블럭의 깊이에 대한 검토

아래의 Fig. 5는 이 연구의 실험결과를 이용하여 등가 직사각형응력블럭의 깊이에 대한 검토를 수행한 결과이다. 수평으로 그려진 굵은 파선은 ACI에 의해 등가응력으로  $0.85f_{cu}$ 로 택하였을 때  $\beta_1$  값인 0.65를 나타내며 원은 아래의 식으로부터 얻은 실험 값을 의미한다.

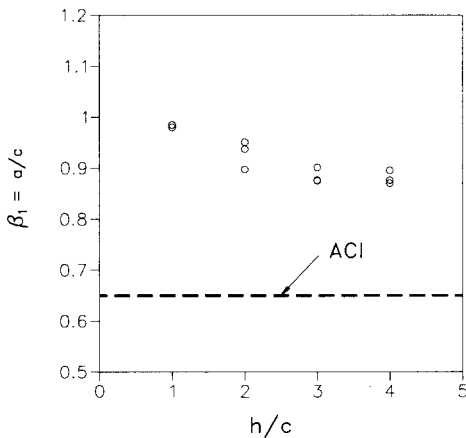


Fig. 5 Depth of the equivalent rectangular stress block as function of the specimen length/width ratio

$$\beta_1 = a/c = \frac{P_u}{0.85 \times 590 \times 12.5 \times 10} \quad (2)$$

이로부터  $\beta_1$ 은  $h/c$ 가 증가함에 따라 점차 감소하지만 ACI에서 제시하는 값보다는 상당히 큰

값을 보이고 있음을 알 수 있다.

한편 참고문헌<sup>(4-5)</sup>에서의 Size I 공시체는 ACI에서  $\beta_1$ 을 정할 때 참조로 한 공시체의 크기와 같으며, ACI에 의하면  $f_{cu}$ 가 528kgf/cm<sup>2</sup>일 때  $\beta_1$ 은 약 0.68이다. 그러나 ACI에서 이  $\beta_1$ 을 정할 때 근거한 참고문헌<sup>(18)</sup>에 따르면  $\beta_1$ 은 상당히 보수적인(conservative) 값이며 이 논문에서 실제로 실험자료를 회귀분석한 결과는 약 0.83이다. 그리고 참고문헌<sup>(4-5)</sup>의  $P_u$  값을 식(2)에 대입하면 0.82, 0.86, 0.83, 0.84, 0.87, 0.83 등의 값을 얻을 수 있는데, 이들은 참고문헌<sup>(18)</sup>으로부터의 값인 0.83과 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 참고문헌<sup>(4-5)</sup>과 동등한 방법으로 수행된 본 논문의 실험결과도 ACI에서 채택하고 있는 결과와 거의 대등한 수준의 정확도를 가지고 있는 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 5의 결과는 참고문헌<sup>(4-5)</sup>에서 Size II 공시체의 길이만을 변화시킨 경우로서 ACI의 경우와는 부재의 크기도 다르고 사용된 굵은골재 최대치수도 다른 등 서로의 조건이 다르므로 그 경향이 다른 것으로 생각된다. 따라서 모든 보의 경우에 등가응력으로  $0.85f_{cu}$ 를 사용하는 것과  $f_{cu} = 590 \text{ kgf/cm}^2$  정도의 강도에 대하여  $\beta_1 = 0.65$ 를 사용하는 것에 대한 더욱 상세한 검토가 필요하다고 판단된다.

### 3.4 극한변형률, 극한하중 및 공시체 중앙부의 변위에 대한 검토

아래의 Fig. 6과 7에는 극한변형률, 극한하중 및 공시체 중앙부의 변위 사이의 관계를 나타내고 있다.

직사각형 단면보가 휨압축을 받아 파괴에 이를 때 압축연단 콘크리트의 극한변형률은 대개 0.003~0.004의 범위에 있다는 것은 보의 실험을 통하여 널리 알려져 있으며 이 C형 공시체 실험에 의해서도 비슷한 결과를 얻었다.

Fig. 6에서 수평으로 그려진 굵은 파선은 ACI에 제시된 0.003을 의미하는데, 이 그림은 실험 결과의 값이 0.003에 비하여 어떻게 변하는 지

를 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.

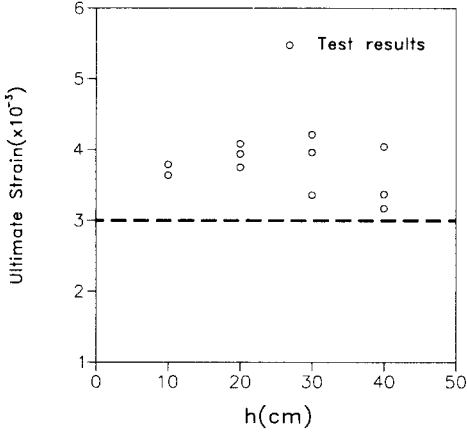


Fig. 6 Ultimate strains as function of the specimen length

Fig. 7에는 재하 초기단계에서부터 파괴시까지 각 공시체의 길이에 대한 하중 ( $P_1 + P_2$ )과 LVDT로부터 얻은 공시체 중앙부의 수평방향 변위와의 관계가 나타나 있다.

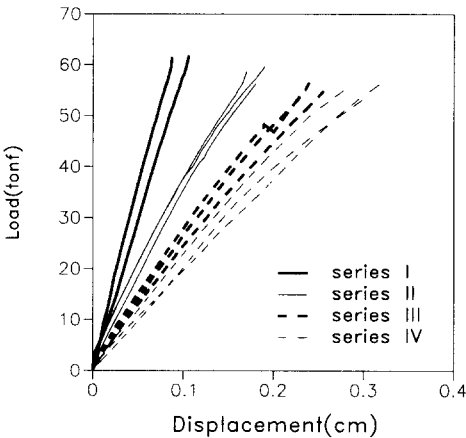


Fig. 7 Comparisons of the relationship between load and horizontal displacement at midheight of specimens

이 그림으로부터 공시체의 길이가 길어질 수록 각 단계의 하중은 조금씩 줄어들고 이 때의 변위

는 반대로 조금씩 늘어나지만, 공시체의 길이가 증가함에 따라 이 하중이 줄어드는 정도에 대한 변위가 늘어나는 정도의 비가 감소해 간다는 것을 알 수 있다.

### 3.5 C형 공시체에 대한 크기효과 법칙의 일반화

아래의 식(3)은 이 연구의 실험결과와  $h/c$ 를 일정하게 한 기존의 연구결과<sup>(4-5)</sup>를 동시에 만족할 수 있는 총 31개의 C형 공시체의 실험결과에 대한 일반화된 모델식으로서 회귀분석을 통해 얻어졌다.

$$f_{cu}(c, h) = \frac{1.1f_{cu}}{\sqrt{1+2.0c(h/c-1/3)}} + 0.6f_{cu} \quad (3)$$

여기서  $f_{cu}$ 는 식(1)의 정의와 같고,  $c$ 와  $h$ 는 부재의 중립축 깊이와 길이를 의미하며 그 단위는 cm이다. 그리고  $h/c \geq 3$ 이면  $h/c = 3$ 으로 해야 한다.

Fig. 8에서 원은 C형 공시체에서 얻은 실험값을 굵은 실선은 식(3)으로부터의 결과를 나타내는데 식(3)이 실험결과를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 경우에 대한 상관계수( $r$ )는 0.932였으며 표준편차( $s$ )는 0.024였다.

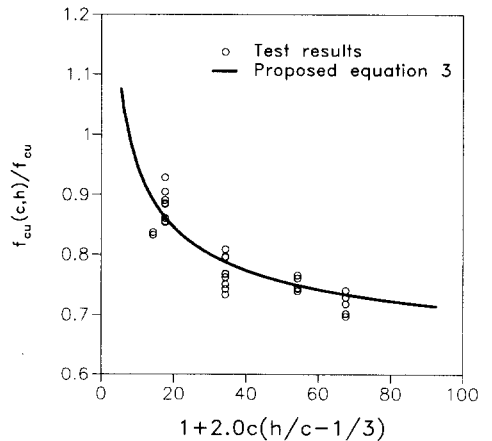


Fig. 8  $f_{cu}(c, h)/f_{cu}$  as function of the  $1+2.0c(h/c-1/3)$

따라서 임의의 부재 깊이와 길이를 갖는 보의 휨압축강도는 이 부재의 중립축 깊이( $c$ ) 및 부재길이( $h$ )를 식(3)에 대입시키면 얻을 수 있다.

#### 4. 결 론

이상에서 휨을 받는 철근콘크리트 부재의 휨압축강도에 대한 크기효과에 부재의 길이가 미치는 영향을 검토하기 위하여 콘크리트의 압축강도가  $590 \text{ kgf/cm}^2$ 인 C형 콘크리트 공시체에 대한 실험을 수행하였으며 그 결과로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 부재의 길이와 중립축 깊이의 비가 3.0까지는 부재의 길이가 증가함에 따라 파괴시의 휨압축강도가 감소하는 현상이 뚜렷이 나타나고 있으며 실험결과를 이용하여 이를 예측할 수 있는 모델식을 제시하였다. 또한 기존의 실험값을 이용하여 보다 일반적인 휨압축강도에 대한 크기효과 모델식을 제안하였다.
- 2)  $h/c$  가 3.0 이상이면 C형 공시체의 휨압축강도에 대한 크기효과에 영향을 미치지 않는다는 사실을 알 수 있었다.
- 3) 등가 직사각응력블럭의 깊이는 부재의 길이가 증가함에 따라 점차 감소하지만 ACI에서 제시하는 값보다는 큰 경향을 보였다. 따라서 이에 대해서는 더 많은 연구가 필요하다고 판단된다.
- 4) C형 공시체에서 부재의 길이가 증가함에 따라 극한변형률에는 큰 차이가 없었다.

#### 감사의 글

이 연구는 한국과학재단(ERC-STRESS)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다

#### 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, V.19, 1989, pp.973-977.
3. Bazant, Z.P., "Size Effect in Tensile and Compressive Quasibrittle Failure", Proc. Int. Workshop, Size Effect in Concrete Structure, held in Sendai, Japan, (edited by Mihashi H., Okamura, H. and Bazant, Z.P.), E&FN Spon, 1993, pp.161-180.
4. 김진근, 이성태, 양은익, "콘크리트의 휨압축강도의 크기효과", 한국콘크리트학회, 제11권 2호, 1999, pp.157-165.
5. Kim, J.K., Yi, S.T. and Yang, E.I., "Size Effect on Flexural Compressive Strength of Concrete Specimens", ACI Structural Journal, Jul. 1999, (accepted).
6. 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.
7. 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.
8. Swartz, S.E., Nikaeen, A., Narayan Babu, H.D., Periyakaruppan, N. and Refai, T.M.E., "Structural Bending Properties of Higher Strength Concrete", High-Strength Concrete, SP-87, ACI, 1985, pp.147-178.
9. Bazant, Z.P., Kazemi, M.T., Hasegawa, T. and Mazars, J., "Size Effect in Brazilian Split-Cylinder Tests: Measurements and Fracture Analysis", ACI Materials Journal, V.88, No.3, May-June 1991, pp.325-332.
10. 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.
11. Kim, J.K., Eo, S.H. and Park, H.K., "Size Effect in Concrete Structures without Initial Crack", Fracture Mechanics: Application to Concrete, SP-118, ACI, Detroit, 1989,



- pp.179-196.
12. 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.
  13. 김진근, 어석홍, 이성태, "비표준형 실린더 공시체에 대한 압축강도의 크기효과", 콘크리트학회지, 제9권 1호, 1997, pp.105-113.
  14. 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.
  15. 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.
  16. Markeset, G., "A Compressive Softening Model for Concrete", Fracture Mechanics of Concrete Structures, (edited by Wittmann F.H.), FRAMCOS-2, AEDIFICATIO Publishers, 1995, pp.435-443.
  17. Jansen, D.C. and Shah, S.P., "Effect of Length on Compressive Strain Softening of Concrete", J. of Engineering Mechanics, ASCE, V.123, No.1, Jan. 1997, pp.25-35.
  18. Nilson, A.H. and Slate, F.O., "Structural Properties of Very High Strength Concrete", Second Progress Report, Dept. of Structural Engineering Cornell University, Mar. 1979, pp.62.

### 요 약

철근콘크리트 보 단면의 극한강도를 예측할 때에는 부재의 길이를 고려하지 않는 것이 일반적이다. 그러나 이 단면의 휨강도는 부재의 길이가 증가함에 따라 항상 감소하게 된다.

따라서 본 논문에서는 부재의 길이가 콘크리트 휨압축강도의 크기효과에 미치는 영향에 대해 살펴보기 위하여 축압축력과 휨모멘트를 동시에 받는 일련의 C형 공시체에 대한 실험을 수행하였다. 공시체의 길이/폭의 비는 4가지(1, 2, 3 및 4)였으며 콘크리트의 압축강도는  $590 \text{ kg/cm}^2$ 로 하였다.

실험결과로부터  $h/c \leq 3.0$  까지는 부재의 길이가 증가함에 따라 파괴시의 휨압축강도가 뚜렷이 감소함을 알 수 있었으며, 실험자료에 대한 회귀분석을 수행하여 이를 예측할 수 있는 모델식을 제안하였다. 또한 등가 직사각응력블럭의 깊이는 ACI에서 제시하는 값보다 컸으며, 부재의 길이가 극한변형률에 미치는 효과는 미소하였다.

최종적으로 본 실험과 기존의 실험자료를 이용한 보다 일반적인 모델식을 제안하였다.

(접수일자 : 1999. 2. 25)