

## 콘크리트의 축압축강도에 대한 크기효과

이성태<sup>1)\*</sup> · 김민욱<sup>2)</sup> · 김진근<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>한국전력기술(주) <sup>2)</sup>(주)대본엔지니어링 <sup>3)</sup>한국과학기술원

(2000년 12월 15일 원고접수, 2001년 3월 14일 심사완료)

### Size Effect on Axial Compressive Strength of Concrete

Seong-Tae Yi<sup>1)\*</sup>, Min-Wook Kim<sup>2)</sup>, and Jin-Keun Kim<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Korea Power Engineering Company, Inc., Yongin, 449-713, Korea

<sup>2)</sup> Daebon Engineering Company, Ltd., Seoul, 135-701, Korea

<sup>3)</sup> Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejeon, 305-701, Korea

(Received on December 15, 2000, Revised on March 14, 2001)

#### ABSTRACT

In this study, the size effect on axial compressive strength for concrete members was experimentally investigated. Experiment of mode I failure, which is one of the two representative compressive failure modes, was carried out by using double cantilever beam specimens. By varying the eccentricity of applied loads with respect to the axis on each cantilever and the initial crack length, the size effect of axial compressive strength of concrete was investigated, and new parameters for the modified size effect law (MSEL) were suggested using least square method (LSM).

The test results show that size effect appears for axial compressive strength of cracked specimens. For the eccentricity of loads, the influence of tensile and compressive stress at the crack tip are significant and so that the size effect is present. In other words, if the influence of tensile stress at the crack tip grows up, the size effect of concrete increases. And the effect of initial crack length on axial compressive strength is present, however, the differences with crack length are not apparent because the size of fracture process zone (FPZ) of all specimens in the high-strength concrete is similar regardless of differences of specimen slenderness.

**Keywords :** size effect, axial compressive strength, eccentricity length, initial crack length, double cantilever beam

#### 1. 서 론

어떠한 재료를 막론하고 그 재료에는 고유한 성질이 있으며 그것이 부재의 크기나 기타의 요인과 무관할 때 그 성질을 재료적 특성이라 한다. 콘크리트도 하나의 합성재료로서  $\phi 15 \times 30$  cm 원주공시체의 압축강도를 가장 기본적인 재료특성으로 간주하고 있다. 그러나 콘크리트 재료는 그 파괴특성으로 인해 압축강도가 실험체나 구조물의 크기에 따라 달라지므로 이를 재료적 특성이라고 보기에는 문제가 있다. 이러한 콘크리트 축압축강도의 크기효과는 인장이나 휨, 전단강도에 비해 뚜렷하지는 않으나 선행된 연구 결과<sup>1~4)</sup>에 따르면 축압축강도도 부재의 크기가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이는 것으로 고찰되었다.

따라서 콘크리트 구조물이 커짐에 따라 구조물을 설계할 때 기준이 되는 콘크리트의 축압축강도로 어떤 크기의 실험체에 대한 값을 선택하느냐가 문제가 될 수 있다. 실험실에서 강도의 측정을 위해 사용하는 실험체와 실제 구조물의 크기에는 차이가 있으므로 크기효과법칙에서 알 수 있는 바와 같이 강도에 있어서도 상당한 차이가 발생하게 된다. 그러므로 구조물을 설계할 때에는  $\phi 15 \times 30$  cm, 혹은  $\phi 10 \times 20$  cm와 같이 확립화된 원주공시체의 콘크리트 압축강도를 사용하기보다는 그 구조물의 크기에 적합한 콘크리트 압축강도를 크기효과법칙에 근거하여 구한 후 이를 사용하는 것이 바람직하다.

한편 압축력이 콘크리트에 작용하면 콘크리트 내부에는 균열이 발생하고 이러한 균열들이 진전하면서 주 균열을 형성하여 콘크리트에는 압축파괴가 일어나는데 이 압축파괴는 구조물의 형태, 크기, 에너지 이완 특성, 그리고 기하학적 영향 등에 의해 두 가지로 나누어 생각해 볼 수 있다. 즉, 콘크리트의 파괴양상은 미세균열들이 진전하다가 한 개

\* Corresponding author

Tel : 031-289-4128 Fax : 031-289-3209

E-mail : yist@kopec.co.kr

의 축방향 주균열로 발달하여 파괴에 이르는 축압축의 경우와 경사진 방향으로 미세균열이 발달하다가 전단의 형태로 파괴에 이르는 경우의 두 가지 형태로 나타난다.

또한 콘크리트의 압축강도는 크게 축압축강도와 휨압축강도로 나눌 수 있는데, 최근 들어서는 이들 압축강도의 크기효과에 대한 연구<sup>2,5-10)</sup>가 활발히 이루어지고 있다.

이번 연구에서는 크기효과를 이용하여 콘크리트의 압축 파괴에 관한 특성을 구명하려 하였으며 두 가지 대표적인 압축파괴 양상 중 축압축만을 그 연구대상으로 하였다. 또한 콘크리트의 축압축 거동을 구명할 수 있는 보다 체계적인 연구방법을 정립하기 위해서 본 연구에서는 초기 균열이 있는 이중 캔틸레버 보 (Double cantilever beam, DCB) 실험체를 이용한 실험방법을 제시하였다.

## 2. 콘크리트의 압축파괴거동

Bazant의 크기효과법칙 (Size effect law, SEL)<sup>11)</sup>이 발표된 이후, 김진근 등<sup>11)</sup>은 부재의 크기와 무관한 항인  $\sigma_o (= \alpha f_{cu})$ 를 고려함으로써 초기 균열이 없는 경우와 유사 혹은 비유사 균열을 가진 콘크리트 부재의 강도를 예측할 수 있는 아래의 식(1)과 같은 수정된 크기효과법칙 (Modified size effect law, MSEL)을 제안하였다.

$$f_{cu}(d) = \frac{Bf_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{d}{\lambda_o d_a}}} + \alpha f_{cu} \quad (1)$$

여기서  $f_{cu}$ ,  $d$ 와  $d_a$ 는 각각 원주공시체 ( $\phi 15 \times 30$  cm)에 대한 압축강도, 특성길이와 굵은 골재의 최대치수를 나타내며  $B$ ,  $\lambda_o$ ,  $\alpha$ 는 실험상수를 나타낸다. 이에 대한 응용으로서 축압축력을 받는 원주공시체<sup>9)</sup>와 휨압축력을 받는 C형 실험체<sup>9,10)</sup>에 대한 연구결과가 이미 발표된 바 있다.

$\lambda_o$ 는 일반적으로 2.0~3.0의 값을 갖는 것으로 알려져 있으며<sup>8-10)</sup> 본 연구에서는 2.0의 값을 사용하였다.

크기효과를 나타나게 하는 요인은 다양하지만, 유한한 연성과 무수히 많은 미세균열이 그 대표적 원인이라 할 수 있다. 콘크리트에 식별 가능한 균열이 없다 해도 하중이 작용하면 미세균열선단에 응력이 집중되고, 여기에 콘크리트가 가지고 있는 취성적인 성질로 인해 균열은 더욱 진전하며 최종적으로 파괴에 도달하게 되는데 이와 같은 현상은 실험체가 커질수록 더 뚜렷해진다. 즉 크기효과가 더 뚜렷이 나타난다.

또한 하중의 작용 형태에 따라 서로 크기효과가 다르게 나타나는데, 이것은 미세균열영역의 크기에 기인한 것이다. 콘크리트에 파괴를 가져오는 주균열이 형성되기 전에 미세균열영역이 콘크리트 단면의 상당 부분을 차지한다면 크기효과는 감소하게 되고, 미세균열영역이 작으면 크기효과는 커지게 된다. 압축력을 받을 때 발생하는 콘크리트 내 미세균열영역은 인장력을 받을 때의 그것보다 더 크기 때문에 크기효과는 감소하게 된다. 또한 축압축 실험체의 경우 휨압축 실험체에 비하여 균열이 더 많이 분산되므로 크기효과는 적게 일어나는 반면 휨압축 실험체의 경우 균열이 집중되므로 크기효과는 크게 일어나는데, 이는 축압축 실험체와 휨압축 실험체의 변형률 구배 (Strain gradient)는 각각 사각형과 삼각형으로 서로 다르기 때문이다.

따라서 인장파괴와 압축파괴는 서로 다른 특성을 보일 것이며, Fig. 1에는 이를 설명하기 위한 원주공시체와 보에 대한 파괴의 전형적인 형태가 나타나 있다. 여기서 인장파괴(a)의 경우 균열이 축압축파괴(b)나 휨압축파괴(c)보다 더 집중되며 특성길이( $l_{ch}$ )의 측정방향이 압축파괴와 다를 수 있다. 그러나 압축파괴도 결국 국소화된 인장의 영향 (Localized tension effect)으로 인한 쪼갬균열의 전파에 의해 일어나므로 인장파괴에 대한 파괴역학적 개념을 압축파괴에도 적용할 수 있음을 알 수 있다.

거시적인 관점에서 콘크리트와 같은 유사취성 (Quasi-

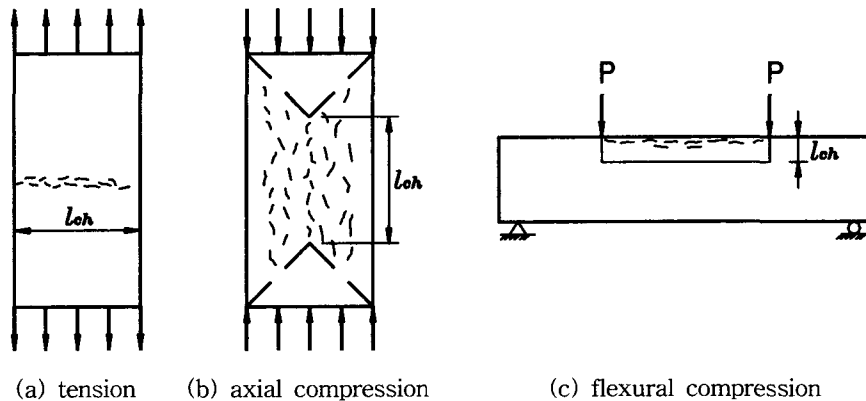


Fig. 1 Tension failure and compression failure of concrete

brittle) 재료의 압축파괴는 먼저 미세균열영역의 띠가 형성된 후 하중의 증가와 함께 이 띠가 발달해 가는 것으로 설명된다.

균열이 발생하고 진전하는 과정 및 압축파괴의 전형적인 양상에 대해서는 참고문헌 12에 나타나 있다. 축압축력을 받는 실험체에 대하여 실험을 수행해 보면 거의가 균열면에 대하여 수직인 인장응력을 받는 모드 I에 따라 파괴되므로 본 연구에서도 모드 I에 대하여 그 특성을 살펴보았다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험개요

Fig. 2(a)에서와 같이 콘크리트가 압축력을 받으면 미세한 축방향 균열이 발생하고<sup>13,14)</sup>, 어느 시점부터는 이 균열이 합쳐지면서 한 개 또는 몇 개의 주 균열이 형성되고 이 주 균열 부근의 기존의 미세균열들은 단히게 된다. 이러한 축방향 균열에 의한 압축파괴를 모형화하기 위해 Fig. 2(b)의 실험체를 사용하여 압축파괴의 크기효과를 살펴보았다. 사용된 실험체는 이중 캔틸레버 보로 통상은 부재의 축에 수직인 방향으로 하중을 가하지만 본 연구에서는 부재의 축과 평행한 방향으로 하중을 가하여 실험을 수행하였다.

같은 크기의 부재에 있어서도 하중작용점의 편심거리( $e$ )나 초기 균열길이( $a_0$ )에 따라 크기효과가 다를 것으로 예상된다. 이와 같은 사실을 확인하기 위해 편심거리와 초기 균열길이를 각각 세 가지로 변화 (Table 2 참조) 시키면서 크기효과를 관찰하였다.

Fig. 3은 부재에 가해지는 하중의 작용 위치를 나타내고 있다. 이 때 하중은 균열의 좌우에 있는 동일 기호의 하중(두 개의 하중)이 동시에 가해졌다. 여기서 하중  $P$ 가 편심거리  $e$ 가 작은 위치에 작용하는 경우, 초기 균열선단에는 압축응력이 작용하므로 크기효과는 거의 일어나지 않는 반면 하중  $P$ 가 편심거리  $e$ 가 큰 곳에 작용하면 크기효과가 크게 나타날 것이다. 이와 같이 하중 작용점의 편심거리가 크기효과에 미치는 영향에 대해서는 4.2절에서 살펴보고자 한다.

#### 3.2 배합설계

고강도 콘크리트는 저강도 콘크리트에 비해 더욱 취성적인 거동을 한다. 이것은 파괴진행영역의 크기가 작고 크기효과가 크게 나타난다는 것을 의미한다. 파괴진행영역의 크기가 작아지면 실험체의 크기를 작게 할 수 있는 이점이 있으므로 본 실험에서는 강도수준  $700 \text{ kgf/cm}^2$ 의 고강도 콘크리트가 되도록 배합설계를 하였다. 실험체를 만들기 위해 선택된 콘크리트 배합표는 Table 1에 주어져 있다.

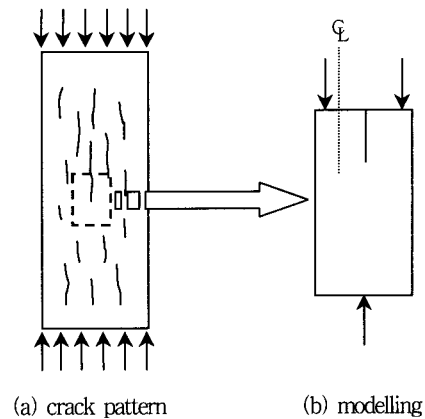


Fig. 2 Crack pattern for compression and modelling of compression failure

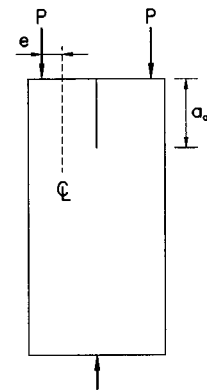


Fig. 3 Effect of loading location on size effect

Table 1 Mixture proportions of concrete

w/c (%)	s/a (%)	Unit weight(kgf/m <sup>3</sup> )					S.P.* (%)
		W	C	S	G	Silica fume	
28	38	177	583	652	1085	58	2.7

\* superplasticizer(ratio for cement weight)

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(1종 시멘트)를 사용하였으며 잔골재는 금강유역의 강모래를 사용하였고 굵은골재는 최대치수( $d_a$ ) 13 mm의 부순자갈을 사용하였다. 실험체의 콘크리트는 수평으로 치기를 하였으며 작업성을 향상시키고 다짐을 원활히 하기 위하여 고성능 감수제와 진동기를 사용하였다.

콘크리트의 비빔에 사용된 믹서는 공칭용량 80 l의 강제식 믹서이며, 재료를 굵은골재, 잔골재, 시멘트, 그리고 실리카 폼의 순으로 투입하여 3분간 건비빔한 다음, 물과 고성능 감수제를 동시에 투입하여 5분간 더 비빔 후 미리 준비된 거푸집에 콘크리트 치기를 하였다. 모든 공시체는 치기를 한 후 24시간이 경과하여 탈형했으며, 실험 수행시까지 양생조에서 수중양생을 실시하였다.

### 3.3 실험체의 제작, 크기 및 형상

Fig. 4에는 본 실험에서 사용한 실험체의 크기, 형상 및 하중 가력점 등이 나타나 있다. 크기효과와 관련한 실험을 하기 위해서는 기하학적으로 유사하며 크기가 다른 실험체를 세 가지 이상 실험해야 하므로 실험체의 크기를 Table 2에 나타낸 바와 같이 1 : 2 : 4로 변화시켰다. 여기서 각 실험체의 크기를 나타내는 단위는 cm이다. 그리고 실험체의 폭( $b$ )과 깊이( $D$ )의 비는 1 : 2로 하였으며 두께( $t$ )는 5cm로 일정하게 하였다.

Table 2의 실험체 번호에서 S(Small), M(Middle), 및 L(Large)은 실험체의 크기를, E1, E2, 및 E3은 편심거리와 폭의 비인  $e/b$ 에 따른 실험체의 일련번호를, A1, A2, 및 A3은 초기 균열길이와 실험체 폭의 비인  $a_o/b$ 에 따른 각 실험체 크기의 일련번호를 나타낸다. 실험체의 크기가 가장 작은 경우(S)에는 실험결과와 혼이 다른 크기의 실험체보다 클 것으로 예상되어 6개의 실험체를 선택했다. 그러나 Table 2에서 6개보다 적은 수의 실험체 수가 나타나 있는 것은 여러 가지의 원인에 의해 실험자료가 생략된 실험체가 있음을 의미하고 있다. 한편  $e/b$ 가 음(-)의 값을 갖는 것은 작용하중이 두 개의 캔틸레버 축보다 안쪽인 캔틸레버 축과 부재축의 사이에 위치하고 있음을 의미한다.

### 3.4 실험절차

실험전 양생조에서 꺼낸 실험체에는 Fig. 4와 같이 볼베어링이 달린 지지대 (Bearing plate)를 하중이 가해질 캔틸레버 보의 끝단에 에폭시로 고정하였는데, 이것은 캔틸레버 보의 끝단에 축하중만이 가해지도록 하기 위해 설치하였다.

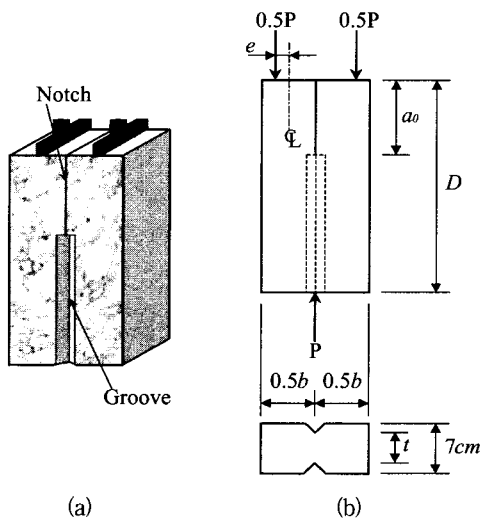


Fig. 4 Size and shape of specimens

Table 2 Dimension of specimens

Specimen no.	$D \times b \times t$	$e/b$	$a_o/b$	Numbers of specimens
S-E1-A2	20×10×5	-0.15	0.4	4
S-E2-A1			0.2	6
S-E2-A2		0.0	0.4	6
S-E2-A3			0.6	5
S-E3-A2		0.15	0.4	5
M-E1-A2	40×20×5	-0.15	0.4	3
M-E2-A1			0.2	3
M-E2-A2		0.0	0.4	3
M-E2-A3			0.6	3
M-E3-A2		0.15	0.4	3
L-E1-A2	80×40×5	-0.15	0.4	3
L-E2-A1			0.2	3
L-E2-A2		0.0	0.4	3
L-E2-A3			0.6	3
L-E3-A2			0.15	0.4

실험에 사용된 기기는 250 tonf 용량의 만능재료시험기 (UTM)이며, 변위제어법에 의해 실험을 수행하였다. 제어 속도는 0.003 mm/sec의 속도를 유지하였고, 실험을 통해 각 실험체에 가해진 극한하중을 구하였다. KS F 2405에 의해 압축강도( $f_{cu}$ ) 실험을, 그리고 KS F 2423에 의해 쪼갬인장강도( $f_{sp}$ ) 실험을 실시하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 실험결과

이중 캔틸레버 보의 극한강도와 원주공시체의 압축강도의 측정은 동일 재령에 실시되었으며 그 결과는 Table 3에 나타나 있다. Table 3에 주어진 값 중에서 극한하중( $P_u$ )의 단위는 tonf이며 콘크리트의 압축강도와 쪼갬인장강도는 시리즈 당 3개의  $\phi 10 \times 20$  cm 원주공시체에서 얻은 값을 평균한 결과이고 그 단위는  $\text{kgf/cm}^2$ 이다.

식(1)에서  $f_{cu}(d)$ 는 아래의 식(2)<sup>15)</sup>로부터 계산되었는데, 여기서  $P_u$ 는 공시체가 파괴될 때의 극한하중이고  $b$ 와  $l$ 은 각각 실험체의 폭과 지점 사이의 길이이다.

$$f_{cu}(d) = \frac{P_u}{bl} = c_n \frac{P_u}{bd} \quad (2)$$

여기서,  $c_n = \frac{d}{l}$  이다.

Table 3 Ultimate load obtained from this experiments

$P_u$ , tonf															$f_{cu}$	$f_{sp}$
S (D=20 cm)					M (D=40 cm)					L (D=80 cm)						
A1	A2			A3	A1	A2			A3	A1	A2			A3		
E2	E1	E2	E3	E2	E2	E1	E2	E3	E2	E2	E1	E2	E3	E2		
4.58		4.47		4.75	7.84		8.20		7.98	15.11		15.00		9.89	729.3	56.0
4.14		4.41		4.08												
4.25		4.42		3.68	7.74		8.13		8.59	14.20		14.07		14.26	749.5	55.9
4.38		4.35														
4.97		3.90		4.44	8.97		8.35		8.34	14.51		13.76		13.99	731.7	56.0
4.49		3.26		4.58												
	4.29		4.56			7.79		9.23			14.30		14.19		767.3	60.0
			4.87													
	3.59			6.94		9.32		9.51			15.21		15.68		756.9	59.3
	4.09															
		4.53		5.49		8.87		9.22			13.69		13.67		788.8	62.7
				5.28												

4.2 편심거리에 따른 크기효과

Table 4에는 편심거리에 따른 크기효과를 확인하기 위하여 실험을 통해 얻은 극한강도 값에 최소자승법을 수행하여 얻은 수정된 크기효과와 법칙의 실험상수들이 나타나 있다. 실험결과와 최소자승법의 결과들을 이용하여  $D$ 와  $f_{cu}(e)/f_{cu}$ 의 관계 곡선을 그리면 Fig. 5와 같고, 이들을 서로 비교하기 위하여 Fig. 6에 세 곡선을 같이 나타내었다.

Table 4 Results obtained from MSEL and least square method (eccentricity)

Specimen No.	$B$	$\lambda_o d_a$	$\alpha$
A2-E1	-	-	-
A2-E2	0.27	2.6	0.14
A2-E3	0.34	2.6	0.06

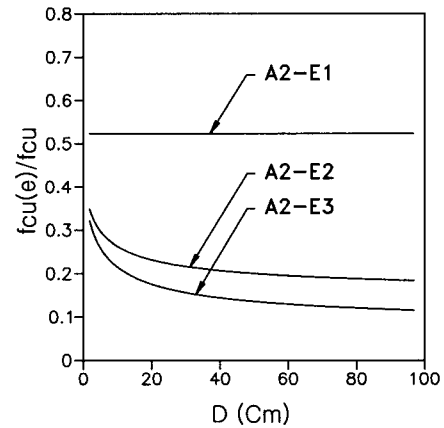


Fig. 6 Comparison of model equations obtained from MSEL and experimental results (eccentricity)

본 실험에서는 작용하중의 편심거리에 따라 균열선단에 서 균열면과 평행한 방향으로 작용하는 압축의 영향과 균

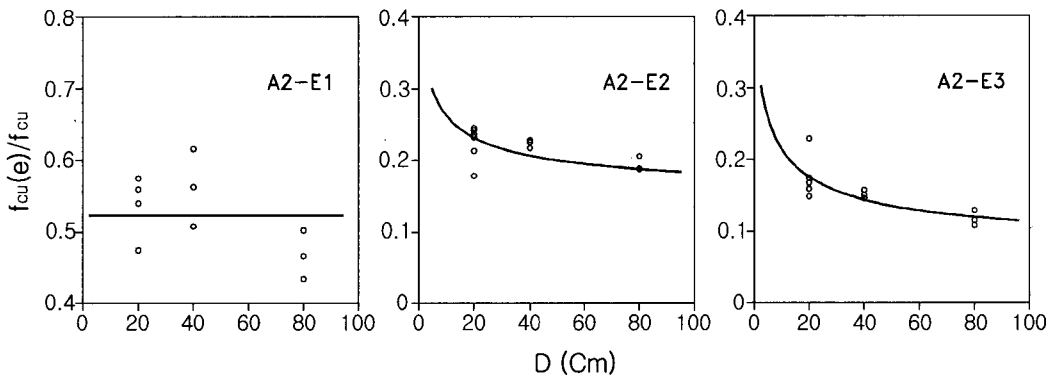


Fig. 5 Relationship between specimen depth  $D$  and  $f_{cu}(e)/f_{cu}$

열면에 수직방향으로 작용하는 인장의 영향이 달라질 것이다. 즉 편심하중이 각 캔틸레버 보의 중심축 안쪽에서 작용하면 중심축 바깥쪽에서 작용하는 경우보다 균열선단에서의 압축력의 영향이 더 커진다. 그러므로 하중이 중심축의 안쪽에 작용한 경우(즉, A2-E1의 경우)에는 크기효과가 일어나지 않아야 하며, 실제로 Fig. 5에서도 이와 같은 경향을 확인할 수 있었다. 이 그림에서 수평선은 실험 자료의 평균치를 나타낸다.

A2-E3의 경우에 가장 큰 크기효과가 나타났으며, A2-E2나 A2-E3의 경우에는 A2-E1의 경우보다 크기효과가 뚜렷이 나타났음을 알 수 있다. 이로부터 편심거리에 따른 크기효과의 변화에도 어떤 한계까지는 강도비의 감소가 급격히 일어나나 그 이상의 편심에 대해서는 큰 변화를 보이지 않음을 알 수 있다.

### 4.3 초기 균열길이에 따른 크기효과

Table 5에는 초기 균열길이에 따른 크기효과를 확인하기 위하여 실험을 통해 얻은 극한강도 값에 최소자승법을 수행하여 얻은 수정된 크기효과의 법칙의 실험상수들이 나타나 있다. 실험결과와 최소자승법의 결과들을 이용하여  $D$ 와  $f_{cu}(a_0)/f_{cu}$ 의 곡선을 그리면 Fig. 7과 같고 이들을 서로 비교하기 위하여 Fig. 8에 세 곡선을 같이 나타내었다.

Table 5 Results obtained from MSEL and least square method (crack length)

Specimen No.	$B$	$\lambda_0 d_a$	$\alpha$
A1-E2	0.28	2.6	0.15
A2-E2	0.27	2.6	0.14
A3-E2	0.26	2.6	0.13

초기 균열길이의 변화는 캔틸레버 보의 폭과 깊이의 변화를 가져오기 때문에, 캔틸레버 보의 세장비를 변화시키는 효과가 있다. 같은 축하중을 받고 세장비가 서로 다른 실험체를 가정할 때, 실험체가 세장할 수록 파괴는 취성에 가까워진다. 그러므로 세장비가 클수록 압축파괴에 대한 크기효과는 더 크게 일어나야 한다.

그러나 본 논문에서는  $700 \text{ kgf/cm}^2$ 의 고강도 콘크리트가 사용되었으며 이 경우 리가먼트 (Ligament) 길이의 차이에도 불구하고 파괴진행영역의 크기가 모든 공시체에서 유사하고 또한 저강도의 콘크리트와 비교해서 작으므로 Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 부재의 크기에 따른 크기효과는 존재하지만 균열길이에 따른 극한강도에는 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 즉 하중이 가해져 파괴진행영역에 미세균열이 발생하면 주균열이 곧 바로 생기고 이는 전체 부재의 파괴와 직접적으로 연결됨을 알 수 있다. 따라서 고강도 콘크리트가 사용되는 경우, 부재의 크기에 따른 극한하중은 세장비가 아닌 파괴진행영역의 크기에 주로 지배됨을 알 수 있다.

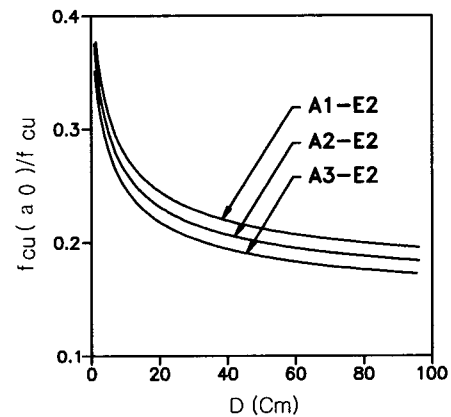


Fig. 8 Comparison of model equations obtained from MSEL and experimental results (crack length)

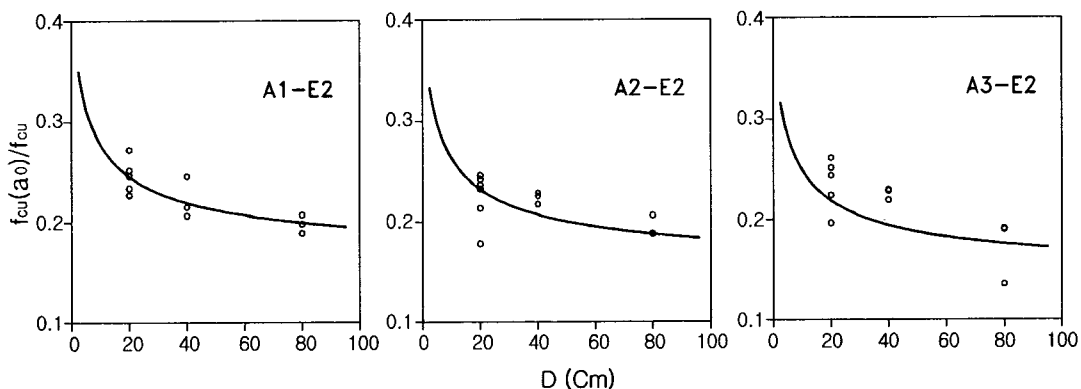


Fig. 7 Relationship between specimen depth  $D$  and  $f_{cu}(a_0)/f_{cu}$

또한 Markeset 등<sup>16)</sup>, Jansen과 Shah<sup>17)</sup>, 및 김진근 등<sup>10)</sup>에 의하면 부재의 길이/직경 혹은 길이/깊이가 일정한다(2.0~3.0)를 넘어서면 더 이상의 강도 저하가 없음이 보고되고 있으며 본 연구에서도 균열의 길이 증가에 따라 어느 정도의 강도저하는 있으나 대체로 이들 문헌에서와 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

만일 저장도 콘크리트가 사용된다면 파괴진행영역의 크기가 상당히 크게 나타난다. 이 경우, 완전한 파괴진행영역을 확보하지 못한 상태에서 파괴에 이르게 되면 크기효과는 감소하게 된다. 이것은 실험방법의 불안정성이나 파괴진행영역이 이 경우에 충분히 확보되지 않은 상태에서 실험이 수행되기 때문으로 판단된다. 보통 압축강도를 실험할 때 쓰이는 표준형 압축공시체에서 크기효과가 발견되지 못하는 원인은 공시체가 작아서 완전한 파괴영역을 확보하지 못한 상태에서 파괴에 이르기 때문이다.

따라서 보다 정확한 실험이 이루어지기 위해서는 실험체의 크기를 조정하거나 파괴진행영역이 충분히 확보될 수 있는 실험체를 제안하여 실험을 해야 할 것으로 사료된다.

## 5. 축압축강도에 크기효과법칙의 적용

현재까지 콘크리트의 축압축강도에 대한 크기효과의 존재 여부를 밝히기 위한 많은 이론적·실험적 연구가 수행되어 왔으며, 본 연구에서도 이와 같은 콘크리트의 특성을 살펴보기 위하여 초기 균열길이를 갖는 이중 캔틸레버 보에 대한 실험적 고찰을 수행하였다. 축압축강도는 주로 원주공시체에 대한 실험에서 그 값을 얻고 있는데, 이 원주공시체 뿐만 아니라 본 연구에서 사용한 실험체에서도 크기효과가 존재함을 확인했다.

여기서 콘크리트의 축압축강도는 강도기준에 따라 설계를 수행할 때 사용되는 가장 중요한 재료적 특성이므로 이 강도에 크기효과가 존재한다는 사실은 큰 문제의 제기가 될 수 있다. 따라서 앞으로의 연구에서는 크기효과법칙에 근거하여 콘크리트의 압축강도를 얻을 수 있는 실험체의 크기를 구조물이나 부재의 크기 별로 제시할 수 있다면 실무자들에게 상당한 도움이 되리라 생각된다.

그리고 우리나라, 미국, 캐나다, 프랑스, 호주 등에서는 원주공시체를 그리고 영국, 독일, 유럽의 각국에서는 입방체의 강도를 콘크리트의 압축강도로 사용하고 있는데, 원주공시체와 입방체의 경우에 공통으로 사용될 수 있는 보다 일반적인 예측식의 도입이 필요하다고 사료된다.

## 6. 결 론

지금까지 수행된 대부분의 콘크리트 축압축강도의 크기

효과에 관한 연구들은 원주공시체에 의한 것이었지만, 보다 체계적인 연구를 위하여 이중 캔틸레버 보를 이용한 실험을 제시하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 실험을 통해 콘크리트의 압축파괴도 결국은 횡방향 인장변형에 의해 발생하므로 콘크리트의 축압축파괴에서도 크기효과가 나타난다는 사실을 확인하였다.

2) 편심거리를 변화시킨 경우, 초기 균열선단에 미치는 압축과 인장의 영향에 따라 크기효과가 변화함을 알 수 있었다. 즉 균열면에 인접한 위치에 하중을 가하면 압축의 영향이 커지므로 크기효과가 작게 나타나고, 균열면에서 멀리 떨어진 위치에 하중을 가하면 인장의 영향이 커져서 크기효과가 증가함을 알 수 있었다.

3) 초기 균열길이에 따른 크기효과 실험에서도 크기효과가 존재함을 확인하였다. 그러나 균열길이에 따른 강도의 차이는 뚜렷하지 않았는데, 이는 본 논문에서 사용된 콘크리트가 고강도이므로 저장도의 경우보다 파괴진행영역의 크기가 작고 또한 서로 유사하기 때문으로 판단된다.

4) 본 논문의 결과로부터 현재 실제 설계에 사용되고 있는 강도기준이 개선되어야 함을 알 수 있었다. 이는 구조물의 설계시에  $\phi 15 \times 30$  cm와 같이 확립화된 원주공시체의 콘크리트 압축강도를 사용하기보다는 그 구조물의 크기에 적합한 콘크리트 압축강도를 크기효과법칙에 근거하여 구한 후 이를 사용하는 것이 바람직함을 의미한다.

## 감사의 글

이 연구는 국가지정연구소(National Research Laboratory, NRL)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. Bazant, Z. P., "Size Effect in Blunt Fracture; Concrete, Rock, Metal", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.110, No.4, 1984, pp.518~535.
2. Gonnerman, H. F., "Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete," *ASTM Proceedings*, Vol.25, 1925, pp.237~250.
3. Blanks, R. F. and McNamara, C. C., "Mass Concrete Tests in Large Cylinders," *Journal of ACI*, Presentation at the 31th Annual Convention, New York, 1935, pp.280~303.
4. Powers, T. C., "Concrete Studies at the Bull Run Dam," City of Portland, Oregon, U.S. Department of the Interior, Bureau of Concrete Research, 1956.

5. Ruetters, A., "Mass Concrete as Affected by Size and Aggregate and Related Factors," *Journal of ACI*, 1933, pp.27~34.
6. Neville, A. M., "The Influence of Size of Concrete Test Cubes on Mean Strength and Standard Deviation," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 8, No.23, 1956, pp.101~110.
7. Neville, A. M., "A General Relation for Strength of Concrete Specimens of Different Shape and Size," *Journal of ACI*, Vol.63, 1966, pp.1095~1110.
8. 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*, Vol.96, No.1, 1999, pp.8~94.
9. 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, 2000, pp.291~296.
10. Kim, J. K., Yi, S. T. and Kim, J. H. J., "Effect of Specimen Sizes on Flexural Compressive Strength of Concrete," *ACI Structural Journal*, (in print).
11. Kim, J. K. and Eo, S. H., "Size Effect in Concrete Specimens with Dissimilar Initial Cracks," *Magazine of Concrete Research*, Vol.42, No.153, 1990, pp. 233~238.
12. 이성태, 김봉준, 김진근, "노치가 있는 콘크리트 실험체의 축압축강도에 대한 크기효과," 한국콘크리트학회논문집, 제12권 6호, 2000, pp.99~108.
13. Cotterell, B., "Brittle Fracture in Compression," *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol.8, No. 2, 1972, pp.195~208.
14. Nemat-Nasser, S. and Obata, M., "A Microcrack Model of Dilatancy in Brittle Material," *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol.55, 1988, pp.24~35.
15. Bazant, Z. P. and Kazemi, M. T., "Determination of Fracture Energy, Process Zone Length and Brittleness Number from Size Effect, with Application to Rock and Concrete," *International Journal of Fracture*, Vol.44, 1990, pp.111~131.
16. Markeset, G. and Hillerborg, A., "Softening of Concrete in Compression Localization and Size Effects," *Cement and Concrete Research*, Vol.25, No.4, 1995, pp.702~708.
17. Jansen, D. C. and Shah, S. P., "Effect of Length on Compressive Strain Softening of Concrete," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.123, No.1, 1997, pp.25~35.

## 요 약

본 연구에서는 콘크리트 부재에서의 축압축강도에 대한 크기효과를 검토하였다. 이를 위하여 두 가지 대표적인 압축과괴모드 중의 하나인 모드 I 파괴에 대한 실험적 연구를 이중 캔틸레버 보를 이용하여 수행하였다. 각 캔틸레버의 축에 대한 작용하중의 편심거리와 초기 균열길이를 변화시키기에 의하여 콘크리트의 축압축강도에도 크기효과가 존재하는지의 여부를 확인하였고, 최소자승법을 이용하여 수정된 크기효과법칙의 새로운 실험상수들을 제시하였다.

연구결과로부터 초기 균열이 있는 콘크리트 부재의 축압축강도에도 크기효과가 존재함을 확인하였다. 하중의 편심거리에 있어서는 균열선단에서의 인장과 압축응력의 영향이 매우 중요하며 이 경우에 뚜렷한 크기효과가 나타났다. 즉 균열선단에서 인장응력의 영향이 증가하면 콘크리트의 크기효과는 증가한다. 그러나 초기 균열길이의 경우, 축압축강도의 크기효과에 미치는 영향은 존재하지만 균열길이에 따른 차이는 뚜렷하지 않았는데 이는 고강도 콘크리트 부재의 경우 부재의 세장비 차에도 불구하고 파괴진행영역의 크기가 서로 비슷한데 그 원인이 있는 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** 크기효과, 축압축강도, 편심거리, 초기 균열길이, 이중 캔틸레버 보