

# 노치가 있는 콘크리트 공시체의 축압축 강도에 대한 크기효과

## Size Effect of Axial Compressive Strength of Concrete in Notched Specimens

김민욱<sup>\*</sup>      김진근<sup>\*\*</sup>      김봉준<sup>\*\*\*</sup>  
Kim, Min Wook    Kim, Jin Keun    Kim, Bong Jun

---

### ABSTRACT

The size effect of axial compressive strength of concrete in notched specimens was experimentally investigated.

Based on the concept of the fracture mechanics and size effect law, theoretical studies for axial compressive failure of concrete were reviewed, and two failure modes of concrete specimen under compression were discussed. In this study, experiment of axial compressive failure, which is one of the two failure modes, was carried out by using double cantilever fracture specimens. By varying the slenderness of cantilevers and the eccentricity of applied loads with respect to the axis of each cantilever, the size effect of axial compressive strength of concrete was investigated, and predicted by Bazant's size effect law.

The test results show that size effect appears conspicuously for all series of specimens. For the eccentricity of loads, the influence of tensile and compressive stress at the notch tip are significant and so that the size effect is varied. In other words, if the influence of tensile stress at the notch tip grows up, the size effect of concrete increases. And the fact that the fracture process zone must be sufficiently secured for more accurate experiment was affirmed.

---

### 1. 서론

콘크리트는 타설 단계에서부터 내부에 많은 공극과 미세한 균열들을 가지고 있으며, 콘크리트의 파괴는 인장, 압축을 막론하고 콘크리트 내에 존재하는 공극과 균열들에 의해 이루어지므로 콘크리트의 재료적 성질을 구명하려는 연구에 파괴역학을 적용하는 것은 필수적이라 할 수 있다. 파괴역학을 적용하여 콘크리트의 성질과 거동을 예측하는 연구는 상당히 다양하게 이루어졌지만, 가장 대표적인 것이 크기효과이다<sup>(1)</sup>. 크기효과는 콘크리트의 강도가 구조체의 크기에 따라 변화한다는 것인데, 이는 콘크리트 재료가 비균질하고 취성적인 성질 때문에 나타나는 재료적 특성이다.

---

\* 정회원, 대본엔지니어링 구조부

\*\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

\*\*\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

한편, 압축력이 콘크리트에 작용하면 콘크리트 내부에 균열이 발생하고 이러한 균열들이 진전하면서 주균열을 형성하여 콘크리트는 압축파괴를 일으키는데 구조물의 형태, 크기, 에너지 이완 특성, 그리고 기하학적 영향 등에 의해 두가지로 나누어 생각해 볼 수 있다. 파괴 양상은 미세균열들이 진전하다가 한 개의 축방향 주균열로 발달하여 파괴에 이르는 축압축의 경우와 경사진 방향으로 미세균열이 발달하다가 전단의 형태로 파괴에 이르는 휨압축의 2가지 형태로 나타난다.

지금까지 콘크리트의 파괴역학과 크기효과에 대한 연구는 인장파괴를 중심으로 이루어졌고, 이미 상당한 수준에 이르러 있다. 그에 비해 콘크리트 압축거동에 대한 연구는 상당히 미미한 수준이다. 그러나 콘크리트는 주로 압축력을 견디기 위한 재료이기 때문에 압축파괴에 대한 연구가 반드시 이루어져야 한다. 이러한 이유로, 최근들어 콘크리트 압축거동에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

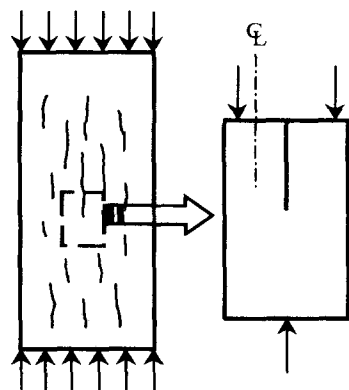
이번 연구는 크기효과를 이용하여 콘크리트의 압축파괴에 관한 특성을 구명하려 하였으며 두가지 압축파괴 양상 중 축압축만을 그 연구내용으로 하였다. 지금까지 콘크리트의 압축강도에 대한 크기효과에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 이루어져 왔지만<sup>(2,5)</sup> 대부분이 원주 공시체를 중심으로 이루어졌기 때문에 압축거동을 구명할 수 있는 보다 체계적인 연구방법이 필요해서 본 연구에서는 Double Cantilever Beam 시험체를 이용한 실험방법을 제시하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험개요

Fig. 1(a)에서와 같이 콘크리트가 압축력을 받으면 미세한 축방향 균열이 발생하고<sup>(6,7)</sup>, 어느 시점부터는 이 균열이 합쳐지면서 한 개 또는 몇 개의 주균열이 형성된다. 이러한 축방향 균열에 의한 압축파괴를 모형화하기 위해 Fig. 1(b)의 시험체를 사용하여 압축파괴의 크기효과를 살펴보았다. 사용된 시험체는 Double Cantilever Beam으로 통상 균열면에 수직인 하중을 가하지만 본 연구에서는 균열면과 평행한 방향으로 하중을 가하여 실험하였다.

Fig. 1(b)에서 각각의 캔틸레버 보에 가해지는 편심에 따라 균열선단에 작용하는 압축과 인장의 영향이 달라진다. 편심이 중심축 안쪽에 작용하면 압축의 영향이 커질 것이고, 바깥쪽에 작용하면 인장의 영향이 커질 것이다. 보통 압축의 크기효과가 인장에 비해 작게 일어난다고 알려져 있으므로 바깥쪽에 하중이 가해진 경우 크기효과가 가장 크게 일어날 것으로 예상된다. 이것을 확인하기 위해 편심거리 및 초기균열 길이를 세가지로 변화시키면서 크기효과를 관찰하였다.



(a) Crack pattern (b) Modelling of specimen for compression failure  
Fig. 1 Modelling of specimen

### 2.2 실험재료 및 배합설계

고강도 콘크리트는 저강도 콘크리트에 비해 취성적인 거동을 한다. 이것은 크기효과가 크게 나타나고, 파괴진행영역의 크기가 작다는 것을 의미한다. 파괴진행영역의 크기가 작아지면 시험체의 크기를 작게 할 수 있는 이점이 있으므로 본 실험에서는 강도수준 700kg/cm<sup>2</sup>의 고강도 콘크리트가 되도록 배합설계하였다.

실험에 사용한 시멘트는 1종 포틀랜드 시멘트 이고, 잔골재는 금강유역의 강모래이며, 굵은골재는 최대치수 13mm의 쇄석을 사용하였다. 작업성을 향상시키기 위하여 고성능 감수제를 사용하였으며 공시체는 제작 후 24시간 만에 탈형하여 실험 전까지 수중양생을 실시하였다. 실험에 사용한 배합표는 Table 1과 같다.

Table 1 Mix proportion of concrete

W/C (%)	S/A (%)	Unit content (kg/m <sup>3</sup> )					S.P. (%)
		C	W	S	G	Silica fume	
28	38	583.4	176.9	652.2	1084.5	58.4	2.7

### 2.3 시험체의 제작

본 실험에서는 Fig. 2의 육면체 시험체를 채택하였고 밑변과 높이의 비가 1:2가 되도록 하였다. 크기효과 실험을 하기 위해서는 기하학적으로 유사한 크기가 다른 시험체를 세가지 이상 실험해야 하므로, 시험체의 크기를 Table 2에 나타난 바와 같이 1:2:4로 변화시켰다.

이 실험에서는 거푸집 내부에 강판을 넣어 타설하였으며 탈형 후 강판을 제거하여 초기균열을 만들었고, 균열이 정해진 방향으로 안정적으로 진행할 수 있도록 시험체의 양쪽 옆에 Fig. 2와 같이 그루브(groove)를 두었다.

Table 2 Dimensions of specimen

Specimen no.	$D \times b \times t$	$e/b$	$a_0/b$	Numbers of specimens
S-E1-A2	20×10×5	-0.15	0.4	5
S-E2-A1			0.2	5
S-E2-A2		0.0	0.4	5
S-E2-A3			0.6	5
S-E3-A2			0.15	0.4
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
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

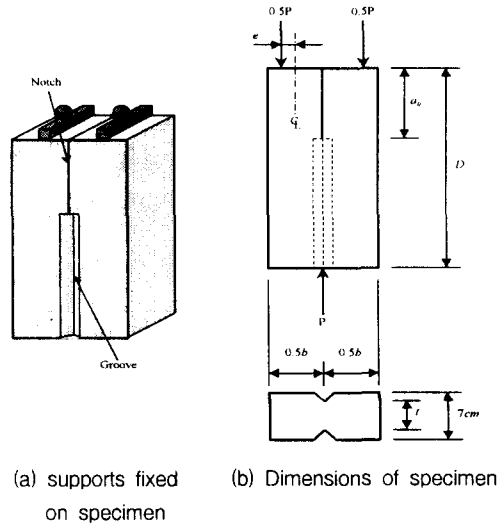


Fig. 2 Shape of specimen

### 2.4 실험방법

실험전 양생조에서 꺼낸 시험체에는 Fig. 2(a)와 같이 볼베어링이 달린 지지대를 하중이 가해질 캔틸레버 보의 끝단에 에폭시로 고정하였는데, 이것은 캔틸레버 보의 끝단에 축하중만이 가해지도록 하기 위해 설치하였다. 실험에 사용된 기기는 Instron사의 만능재료시험기이며, 변위제어에 의해 실험을 수행하였다. 제어속도는 0.003mm/sec의 속도를 유지하였고, 실험을 통해 각 시험체에 가해진 최대 하중을 구하였다.

KS F 2405에 의해 압축강도 실험을, 그리고 KS F 2423에 의해 조갸인장강도 실험을 실시하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 실험결과

본 실험을 통해 균열 길이와 편심거리 그리고 각 시험체의 크기에 따라 최대하중을 구하였다.

얻어진 최대 공칭응력 값을 Bazant의 크기효과 식(1)에 적용, 회귀 분석하여 상수값  $B$ ,  $D_0$ 를 결정하였다<sup>(8)</sup>. Bazant의 크기효과 식은 인장파괴에 적용하는 식이지만, 수행된 압축 실험도 궁극적으로는 횡방향 인장변형에 의해 파괴에 일어나기 때문에, 회귀분석은 Bazant의 크기효과 식을 이용하였다.

$$\sigma_{Nc} = \frac{Bf'_t}{\sqrt{1 + \frac{D}{D_0}}} \quad (1)$$

### 3.2 편심거리에 따른 크기효과

Table 3은 편심거리에 따른 크기효과를 확인하기 위해 실험을 통해 얻은 최대 하중값을 식(1)을 이용하여 회귀 분석하여 얻은 결과이다. 회귀 분석한 결과값들을 이용하여 크기효과 곡선을 그리면 Fig. 3의 (a), (b), (c)와 같고, 세가지 곡선을 비교하기 위해 Fig. 5에 정리하였다.

크기효과가 나타나는 것은 많은 요인에 의하지만, 유한한 연성과 무수히 많은 미세균열이 그 대표적인 원인이라 할 수 있다. 미세균열선단에서 발생하는 응력집중으로 인해 시험체가 커질수록 강도가 떨어지는 것이다. 콘크리트는 식별 가능한 균열이 없더라도 하중이 작용하면 미세균열선단에 응력이 집중되고, 취성한 성질로 인해 균열을 진전시키게 되어 크기효과가 나타난다.

그러나 하중의 작용 형태에 따라 서로 다른 크기효과를 나타내는데, 이것은 미세균열 영역의 영향에 기인한 것이다. 콘크리트에 파괴를 가져오는 주균열이 형성되기 전에 미세균열영역이 콘크리트 단면의 상당 부분을 차지한다면 크기효과는 감소하게 되고, 미세균열 영역이 작으면 크기효과는 커지게 된다. 압축력하에서 발생하는 콘크리트 내 미세균열 영역은 인장력을 받을 때의 그것보다 더 크기 때문에 크기효과는 감소하게 된다.

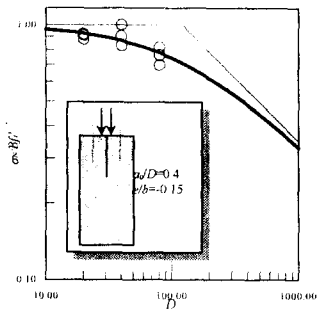
본 실험에서 편심거리에 따라 균열선단에서는 균열면과 평행한 방향으로 작용하는 압축과 균열면에 수직방향으로 작용하는 인장의 영향이 달라질 것이다. 즉 편심하중이 각 캔틸레버보의 중심축 안쪽으로 작용하면 초기균열선단에서의 압축력의 영향이 중심축 바깥쪽에 작용하는 경우의 압축 영향보다 더 커진다. 그러므로 편심이 안쪽에 작용한 경우(A2E1의 경우)에 크기효과가 더 작게 나타날 것으로 예상할 수 있다. 실제로 Fig. 5에서도 이러한 경향을 확인할 수 있다.

### 3.3 초기균열 길이에 따른 크기효과

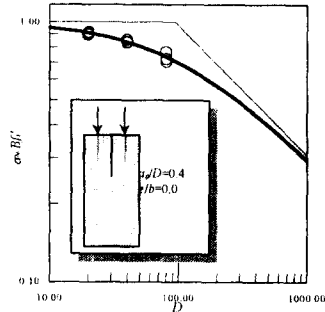
Table 4는 초기균열 길이에 따른 크기효과를 확인하기 위해 실험을 통해 얻은 최대 하중값을 식(1)을 이용하여 회귀 분석하여 얻어진 결과값이다. 회귀 분석한 결과값들을 이용하여 크기효과 곡선을 그리면 Fig. 4의 (a), (b), (c)와 같고, 세가지 곡선을 비교하기 위해 Fig. 6에 정리하였다.

초기균열 길이의 변화는 캔틸레버 보의 폭과 높이의 변화를 가져오기 때문에, 캔틸레버 보의 세장비를 변화시키는 효과가 있다. 같은 축하중을 받고 세장비가 서로 다른 시험체를 가정했을 때, 시험체가 세장할수록 파괴는 취성파괴에 가까워진다. 그러므로 세장비가 클수록 압축파괴에 대한 크기효과는 더 크게 일어난다.

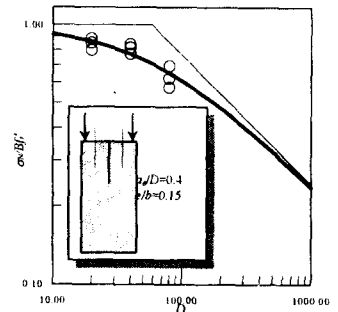
그러나 Table 4, Fig. 4 그리고 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 예측한 바와는 다른 양상의 결과가 나타났다. 이것은 시험방법의 불안정성이나 파괴진행영역이 충분히 확보되지 않았기 때문으로 판단된다.



(a) A2E1

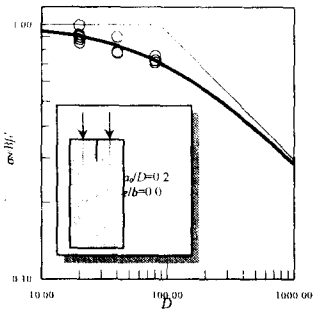


(b) A2E2

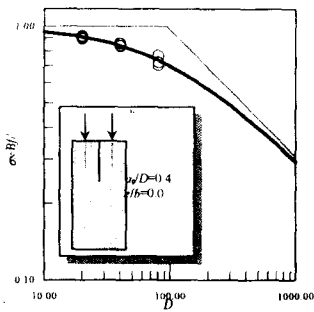


(c) A2E3

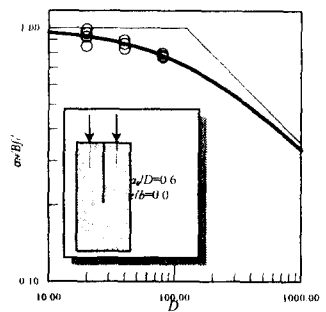
Fig. 3 Size effect curves for eccentricity



(a) A1E2



(b) A2E2



(c) A3E2

Fig. 4 Size effect curves for initial crack lengths

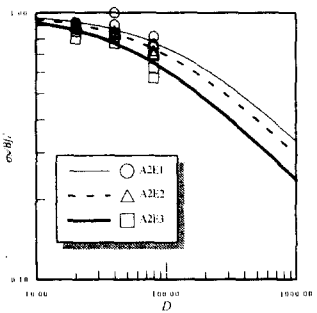


Fig. 5 Comparison of three size effect curves for A2 series

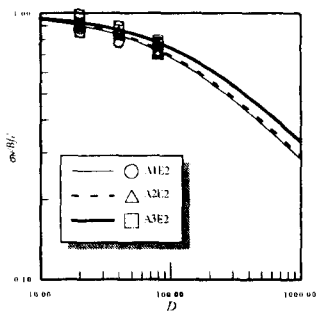


Fig. 6 Comparison of three size effect curves for E2 series

Table 3 Regression results for A2 series

Specimen no.	B	D <sub>0</sub>
A2E1	0.784	122.1
A2E2	0.871	94.2
A2E3	0.952	58.8

Table 4 Regression results for E2 series

Specimen no.	B	D <sub>0</sub>
A1E2	0.894	88.2
A2E2	0.871	94.2
A3E2	0.858	123.5

완전한 파괴진행 영역을 확보하지 못한 상태에서 파괴에 이르게 되면 크기효과는 감소하게 된다. 보통 압축강도를 실험할 때 쓰이는 표준형 압축공시체에서 크기효과가 발견되지 못하는 원인은 공시체가 작아서 완전한 파괴진행영역을 확보하지 못한 채 파괴에 이르기 때문이다.

그러므로 보다 정확한 실험이 이루어지기 위해서는 시험체의 크기를 조정하거나 파괴진행 영역이 충분히 확보될 수 있는 시험체를 제안하여 실험을 해야될 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 축방향 균열진전으로 발생하는 콘크리트의 압축파괴에 관한 크기효과를 구명하기 위한 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 지금까지의 콘크리트 압축파괴에 관한 크기효과 연구들은 대부분 원주 공시체에 의한 것이었지만, 보다 체계적인 연구를 위하여 Double Cantilever Beam 시험체를 이용한 실험을 제시하였다.
- (2) 본 실험을 통해 콘크리트의 축압축파괴에서도 크기효과가 나타난다는 사실이 확인되었다. 콘크리트의 축압축파괴도 결국은 횡방향 인장변형에 의해 발생하므로 편심거리와 초기균열 길이를 변화시키면서 실험한 결과에서도 크기효과를 발견할 수 있었다.
- (3) 편심거리를 변화시킨 경우, 균열선단에 미치는 압축과 인장의 영향에 따라 크기효과가 변화함을 알 수 있었다. 초기균열면에 인접한 위치에 하중을 가하면 압축의 영향이 커지면서 크기효과는 작아지고, 초기균열면에서 멀리 떨어진 위치에 하중을 가할수록 크기효과가 커짐을 알 수 있었다.
- (4) 초기균열 길이에 따른 크기효과 실험에서는 파괴진행 영역이 충분히 확보되지 않아서 만족할 만한 결과를 얻지 못하였다. 이 경우 크기효과가 감소한다는 사실이 널리 알려져 있다. 따라서 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 적절한 시험체 크기의 선정이 선행되어야 한다.

#### 참 고 문 헌

1. Bazant, Z. P., "Size Effect in Blunt Fracture : Concrete, Rock, Metal", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 110, No. 4, 1984, pp. 518-535.1.
2. Gonnerman, H. F., "Effect of Size and Shape of test Specimen on Compressive Strength of Concrete", *Proceedings, ASTM*, Vol. 25, 1925, pp. 237-250.
3. Ruetters, A., "Mass Concrete as Affected by Size and Aggregate and Related Factors", *Journal of ACI Proceedings*, 1933, pp. 27-34.
4. 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.
5. 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.
6. Cotterell, B. (1972). "Brittle fracture in compression", *International Journal of Fracture Mechanics*, 8(2), 195-208.
7. Nemat-Nasser, S., and Obata, M. (1988). "A microcrack model of dilatancy in brittle material", *Journal of Applied Mechanics, ASME*, 55, 24-35.
8. 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