

---

# 노치가 있는 콘크리트 실험체의 축압축 강도에 대한 크기효과

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



이성태\*

Yi, Seong-Tae



김봉준\*\*

Kim, Bong-Jun



김진근\*\*\*

Kim, Jin-Keun

---

### ABSTRACT

The size effect on axial compressive strength in notched concrete 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 specimens under compression were discussed.

In this study, experiments of axial compressive failure, which is one of the two failure modes, was carried out by using cylindrical specimens. Adequate notch length was taken from the experimental result of strength variation based on the notch length. And, by taking various sizes of specimens the size effect on axial compressive strength of concrete was investigated. Also, model equations were suggested by modified size effect law (MSEL).

The test results show that size effect appears conspicuously for all series of specimens. Additionally, the effect of initial notch length on axial compressive strength was also apparent.

Keywords : size effect, axial compressive strength, notch length, specimen size, cylindrical specimen

\* 정회원, 한국전력기술(주) 책임기술원

\*\* 정회원, 대본엔지니어링 구조부 사원

\*\*\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

· 본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2001년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

콘크리트는 타설 단계에서부터 내부에 많은 공극과 미세한 균열을 가지고 있으며, 콘크리트의 인장 또는 압축파괴는 콘크리트 내에 존재하는 공극과 균열에 의해 발생함으로 콘크리트의 재료적 특성을 구명하려는 연구에 파괴역학을 적용하는 것은 필수적이라 할 수 있다. 파괴역학을 적용하여 콘크리트의 성질과 거동을 예측하는 연구는 다양하게 이루어졌으며, 가장 대표적인 것이 크기효과이다.<sup>(1)</sup> 크기효과는 콘크리트의 강도가 구조체의 크기에 따라 변화한다는 것인데, 이는 콘크리트 재료가 비균질하고 취성이기 때문에 나타나는 재료적 특성이다.

지금까지 콘크리트의 파괴역학과 크기효과에 대한 연구는 인장파괴를 중심으로 이루어졌고, 이미 상당한 수준에 이르러 있다. 그에 비해 콘크리트의 압축파괴의 크기효과에 대한 연구는 현재까지도 상당히 부족한 수준이다. 콘크리트는 주로 압축력을 견디기 위한 재료이므로 압축파괴에 대한 연구가 충분히 이루어져야 하며 이러한 이유 때문에 최근에는 콘크리트의 압축파괴에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다.

한편, 압축력이 콘크리트에 작용하면 콘크리트 내부에 균열이 발생하고 이러한 균열이 진전하면서 주균열을 형성하여 압축파괴에 도달하는데 이때의 파괴양상은 구조물의 형태, 크기, 에너지 이완 특성, 그리고 기하학적 영향 등을 고려하여 두 가지 형태로 나누어 생각해 볼 수 있다. 즉, 콘크리트의 파괴양상은 미세균열이 진전하다가 한 개의 축방향 주균열로 발달하여 파괴에 이르는 경우와 경사진 방향으로 미세균열이 발달하다가 전단의 형태로 파괴에 이르는 경우의 두 가지 형태로 나타난다.

콘크리트의 압축강도는 크게 축압축강도와 휨 압축강도로 구분되는데, 최근까지도 연구의 대부분은 원주공시체<sup>(2-7)</sup>를 중심으로 한 축압축강도에 대해서 이루어졌다. 그 후 휨압축강도의 크기효과에 대한 연구가 김진근 등<sup>(8-10)</sup>에 의해 수행되었는데 참고문헌 8에는 휨부재의 크기에 따른 휨압축강도의 변화를 연구한 후 이를 적절히 예측할 수 있는 모델식이 제시되어 있다. 그러나 이는 부

재의 길이( $c$ )에 대한 깊이( $h$ )의 비( $c/h$ )가 2.0인 경우에 한해 제한적으로 적용 가능하다. 참고문헌 9와 10에서는 각각 부재의 깊이는 일정하게 하고 길이를 변화시킨 경우와 부재의 길이는 일정하게 하고 깊이를 변화시킨 경우에 대하여 휨압축강도를 예측할 수 있는 모델식을 실험을 통하여 구하였으며, 최종적으로 크기효과, 길이효과 및 깊이효과를 동시에 잘 예측할 수 있는 보다 일반적인 모델식을 제시하였다.

이 연구에서는 크기효과를 이용하여 콘크리트의 압축파괴에 관한 특성을 구명하려 했으며 두 가지의 대표적인 압축파괴 양상 중 축압축만을 그 연구대상으로 하였다. 따라서 콘크리트의 축압축거동을 구명할 수 있는 보다 체계적인 연구방법을 정립하기 위하여 본 연구에서는 노치가 있는 원주공시체를 사용한 실험방법을 이용하였다.

## 2. 콘크리트의 압축파괴거동

Bazant의 크기효과법칙(Size effect law, SEL)<sup>(1)</sup>이 발표된 이후, 김진근 등<sup>(11,12)</sup>은 부재의 크기와 무관한 항인  $\sigma_o (= af_{cu})$ 를 고려함으로써 초기 균열이 없는 경우 혹은 비유사 균열을 가진 콘크리트 부재의 극한강도를 예측할 수 있는 아래의 식(1)과 같은 수정된 크기효과법칙(Modified size effect law, MSEL)을 제안하였다.

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

여기서  $f_{cu}$ ,  $d$ 와  $d_a$ 는 각각 원주공시체( $\phi$  15×30 cm)에 대한 압축강도, 특성길이와 굵은 골재의 최대치수를 나타내며  $B$ ,  $\lambda_o$ ,  $a$ 는 실험 상수를 나타낸다. 이에 대한 응용으로서 축압축력을 받는 원주공시체<sup>(6,7)</sup> 및 휨압축력을 받는 C형 실험체<sup>(8-10)</sup>에 대한 연구결과가 이미 발표된 바 있다.

크기효과가 나타나게 하는 요인은 다양하지만, 유한한 연성과 무수히 많은 미세균열이 그 대표

적 원인이라 할 수 있다. 외부에서 하중이 가해질 때 미세균열선단에 발생하는 응력집중으로 인하여 실험체가 커질수록 강도가 작아진다. 콘크리트는 식별 가능한 균열이 없더라도 하중이 작용하면 미세균열선단에 응력이 집중되고, 취성한 성질로 인해 균열이 진전되어 크기효과가 나타난다.

그러나 하중의 작용 형태에 따라 서로 다른 크기효과를 나타내는데, 이것은 미세균열영역의 크기에 기인한 것이다. 콘크리트의 파괴를 일으키는 주균열이 형성되기 전에 미세균열영역이 콘크리트 단면의 상당 부분을 차지한다면 크기효과는 감소하게 되고, 미세균열영역이 작으면 크기효과는 커지게 된다.

압축력에 의하여 발생하는 콘크리트 내 미세균열영역은 인장력을 받을 때보다 더 크기 때문에 크기효과는 감소하게 된다. 특히 축압축 실험체의 경우에는 횡압축 실험체에 비하여 균열의 분산이 더 많으므로 크기효과는 작게 일어나는 반면 횡압축 실험체의 경우에는 상대적으로 균열이 더 집중되므로 크기효과는 크게 일어난다. 이는 축압축 실험체와 횡압축 실험체의 변형을 구배(strain gradient)가 각각 사각형과 삼각형으로 서로 다르기 때문이다.

일반적으로 콘크리트의 압축파괴는 다음과 같은 균열의 몇가지 진전 형태에 의해 일어난다고 알려져 있다. 첫번째로는 콘크리트 내에 존재하는 공극을 들 수 있다. 콘크리트는 타설시부터 그 내부에는 이미 많은 공극을 포함하고 있다. 이러한 공극이 존재하는 콘크리트가 압축력을 받으면 Fig. 1(a)와

같이 하중이 작용하는 방향으로 미세균열이 발생하게 된다. 두번째는 시멘트풀과 골재에 의해 균열이 발생하는 경우를 생각할 수 있다. 즉 콘크리트가 압축력을 받으면 골재로부터 일정거리 떨어진 시멘트풀에 짧은 인장균열이 발생한다(Fig. 1(b)). 이보다 균열이 발생하기 더 쉬운 경우는 Fig. 1(c)에 보인 것과 같이 골재가 균으로 작용하여 인장균열을 발생시키는 경우이다. 좌우의 골재가 인장을, 상하의 골재가 압축을 가하는 형태를 이루면서 균열이 발생하게 된다. 네번째 경우는 압축력을 받고 있는 콘크리트 내부에 경사진 균열이 존재하는 경우이다. 골재와 골재 사이에 존재할 수 있는 이러한 균열은 압축력이 작용하는 방향으로 휘면서 진전하게 된다(Fig. 1(d)).

따라서 미세균열이 형성되는 시기에는, 각 경우가 조합된 상태인 Fig. 1(e)와 같이 균열들이 콘크리트 내부에 고르게 분포하다가 외력의 증가에 의한 균열의 진전으로 이들이 서로 합쳐지면서 주균열을 형성하여 압축파괴에 이른다.

실제 구조물이 어떤 형태로 파괴되는 지는 구조물의 형태(세장비와 경계조건 등), 크기, 에너지이완 특성 및 이차적인 기하학적 영향(내부 좌굴) 등에 따라 결정되며 이 미세균열 영역의 띠가 생성 및 발달되어 가는 과정은 아래와 같이 크게 두 가지로 나누어 설명할 수 있다.

- (1) 최종적으로 한 개의 축방향 쪼갠균열로 합체되는 축방향 미세균열의 띠가 축방향으로 발달하는 경우, 즉 모드 I이 주가 되는 경우(Fig. 2(a) 참조).

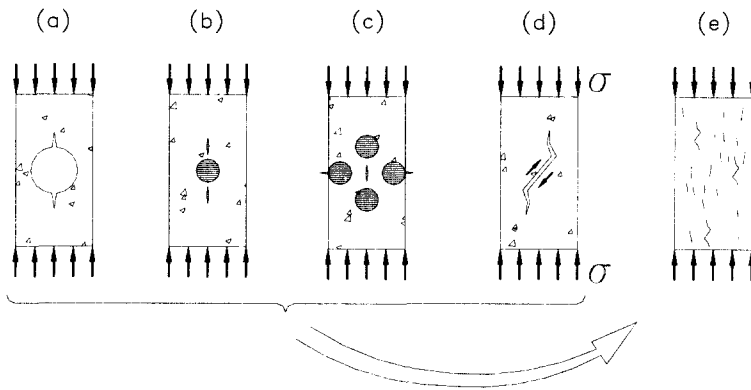


Fig. 1 Microscopic mechanisms of compression fracture<sup>(13)</sup>

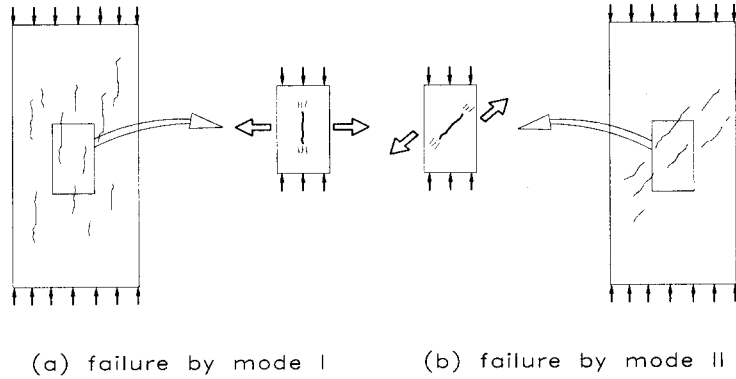


Fig. 2 Mode types of compression failure

(2) 경사진 파괴면을 따라 생성되는 경사 미세균열의 때가 사방향으로 발달하는 경우, 즉 전단파괴의 형태로 모드 II가 주가 되는 경우(Fig. 2(b) 참조). 이 경우는 공시체 내에 골재가 대칭으로 배치되지 않았거나 하중이 실험체의 중심축에 정확하게 가해지지 않을 때 가능하다.

축압축력을 받는 실험체에 대하여 실험을 수행해 보면 거의가 모드 I에 따라 파괴되므로 본 연구에서는 모드 I에 대하여 그 특성을 살펴보았다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험개요

콘크리트 부재가 압축력을 받으면 미세한 축방향 균열이 발생하고<sup>(14,15)</sup>, 어느 시점부터는 이 균열이 합쳐지면서 한 개 또는 몇 개의 주균열이 형성된다. 본 실험에서는 이러한 축방향 균열에 의한 압축파괴를 검토하기 위해 Fig. 3과 같은 실험체를 사용하여 압축파괴의 크기효과를 살펴 보았다. 사용된 실험체는 노치가 있는 원주공시체로 통상은 균열면에 수직한 방향으로 하중을 가하지만 본 연구에서는 균열면과 평행한 방향으로 하중을 가하였다.

#### 3.2 배합설계

고강도 콘크리트는 저강도 콘크리트에 비해 더욱 취성적인 거동을 하며 크기효과가 크게 나타나고, 파괴진행영역의 크기는 작게 나타난다. 파괴진행영역의 크기가 작아지면 실험체의 크기를 작게 할 수 있는 이점이 있으므로 본 실험에서는 강도수준 500 kgf/cm<sup>2</sup>의 고강도 콘크리트가 되도록 배합설계를 하였으며, 실험체의 제작에 사용된 콘크리트 배합은 Table 1에 주어져 있다.

Table 1 Mix proportions of concrete

w/c (%)	s/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				S.P.* (%)
		W	C	S	G	
35	40	175	500	671	1027	2

\* 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 연직으로 치기를 하였으며 작업성을 향상시키고 다짐을 원활히 하기 위하여 고성능 감수제와 진동기를 사용하였다.

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 콘크리트 치기를 하였다. 모든 공시체는 치기를 한 후 24시간이 경과하여 탈형했으며, 실험 수행시까지 양생포로 덮어 습윤양생을 실시하였다.

### 3.3 실험체의 제작, 크기 및 형상

Fig. 3에는 본 실험에서 사용한 실험체의 크기와 형상 및 노치의 위치가 나타나 있다.

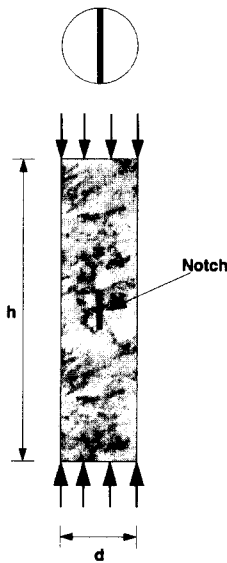


Fig. 3 Size and shape of specimens

이번 연구에서는 노치의 길이에 따른 강도변화와 부재의 크기에 따른 크기효과에 대한 실험을 수행하였다. 강도변화에 대해서는  $\phi 10 \times 75$  cm 원주공시체에서 최대 골재크기의 0.5, 1, 2, 3, 4, 5배 길이의 노치를 갖는 실험체를 사용했으며, 크기효과 실험을 하기 위해서는 강도변화에 대한 실험결과로부터 적절한 노치길이를 선택했는데 실험체의 크기와 노치의 길이는 Table 2에 나타나 있다. 크기효과에서는 기하학적으로 유사하며 크기가 다른 실험체를 세 가지 이상 실험해야 하므로 실험체의 크기를 1 : 2 : 4로 변화시켰다. Table 2의 실험체 번호에서 S, M, 및 L

은 실험체의 크기를 나타내고, N0, N6, N12, N24, 및 N48은 노치의 길이에 따른 각 실험체의 일련번호를 나타낸다. 실험체의 크기가 가장 작은 경우(S)에는 실험결과의 흠여짐이 다른 크기의 실험체보다 클것으로 예상되어 4~5개의 실험체를 선택하였다.

Table 2 Dimension of specimens

Specimen no.	Specimen size, $d \times h$ (cm)	Initial crack length (cm)	Number of specimens
S-N0	5×37.5	0	4
S-N6		6	5
S-N12		12	5
M-N0	10×75	0	3
M-N12		12	3
M-N24		24	3
L-N0	20×150	0	2
L-N12		12	3
L-N24		24	3
L-N48		48	3

### 3.4 실험절차

실험에 사용된 기기는 250 tonf 용량의 만능재료시험기(UTM)이며, 변위제어법으로 실험을 수행하였다. 모든 실험체가 10분 내에 파괴에 도달하도록 제어속도를 변화시켰으며, 실험을 통해 각 실험체에 가해지는 최대 하중을 구하였다.

본 실험체에 대한 실험을 실시하기 전에  $\phi 10 \times 20$  cm 원주공시체에 대한 실험이 실시되었는데, KS F 2405에 의해서는 압축강도( $f_{cu}$ ) 실험을, 그리고 KS F 2423에 의해서는 쪼갬인장강도( $f_{sp}$ ) 실험을 실시하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 실험결과

실험체의 극한강도와 원주공시체의 압축강도는 동일 재령에서 측정되었으며 노치의 길이에 따른 강도변화와 부재의 크기에 따른 크기효과에 대한 실험결과는 각각 Table 3과 4에 나타나 있다. Table 3과 4에 주어진 값 중에서 최대 하중의

단위는 ton이며 공칭강도, 콘크리트의 압축강도, 그리고 조깅인장강도는 시리즈 당 3개의  $\phi 10 \times 20$  cm 원주공시체에서 얻은 값을 평균한 결과이고 그 단위는 kgf/cm<sup>2</sup>이다.

#### 4.2 노치의 길이에 따른 강도 변화

본 실험에서는 최대 골재크기의 0.5, 1, 2, 3, 4, 5배의 길이를 가지는 노치에 대하여 실험을 실시하였다. Table 3에는 각 노치길이에 대한 실험체의 공칭강도와 콘크리트의 압축강도에 대한 실험결과가 나타나 있다.

Table 3 Experimental results for notch length

0.5 $d_a$	1.0 $d_a$	2.0 $d_a$	3.0 $d_a$	4.0 $d_a$	5.0 $d_a$	$f_{cu}$
594 591	581 605	599 573	594	527	605	610
547	561	565	571 592	553	508 553	606

Fig. 4는 노치의 길이에 따른 강도의 변화를 나타내고 있는데 이 그림으로부터 노치의 길이가 최대 골재크기의 4배 이상이 되면 콘크리트의 강도는 노치가 존재하지 않는 경우보다 현저하게 감소한다는 사실을 알 수 있다. 콘크리트는 무수히 많은 초기의 미세균열이 외부 하중에 의한 응력집중에 의하여 진전하고, 이러한 균열이 서로 합쳐져서 주균열을 형성한 후에 가장 취약한 주균열에 의해서 구조물이 전체적으로 파괴된다.

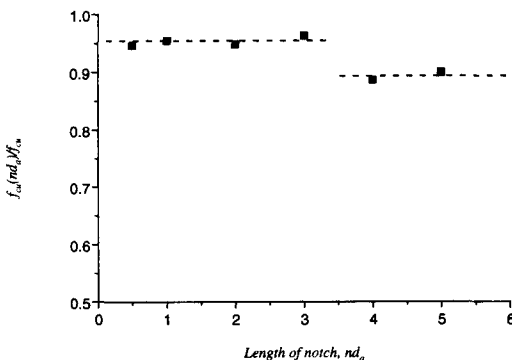
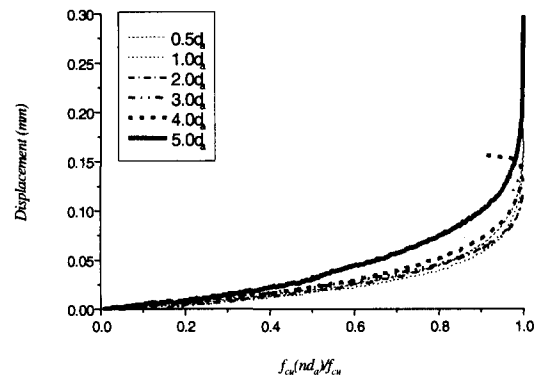


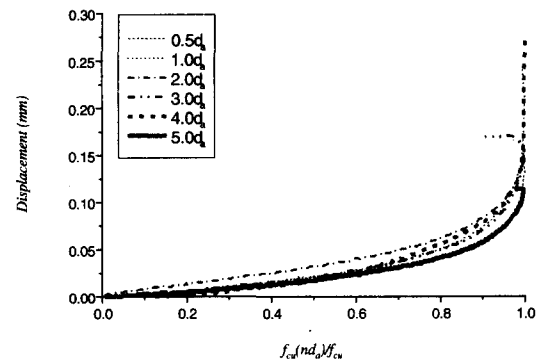
Fig. 4 Relationship between  $f_{cu}(nd_a)/f_{cu}$  and notch length

따라서 Fig. 4에 나타난 바와 같이 노치의 길이가 최대 골재크기의 4배보다 큰 경우에는 콘크리트 내부에 충분한 주균열이 형성되어 있기 때문에 하중을 받으면 바로 균열선단에서의 균열이 안정적으로 진전하여 파괴가 일어난다는 사실을 알 수 있다. 그러나 노치의 길이가 최대 골재크기의 4배보다 작은 경우에는 충분한 균열의 성장에 추가적인 하중이 더 필요하고, 그 이후에 균열의 진전에 의해서 파괴가 일어나게 된다.

Fig. 5에는 노치의 중심부분에서의 횡방향 변위를 LVDT로 측정하여 나타내었다. Fig. 5(a)에는 노치의 방향과 수직한 방향의 변위를 나타내었고, Fig. 5(b)에는 노치의 방향과 평행한 방향의 변위를 나타내었다.



(a) Normal direction against notch length



(b) Parallel direction against notch length

Fig. 5 Lateral displacement length

이는 모드 I에 의한 파괴를 모형화할 수 있는 노치의 길이를 결정하기 위해서 수행되었다. 노치가 최대 골재크기의 5배 길이를 가지는 경우, 노치에 수직방향의 변위가 길이방향 변위보다 더 많이 일어나며 모드 I에 의한 파괴를 유도할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 4.3장의 크기효과 실험에서는  $\phi 10 \times 75$  cm의 실험체에 대하여 노치의 길이를 최대 골재크기의 9.2와 18.5 배 (즉 12와 24 cm)가 되도록 하였다.

### 4.3 부재의 크기에 따른 크기효과

Table 4에는 앞 장에서 결정된 노치길이를 갖는 부재의 크기에 따른 최대 하중 ( $P_u$ )이 나타나 있다. 또한 초기 균열이 없는 경우와 있는 경우의 크기효과를 비교하기 위하여 노치가 없는 실험체에 대한 실험도 수행되었으며 이에 대한 실험결과도 나타나 있다. Table 5는 크기효과의 존재 여부를 확인하기 위해 수정된 크기효과법칙과 실험을 통해 얻은 최대응력값에 대한 회귀분석을 수행하여 얻은 결과이다. 각 경우에 대한 회귀분석한 결과값들을 이용하여 크기효과 곡선을 그리면 Fig. 6과 같고, 이들을 비교하기 위하여 Fig. 7에 모든 곡선을 같이 나타내었는데 원은 각 경

Table 5 Results obtained from MSEL and regression analysis

Specimen series	$B$	$\lambda_o d_a$	$\alpha$
N6:N12:N24	0.92	2.6	0.48
N12:N24:N48	0.90	2.6	0.44
N0:N0:N0	0.52	2.6	0.80
N12:N12:N12	0.72	2.6	0.63

우에 대한 실험결과의 평균값을 나타낸다.

Fig. 6으로부터 모든 실험체의 크기가 커질수록 강도가 감소하는 크기효과가 뚜렷이 나타남을 확인하였다. Fig. 7에 따르면 초기균열이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우(N0:N0:N0)에는 크기효과에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 실험체의 크기에 관계없이 노치길이가 일정한 N12:N12:N12의 경우, 실험체의 직경이 작을수록 같은 크기의 타 실험체보다 노치길이/실험체의 길이 값이 크며 직경이 클수록 작다. 따라서 실험체의 직경이 작을수록 더 작은 강도를 보이고 이 직경이 클수록 강도의 저하정도가 감소함을 알 수 있다. 노치의 길이가 최대 골재크기의 4배 이상인 경우에는 주균열이 충분히 형성되어 있기 때문에 하중의 증가와 더불어 주균열의 안정적인 진전에 의해서 파괴가 일어난다.

Table 4 Maximum loads obtained from this experiments

$P_u$ , tonf										$f_{cu}$	$f_{sp}$
S (d=5 cm)			M (d=10 cm)			L (d=20 cm)					
N0	N6	N12	N0	N12	N24	N0	N12	N24	N48	kgf/cm <sup>2</sup>	
11.3			39			152				500	52
9.8			36			146				485	49
10.5			36							485	53
9.6		9.8		38			148			529	56
	10.1	10.1		38			139	124		512	49
	9.6			38				129		507	49
	9.9							130			
	11.2				38				114	487	51
		9.8			35				143		
		9.4			36			100		539	49

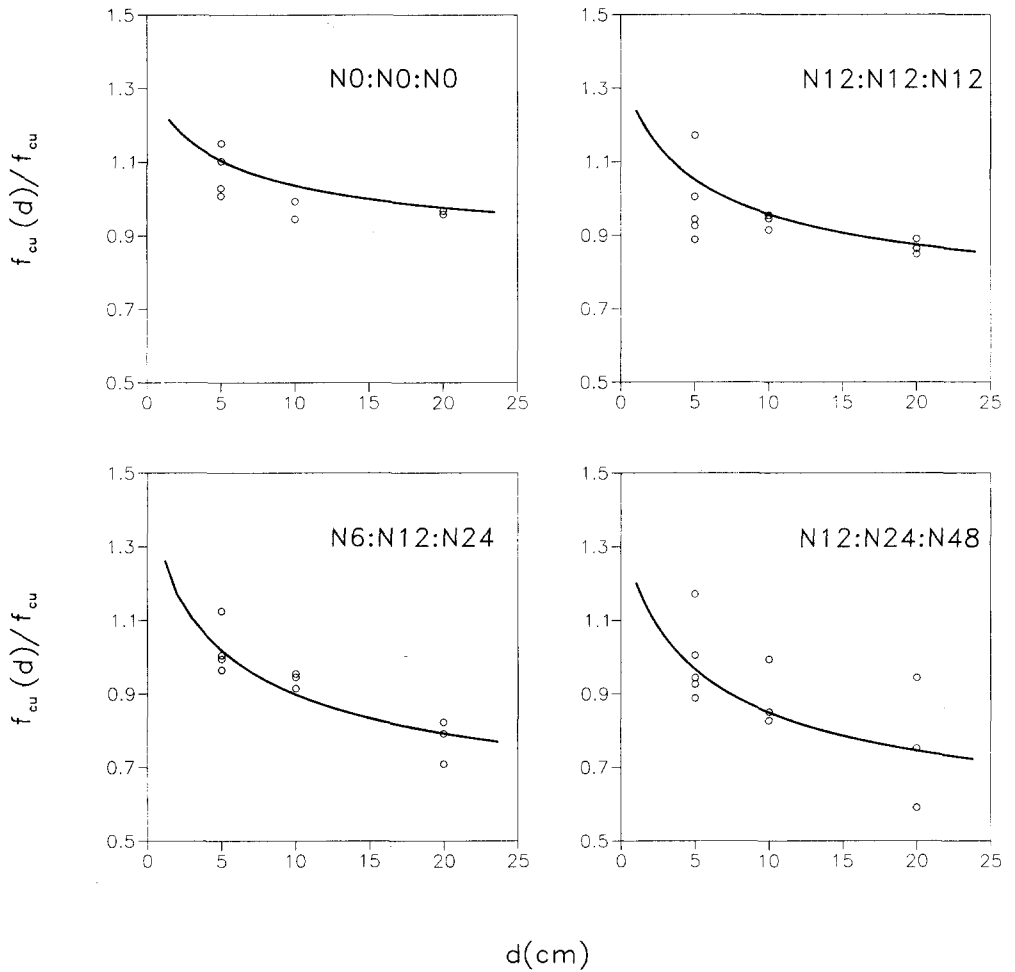


Fig. 6 Relationship between  $f_{cu}(d)/f_{cu}$  and specimen diameter  $d$

반면, 노치의 길이가 이보다 작은 경우에는 충분한 주균열을 형성하기 위하여 추가적인 하중이 필요하므로 크기효과는 노치길이가 보다 큰 경우와 다르게 나타난다. 따라서 노치길이가 가장 긴 경우(N12:N24:N48)에는 이 보다 작은 노치길이를 갖는 실험체에 비해서 부재의 크기증가에 따른 강도의 감소가 더 뚜렷해야 한다. 그러나 Markeset 등<sup>(16)</sup>, Jansen과 Shah<sup>(17)</sup>, 및 김진근 등<sup>(9)</sup>에 의해서 부재의 길이/직경 혹은 길이/깊이가 일정한도를 넘어서면 더 이상의 강도 저하가 없음이 보고되고 있으며 본 연구에서도 노

치의 길이 증가에 따라 어느 정도의 강도저하, 즉 N6:N12:N24와 비교할 때 Fig. 7의  $f_{cu}(d)/f_{cu}$ 의 값 차이(거의 유사함)는 있으나 대체로 문헌에서와 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

노치가 없는 실험체에 대한 실험결과(NO:N0:N0)를 아래의 모델식 (2)<sup>(6,7)</sup>와 비교하였다. 실험체의 직경이 약 10 cm를 넘어서면 거의 유사한 값을 보여 준다. 그러나 이 직경의 범위가 5 cm 전후일 경우에는 결과에 차이가 있는데 이는 사용된 굵은골재 최대치수의 차이에 기인하는 것으로 생각된다. 즉 식(2)는 주로 25 mm의 골재



에 대해서 얻어진 결과이지만 본 논문에서는 13 mm의 골재를 사용했기 때문이다.

$$f_{cu}(h, d_c) = \frac{0.4f_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{(h-d_c)}{5}}} + 0.8f_{cu} \quad (2)$$

여기서,  $f_{cu}(h, d_c)$ 와  $f_{cu}$ 는 임의의 공시체와 표준실린더 공시체 ( $\phi 15 \times 30$  cm)에 대한 압축강도를 각각 나타내는데 단위는  $\text{kgf/cm}^2$ 이고  $h$ 와  $d_c$ 는 각각 원주공시체의 길이와 직경으로서 단위는 cm이다.

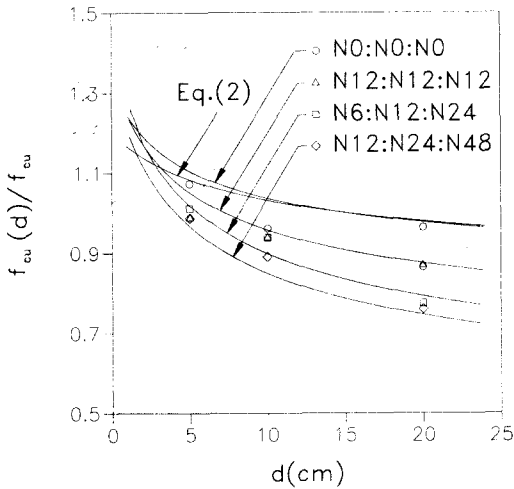


Fig. 7 Comparison of model equations obtained from MSEL and experimental results

## 5. 결론

지금까지 수행된 콘크리트의 축압축강도의 크기효과에 관한 연구들은 대부분 노치가 없는 원주공시체에 의한 것이었지만, 본 연구에서는 보다 체계적인 연구를 위하여 노치가 있는 원주공시체를 이용하여 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실험을 통해 콘크리트의 축압축파괴에서도 크기효과가 나타난다는 사실을 확인하였다. 즉, 콘크리트의 압축파괴도 결국은 횡방향 인장변형에 의해 발생하므로 부재의 크기와 노치의

길이를 변화시키면서 실험한 결과에서도 크기효과를 발견할 수 있었다.

- 2) 원주공시체에서 노치길이가 최대 굵은골재의 4배 이상이 되면 안정적인 파괴가 일어나며 모드 I에 의한 파괴를 유도할 수 있음을 알 수 있었다.
- 3) 본 논문의 결과로부터 현재 실제 설계에 사용되고 있는 강도기준이 개선되어야 함을 알 수 있었다. 이는 구조물의 설계시에  $\phi 15 \times 30$  cm, 혹은  $\phi 10 \times 20$  cm와 같이 획일화된 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, V.110, No.4, Apr. 1984, pp. 518-535.
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. Ruettggers, 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. 김진근, 어석홍, 이성태, "비표준형 실린더 공시체에 대한 압축강도의 크기효과," 콘크리트학회논문집, 제 9권 1호, 1997, pp. 105-113.

7. 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.
8. Kim, J.K., Yi, S.T. and Yang, E.I., "Size Effect on Flexural Compressive Strength of Concrete Specimens," *ACI Structural Journal*, V.97, No.2, Mar.-Apr. 2000, pp. 291-296.
9. 김진근, 이성태, 이태규, "부재의 길이가 콘크리트의 휨압축강도에 미치는 영향," *콘크리트학회논문집*, 제 11권 4호, 1999, pp. 63-71.
10. 이성태, 김진근, 김장호, "부재의 길이가 콘크리트의 휨압축강도에 미치는 영향," *콘크리트학회논문집*, 제12권 5호, 2000, pp. 121-130.
11. 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.
12. 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. 179-196.2.
13. Bazant, Z.P. and Xiang, Y., "Size Effect in Compression Fracture : Splitting Crack Band Propagation," *J. of Engineering Mechanics*, ASCE, V.123, No.2, Feb. 1997, pp. 162-172.
14. Cotterell, B., "Brittle Fracture in Compression," *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol.8, No. 2, 1972, pp. 195-208.
15. 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.
16. 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.
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. IMSL, Library, Edition 8, IMSL, Inc., Sixth Floor, NBC Building, 7500 Bellaire Blvd., Houston, Texas 77036.
19. Benjamin, J.R. and Cornell, C.A., "Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers," McGraw-Hill, New York, 1970, Section 4.3.

## 요 약

콘크리트의 축압축강도에 크기효과가 미치는 영향에 대한 연구는 주로 노치가 없는 원주공시체에 대해서 수행되어 왔으나 실제로 콘크리트 내에는 상당히 큰 크기의 균열이나 재료적 결함, 혹은 흠 등을 내재할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 경우의 콘크리트의 특성을 파악하기 위하여 노치가 있는 콘크리트 부재의 축압축강도에 대한 크기효과를 실험적으로 살펴보았다.

파괴역학과 크기효과법칙에 근거하여 콘크리트의 축압축파괴에 대한 이론적 연구를 수행하였으며 압축력을 받는 콘크리트 부재에서의 두 가지 파괴모드에 대해서도 살펴보았다. 두 가지 파괴모드 중의 하나인 모드 I에 대하여 축압축 파괴에 대한 실험적 연구를 노치가 있는 원주공시체를 이용하여 수행하였다. 노치길이에 따른 강도변화의 실험결과로부터 적절한 노치길이가 결정되었으며, 부재의 크기를 변화시킴에 의해서 콘크리트의 축압축강도에도 크기효과가 존재하는지의 여부를 확인하였고, 수정된 크기효과의 법칙을 이용하여 예측모델식을 제시하였다.

실험결과로부터 모든 실험체에 대하여 크기효과가 뚜렷이 나타남을 확인하였다. 또한 축압축강도에 초기 노치의 길이가 미치는 영향도 뚜렷하였다.

(접수일자 : 2000. 9. 15.)