

# 초기균열이 없는 콘크리트 구조물의 크기에 따른 응력감소효과에 관한 연구

Size Effect of Concrete Structures without Initial Cracks

김	진	근*
Kim,	Jin	Keun
박	홍	기**
Park,	Hong	Kyee

## Abstract

In most of the structural members with initial cracks, the strength tends to decrease as the member size increases. This phenomenon is known as size effect. Among the structural materials of glass, metal or concrete, etc., concrete represents the size effect even without initial crack.

According to the previous size effect law, the concrete member of very large size can resist little stress. Actually, however, even the large size member can resist some stress if there is no initial notch. This means that the fracture mechanism of very small or very large size member follows strength criterion, but the medium size member follows non-linear fracture mechanics (NLFM).

In this study, the empirical models which are derived based on nonlinear fracture mechanics are proposed according to the regression analysis with the existing test data of large size specimens for uni-axial compression test, splitting tensile test and shear test of reinforced concrete beams.

## 요 지

초기균열을 갖는 대부분의 구조체는 부재크기가 증가함에 따라 강도가 저하한다. 이러한 현상을 크기효과(size effect)라고 한다. 유리, 금속, 콘크리트 등, 구조재료중에서 콘크리트는 비록 초기균열이 없더라도 이 size effect 현상을 보인다.

현존의 크기효과 법칙에 따르면 매우 큰 콘크리트 구조체는 거의 하중을 저항할 수 없다. 그러나 실제로는 초기 균열이 없는 경우 상당한 크기의 응력을 저항할 수 있다. 이러한 현상은 매우 큰 구조체와 작은 구조체는 강도기준의 적용이 합당하고, 그 중간 크기의 구조체는 비선형 파괴역학의 적용이 합당함을 말한다.

이 논문에서는 비선형파괴역학에 근거하여 유도된 실험식에, 기존의 실험치를 이용하여 비선

\* 정회원 · 한국과학기술원

\*\* 정회원 · 한국과학기술원

형회귀분석을 행하여 실험상수를 정함으로써 일축압축, 할열(splitting)인장 및 전단강도에 대한 실험식을 제시한다.

## 1. 서 론

금세기에 들어와 실제 구조물에 파괴역학의 적용이 시작된 이래 취성 및 연성재료의 파괴거동에 관한 이론적 연구에 많은 진전이 있어 왔다. 콘크리트의 경우는 1961년 Kaplan<sup>(1)</sup>에 의해서 Griffith의 파괴에너지 이론<sup>(2)</sup>이 도입된 이래 콘크리트 구조물예의 파괴역학의 적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 이유는 콘크리트가 파괴에 이를 때는 균열에 의해 파괴가 발생하기 때문에 파괴역학에 의해 그 파괴거동을 해석하여야 함이 합리적일 것으로 판단되기 때문이다<sup>(3,4,6)</sup>. 이러한 연구결과 콘크리트 구조물이 크기가 커짐에 따라 저항용력이 감소한다(size effect)는 것을 이론적으로 보여주었으며<sup>(6)</sup>, 콘크리트의 파괴거동이 비선형 파괴역학에 의해 적절히 설명될 수 있다는 것을 보여주고 있다<sup>(7)</sup>.

콘크리트는 파괴에 이르기 전에 균열이 발생하며 이는 역학적으로 중요한 의미를 갖는다. 즉 콘크리트는 초기균열이 없더라도 파괴 전에 균열이 자연적으로 발생되어 균열단(crack tip)에서 응력집중현상이 일어나 파괴에 이르게 되는데, 이는 콘크리트의 중요한 특성이다. 콘크리트 외의 일반재료(유리, 금속 등)에 있어서는 초기균열이 있는 경우에는 파괴역학이 적용될 수 있으나, 균열이 없는 경우에는 강도기준(strength criterion)에 근거한 탄성 혹은 소성해석에 의해 구조물의 파괴거동을 설명할 수 있다. 그러나 콘크리트는 초기균열이 없는 경우 어느 한 중 한계내에서는 강도기준에 따라 거동하게 되어 탄·소성해석이 가능하나, 그 한계를 벗어나면 균열이 발생하게 되므로 파괴역학을 적용하여 그 거동을 설명하는 것이 합리적이다.

본 논문의 목적은 초기균열이 없는 크리콘트 부재가 파괴에 이를 때까지의 파괴거동에 근거하여 부재의 크기에 따른 저항용력감소효과를 설명하는데 있다. 이를 위해 본 논문에서는 콘크리트 재료의 파괴특성에 관하여 언급한 후, 파괴거동에 따른 이론식을 유도하여 유도된 이론식의 실험상수를 기존의 실험치에 의해 결정하여 새로운 실험식을 제시하고자 한다.

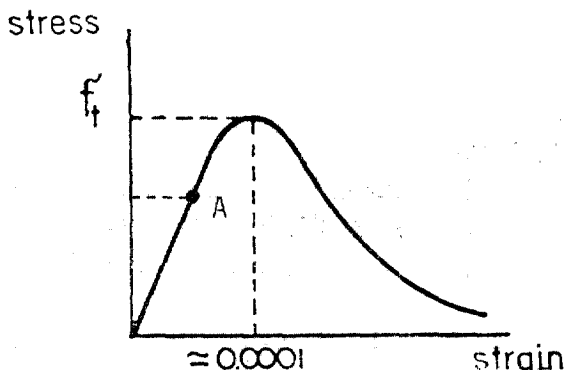
## 2. 초기균열이 없는 콘크리트의 파괴거동

금속과 같이 상당한 소성변형을 일으키는 재료는 초기균열이 없는 경우 size effect가 생기지 않는다. 이는 금속이 파괴에 이를 때 균열에 의한 파괴가 아니라 탄·소성 변형에 의한 파괴가 일어나기 때문이다. 그러나 콘크리트는 그 파괴거동의 특성으로 인해 초기균열이 없는 경우에도 size effect가 일어난다.

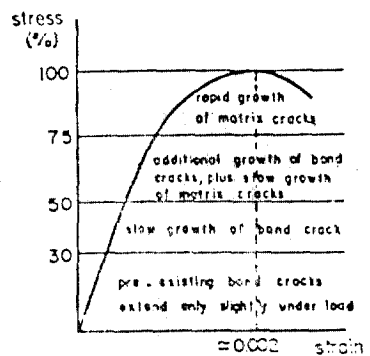
## 2. 초기균열이 없는 콘크리트의 파괴거동

그림 1의(a)에서 보는 바와 같이 1축인장의 경우 최대응력  $f_t$ 에 도달할 때까지 응력-변

형



(a) tension



(b) compression

그림 1. Uniaxial stress-strain curve for concrete.

형도 관계는 거의 직선을 유지한다. 정확히 말해서  $\alpha f'_c$  ( $\alpha < 1$ )까지는 선형을 유지하고 그 이후에 가서야 비로소 비선형성을 보이는 것이다. 참고문헌[8]에 의하면 이  $\alpha$  값은 대략 0.6 정도인 것으로 밝히고 있다. 그림 1의 (b)는 압축 응력의 크기에 따른 균열 발생 양상을 나타낸 것으로 일반적으로 4 단계로 구분된다<sup>(6)</sup>. 근본적으로 콘크리트에는 하중이 가해지기 이전에도 블리딩, 수화작용 등에 의해 체적변화, 그밖에 콘크리트의 일정하지 않은 건조수축 등의 이유로 시멘트-골재의 접합부에 미세한 균열이 존재한다. 그러나 작용하중이 최대압축강도  $f'_c$ 의 약 0.3배 즉  $0.3f'_c$ 에 이를 때까지는 기존의 미세균열의 확대는 거의 발생하지 않으며, 따라서 응력-변형도 곡선은 선형을 유지한다. 그러나 하중이  $0.3f'_c$ 을 초과하면 기존의 미세균열은 확대되기 시작하여 골재표면에 미세균열이 응력방향과 평행하게 나타나기 시작하고 응력-변형도 관계는 미세한 비선형성을 보이기 시작한다. 즉 압축응력이 대략  $0.3f'_c \sim 0.5f'_c$ 에 이를 때 압축변형도는 0.0004 정도이고 이때 횡방향의 인장변형도는 0.00005~0.00008 정도가 되어 1축인장 때의  $f'_c$ 에 상응하는 인장변형도 0.0001보다 조금 적은 값이 되는 바, 이는 압축력을 받더라도 미세균열은 인장변형도가 어느 범위를 초과할 때 나타남을 보이며, 압축력에 의한 비선형성도 실제로는 인장변형도에 의한 미세균열 때문임을 알 수 있다. 그리고 응력이 더욱 증가하여  $0.75f'_c$ 에 가까이 도달하면 부착균열은 더욱 확대되어 모르타내에서도 균열이 발생되어 비선형성은 더욱 커지게 된다. 이 때부터 주균열이 발생하게 되며 결국은 파괴에 이르게 되는 것이다.

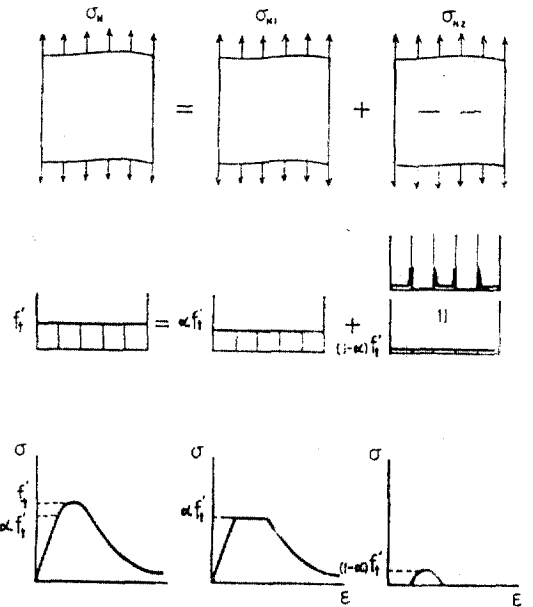
이상의 설명에 의하면 콘크리트는 비록 초기 균열이 없다하더라도 최대응력에 도달하기전에 미세균열이 발생하며, 이러한 미세균열이 모여 상당한 크기의 균열을 형성한 후에야 파괴에 이른다는 것이다. 이러한 사실은 콘크리트의 파괴 거동이 초기의 어느 한계까지는 강도기준을 따르나, 일단 균열이 발생하면 초기균열이 있는 부재에서와 마찬가지로 그 해석에 파괴역학의 도입이 타당함을 보인다. 다시 말하면 콘크리트

공시체 또는 구조물은 그 크기가 매우 크더라도 초기균열이 없으면 상당한 양의 작용하중을 저항할 수 있다는 것으로, 이는 매우 큰 구조물에서 작용하중에 거의 저항할 수 없다는 기존의 크기 효과 법칙(size effect law)과는 다름을 의미한다.

### 3. 초기균열이 없는 콘크리트 부재의 크기효과식의 유도

앞 장에서 언급된 바와 같이 초기균열이 없는 콘크리트 부재의 경우, 초기균열이 발생할 때까지는 강도 기준을 따르게 되며 이는 부재의 크기와는 무관하다. 그러나 일단 주균열이 발생한 이후에는 파괴역학에 근거한 크기효과 법칙을 따르게 되며 그 때의 식은 참고문헌[9]에 나타나 있다.

그림 2는 일축인장을 받는 초기균열이 없는 부재의 응력상태를 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 전체저항력은 부재크기에 무관한 응력, 즉 초기균열이 생성되기 이전까지의 응력과 부재크기에 관계되는 응력, 즉 균열 후 저항 응력의 합으로 이루어진다. 즉



(a) total stress  
 (b) size independent stress  
 (c) size dependent stress  
 그림 2. Nominal stress for concrete without initial crack.

$$\sigma_N = \sigma_{N1} + \sigma_{N2} \dots\dots\dots(1)$$

여기서

$\sigma_{N1} = \alpha f'_i$  / 부재크기에 무관한 응력

$\sigma_{N2} = B f'_i \sqrt{1 + \frac{d}{\lambda_0 d_a^m}}$  : 부재크기에 관계있  
는 응력

$d$  : 특성길이

$d_a$  : 최대골재크기

$\alpha, B, \lambda_0, m$  : 실험상수

따라서 초기균열이 없는 부재의 크기효과 식은 다음과 같다.

$$\sigma_N = \frac{B f'_i}{\sqrt{1 + \frac{d}{\lambda_0 d_a^m}}} + \alpha f'_i \dots\dots\dots(2)$$

여기서  $d \rightarrow \infty$  이면  $\sigma_{N2} \rightarrow 0$  즉  $\sigma_N = \alpha f'_i$

$d \rightarrow 0$  이면  $\sigma_{N2} \rightarrow B f'_i$  즉  $\sigma_N = B f'_i + \alpha f'_i$

즉  $d$  가 매우 큰 경우 구조체는 탄성거동을 하게되고,  $d$  가 매우 작은 경우 구조체는 비탄성 거동을 하게 되나, 두 경우 모두 강도기준을 따른다는 것이다.

식(2)를 더욱 일반화시키면

$$\sigma_N = \frac{B f'_i}{\sqrt{1 + \frac{d}{\lambda_0 d_a^m}}} + \sigma_0 \dots\dots\dots(3)$$

여기서  $\sigma_0$  : 부재의 크기에 무관한 초기균열을 발생시키기 위한 응력(= $\alpha f'_i$ )

식(2)를 그림으로 나타낸 것이 그림 3이다. 그림 3에서 보는 바와 같이 부재 크기가 매우 작은 경우는 전 부재 단면에 미세균열영역만이 형성되어 파괴가 일어나게 되며 소성에 의한 파괴와 유사하게 파괴가 일어나게 된다. 이때의 응력의 크기는 부재크기와 무관하고 따라서 강도기준을 따르게 된다(구간 A). 또한 부재크기가 매우 큰 경우에도 완전탄성거동으로 균열이

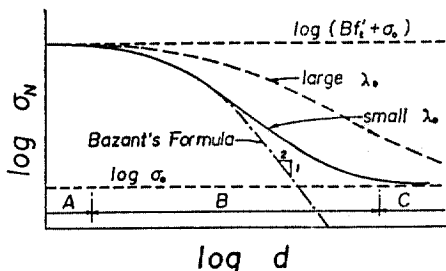


그림 3. Size effect for specimen without initial crack.

발생할 때까지는 응력의 크기가 부재의 크기와 무관하므로 역시 강도기준을 따르게 된다(구간 C). 그러나 중간크기의 부재에서는 비선형파괴 역학에 따른 거동을 하게 되며 실제 대부분의 구조물은 이 범주에 속함에 유의할 필요가 있다(구간 B).

#### 4. 실험치 분석 및 실험식의 설정

초기균열이 없는 공시체 혹은 구조물의 실험식 설정을 위해서는 매우 큰 공시체의 실험이 요구된다. 이는 작은 공시체에 대해서는 초기균열의 유무에 관계없이 정도의 차이는 있으나 항상 크기효과를 보여주기 때문에, 큰 공시체에 대한 실험치가 없으면 식(3)의  $\sigma_0$  항을 정하기가 매우 어렵기 때문이다. 참고문헌[10, 11, 12, 13]으로부터의 큰 공시체에 대한 실험치는 한정되어 있기는 하나, 이러한 실험치를 이용하여 각각 다른 하중상태에 대한 실험식을 제시하고자 한다.

##### 4.1 일축압축강도

일축 압축강도에 대해서는 많은 실험을 수행하여 왔으나, 큰 공시체에 대한 실험으로는 1930년대의 미국의 Blanks와 McNamara가 시행한 것을 들 수 있다<sup>(10, 13)</sup>. 이 실험에서는 최대 직경이 36인치(90cm)인 공시체까지 실험을 하였으며, 또한 각 경우 최대 골재 크기에 따라 실험치가 나와 있어 식(3)의 분석을 위해 적절한

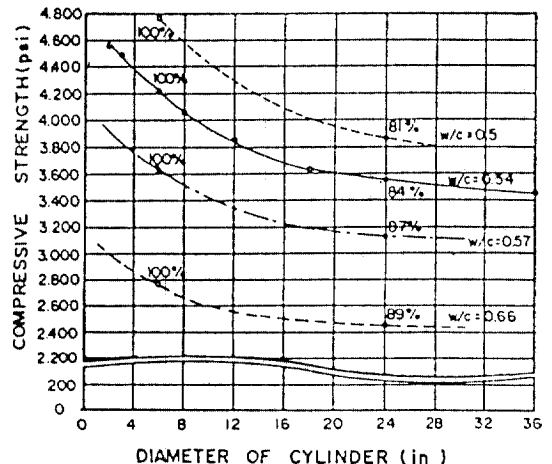


그림 4. Effect of cylinder size on strength of concrete for various compressive strength.

실험치라 볼 수 있다. 식(3)에서 크기효과의 크기는  $\lambda_0$  값에 좌우되며,  $\lambda_0$  값은 미세균열영역의 폭에 관계되는 것이다.  $\lambda_0$  값이 크면 미세균열영역이 큰 것을 의미하고 크기효과가 서서히 일어난다. 일축압축의 경우 이 미세균열폭은 골재크기  $d_a$  뿐만 아니라 압축강도  $f'_c$  값에도 관계됨을 그림 4에서 알 수 있다. 즉 강도가 커짐에 따라 크기효과가 크게 일어나며, 이는 고강도 콘크리트에서는 미세균열폭이 좁다는 것을 의미한다.

식(3)에 의한 실험식 설정을 위해  $f'_i$ 을  $f'_c$ 으로 대체한다. 그리고 앞장에서 설명된 바와 같이  $\sigma_0$ 의 크기는 이론적으로 정확하게 산정할 수는 없지만 약  $(0.6 \sim 0.8)f'_c$  정도로 추정된다(그림 1과 그림 4 참조). 또한 일축압축에서 주균열은  $(0.7 \sim 0.75)f'_c$  가까이에서 일어나므로  $\sigma_0 = 0.7f'_c$ 으로 정하여 비선형 회귀분석을 하면 다음 식(4)를 얻는다.

$$\sigma_c = \frac{0.38f'_c}{\sqrt{1 + \frac{d}{10d_a^{0.1}}}} + 0.7f'_c \quad (4)$$

여기서,

$\sigma_c$ : 임의 크기의 실린더 공시체의 콘크리트 압축강도(in psi.)

$f'_c$ : 직경 6"인 공시체의 콘크리트 압축강도 (in psi.)

$d$ : 실린더 공시체 직경(in inches)

$d_a$ : 최대 골재크기(in inches)

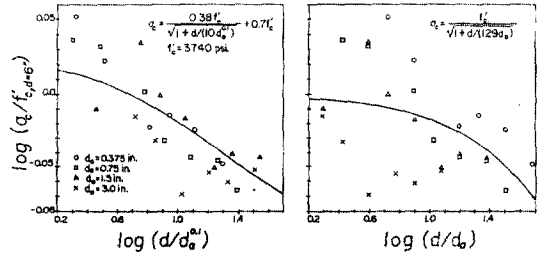
위의 식(4)를 도식화하면 그림 5(a)와 같다. 이 새로운 실험식을 같은 파괴역학에 의해 제안된 Bazant 실험식<sup>(6)</sup> 즉 다음식(5)를 같은 실험치를 이용한 회귀분석결과로 얻은 식(6)과 비교하고자 한다.

$$\sigma_c = k_1 f'_c / \sqrt{1 + \frac{d}{\lambda_0 d_a}} \quad (5)$$

비선형 회귀분석결과식은 다음과 같다.

$$\sigma_c = f'_c / \sqrt{1 + \frac{d}{129d_a}} \quad (6)$$

위의 식(6)은 그림 5(b)에 나타나 있으며 그림 5(a)와 비교하여 볼 때 실험치들이 매우 많이 흩어져 있음을 볼 수 있다. 따라서 제안된 새로운 실험식(4)가 타당한 것으로 보이며, 또한 그림 5(a)의 실험치에서 볼 수 있듯이 부재



(a) Proposed formula (b) Bazant's model  
그림 5. Size effect of the uniaxial compressive strength

크기가 커짐에 따라 size effect가 완만해짐도 알 수 있다.

#### 4.2 횡압 인장강도 (Splitting Tensile Strength)

콘크리트 인장강도 결정의 한 방법인 횡압 인장강도 시험의 실험치로부터 콘크리트 인장강도의 크기효과를 보이고자 한다. 참고문헌[11]에 의하면 직경 10 cm로부터 직경 300 cm까지, 그리고 길이는 50 cm로 일정하게 같은 성질의 콘크리트로 된 공시체를 실험하였다. 이 경우에도  $f'_i$ 을  $f_{tsp}$ 로 대체하여 앞에서 유도한 새로운 실험식을 적용한다. 이 실험에서는 동일한 콘크리트를 사용하였기 때문에 모든 공시체에서 최대 골재크기가 같게 되어  $\lambda_0 d_a^m$  항이 하나의 상수항  $d_0$ 로 나타낼 수 있게 되어 미세균열영역의 폭이  $d_a$ 의 어떠한 함수로 나타나는지에 대해서는 알 수 없다.

앞장의 식(2)는

$$f_{tsp} = \frac{k_1 f_{tsp,r}}{\sqrt{1 + \frac{d}{d_0}}} + k_2 f_{tsp,r} \quad (7)$$

여기서,

$f_{tsp}$ : 임의 크기의 공시체에서 횡압 인장강도

$f_{tsp,r}$ : 직경 6" 공시체의 횡압 인장강도 ( $f_{tsp,r} = 22 \text{ kg/cm}^2$ 으로 가정)

$k_1, k_2, d_0$ : 실험상수

여기서는  $k_2 = 0.6$ 으로 결정하여 실험치로부터 비선형 회귀분석을 하여 다음식(8)을 얻는다.

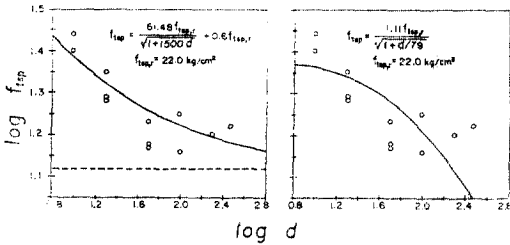
$$f_{tsp} = \frac{61.5 f_{tsp,r}}{\sqrt{1 + 1500d}} + 0.6 f_{tsp,r} \quad (8)$$

또한 Bazant 교수가 제안한 식에 의해

$$f_{isp} = \frac{1.11 f_{isp,r}}{\sqrt{1+d/79}} \quad (9)$$

여기서  $f_{isp}$  와  $f_{isp,r}$  의 단위는  $\text{kg/cm}^2$  이고,  $d$  의 단위는  $\text{cm}$  이다.

이 식(8)과 (9)를 그림 6(a)와 그림 6(b)에 각각 나타내었다. 그림 6(a)와 그림 6(b)에서 볼 수 있듯이 직경이 50~100cm 이상이 되면 인장강도의 저하가 나타나지 않고 있다. 이는 초기균열이 없기 때문이며 만약 초기 균열이 있는 공시체인 경우 계속적인 인장강도의 감소는 앞서 설명한 바와 같다.



(a) Proposed formula (b) Bazant's model  
그림 6. Size effect of splitting tensile strength.

### 4.3 전단강도

콘크리트의 압축 및 인장강도에 대한 크기효과는 앞절에서 설명되었고, 이절에서는 전단강도에 관한 실험치를 분석하고자 한다. 콘크리트 부재에서 전단력에 저항함은 바로 콘크리트의 인장저항능력에 의한 것이다. 이 전단력에 대한 크기효과에 대해서는 논근이 없는 경우 [14]와 있는 경우 [15]에 대해 이미 연구되었으며, 여기서는 앞에서 유도된 새로운 실험식을 적용하고자 한다.

콘크리트 보에서 전단저항의 형태는 크게 “보의 전단지간/보의 높이” 비에 따라 달라지는데,  $a/d \leq 2.5$  (여기서  $a$  는 전단지간)이면 아치 거동(arch action)에 의한 파괴가 주로 되며,  $2.5 \leq a/d \leq 5 \sim 6$  정도에서는 전단력과 휨의 조합에 의해 파괴가 이루어지고,  $a/d \geq 5 \sim 6$  이면 휨 파괴에 의한다. 초기균열이 없는 보의 전단파괴의 경우  $a/d \leq 2.5$  인 경우에  $\sigma_0$  항의 크기는 앞절의 압축이나 인장의 경우와 유사하게 나타날 것이나  $2.5 \leq a/d \leq 5 \sim 6$  인 경우 초기균열이 없다 하더라도 휨에 의해 일단 균열이 발생된 후에

전단력에 의해 균열이 진행되어 파괴되므로 초기균열이 있는 경우와 유사한 형태를 나타낼 것이다. 즉 이 경우에는  $\sigma_0$  항이 0에 가까운 값을 가질 것이다. 따라서 참고문헌[12]의 실험치를 이용하여 앞절의 방법과 유사하게 실험식을 만들면,

$$\tau_u = \frac{1.4 \tau_{u,d=10}}{\sqrt{1 + \frac{d}{13d_0^{0.3}}}} \quad (10)$$

여기서,

$\tau_u$  : 임의 크기의 부재에서 극한 전단 응력도(in MPa)

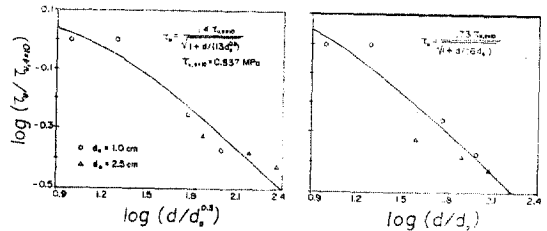
$\tau_{u,d=10}$  :  $d=10$  cm 크기의 부재에서 극한 전단 응력도

이 경우 등분포 하중이 작용하고 있으므로  $a = l/4$  로 볼 수 있고 [14], 따라서  $a/d=3$  이 되어 초기균열이 없어도 초기균열이 있는 경우와 유사하게 거동하게 되어  $\sigma_0$  항을 생략하였다. 또한 최대골재의 크기는  $d_0=1$  cm 와 2.5 cm 로 2 종류 뿐이며, 각각 실험치도 4 개와 3 개 이어서  $d_0^m$  의  $m$  상수 결정에는 어려움이 많은 바, 식(10)의  $m$  값은 오직 이 실험치에 의한 것으로 일반화하기엔 어려운 값을 밝혀둔다.

이 경우에도 Bazant 가 제안한 식에 의하면

$$\tau_u = \frac{1.73 \tau_{u,d=10}}{\sqrt{1 + \frac{d}{6d_0}}} \quad (11)$$

가 되며, 식(10)과 (11)을 그림 7(a)와 그림 7(b)에 나타내었다.



(a) Proposed formula (b) Bazant's model  
그림 7. Size effect of shear strength

이 전단강도에 대한 보다 나은 실험식을 위해서는 더욱 많은 실험치가 요구된다. 특히  $a/d \leq 2.5$  인 춤이 큰 보에 대해서는  $\sigma_0$  항이 고려되어야

할 것이며 또한  $m$  값은 압축이나 인장의 경우보다 큰 값이 될 것으로 예상되는데 이는 전단파괴의 경우 균열이 일어난 후 골재의 interlocking에 의한 전단저항을 하므로 최대골재크기에 많은 영향을 받게되기 때문일 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

이 연구를 통하여 모든 콘크리트 공시체 및 구조물에 있어서 초기균열이 없을 경우의 콘크리트 파괴거동상의 특성에 근거한 새로운 크기효과 법칙을 제안하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

1) 강도기준과 에너지기준에 근거하여 유도된 새로운 크기효과 식에 의해 초기균열이 없는 콘크리트의 크기에 따른 강도저하를 예측할 수 있게 되었다.

2) 파괴역학에 근거한 현존의 크기효과식은 매우 큰 공시체에 대해 초기균열의 유무에 관계없이 강도저하가 매우 심하게 나타나나 이는 최근의 실험치와 일치하지 않음이 밝혀졌으며, 여기서 제시한 크기효과식은 보다 잘 일치함을 보였다.

3) 전단강도에 대해서  $2.5 \leq a/d \leq 5 \sim 6$  정도의 보에서는 휨균열 후에 전단균열이 확장되어 파괴가 일어남으로써 초기균열유무에 큰 관계가 없다. 그러나  $a/d \leq 2.5$  인 층이 큰 보의 경우는 초기균열 유무에 큰 관계가 있을 것임을 알 수 있다.

4) 새로운 실험식에서 제안한 미세균열영역 폭에 대한 최대골재크기  $d_a$ 의 효과에 대해서는 실험치의 부족으로 깊어있게 연구되지 못하였으나 일축압축강도에 대해서는 새로운 실험식에 의해 많은 개선이 가능함을 보여 주었다.

## 감사의 말

이 논문은 한국과학재단의 1985년도 후반기 연구비 지원에 의한 것으로 한국과학재단에 감사함을 표한다.

## 참 고 문 헌

1. Kaplan, F.M. "Crack Propagation and the Frac-

ture of Concrete," *J. of ACI*, Vol. 58, 1961, pp. 591~610.

2. Griffith, A.A., "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids," *Phil. Trans. Royal Society*, A221, 1920.
3. Bazant, Z.P., "Mechanics of Distributed Cracking," Center for Concrete and Geomaterials, Report No. 85-6/428M, Northwestern Univ. Evanston, IL, U.S.A. p.82.
4. Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson, P.E., "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Elements," *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, No. 6, pp. 773~782.
5. Wittmann, F.H., "Fracture Mechanics of Concrete," Elsevier, 1983.
6. Bazant, Z.P., "Size Effect in Blunt Fracture; Concrete, Rock, Metal," *J. of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 110, pp. 518~535.
7. Bazant, Z.P., Kim, J.K., and Pfeiffer, P., "Non-Linear Fracture Properties from Size Effect Tests," *J. of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 112, No. 2, Feb., 1986, pp. 289~307.
8. ACI Committee 224, "Control of Cracking in Concrete Structures," ACI 224 R-80.
9. 박흥기, "균열이 없는 콘크리트 구조물의 크기에 따른 응력감소효과에 관한 연구," 한국과학기술원 토목공학과 1987.
10. Blanks, R.F., and Namamara, C.C., "Mass Concrete Tests in Large Cylinders," *J. of ACI Proc. for Presentation at the 31th Annual Convention*, New York, Feb. 19~21, 1935.
11. 長谷川俊昭, 鹽屋俊幸, 岡田 武二, "コンクリートの割裂引張強度に關する寸法效果", 1985.
12. Iguro, M., Shioya, T., Nojiri, Y., and Akiyama, H., "Experimental studies on Shear Strength of Large Reinforced Concrete Beams under Uniformly Distributed Load."
13. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, "Boulder Canyon Project, Final Report, Part VII-Cement and Concrete Investigations, Bulletin 4, Mass Concrete Investigations."
14. Bazant, Z.P., and Kim, J.K., "Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams," *ACI Journal*, Sep~Oct, 1984, pp. 456~468.

15. 최호태, “녹근이 있는 철근콘크리트보의 전단파괴  
시의 응력도 감소효과(Size Effect in Shear Failure

of Reinforced Beams with Web Reinforcements),”  
한국과학기술원 토목공학과, 1987.

(接受: 1987. 3. 9)