

비유사 균열이 있는 콘크리트 구조의 크기효과

Size Effect of Concrete Structures with Dissimilar Initial Cracks

김진근* 어석홍**
Jin-Keun Kim Seok-Hong Eo

장정수*** 조성찬****
Jeong-Soo Jang Sung-Chan Cho

요약

초기 균열을 갖는 대부분의 구조 부재에 있어서, 부재의 크기가 증가함에 따라 일반적으로 강도가 감소하는 현상을 보인다. 이를 크기효과라고 하며, 특히 콘크리트는 유리, 철과같은 구조 재료와는 달리 초기균열이 없는 경우에도 이러한 크기효과를 나타낸다는 것이 실험에 의해 나타나고 있다. 기존의 크기효과 법칙을 따르면 크기가 매우 큰 콘크리트 부재는 응력을 거의 받을 수 없는 것으로 나타나나, 실험에 의하면 강도의 감소율이 현저하게 감소되어 기존의 크기효과 법칙과 큰 차이를 보인다.

따라서, 본 논문에서는 콘크리트 구조물의 비선형 파괴역학에 근거하여 비유사 균열이 존재하는 경우에 대한 크기효과식을 유도하여 기존의 활열인장강도, 전단강도 및 압축강도 실험치에 대한 회귀분석을 통하여 보다 나은 모델식을 제시하였다.

ABSTRACT

In most of the structural members with initial cracks(or initial notches), 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 crack made artificially, consequently showing a rather milder strength reduction compared to the severe strength reduction by the previously derived size effect law.

In this study, the theoretical size effect law previously derived by Z.P. Bazant was discussed based on nonlinear fracture mechanics of concrete structures with dissimilar initial cracks, and the prediction models are proposed by regression analysis with the existing test data of more large size specimens for splitting tensile strength, shear strength and uniaxial compressive strength tests.

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수, 공학박사

** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 조선대학교 건축공학과 부교수, 공학박사

**** 조선대학교 건축공학과 석사과정

● 1989. 10. 2 접수. 본 논문에 대한 토론을 1990. 6. 30까지 본 학회에 보내주시면 1990. 9월호에 그 결과를 게재해 드리겠습니다.

1. 서 론

1920년대초 Griffith[1]에 의해 처음으로 제안된 이래, 연성 및 취성재료의 파괴거동에 관한 많은 파괴역학 이론들이 개발되었다. 콘크리트의 경우에 있어서는 1961년 Kaplan[2]이 최초로 Griffith의 기본 이론을 콘크리트의 파괴에 적용하는 실험적 연구를 수행하였으며, 그 후 많은 연구자들에 의해 콘크리트 구조물의 파괴거동을 규명하려는 시도가 진행되어 왔다[3~6].

콘크리트 구조물에 대한 파괴기구의 한가지 중요한 측면은 파괴에 도달하기 전에 항상 균열이 발생한다는 사실이다. 다시 말하면, 콘크리트 구조물은 그것이 초기 균열의 유무에 관계없이 항상 균열에 의하여 파괴에 이르게 되는 것이다. 이러한 사실은 콘크리트 재료의 매우 중요한 특성으로서, 콘크리트 구조물의 해석에 파괴역학을 적용할 수 있고 또한 마땅히 적용하여야 함을 의미한다고 할 수 있다.

유리, 철과 같은 재료는 초기 균열이 존재하는 경우에서의 파괴거동에 대하여 파괴역학 이론을 적용할 수 있는 반면, 초기 균열이 없는 경우에는 강도기준에 근거한 탄소성 이론을 적용할 수 있다. 물론 콘크리트 재료에 있어서도 균열이 발생하게 되는 어느 임계하중 이하에서는 강도기준에 따른 탄성해석을 적용할 수 있으며 임계하중 이상 즉, 균열이 일단 발생하고 나면 파괴역학 이론을 적용하여 그 파괴거동을 해석함이 타당하다. 그러나, 콘크리트는 크게 골재와 시멘트풀로 구성된 복합적 재료로서 수화반응이나 제반 환경요인에 의해 골재와 시멘트풀의 경계면에 미세한 부착균열이 항상 존재하는 것으로 알려져 있다. 따라서 이와 같은 콘크리트 재료의 고유한 재료특성을 고려한다면 그 해석에 파괴역학을 적용할 경우에 보다 정확한 해를 얻을 수 있을 것이다. 이론적인 연구에 의하면, 콘크리트 구조물의 강도는 부재의 크기가 증가할수록

감소하며[7], 그 파괴거동을 규명하는 데는 비선형 파괴역학 이론을 적용하여야 함을 보이고 있다[8].

본 연구의 목적은, 낫치와 같은 인위적인 초기균열이 없는 경우에 콘크리트 구조물의 강도에 미치는 크기효과를 콘크리트 파괴거동에 근거하여 규명하는 데에 있다. 이를 위하여 먼저 콘크리트의 파괴거동에 관하여 논의한 다음, 비선형 파괴역학에 근거하여 크기효과에 관한 새로운 이론적 모델식을 유도하고자 한다. 또한 기존의 여러 문헌[9-11]으로 부터 얻은 콘크리트 부재의 압축강도 실험결과에 대한 회귀분석을 통하여 실용적인 범위내에서 적용가능한 경험식을 제안하고자 한다.

2. 크기효과에 관한 이론적 연구

금속과 같이 상당한 소성변형이 일어나는 재료의 경우에는 초기 균열이 존재하지 않으면 크기효과가 나타나지 않는다. 그러한 재료의 파괴는 균열에 기인한 것이 아니라 소성변형에 의하여 발생하기 때문이다. 그러나 콘크리트에 있어서는 초기 균열(혹은 낫치)이 존재하지 않는 경우에도 크기효과가 나타나는 것으로 알려져 있다.

콘크리트 강도의 크기효과에 관해서는 많은 연구자들에 의해 실험적 및 이론적으로 연구되어 왔다[5-8, 12, 13]. 특히 Z.P. Bazant 교수가 이 문제의 해석에 뛰어난 업적을 쌓은 바 있다[7]. 그는 콘크리트의 균열 전진시 에너지 평형 개념을 고려하여 기하학적으로 유사한 공시체에 대한 차원해석으로부터 식(1)에 주어진 소위 크기효과 법칙(size effect law)을 유도하였다.

$$\sigma_N = \frac{Bf'_c}{\sqrt{1 + \frac{d}{\lambda_0 d_0}}} \quad (1)$$

여기서, $\sigma_N = P/bd =$ 공칭 파괴강도, $P =$ 최대하중, $b =$ 부재의 두께 또는 폭, $d =$ 부재의 특성

길이, f'_1 =인장강도, d_a =최대골재크기, B , λ_0 = 실험상수를 각각 나타낸다.

위의 식(1)을 유도하는 데에는 다음과 같은 두가지 가정을 전제로 하였다. 즉, 파괴시에 총 포텐셜에너지는 균열길이 a 와 파괴진행영역(fracture process zone)의 면적 $n \cdot d_a \cdot a$ 에 비례한다는 것이다. 이때 파괴진행영역의 폭은 최대골재크기(d_a)의 n 배로 일정한 것으로 가정하였다.

한편, Hillerborg등[5]과 Petersson[6]의 가상균열모델(fictitious crack model)을 사용한 해석에서 뿐만 아니라, Zaitsev와 Kovler[12]의 notch 민감도 해석(notch sensitivity analysis)을 통해서도 앞서 설명한 Bazant의 크기효과 법칙이 정확함을 보였다. 그러나, Zaitsev가 지적하였듯이 재료의 인장강도에 대한 크기효과도 고려할 필요가 있으며, 매개변수 λ_0 를 상수로 취급할 것이 아니라 파괴시의 상대균열길이 a/d 의 함수가 될 수 있음을 시사하고 있다.

파괴시의 균열길이 a 를 최대골재크기 d_a 의 함수로 표현할 수도 있지만 실제로 실험을 통하여 측정하기란 매우 어려운 문제이다. 결과적으로, 임의의 단조감소함수 $f(a/d)$ 를 도입하여 식(1)을 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\sigma_N = \frac{Bf'_1}{\sqrt{1 + \frac{d}{f(a/d)d_a}}} \quad (2)$$

식(2)의 물리적 의미를 구체적으로 설명하기 위하여 Fig.1에 인장하에 놓인 일련의 부재열 A, B, C를 도시하였다. A, B, C부재열은 모두 기하학적으로 유사한 형상을 나타내며 부재의 크기 d_1 , d_2 , d_3 에 대한 상대균열길이비는 각각 다른 일정한 값을 갖는다. 따라서 각 부재열에 대한 크기효과는 식(1)을 따를 것이다. 즉, 함수 $f(a/d)$ 가 각 부재열별로 일정한 값을 가질 것이므로 결국 식(2)와 식(1)은 같게 된다.

그러나 대각선 방향으로 이루어진 부재열

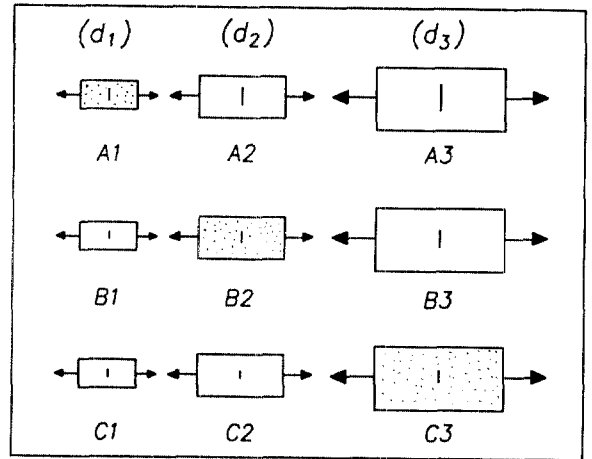


Fig. 1. Illustrations of similar specimen series(row series) and dissimilar specimen series (diagonal series)

A1, B2, C3를 생각해 보자. 이때 균열길이 a 는 모두 같은 값을 가지며, 부재크기에 대한 균열길이의 비 a/d 는 부재가 클수록 작은 값을 갖게 된다. 따라서 정확한 크기효과를 나타내기 위해서는 식(2)를 사용하여야 한다.

한편, notch와 같은 인위적인 초기 균열을 두지 않은 콘크리트 부재에 있어서 동일한 최대골재크기를 사용할 경우 초기 균열길이 a_0 를 부재의 크기에 관계없이 일정하게 가정할 수 있음은 앞서 설명한 바와 같다. 또한, 식(2)의 논거에서 언급한 초기 균열길이 a_0 와 파괴시의 균열길이 a 는 분명히 다르나 a_0 에서 진전한 균열길이양을 실험적으로나 이론적으로 정확히 구할 수가 없다. 그러나 a_0 혹은 a 어느 것이나 최대골재크기의 함수로 나타내어질 수 있다는 관점에서 대각선 방향의 부재열 A1, B2, C3의 기하학적 비유사성 자체에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다. 결과적으로, 부재의 크기에 따라 변하는 매개변수 $f(a/d)$ 를 고려하여 수정된 크기효과의 경향을 나타내면 Fig. 2에 도시한 것과 같다.

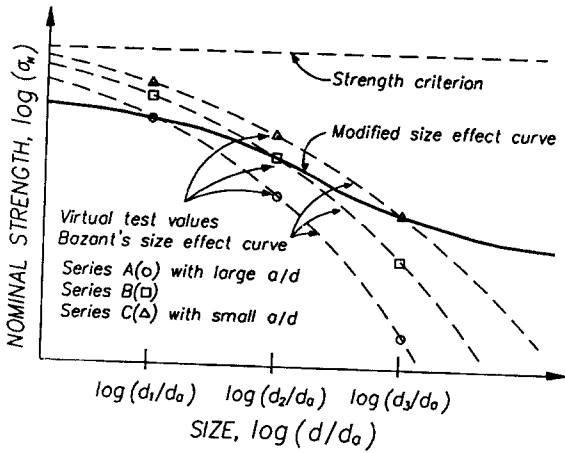


Fig. 2. Trend of modified size effect in concrete structures with different ratios of a/d

Fig. 2에 도시한 실험값은 Fig. 1에 예시한 각 부재열에 대한 가상적인 것으로 각각 Bazant의 크기효과 법칙인 식(1)에 의해 점선으로 나타낼 수 있음을 보인다. 굵은 실선은 A1, B2, C3부재의 가상적인 실험값을 연결한 것으로 λ_0 값이 작은 A부재열로 부터 λ_0 값이 큰 C부재열에 까지 강도의 감소가 현저히 둔화된 경향을 나타내며 그 경향을 결정하는 것이 식(1)의 λ_0 에 해당하는 식(2)의 $f(a/d)$ 인 것이다. 그러나 $f(a/d)$ 를 구체적으로 정의할 수 없으므로 실용적인 범위내에서의 회귀분석을 위하여 다음 식(3)을 근사적으로 나타낼 수 있으며, 식(3)의 경향은 Fig. 3에 나타나 있다.

$$\sigma_N = \frac{Bf'_t}{\sqrt{1 + \frac{d}{\lambda_0 d_a}}} + \alpha f'_t \quad (3)$$

여기서 α 는 1보다 작은 상수이다.

그러나 기존의 여러 실험결과들에 의하면, 실제 건설현장에서 사용되고 있는 약 2~7cm 정도의 최대골재크기에 있어서는 미세균열의 폭에 관한 골재크기의 영향이 별로 없는 것으로 나타나 있다. 따라서 미세균열의 폭을 일정하게 가정하고 위의 식(3)을 수정하여 식(4)

와 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_N = \frac{Bf'_t}{\sqrt{1 + \frac{d}{\ell_0}}} + \sigma_0 \quad (4)$$

이때 ℓ_0 는 미세균열의 폭과 관련한 부재의 특성길이를 나타내며 하나의 실험상수로서 취급할 수 있다. σ_0 항은 부재의 크기에 무관한 것으로 초기 균열을 유발하는데 필요한 응력으로 해석된다[14].

Fig. 3은 식(1)과 식(4)의 크기효과에 관한 경향을 비교 도시하고 있다. Fig. 2와 Fig. 3으로부터 살펴 볼 때 부재의 크기가 최대골재 크기에 비해 매우 작거나 매우 큰 경우에는 강도 감소율이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

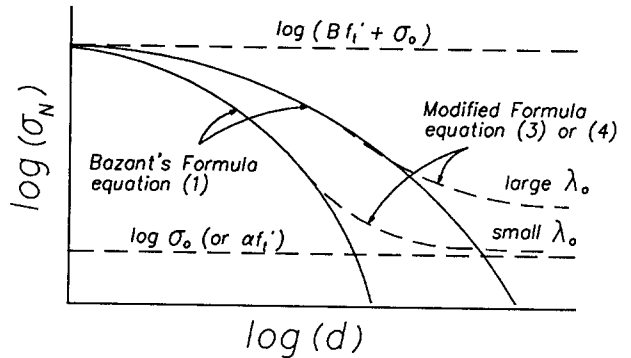


Fig. 3. Comparison of the size effect between the modified formula and the Bazant's formula

이상의 논의로부터 초기균열을 두지 않은, 즉 비유사 균열이 있는 콘크리트 부재의 크기효과와는 심한 강도의 감소 현상을 보이는 식(1)보다는 현저히 완화된 감소 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서, 다음 절에서 수정된 경험식 식(3)과 식(4)의 타당성을 일련의 활렬인장강도 및 전단강도 시험결과를 이용하여 입증하고자 하며 나아가 압축강도의 경우에 적용하여 활용가능한 크기효과 예측공식을 제안하고자 한다.

3. 회귀분석 결과 및 경험식의 산정

3.1 활열인장강도

인장강도를 측정하기 위한 한가지 방법인 활열인장강도 시험에 관한 Hasegawa[13] 및 저자가 수행한 실험결과[15]를 회귀분석 자료로 사용하였다. Hasegawa는 길이가 50cm (20in.) 로 일정하고 직경이 300cm(118in.)까지 변하는 상당히 큰 크기의 실린더 공시체를 동일한 배합비로 제작하여 활열인장 시험을 수행하였다.

한편, 저자는 길이가 20cm(8in.), 직경이 10cm(4in.)에서 160cm(4in.)까지 변하는 일련의 활열인장 시험을 수행한 바 있다.

여기서는 식(3)의 f'_t 을 기준 활열인장강도 $f_{tsp,r}$ 로 대치하여 회귀분석을 시도하였다. 한편, 위의 두 실험에서 사용된 최대골재크기가 2.5cm(1in.) 로 일정하므로 식(3)의 $\lambda_0 d_0$ 는 상수로 치환할 수 있다. 따라서 앞서 설명한 바와 같이 새로운 매개변수 ℓ_0 를 도입한 식(4)를 사용하였다.

이는 본 연구에서 사용한 실험결과 [13,15]만으로는 미세균열영역의 폭에 미치는 최대골재크기의 영향을 해석할 수 없음을 의미하기도 한다. 따라서 식(4)는 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$f_{tsp} = \frac{k_1 f_{tsp,r}}{\sqrt{1 + \frac{d}{\ell_0}}} + k_2 f_{tsp,r} \quad (5)$$

여기서, f_{tsp} =직경 d인 공시체의 활열인장강도 ; $f_{tsp,r}$ =직경 10cm(4in.)인 공시체의 기준 활열인장강도 ; k_1, k_2 는 각각 실험상수를 나타낸다.

위의 식(5)를 적용하여 얻은 회귀분석 결과와 식(5)에서 $k_2 f_{tsp,r}$ 항을 무시한 Bazant의 제안식을 사용하였을 때의 결과를 Fig. 4에 나타내었다. $f_{tsp}, f_{tsp,r}$ 및 d의 단위는 각각 psi 및 in.를 사용하였다.

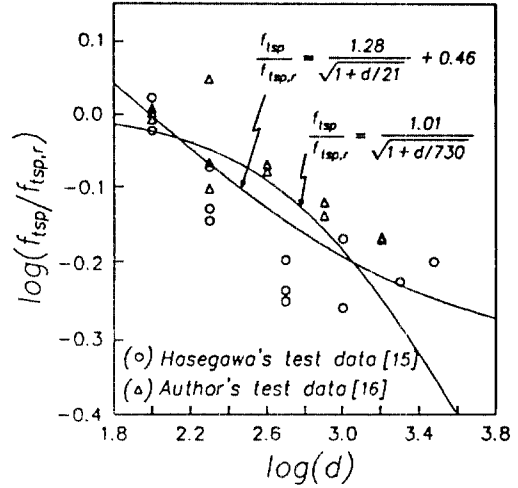


Fig. 4. Size effect of splitting tensile strength

그림에서 볼 수 있듯이 직경이 약 50cm (20in.) 내지 100cm(40in.), 즉 $\log d$ 가 1.3 내지 1.6이상에서는 강도의 감소 비율이 작아지는 경향이 있다. 이러한 현상은 초기 균열이 없는 경우 혹은 비유사 균열을 가진 콘크리트 부재의 강도에 관한 크기효과를 설명하는 데 수정된 이론식인 식(2)를 적용하는 것이 타당함을 시사한다고 볼 수 있다. 부재가 만약 인위적인 초기 균열을 가지고 있다면 물론 식(1)에 따라 계속적인 강도의 감소가 있을 것이다.

3.2 전단강도

콘크리트 보의 전단저항 형태는 전단경간대높이 비(shear span to depth ratio= s/d)에 따라 크게 세가지로 구분할 수 있다. 첫째는 $s/d \leq 2.5$ 인 경우로 아아치작용에 의한 파괴가 일어난다는 경우이고, 둘째는 $2.5 < s/d < 5 \sim 6$ 인 경우로 전단과 휨의 조합작용에 의해 파괴가 일어난다는 경우 그리고 셋째는 $s/d \geq 5 \sim 6$ 인 경우로 휨에 의한 파괴가 지배적인 경우를 말한다.

2.5 < s/d < 5~6인 경우에는 초기균열을 두지 않더라도 초기균열이 존재하는 경우와 유사하게 크기효과가 나타날 것이다. 이는 휨균열이 먼저 발생하고 이것이 초기균열의 역할을 함으로써 결국 전단에 의해 균열이 진전하여 파괴에 이르기 때문이다. 따라서 식(4)의 σ_0 는 무시할 수 있을 정도의 작은 값을 가질 것으로 예상된다. 그러나 s/d ≤ 2.5인 경우에는 사인장균열에 의해 직접 파괴에 도달하기 때문에 σ_0 항을 고려하여야 한다.

전단강도에 있어서 최대골재크기의 영향은 인장 및 압축강도보다 더 클 것으로 보인다. 왜냐하면 일단 균열이 발생하고 나면 골재의 맞물림현상(aggregate interlocking)이 극한 전단저항력에 상당히 크게 기여하기 때문이다.

Kani[16], Taylor[17] 및 Iguro 등[18]의 실험결과로부터(s/d=3) 수정된 식(4)의 f'_c 을 기준 전단강도 τ_{ur} 로 대치하여 회귀분석한 결과를 Bazant의 제안식과 비교하여 Fig. 5에 나타내었다.

여기서, τ_u =길이 d인 보의 전단강도(psi) τ_{ur} =길이 50cm(20in.)인 보의 기준 전단강도(psi)를 각각 나타낸다.

Fig. 5에서 $\sigma_0=0.45$ 로서 2.5 < s/d < 5~6인 경우에 대하여 위에서 논술한 바와는 상이한 결과를 볼 수 있다. 이는 각 실험에 있어서 그 파괴형태가 사실상 서로 다르게 나타나고 있음을 반영하는 것으로 풀이된다.

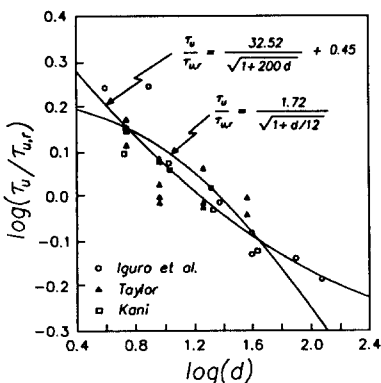


Fig. 5. Size effect of shear strength

3.3 일축 압축강도

일축 압축강도에 관해서는 많은 실험적인 연구가 수행되어 왔으나 [9-11], 사실은 매우 큰 공시체에 대한 유용한 실험결과는 그리 많지 않다. Blanks와 McNamara[9]는 직경이 36in.(90cm)인 경우까지 각 직경에 대하여 여러 종류의 최대골재크기를 사용한 실험결과를 제시하였으며 식(3) 혹은 식(4)에 대한 회귀분석 자료로 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 여겨진다.

식(3)에서 알 수 있듯이 크기효과는 미세균열영역의 폭에 따른 매개변수 λ_0 에 의존하며, λ_0 가 클수록 미세균열영역의 폭은 커지고 따라서 크기효과는 천천히 일어나게 된다. 이 미세균열영역은 Fig. 6에 나와 있듯이 최대 골재크기뿐만 아니라 콘크리트의 압축강도에도 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 즉, 강도가 클수록 공시체의 크기에 따른 강도의 감소가 더 많이 발생하는 것을 말한다. 이는 고강도콘크리트에 대한 미세균열영역이 보통콘크리트의 경우보다 작게 발생한다는 사실을 의미하는 것이다.

경험식을 산정하기 위하여 식(3)의 f'_c 을 f'_c 으로 대체하였다. 앞에서 논의하였듯이 σ_0 항을 실험적으로나 이론적으로 정확히 계산할 수는 없으나 압축강도에 있어서는 Fig. 6 및 참고문헌[14]로부터 대략 0.6 f'_c 내지 0.8 f'_c 정도로 취할 수 있다. 참고문헌으로부터 얻은 약 200여 개의 압축강도 측정치[9-11]와 식(3), 식(4)로부터 회귀분석한 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 도시하였다. 한편, Fig. 7은 일축 압축에서 작용응력이 약 (0.7~0.75) f'_c 일 때 주균열이 발생하므로 σ_0 를 0.7 f'_c 으로 가정하여 얻은 결과를 나타낸다.

여기서, σ_c =직경 d인 실린더 공시체의 압축강도(psi); f'_c =직경 6in.인 표준실린더 공시체의 기준 압축강도(psi)를 각각 나타내며, d_m =최대골재크기(in.)를 말한다. 실린더의 높이/직경 비(h/d)는 2이다.

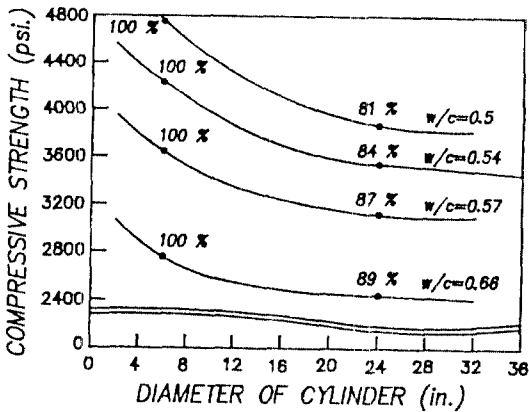


Fig. 6. Effect of cylinder size on compressive strength of concrete for various strength levels[10]

Fig. 8에서 직경 50cm(18in.)까지는 세 식에 의한 강도의 감소율이 비슷하며 실험결과와도 잘 일치하고 있으나 그 이상의 크기에서는 특히 본 연구의 제안식과 Bazant에 의한 공식 사이의 격차가 점점 벌어져 직경 150cm(60in.)에서 약 11%, 직경 300cm(120in.)에서는 약 22%의 큰 차이가 남을 알 수 있다. 따라서 Fig. 8에 도시한 본 연구의 제안식은 특히 부재의 크기가 매우 큰 경우의 압축강도에 관한 크기효과를 잘 나타내고 있으며, $\phi 2in. \times 4in.$ 및 $\phi 3in. \times 6in.$ 의 작은 실린더 공시체의 시험으로부터 $\phi 6in. \times 12in.$ 표준실린더 공시체의 압축강도를 예측하는 데 뿐만 아니라 실제 콘크리트 구조물의 압축강도를 예측하는 데도 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

앞의 Fig. 6과 Fig. 7을 살펴보면 직경이 대략 18in. ($\log d \sim 1.25$) 이상에서 압축강도의 감소가 거의 일어나지 않는 것을 알 수 있다. 이 사실은 Fig. 8로부터도 볼 수 있는데, 여기에는 회귀분석에 사용된 각 실린더 직경의 평균 압축강도를 본 절에서 얻은 경험식 및 Bazant의 제안식 그리고 Neville[16]의 예측 공식과 함께 비교 도시되어 있다. Neville은 파괴역학 이론과는 무관하지만 확률론적 고찰에 근거하여 실험결과와 비교적 잘 맞는 경험식을 제안

하였다. 그는 콘크리트의 강도 P 를 일반적으로 공시체의 체적 V , 횡방향 최대크기 d 및 높이 대 횡방향 크기비 h/d 의 함수로 나타낸 뒤 12명의 다른 연구자들의 실험결과를 사용하여 회귀분석하였다. 그리하여 기준공시체로서 6in. (15cm) 정방형 공시체를 취하고 그에 대하여 같은 성질의 콘크리트, 다른 크기의 공시체에 대한 강도비 P/P_0 와 $d/[(V/6h)+h]$ 의 관계를 구할 바 있다. Fig. 9내에 주어진 Neville의 식은 원래 그가 구한 식으로 부터 비교를 위해 실린더 공시체에 대하여 적절히 변형시킨 형태이다.

4. 결 론

이상에서 비선형 파괴역학에 근거한 콘크리트의 파괴거동으로 부터 수정된 크기효과 공식을 유도하였으며, 이를 일련의 활열인장강도 및 전단강도 실험결과와의 회귀분석을 통해 그 타당성을 보였고 나아가 일축 압축강도에 적용하여 실제 활용가능한 새로운 경험식을 제시하였다. 본 연구에서 도출한 결론을 요약 하면 다음과 같다.

- 1) 강도기준 및 에너지 기준에 근거하여 본 연구에서 유도한 새로운 크기효과 모델을 사용함으로써 콘크리트 구조물의 크

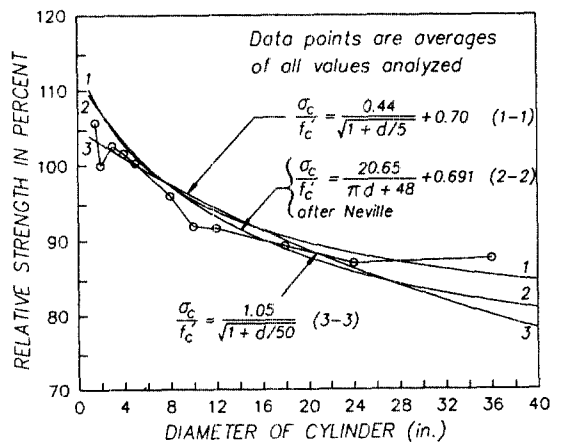


Fig. 9. Relative strength in percent to that of $\phi 6 \times 12$ cylinder.

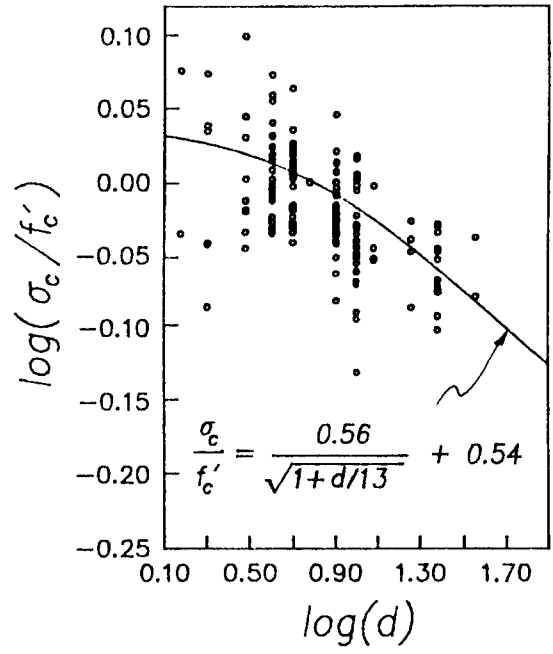
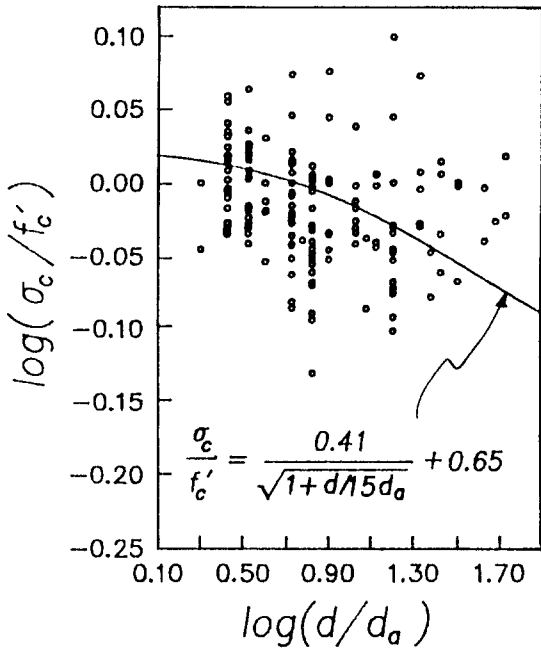


Fig. 7. Size effect of uniaxial compressive strength(I)

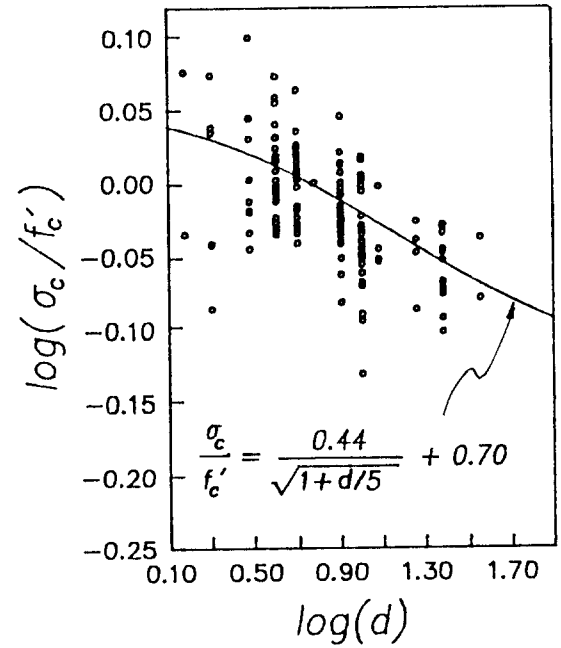
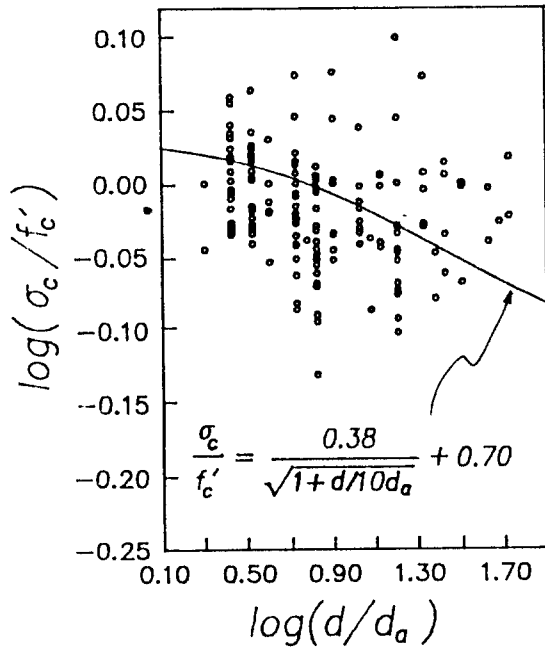


Fig. 8. Size effect of uniaxial compressive strength(II)

기 증가에 따른 강도 감소 효과를 적절히 평가할 수가 있다.

- 2) 제시한 경험식이 부재의 크기가 무한히 큰 경우에는 콘크리트의 거동을 정확히 나타내지는 않지만 실용적인 범위내에서 충분히 타당하게 사용될 수 있으며 보다 정확한 해를 얻기 위해서는 다른 해석적 접근법이 요구된다.
- 3) 기존의 크기효과 법칙을 따를 경우 부재의 크기가 매우 클 때 상당히 심한 강도 감소 결과를 주게 되며 많은 유용한 실험 결과와 잘 일치하지 않는 반면, 본 연구에서 제시한 모델식에 의하면 실험결과와 보다 잘 맞는 것으로 나타났다.
- 4) 실험치의 부족으로 미세균열영역의 폭에 관한 최대골재크기의 영향을 정확히 파악할 수는 없으나 일축 압축강도에 있어서 그것을 하나의 상수로 일정하게 가정한 새로운 경험식을 제안하였으며 아래 제시된 식은 실제에서 효과적으로 이용될 수 있으리라 사료된다.

$$\frac{\sigma_N}{f'_c} = \frac{0.44}{\sqrt{1+d/5}} + 0.70 \quad (d \text{의 단위는 inch})$$

또는

$$\frac{\sigma_N}{f'_c} = \frac{0.44}{\sqrt{1+d/12.7}} + 0.70 \quad (d \text{의 단위는 cm})$$

REFERENCES

- 1) Griffith, A.A., "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids," Philosophical Trans. Royal Society of London, A221, pp.163-198.
- 2) Kaplan, F.M., "Crack Propagation and the Fracture of Concrete", J. of ACI, Vol.58, No.5, 1961, pp.591-610.
- 3) Bazant, Z.P., "Mechanics of Distributed Cracking", Center for Concrete and Geo-

materials, Report No.85-6/428M, Northwestern Univ., Evanston, Ill., U.S.A., Feb., 1983, 82 pp.

- 4) Wittmann, F.H.(Editor), "Fracture Mechanics of Concrete", Elsevier, Netherlands, 1983, 680 pp.
- 5) 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, 1976, pp.773-782.
- 6) Petersson, P.E., "Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and Similar Materials", Report TVBM-1006, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1981.
- 7) Bazant, Z.P., "Size Effect in Blunt Fracture ; Concrete, Rock, Metal", J. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.110, No.4, Apr., 1984, pp.518-535.
- 8) Bazant, Z.P., Kim, J.K., and Pfeiffer, P. " Nonlinear Fracture Properties from Size Effect Tests", J. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 112, No.2, Feb., 1986, pp. 289-307.
- 9) Blanks, R.F., and McNamara, C.C., "Mass Concrete Tests in Large Cylinders", J. of ACI, Vol.31, No.3, Jan.-Feb., 1935, pp. 280-303.
- 10) Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, "Boulder Canyon Project, Final Report, Part VII Cement and Concrete Investigations, Bulletin 4, Mass Concrete Investigations", 1965.
- 11) Gonnerman, H.F., "Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete", ASTM proc. Vol.

25, 1925, pp.237–250.

- 12) Zaitsev, Y.V., and Kovler, K.L. "Notch Sensitivity of Concrete and Size Effect, Part I : Effect of Specimen Size and Crack Length by 3–Point Bending", Cement and Concrete Research, Vol.15, No.6, Nov., 1985, pp.979–987.
- 13) Hasegawa, T., "Size Effect on Splitting Tensile Strength of Concrete", for presentation at the JCI 7' th Annual Conference, 1985.
- 14) 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, American Concrete Institute, Detroit, 1989, 308 pp.
- 15) Kim, J.K., Im, S.T., and Koo, H.S., "Size Effect on the Splitting Tensile Strength of Concrete and Mortar", Report No. CM 89–3, Center for Concrete Materials and Reinforced Concrete Structures, KAIST, Seoul, Korea, 1989.
- 16) Kani, G.N.J., "How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams?", J. of ACI, Vol. 64, No. 3, Mar, 1967, pp. 128–141.
- 17) Taylor, H.P.J., "Shear Strength of Large Beams", proc. of ASCE, Vol. 98, No. ST11, Nov., 1972, pp. 2473–2490
- 18) Iguro, M., Shioya, T., Nojiri, Y., and Akiyama, H., "Experimental Studies on Shear Strength of Large Reinforced Concrete Beams under Uniformly Distributed Load", Proc. of JSCE, No. 345/Vol–1, Aug., 1984(in Japanese).
- 19) Neville, A.M, "A General Relation for Strength of Concrete Specimens of Different Shape and Size", J. of ACI, Vol.63, No.10, Oct., 1966, pp.1095–1110.