

비표준형 실린더 공시체에 대한 콘크리트 압축강도의 크기효과

Size Effect of Compressive Strength of Concrete for the Non-standard Cylindrical Specimens



김진근*

Kim, Jin-Keun



어석홍**

Eo, Seok-Hong



이성태***

Yi, Seong-Tae

요 약

콘크리트 실린더 공시체의 크기에 따른 압축강도의 감소현상은 많은 관심을 받아 왔으나, 지금까지도 이에 대해 제시된 모델식이 없는 실정이다. 기존의 연구결과에 의하면 콘크리트의 강도는 부재의 크기가 증가할 수록 감소하며 그 파괴거동을 규명하기 위해서는 비선형 파괴역학 이론을 적용해야 함을 알 수 있다.

이전의 연구에서 표준형 콘크리트 실린더 공시체의 크기에 따른 압축강도의 변화를 파괴역학 이론에 따라 연구하고 실용적인 예측 모델식을 제시한 바 있다. 이 논문에서는 높이/직경의 비가 2/1이 아닌 비표준형 실린더 공시체를 고려하여 보다 일반적인 실린더 압축강도 예측 모델식을 제시하고자 한다. 이를 위하여 최대골재크기가 미소균열영역에 미치는 영향을 이론적으로 고찰하였으며, 특성길이의 개념을 새로이 도입하여 일반화된 크기효과에 대한 모델식을 제시하였다.

이 연구의 결과는 기존 구조물에서 채취한 다양한 크기의 콘크리트 코어 강도 등을 예측하는데도 매우 실용적으로 사용될 수 있을 것이다.

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과, 교수

** 정회원, 창원대학교 토목공학과, 조교수

*** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과, 박사과정,
한국전력기술(주) 토목구조기술처, 과장

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 4월 30일까지 학회로 보내주
시면 1997년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

Abstract

The reduction phenomena of concrete compressive strength with the size of cylinders have been very interested in, but till now the adequate analysis technique is not fixed. Based on the existing research results, the bigger the member size is, the smaller the strength is. However, the real test results reveal that the reduction rate becomes blunt and there are considerable differences between size effect law and real results.

The purpose of this paper is to propose the model equation which covers the compressive strength of cylinder specimens in case of general high/diameter ratio in terms of the size effect. The effect of maximum aggregate size on the microcrack zone was also studied, and the model equation was proposed by considering the concept of the characteristic length.

These results will also be used to predict the compressive strength of various sized concrete cores sampled from existing structures.

Keywords : size effect law, fracture mechanics, non-standard compressive strength

1. 서 론

공시체의 크기에 따른 압축강도의 감소현상은 1925년 Gonnerman¹⁾에 의해 최초로 증명된 바 있다. 그 후에도 많은 연구자들^{2)~7)}에 의해 이 현상이 실험적으로 뒷받침되었으나, 크기효과의 규명을 위한 실험변수의 선택이 다양하여 일관된 해석이 거의 불가능하였다.

한편, 이론적 측면의 연구(Weibull⁸⁾의 Weakest Link Theory, Tucker⁹⁾의 Strength Summation Theory, Nielson¹⁰⁾의 Surface Theory 등)도 많이 이루어졌는데, 이러한 이론들은 초기균열 진전 후의 상당한 안정적 균열성장과 이로 인한 응력 재분배의 영향을 고려할 수 없는 결점이 있다.

따라서, 이러한 Weibull-Type의 크기효과에 대한 모순을 해결하기 위하여 파괴역학을 적용한 크기효과에 관한 연구가 많이 시도되었으며 지금까지 이 분야에 대한 연구실적은 상당한 수준에 이르렀다. 현재에는 구조물의 해석 및 설계에 이들을 적용하는데 더욱 관심이 집중되고 있는 실정이다.

참고문헌^{11,12)}에서 콘크리트 실린더 공시체의 크기에 따른 압축강도의 변화를 연구하고 모델식을 제시한 바 있다. 그러나, 이는 높이/직경의 비가 2/1인 표준형 실린더 공시체에 한해 적용 가능한 이론적 한계점을 안고 있다. 따라서, 본 연구에서는 높이/직경의

비가 2/1이 아닌 비표준형 실린더 공시체의 파괴특성을 고려하여 실린더 공시체의 압축강도를 예측하기 위한 일반화된 모델식을 제시하고자 한다. 이를 위해 최대골재크기가 콘크리트의 주균열부에 형성되는 미소균열영역에 미치는 영향을 이론적으로 검토하였으며, 특성길이의 개념을 새로이 도입하여 일반화된 크기효과 모델식을 유도하였다. 이를 토대로 참고문헌으로부터 얻은 기존의 실험치를 이용하여 회귀분석을 수행하고 실용적인 예측 모델식을 제시하였으며 통계해석을 통해 그 타당성을 검증하였다.

한편, 기존 구조물에서 채취한 코어(core)의 길이/직경 비에 따른 강도를 추정하기 위해 ASTM C42-87¹³⁾에서 제시하는 강도보정계수(strength correction factor)를 주로 사용하고 있는데, 본 연구에서 제시된 모델식을 ASTM의 요구치와 비교/검토하는 작업을 통하여 그 실용성을 검증하였다.

2. 크기효과에 관한 이론적 연구

2.1 파괴진행영역의 크기에 미치는 최대골재크기의 영향

Z. P. Bazant는 콘크리트의 균열 진전시 에너지 평형 개념을 고려하여 기하학적으로 유사한 공시체

에 대하여 식(1)에 주어진 이른바 크기효과 법칙 (size effect law)¹⁰⁾을 유도하였다.

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

여기서, $\sigma_N = P/bd$ = 공칭파괴강도, P = 최대하중, b = 부재의 두께 또는 폭, d = 부재의 특성길이, f'_c = 인장강도, d_a = 최대골재크기, B, λ_0 = 실험상수를 각각 나타낸다. 위의 식(1)을 유도하는 데에는 다음과 같은 두가지 가정을 전제로 하였다. 즉, 파괴시의 총에너지 이완량(total energy release)은, (1)균열길이의 함수이고 (2)파괴진행영역(fracture process zone)의 면적 $n d_a$ 에 비례한다는 것이다.

여기서, 가정(2)는 기존의 실험결과들과 비교할 때 그 타당성이 의문시되며, 오히려 d_a 보다는 d_a^m (m

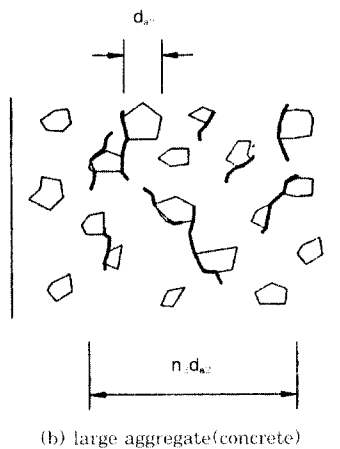
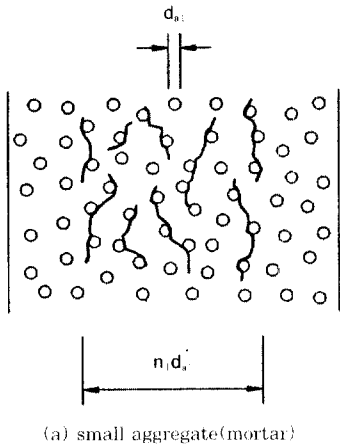


Fig. 1 Crack patterns for two different aggregate sizes

은 1보다 작은 상수)에 비례한다고 보는 것이 타당할 것으로 판단된다. 왜냐하면, 균열폭은 최대골재크기 d_a 에 관계되는 것이 사실이나 콘크리트에서 균열이 발생할 때 한 곳에 변형이 집중되므로 골재크기가 커진다고 해서 균열폭의 확대량이 정확히 비례하는 것으로 기대할 수 없기 때문이다.

이를 이론적으로 고찰하기 위하여 Fig. 1과 같이 두가지 골재의 크기에 대한 균열진행 양상을 살펴보기로 한다.

먼저, 모르타르에서와 같이 골재의 크기가 작을 때는 미세균열영역의 폭이 최대골재크기의 수배가 되지만 사용되는 골재의 크기가 비교적 큰 콘크리트에서는 최대골재크기에 대한 미세균열영역의 폭의 비가 작게 됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2에서와 같이 $n = n(d_a) = \tilde{n} d_a^p$ 를 도입했으며 상수인 \tilde{n} 와 $-1 < p < 0$ 의 범위에 속하는 p 의 값은 실험이나 이론적 접근을 통하여 더욱 자세히 평가할 수 있다. 물론, n 은 엄격히 말해서 콘크리트의 압축강도 (f'_c), 하중의 형태 혹은 최대골재크기를 모두 포함하는 함수가 될 수도 있다.

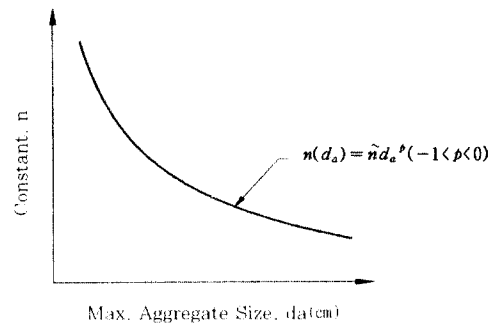


Fig. 2 Illustration of the function $n(d_a) = \tilde{n} d_a^p (-1 < p < 0)$

그러나, 본 연구에서는 최대골재크기에 주안점을 두었으며 결과적으로 미세균열영역의 폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\tilde{n} d_a^p) d_a = \tilde{n} d_a^m, \text{ 여기서 } 0 < m < 1 \quad (2)$$

미세균열영역에 대한 최대골재크기의 영향을 고려하여 새로운 크기효과 법칙을 유도하기 위하여 다음과 같은 두 개의 무차원 변수 θ_1 과 θ_2 를 도입한다.

$$\theta_1 = \frac{a}{d}; \quad \theta_2 = \frac{\tilde{n} d_a^m a}{ad} = \frac{\tilde{n} d_a^m}{d} \quad (3)$$

여기서, a 와 d 는 파괴영역의 길이와 부재의 특성 길이이며, θ_1 과 θ_2 는 무차원량으로 각각 균열대의 길이 및 균열대의 면적을 나타낸다. 또한, 식(3)에서 $\tilde{n}d_a^m$ 의 차원은 {L}인데, 이것은 $\tilde{n}d_a^m = n(d_a)d_a$ 관계에서 알 수 있듯이 $n(d_a)$ 가 d_a 의 함수로부터 계산되는 임의의 상수이기 때문이다.

총 변형에너지 이완량(total strain energy release) U 는 무차원 함수로 나타낼 수 있는데, 여기서 U 가 구조물의 체적인 d^2b 와 에너지밀도 $\sigma_N^2/2E_c$ 에 비례하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U = \frac{1}{2E_c} \sigma_N^2 b d^2 F(\theta_1, \theta_2, \xi_i) \\ = \frac{1}{2E_c} \left(\frac{P}{bd}\right)^2 b d^2 F(\theta_1, \theta_2, \xi_i) \quad (4)$$

여기서, $\xi_i = \frac{l_i}{d}$ (l_i 는 기하학적 크기, 예, $l_1 = a$)는 특성길이 d 에 대한 구조물의 상대적인 크기를 의미하며 E_c 는 콘크리트의 탄성계수를 나타낸다. 함수 F 는 실제 구조요소의 기하학적 형태와 경계조건에 의존하는데 크기 d 와는 무관하다. ξ_i 의 정확한 정의와 F 의 ξ_i 에 대한 의존성은 구조물의 기하학적 형태에 의존한다.

균열대 이론^[10]으로 부터, 균열이 전파되는 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial a} = \frac{1}{2E_c} \sigma_N^2 b d^2 \frac{\partial F}{\partial \theta_1} \frac{1}{d} = G_F b \quad (5)$$

결과적으로 강도 σ_N 에 관한 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\sigma_N = \frac{\sqrt{2G_F E_c}}{\sqrt{\frac{\partial F(\theta_1, \theta_2, \xi_i)}{\partial \theta_1}}} d \\ = \frac{\sqrt{w_c \left(1 - \frac{E_c}{E_t}\right) f_i'}}{\sqrt{\frac{\partial F(\theta_1, \theta_2, \xi_i)}{\partial \theta_1}}} d \quad (6)$$

만약, $d/\tilde{n}d_a^m \rightarrow \infty$ 이면 $\theta_2 \rightarrow 0$ 이 되어 식(6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_N = \frac{\left[w_c \left(1 - \frac{E_c}{E_t}\right)\right]^{1/2} f_i'}{\left[F_1 d + F_2 \tilde{n}d_a^m + F_3 \frac{(\tilde{n}d_a^m)^2}{d} + F_4 \frac{(\tilde{n}d_a^m)^3}{d^2} + \dots\right]^{1/2}} \quad (7)$$

여기서, F_1, F_2, F_3 과 F_4 는 θ_1 과 ξ_i 의 함수로서 구조물의 크기와는 무관한 함수이다. 만약, 위의 식(7)

중 고차의 항을 무시한다면 다음의 식으로 바꿀 수 있다.

$$\sigma_N = \frac{\left[\frac{\tilde{n}d_a^m}{F_2 \tilde{n}d_a^m} \left(1 - \frac{E_c}{E_t}\right)\right]^{1/2} f_i'}{\left[1 + \frac{F_1 d}{F_2 \tilde{n}d_a^m}\right]^{1/2}} \\ = \frac{B f_i'}{\sqrt{1 + \frac{d}{\lambda_o d_a^m}}} \quad (8)$$

여기서, $B = \sqrt{(1 - E_c/E_t)/F_2}$, $\lambda_o = \tilde{n}F_2/F_1$ 이다.

이제, 크기와 무관한 강도 $\sigma_c (= \alpha_1 f_i')$ 를 식(8)에 도입하면 파괴진행영역에서의 최대골재크기의 효과를 고려할 수 있는 다음과 같은 새로운 식이 얻어진다.^[11,12]

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{B f_i'}{1 + \frac{d}{\lambda_o d_a^m}}} + \alpha_1 f_i' \quad (9)$$

상기 식에서 상수 B, λ_o, m 및 α_1 을 얻기 위해서는 보다 정확한 해석절차가 필요하지만, 이 작업은 사실상 불가능하므로 실험결과에 대한 회귀분석으로부터 이 값들을 결정할 수 있다.

2.2 비표준형 실린더 공시체에 대한 특성길이 개념의 도입

표준형 실린더 공시체와는 다른 h/d 값을 갖는 비표준형 공시체에 기존의 크기효과 식을 적용하기 위해서는 미소균열영역의 폭과 주균열영역을 제공하는 특성길이를 반영하기 위해 수정작업이 이루어져야 한다. Fig. 3은 $h_1 - \alpha d_1$ 로 표현되는 특성길이를 나타내고 있다. 이 특성길이는 특성길이의 비인 $(h_1 - \alpha d_1)/(h_2 - \alpha d_2)$, h_1/h_2 및 d_1/d_2 이 같은 값을 가짐으로 인해 기하학적으로 유사할 경우, h_1 나 d_1 로도 나타낼 수 있다. 그러나 Fig. 3에 나타낸 것처럼 공시체가 같은 직경 ($d_1 = d_2$)을 가질 경우, $(h_1 - \alpha d_1)/(h_2 - \alpha d_2)$ 는 h_1/h_2 와 같지 않다. 바꾸어 말하면, 크기가 공시체 ABCD의 2배일 때의 크기효과를 나타내는 공시체는 $h_2 = 2h_1$ 을 만족하는 $A''B''C''D''$ 가 아니라 $h_2 - \alpha d_2 = 2(h_1 - \alpha d_1)$ 과 $h_2' - \alpha d_2 = 2(h_1 - \alpha d_1)$ 를 만족하는 $A'B'C'D'$ 와 $A''B''C''D''$ 이다. 이것은 미소균열영역과 특성길이의 영향만이 크기효과에 중요 요소로 고려되었다는 조건에서 얻어진 결과이다.

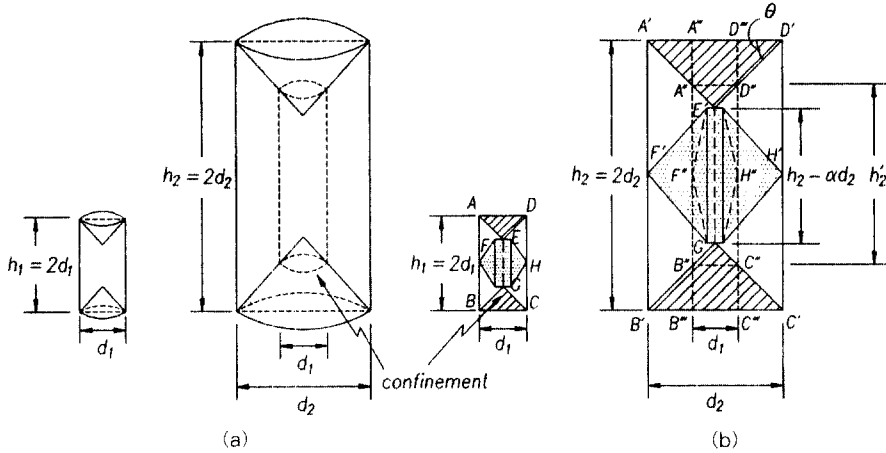


Fig. 3 Illustration of size effect for non-standard uniaxial compressive test specimen with $h/d \neq 2$

위 그림에서 각 공시체의 정 가운데에 위치한 사각형은 균열폭의 띠를 나타낸다.

한편, 축방향 압축강도에서 단부구속조건(그림의 빗금친 부분)과 에너지이완 영역(상기 그림에서 점으로 표시된 부분)도 크기효과에 영향을 미친다. 만일 구속효과와 에너지이완 영역을 고려하지 않는다면 공시체 $A'B'C'D'$ 와 $A''B''C''D''$ 는 같은 크기효과를 보일 것이다. 면적 $A'E'D'$ 와 $A''E''D''$ 는 공시체 $A'B'C'D'$ 와 $A''B''C''D''$ 의 구속효과를 각각 나타낸다. 구속과 응력은 체적인 $(d_1/d_2)^3$ 와 면적인 $(d_1/d_2)^2$ 에 각각 연관되기 때문에 공시체 $A'B'C'D'$ 는 $A''B''C''D''$ 보다 더 큰 하중저항 능력을 가지고 있다. 그러나 만일 에너지이완 영역이 공시체에서 고려된다면 $A'B'C'D'$ 는 $A''B''C''D''$ 보다 단위체적당 더 많은 에너지 즉, 단위면적당 더 적은 하중저항 능력을 가지게 되는데 이는 단위균열이 생성되기 위해서는 같은 에너지가 요구되기 때문이다. h/d 의 값이 크면 구속효과의 정도를 결정하는 θ 의 값이 작아지기 때문에 이 비도 크기효과에 중요변수로 선정되었다. 결과적으로, 축방향 압축강도의 크기효과에 단부구속과 에너지이완 영역의 효과는 서로 상쇄하는 방향으로 작용한다는 사실을 알 수 있다. 그러나 이들을 크기효과식의 유도에서 고려하기는 어려우며 실용적인 범위내에서 미소균열영역의 폭과 특성길이 보다 그 영향이 적다. 한편, 최대골재의 크기가 미소균열영역의 크기에 미치는 영향은 미소하다고 할 수 있다. 따라서, 앞에서 유도한 식(9)에서 f' 를 압축강도 f_c 로 대체함으로써

다음과 같은 크기효과 식을 얻을 수 있다. 여기서, η 는 σ_c/f_c' 로 정의되는 크기효과계수(strength size factor)를 나타낸다.

$$\eta = \sigma_c/f_c' = \frac{B}{\sqrt{1 + \lambda_1(h - \alpha_2 d)}} + \alpha_1$$

$$= \frac{B}{\sqrt{1 + \lambda_1 d(h/d - \alpha_2)}} + \alpha_1 \quad (10)$$

최대골재크기를 고려한다면, 2.1절에서 살펴본 내용에 의해 상기의 식을 다음 식으로 바꿀 수 있다.

$$\eta = \sigma_c/f_c' = \frac{B}{\sqrt{1 + \frac{d}{\lambda_0 d_a^m} (h/d - \alpha_2)}} + \alpha_1 \quad (11)$$

상기 식의 적합성은 문헌으로부터 얻은 실험자료에 통계해석을 수행하여 입증할 수 있는데, 이는 다음 절에서 다루고자 한다. 또한, 위의 식(10)과 (11)을 사용할 때 Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 $h \geq \alpha_2 d$ 조건이 만족해야 된다는 사실에 주의해야 한다.

$h < \alpha_2 d$ 인 경우는 구속영역이 공시체의 범위를 넘어서기 때문에 균열에 의해서가 아니라 부숴짐(crushing)에 의해 파괴가 진행되기 때문이다.

3. 기존의 실험결과에 대한 회귀분석

3.1 최대골재크기의 영향을 무시한 경우

임의의 실린더 공시체에 대해 적용 가능한 일반화된 압축강도 예측 모델을 얻기 위해, 총 678개의

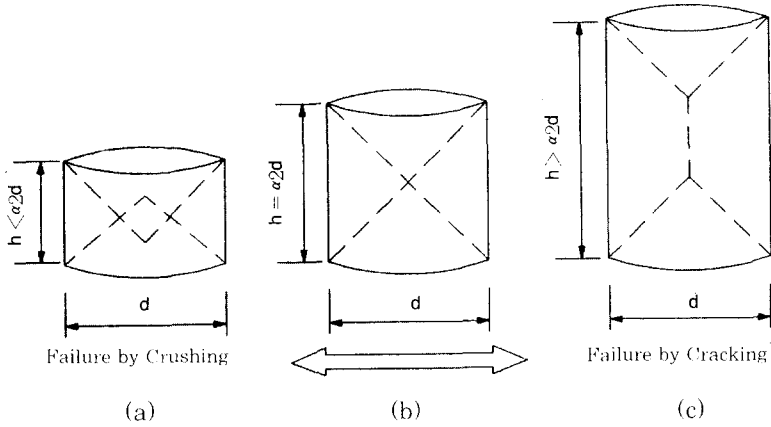
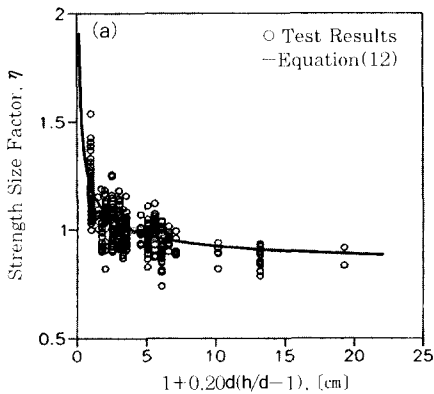


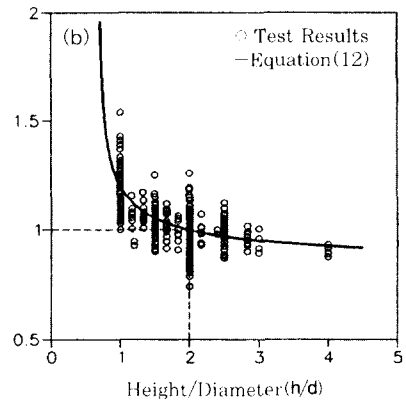
Fig. 4 Failure modes according to the specimen geometry

자료(비표준형 실린더에 대해 456개와 표준형 실린더에 대해 222개)에 대한 회귀분석을 수행하였다. 식(12)는 해석결과로 얻은 수식이며 Fig. 5(a)에 도시하였는데, 여기에서 실선은 $1+0.20d(h/d-1)$ 와 η 의 관계를 나타낸다. 그림으로부터 많은 자료가 어느 영역에 집중적으로 모여 있음을 알 수 있는데 이는 실험에 사용된 공시체의 직경이 7.5, 10.0 및 15.0cm인 경우가 거의 대부분임을 보여주고 있다. 또한, h/d 의 값이 1.0에 가까울수록 자료의 흩어짐이 크짐을 알 수 있는데 이는 단부구속 혹은 에너지 이완영역의 효과 때문인 것으로 판단된다.

$$\eta = \sigma_c / f'_c = \frac{0.40}{\sqrt{1+0.20d(h/d-1)}} + 0.80 \quad (12)$$



(a) Relationship between $1+0.20d(h/d-1)$ and strength size factors



(b) Relationship between height/diameter and strength size factors

Fig. 5 Strength size factors

여기서, σ_c 와 f'_c 는 각각 임의의 공시체와 표준공시체($\phi 150 \times 300\text{mm}$)에 대한 압축 강도로서 그 단위는 kg/cm^2 이며 d 의 단위는 cm이다.

그림에서 h/d 의 값이 1.0보다 작은 경우에, η 가 무한대로 발산함을 나타내고 있으나 식(12)가 가진 제한조건을 고려하면 이 구간에 해당하는 곡선은 의미가 없을 수 있다. 따라서, $h \geq \alpha d$ 조건이 만족되는 공시체의 경우에 d, h 및 표준공시체의 압축강도를 이 식에 대입시키면 그 크기의 공시체에 대한 압축강도를 얻을 수 있다. 이 식에 의하면 만약 가압판의 횡구속효과가 없는 경우 즉, h/d 의 비가 매우 큰 경우의 실제 콘크리트 압축강도는 실험실에서 얻은 값의 약 0.8배임을 알 수 있다. 또한, Fig. 5(b)에는 해석에서 사용된 h/d 의 비

와 식(12)로부터 구한 η 의 관계가 설명되어 있다. 여기서, h/d 가 2인 경우, η 는 정확하게 1.0이 되며 이 비가 감소할 수록 η 는 지수함수로 증가함을 알 수 있다.

위의 모델식(12)와 실험자료를 직접 비교하기 위한 통계해석 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 그림에서의 가로축과 세로축은 각각 식(12)에 의해 계산된 값과 실험 결과에서 얻은 값을 나타낸다. 분산은 14.45였으며 상관관계수는 0.991로 실험치와 계산치 사이에 상관관계가 매우 높으며 모델식이 실험자료들을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 그림에서 가운데 실선은 $Y=0.97X+2.92$ 의 직선식을, 상/하의 실선은 표준편차 구간을 각각 나타내는데 계산된 값과 실험자료 사이에 직선관계가 성립하며 신뢰도가 매우 높음을 알 수 있다.

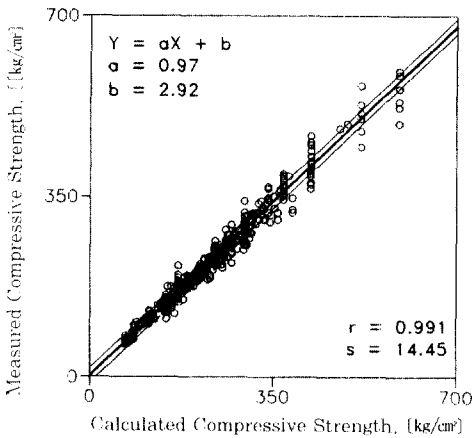


Fig. 6 Comparison of the measured and calculated values of concrete strength

대부분의 실험자료는 실험기술, 장비 및 품질관리 등이 아주 열악한 과거 50년 이전에 수행되었기 때문에 이들의 신빙성에는 상당한 문제점이 있음을 알 수 있었다. 그리고 실제로 해당 보고서를 살펴 보면, 실험 조건이 상세히 기술되어 있지 않거나 이 조건들이 서로 상이한 경우가 대부분이었다. 그러나, 본 논문에서는 모델식을 얻기 위해 새로운 이론을 전개했으며 기존의 실험자료에 통계해석을 수행하여 우수한 결과를 얻었음을 알 수 있다.

3.2 최대골재크기의 영향을 고려한 경우

최대골재크기를 고려했을 경우에도 공시체의 크기

에 따른 압축강도의 감소현상을 나타내는 수식을 제안하기 위해 상기의 식(11)과 실험자료를 이용하여 통계해석을 수행하였다. 그 결과 d_n 의 승수로 0.00055의 값을 얻었는데, 이 경우 $d_n^{0.00055}$ 의 값은 1.0에 근접하게 된다. 따라서, 이를 이용하여 식(11)을 정리하면, d_n 항을 무시할 수 있으며 최대골재크기를 고려했을 경우에도 식(12)를 사용할 수 있음을 알 수 있다. 이는 실험에 사용된 대부분의 최대골재크기가 2.54cm(1inch)였으며, 그 범위도 1.27cm(0.5inch)에서 5.08cm(2inch)로 크지 않았기 때문으로 사료된다.

3.3 ASTM 요건과의 비교

구조물의 비파괴 검사 시에는 채취한 코아의 길이/직경 비에 따른 강도를 추정하기 위하여 ASTM C42-87에서 제시하는 강도보정 계수를 사용하고 있다. 여기서는 Kesler¹⁹⁾, Murdock & Kesler²⁰⁾ 및 Gonnerman¹¹⁾의 실험 자료에 대해 논문에서 제시된 식과 이 규준에서 정하는 바를 상호 비교/검토하였다.

Fig. 7에서 굵은 실선은 식(12)에 따른 결과를 가는 실선은 ASTM에서 요구하는 자료를 이용하여 구한 결과를 각각 나타낸다. 여기에 사용된 자료는 각 연구자의 보고서로부터 임의로 발췌한 경우인데, 식(12)가 보다 실험치에 가까운 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히, 길이/직경의 비가 ASTM의 제한치인 1.94를 넘어서는 경우에도 식(12)를 이용하면 매우 정확한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림의 세로축은 강도보정계수를 나타내는데 이는 앞에서 정의된 크기효과계수의 역수이다.

4. 결 론

이상에서 비선형 파괴역학에 근거한 콘크리트의 파괴거동으로부터 비표준형 실린더 공시체의 크기효과에 대한 모델식을 유도하였으며, 이를 검증하기 위하여 일축 압축강도에 대한 기존의 많은 실험자료에 대한 회귀분석을 수행하여 실용적인 예측 모델식을 제시하였다. 본 연구에서 도출된 결론을 살펴보면 다음과 같다.

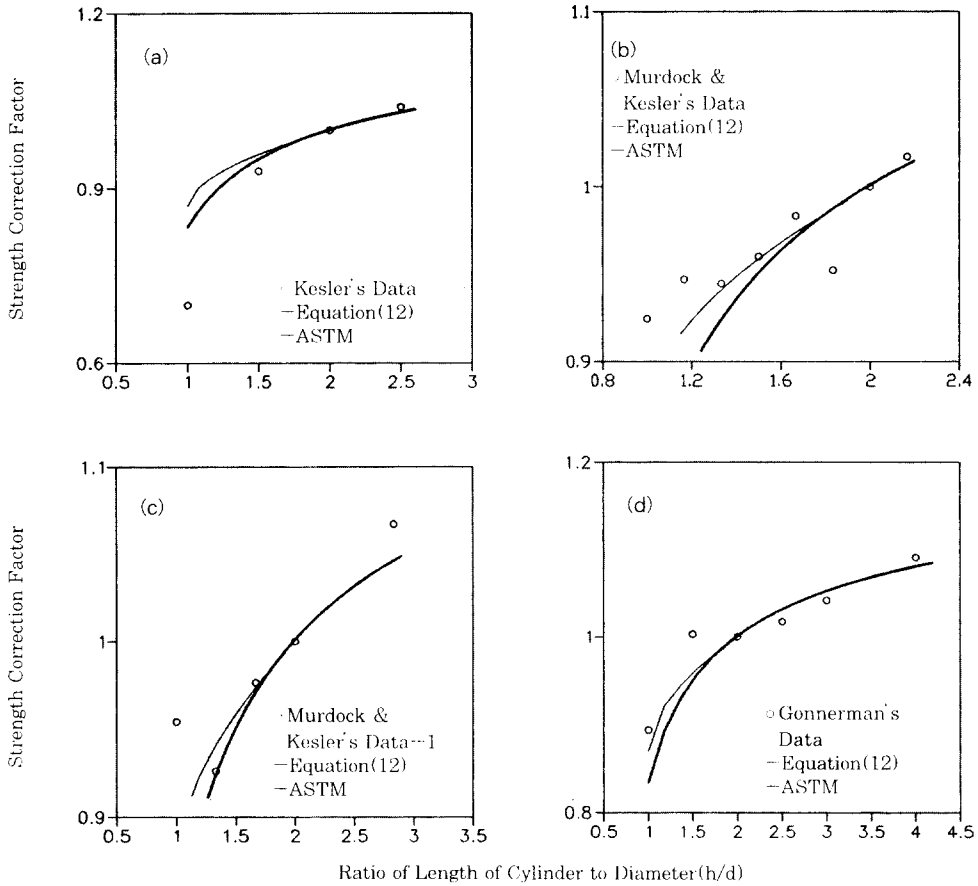


Fig. 7 Comparison of strength correction factors based on ASTM C42-87 and Equation (12)

1) 비선형 파괴역학에 근거하여 제시된 크기효과 모델식을 사용함으로써, 콘크리트 구조물의 크기 증가에 따른 강도감소 효과를 합리적으로 표현하였다.

2) 콘크리트의 압축강도가 70~500kg/cm²(1000~7000psi), 공시체의 직경이 3.81~91.44cm(1.5~36inch)의 범위에 드는 경우, 임의의 높이/직경의 비에 대해 실린더 공시체의 크기효과를 고려하여 압축강도를 예측할 수 있는 다음의 모델식을 제시하였다.

$$\eta = \sigma_c / f_c' = \frac{0.40}{\sqrt{1 + 0.20d(h/d - 1)}} + 0.80$$

3) 최대골재크기가 압축강도에 대한 크기효과에 미치는 영향은 미소한 것으로 나타났다. 이는 실용적인 범위내에서 특성길이의 영향에 비하여 최대골재

의 크기가 미세균열 영역의 크기에 미치는 영향을 무시할 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

4) 제시된 식에 의하면 콘크리트의 실제 압축강도는 가압판의 횡구속 효과를 없앨 경우, 표준공시체의 실험실 압축강도의 약 80%가 됨을 알 수 있었다.

5) ASTM에서 제시한 강도보정 계수와 상기의 식에서 구한 계수를 서로 비교한 결과, 상기 식에서 구한 값이 실제 실험치와 더 잘 일치하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 한국과학재단(STRESS 연구센터)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Gonnerman, H.F., "Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete", ASTM Proc., Vol.25, 1925, pp.237-250.
2. Johnson, R.F., "Strength Tests on Scaled-down Concrete Suitable for Model", Magazine Concrete Research, Vol.14, 1962, pp.47-53.
3. Blanks, R.F., and McNamara, "Mass Concrete Tests in Large Cylinders", J. of ACI, Presentation at the 31th Annual Convention, New York, Feb., 1935, pp.280-303.
4. Gyengo, T., "Effect of Type of Test Specimen and Gradation of Aggregate on Compressive Strength of Concrete", J. of ACI, Vol.33, 1938, pp.269-282.
5. Neville, A.M., "The Influence of Size and Concrete Tests Cube on Mean Strength and Standard Deviation", Magazine Concrete Research, Vol.7, 1955, pp.121-132.
6. 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.
7. Kuczynski, "La Resistance du Beton Etudiee sur des Eporouvettes de Diffentes Formes et de Diveres Dimension", RILEM Bulletin, No.8, 1960, pp.77-95.
8. Weibull, W., "A Statistical Theory of the Strength of Materials", Royal Swedish Proc., No.151-152, 1939.
9. Tucker, J., "Statistical Theory of the Effect of Dimensions and Method of Loading on the Modulus of Rupture of Beams", ASTM Proc., Vol.41, 1941, pp.1072-1088.
10. Nielson, K.E.C., "Effect of Various Factors on the Flexural Strength of Concrete Test Beams", Magazine Concrete Research, Vol.15, 1954, pp.105-114.
11. 김진근, 어석홍, 조수연, 문영호, "실린더 크기에 따른 콘크리트 압축강도의 변화", 대한건축학회, 제3권6호 통권14호, 1987, pp.225-234.
12. Kim, J.K. and Eo, S.H., "Size Effect in Concrete Specimens with Dissimilar Initial Cracks", Magazine Concrete Research, Vol.42(153), 1990, pp.233-238.
13. Annual Book of ASTM Standards, "Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete", Designation : C42-87, 1987, pp.27-29.
14. Bazant, Z.P., "Size Effect in Blunt Fracture : Concrete, Rock, Metal", J. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.110, pp.518-535.
15. Bazant, Z.P., and Oh, B.H., "Crack Band Theory for Fracture of Concrete", Materials and Structures, Vol.16, No.93, 1984, pp.155-177.
16. Wittmann, F.H.(Editor), "Fracture Mechanics of Concrete", Elsevier, Netherlands, 1983, 680pp.
17. 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.
18. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, "boulder Canyon Project, Final Report, Part VII Cement and Concrete Investigations, Bulletin 4, Mass Concrete Investigation", 1965.
19. Kesler C.E., "Effect of Length to Diameter Ratio on Compressive Strength-An ASTM Cooperative Investigation", Proceeding, ASTM, Vol.59, 1959, pp.1216-1229.
20. Murdock, J.W. and Kesler C.E., "Effect of Length to Diameter Ratio of Specimen on the Apparent Compressive Strength of Concrete", ASTM Bulletin, No.221, 1957, pp.68-73.

(접수일자 : 1996. 10. 14)