

# 강도수준에 따른 콘크리트 압축강도의 크기효과에 관한 연구

## A Study on Size Effect for Compressive Strength of Concrete considering Strength Level

김희성\*  
Kim, Hee-Sung

진치섭\*\*  
Jin, Chi-Sub

어석홍\*\*\*  
Eo, Seok-Hong

### ABSTRACT

The reduction phenomena of the compressive strength of concrete with respect to the size of specimens have been extensively investigated. However, adequate analysis technique have not been developed until now. Existing researches have shown that the larger member size, the smaller the strength. This indicated the necessity of nonlinear fracture mechanics theory in order to analyze the fracture behaviors of concrete. There are some models that predict the size effect of compressive strength of cylindrical specimens. These equations, however, are developed not considering the difference of fracturing mechanism which depends on both geometry of specimen and the strength level of concrete.

In this paper, a model to predict compressive strength of cylindrical concrete specimens with respect to diameters, h/d ratios, and the strength level of concrete, is suggested. For this purpose, theoretical and statistical analyses are conducted. Experimental constants used in the model of new size effect are formulated in terms of strength levels of concrete based on existing experimental data.

### 1. 서론

콘크리트는 압축강도로써 그 특성을 특징지을 수 있다. 각종 시방서에도 대부분 콘크리트의 압축강도인 설계기준강도가 모든 강도산정의 척도가 되어 있다. 이에 따라 각국의 시방서에는 콘크리트의 압축강도시험에 사용할 수 있는 시편의 형상 및 크기를 규정하고 있으며, 일반 공시체에 대해서는 기준 공시체로 보정하도록 규정하고 있다. 지금까지 수행된 수많은 연구에 의하면 동일한 강도수준에 대해서도 시편의 크기 및 형상에 따라 강도특성 및 파괴특성이 다르게 나타나는 것으로 알려졌다. 특히, 고강도 콘크리트(HSC)에서는 그 차이가 보통강도 콘크리트(NSC)보다 커지는 경향이 있어 압축강도 예측시 적용제한조건 및 강도수준을 구분하여 정의할 필요가 있다. 시편크기와 형상에 따른 보정을 위하여 제시되어 있는 환산표와 그래프는 경험적으로 구한 실험결과가 대부분이며 강도수준과 공시체 크기 및 형상, 굵은골재최대치수의 다양성에 따른 정확한 이론적 확립이 부족한 실정이다.

\*정회원, 부산대학교 생산기술연구소 전임연구원

\*\*정회원, 부산대학교 토목공학과 교수

\*\*\*정회원, 창원대학교 토목공학과 부교수

따라서, 본 연구에서는 콘크리트의 가장 기본적인 재료특성인 압축강도에 대한 크기효과를 강도수준을 고려하여 합리적인 관계식으로 정립하고자 한다. 이를 위하여 많은 실험데이터를 바탕으로 지금까지 콘크리트에 적용되어 왔던 강도보정계수의 비교 및 강도수준에 따른 압축강도비를 구하고 각국 지방서 및 여러 연구자들이 제시하고 있는 강도보정계수를 검토하여 콘크리트의 압축강도를 예측하기 위한 일반화된 크기효과 관계식을 제시하고자 한다.

## 2. 콘크리트 압축강도의 크기효과법칙

시편의 크기에 따른 압축강도의 변화현상은 1925년 Gonnerman<sup>(1)</sup>에 의해 최초로 증명되었고, 그 후에도 많은 연구자들에 의해 이 현상이 실험적으로 뒷받침되었으나, 실험변수의 선택이 다양하여 크기효과를 규명하기 위한 일관된 해석이 거의 불가능하였다. 한편, 이론적 측면의 연구도 많이 이루어져 있으나, 일반적으로 사용하기에는 문제점이 있다. 따라서, 크기효과에 대한 모순을 해결하기 위하여 파괴역학을 적용한 크기효과에 관한 연구가 많이 시도되어 이 분야에 대한 연구실적은 상당한 수준에 이르렀다.

김진근 등<sup>(2,3)</sup>은 Bazant<sup>(4)</sup>에 의해 제안된 크기효과법칙(Size Effect Law)을 표준형 및 비표준형 원주형 공시체의 압축강도에 관한 관계식으로 수정하여 식(1) 및 (2)와 같은 관계식을 제안하였다. 여기서,  $\sigma_c$ 는 임의 직경  $d$ 인 원주형 공시체의 압축강도,  $f_c'$ 은 기준이 되는 크기의 표준형 원주형 공시체(직경 15 cm, 높이 30 cm)의 압축강도,  $B$ ,  $\lambda_1$ ,  $\alpha_1$ 은 실험상수를 각각 나타낸다.

$$\sigma_c = \frac{Bf_c'}{\sqrt{1 + \lambda_1 d}} + \alpha_1 f_c' \quad (1) \quad \sigma_c = \frac{0.4f_c'}{\sqrt{1 + 0.2d(h/d - 1.0)}} + 0.8f_c' \quad (2)$$

비표준형 공시체에 대해서 많은 연구자들이 관계식을 제시하고 있고, 각국 지방서에도  $h/d$ 에 따른 강도보정계수를 제시하고 있다. 小阪<sup>(5)</sup>등은 압축강도 수준에 따라 강도보정계수를 달리 설정해야 함을 실험으로 나타내고 식(3)과 같은 보정계수식을 제안하였다.  $\eta = \sigma_c/f_c'$ ,  $A = 0.45 + 0.00137f_c'$ ,  $B = 1.07 - 0.00297f_c'$ ,  $C = 0.04 + 0.00040f_c'$ 이며,  $f_c'$ 은 MPa 단위이다. Chung<sup>(6)</sup>은 파피시 콘크리트의 Poisson비를 고려하여 식(4)와 같은 보정계수식을 제안하였다. 野口<sup>(7)</sup>등도 역시 압축강도 수준을 고려하여 식(5)와 같은 보정계수식을 제안하였다.  $k = 4.84/f_c' + 0.165$ 이며  $f_c'$ 은 MPa 단위이다. Tokyay<sup>(8)</sup> 등은 실험치를 회귀분석하여 간단한 지수함수형태로 압축강도비 관계식을 식(6)과 같이 제안하였다.

$$\eta = A + B(d/h) + C(d/h)^2 \quad (3) \quad \eta = 1 + 0.8[1 - 0.5(h/d)]^2 \quad (4)$$

$$\eta = k[\ln(2d/h)]^2 + 1 \quad (5) \quad \eta = 1.0135(h/d)^{-0.0157} \quad (6)$$

지금까지 여러 학자들의 연구결과에 의하면 압축강도의 크기효과는 공시체의 직경( $d$ ) 및  $h/d$  뿐만 아니라  $f_c'$  수준에도 중요한 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 이런 관점에서 기존의 제안식을 살펴보면 식(4)와 (6)은  $h/d$ 의 영향만 고려할 수 있고, 식(2)는  $d$  및  $h/d$ 의 영향은 고려할 수 있으나  $f_c'$ 을 고려할 수 없으며  $h/d=1.0$ 인 경우에는 시편의 크기에 관계없이 압축강도비가 1.2가 된다. 식(3)과 (5)는  $h/d$  및  $f_c'$ 을 고려할 수 있으나  $d$ 의 변화에 따른 크기효과를 고려할 수 없는 등  $d$ 와  $h/d$ ,  $f_c'$ 을 모두 고려할 수 있는 관계식이 아직 제안되지 않고 있다. 따라서, 원주형 공시체의  $d$ 와  $h/d$  및  $f_c'$ 을 동시에 고려한 크기효과 관계식이 필요하며 이에 대한 식을 다음 장에서 제시하고자 한다.

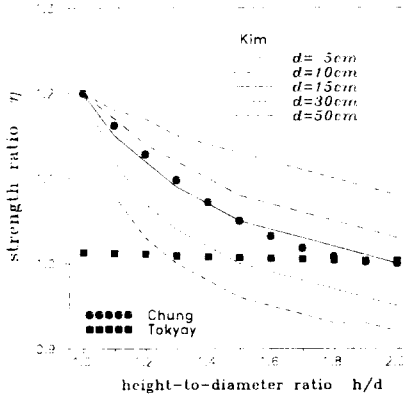


그림 1 강도수준을 고려하지 않은 직경에 대한 높이에 따른 압축강도비

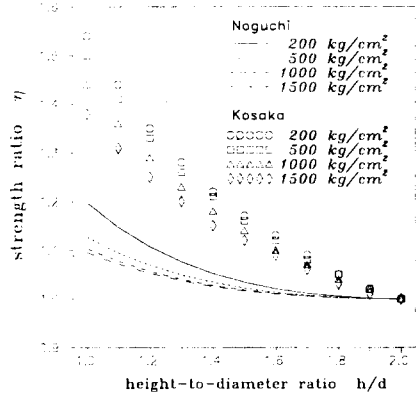


그림 2 강도수준을 고려한 직경에 대한 높이에 따른 압축강도비

### 3. 원주형 공시체의 압축강도에 대한 크기효과식 제안

파괴가 일어날 때 소요되는 총 변형률 에너지 이완량  $U$ 의 정식화 과정에서 원주형 공시체의 형상과 미세균열영역에 대한 굵은골재최대치수의 영향을 고려하여 새로운 크기효과법칙을 유도한다. 원주형 공시체에 적합한 크기효과식을 유도하기 위하여 식(7)과 같은 두개의 무차원변수  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 를 도입한다. 식(7)에서  $a$ 는 파괴영역의 길이이며,  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 는 무차원량으로 각각 균열대의 길이와 면적을 나타낸다.  $U$ 는 구조물의 체적  $\pi d^2 h/4$ 와 에너지밀도  $\sigma_c^2/2E_c$ 에 비례하므로 식(8)과 같이 나타낼 수 있다. 식(8)에서  $E_c$ 는 콘크리트의 탄성계수를 나타낸다. 함수  $f$ 는 원주형 공시체의 기하학적 형태와 경계조건에 의존하며,  $\xi_i$ 는 공시체의 직경에 대한 구조물의 상대적인 크기를 의미한다.

$$\theta_1 = \frac{a}{d} ; \theta_2 = \frac{\tilde{n}d_a^m a}{d^2} \quad (7) \quad U = \frac{\sigma_c^2}{2E_c} d^2 h \cdot f(\theta_1, \theta_2, \xi_i) \quad (8)$$

균열밴드이론에 의해 균열이 전파되는 조건인 식(9)를 도입하여 압축강도에 관한 식을 정리하고, 크기와 무관한 강도  $\alpha_1 f'_c$ 를 도입하면 FPZ에서의 최대골재크기의 효과를 고려할 수 있는 원주형 공시체의 압축강도에 관한 새로운 크기효과식이 식(10)과 같이 구해진다.

$$\frac{\partial U}{\partial a} = \frac{\sigma_c^2}{2E_c} d^2 h \frac{\partial f}{\partial a} = G_F d \quad (9)$$

한편, 실험에 사용된 대부분의 최대골재크기는 9.5~50mm로 크지않고 최대골재크기가 공시체 강도감소 현상에 미치는 영향은 크기 및 형상에 비하여 미소하다는 연구결과<sup>(3)</sup>에 의하여 최대골재크기의 영향을 무시하고 크기효과 관계식을 간단하게 정리하면 식(11)과 같다. 여기서,  $\lambda_1 = (\lambda_0 d_a^m)^{-1}$ 이다.

$$\sigma_c = \frac{B' f'_c}{\sqrt{1 + \frac{d}{\lambda_0 d_a^m}}} \sqrt{\frac{d}{h}} + \alpha_1 f'_c \quad (10) \quad \sigma_c = \frac{B' f'_c}{\sqrt{1 + \lambda_1 d}} \sqrt{\frac{d}{h}} + \alpha_1 f'_c \quad (11)$$

식(11)에서 상수  $B'$ ,  $\lambda_1$ ,  $\alpha_1$ 을 구하기 위해서는 보다 정확한 해석절차가 필요하지만, 이 작업은 사실상 불가능하므로 실험결과에 대한 회귀분석으로부터 이 값들을 결정할 수 있다.

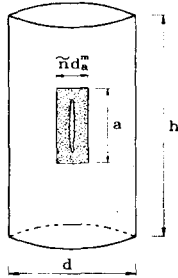


그림 3 압축을 받는 원주형공시체의 균열밴드전과

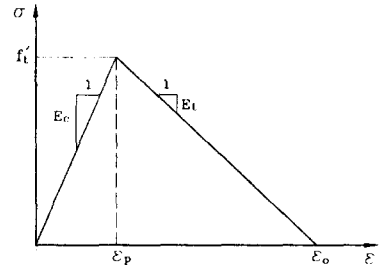


그림 4 파괴진행영역에 대한 응력-변형률선도<sup>(11)</sup>

#### 4. 실험상수의 정식화

본 연구에서는 다양한 강도수준에 대하여 기준이 되는 형상(직경 15 cm, 높이 30 cm, h/d=2.0)의 원주형 공시체에 대한 임의 d 및 h/d에 대해 원주형 공시체의 압축강도비 관계를 규명하기 위하여 총 1844개의 문헌상의 실험결과치(표준형에 대해 988개, 비표준형에 대해 856개)를 분석하였다. 콘크리트는 저강도일수록 골재의 강성이 시멘트 모르타르보다 상대적으로 크고 모르타르와 골재 사이의 부착력이 작아져 골재와 모르타르의 경계부를 따라 균열이 진전하게 되고 시편 전반에 걸친 균열영역의 형성으로 FPZ가 넓어지게 된다. 고강도화되면 구성재료간의 상대적인 특성차이가 작아져 비교적 균질재료로 거동을 하게 되고 골재를 관통하는 균열진전으로 FPZ가 좁아지게 된다. 또한, 파괴시 양상을 보면 고강도화될수록 취성 파괴거동을 나타내며 갑작스런 파괴로 이어진다.

이와같이, 강도수준에 따른 콘크리트의 파괴특성과 역학적인 거동, 보고된 실험결과 및 본 연구에서 제안한 크기효과 관계식의 경계조건(직경 15cm, h/d=2.0일 때  $\eta = \sigma_c / f_c' = 1.0$ )을 바탕으로 앞장에서 유도한 크기효과 관계식의 실험상수들을 다음과 같이 정식화하였다. 여기서,  $f_c'$ 은  $\text{kg/cm}^2$  단위이다.

$$B' = 2.060 - 0.210 \ln f_c', \quad \lambda_1 = 0.132 \text{EXP}(0.001 f_c'), \quad \alpha_1 = 0.120 \ln f_c' \quad (13)$$

모르타르와 골재사이의 미세부착균열이 모르타르로 전달되는 강도의 압축강도에 대한 비가 고강도화 될수록 커진다는 Carrasquillo<sup>(9)</sup> 등의 실험결과에 근거하여 크기와 무관한 강도에 대한 상수  $\alpha_1$ 은 강도수준의 증가에 따라 단조증가함수로 결정하였고, 고강도화될수록 FPZ가 좁아진다는 일반적인 경향에 따라 FPZ에 관한 실험상수인  $\lambda_1$ 을 단조증가함수로 결정하였다. 또한, FPZ의 응력-변형률 관계로부터 고강도화될수록 취성이 증가함에 따라  $E_c/E_t$ 비가 작아지게 되고 크기효과 관계식의 경계조건을 만족하기 위하여  $B'$ 은 단조감소함수로 결정하였다. 본 논문에서 제시한 관계식은 콘크리트의 압축강도가  $170 \sim 1700 \text{kg/cm}^2$  범위에 드는 경우 임의의 d, h/d에 대해 적용 가능하다.

#### 5. 결과 분석 및 고찰

##### 5.1 기존의 실험결과 및 제안식과의 비교

h/d의 변화에 따른 압축강도를 규명하기 위하여 많은 연구자들에 의하여 연구가 수행되었고 그 결과를 정식화하거나 도표로 제시하고 있다. 여기서는 강도수준에 따라 여러 연구자들<sup>(1,3,6,8,10)</sup>에 의한 결과와 본 연구에서 제시하는 바를 상호 비교·검토하였다(그림 5). 강도수준에 따른 압축강도비 변화의 경향은 여러 학자들의 실험결과에서 나타나듯이 저강도일수록 크기의 영향이 커지고 고강도화되면 그 차이는 줄어들게

된다.  $h/d=1.0\sim 2.0$  부분에 관한 여러 연구자들의 제안값과 본 연구에서의 회귀분석 결과를 비교해 보면 알 수 있듯이 각 연구자에 따라 강도보정계수에는 상당한 차이가 있으며 대부분의 경우 강도수준은 고려되어 있지 않고 모든 범위의 콘크리트에 동일하게 적용하도록 제안하고 있어 강도수준별 실험결과와 오차를 보이고 있다.

## 5.2 각국 시방서와의 비교

구조물의 비파괴 검사시 채취한 코아의  $h/d$ 에 따른 강도로부터 기준 공시체의 강도를 추정하기 위하여 각국의 여러 시방서는 강도보정계수를 제시하고 있다. 여기서는 미국 시험과 재료에 관한 표준인 ASTM<sup>(11)</sup> 및 일본 공업규격 JIS<sup>(12)</sup> 및 영국 콘크리트협회(Concrete Society)<sup>(13)</sup>에서 제시하는 것과 본 연구에서 제시하는 바를 상호 비교·검토하였다. 각국의 시방서에서는 대부분 압축강도 보정계수를  $h/d=1.0\sim 2.0$  범위에 대하여 제시하고 있다. 이 값들과 본 연구에서 제안한 관계식을 이용한 값을 그림 6에 함께 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 ASTM와 JIS, CS에서 각각 제시하고 있는 강도보정계수는  $h/d=1.25\sim 2.0$  범위에서는 유사한 값이며 제안한 관계식과 비교할 때 NSC와 비슷한 경향을 나타내고 있으나 HSC의 경우에는 많은 편차를 보이고 있어 HSC에 적용시 압축강도를 과대평가하게 된다.

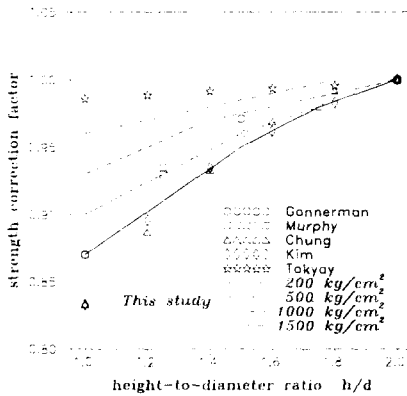


그림 5 기존의 실험결과와 본 논문에서 제시한 강도보정계수의 비교

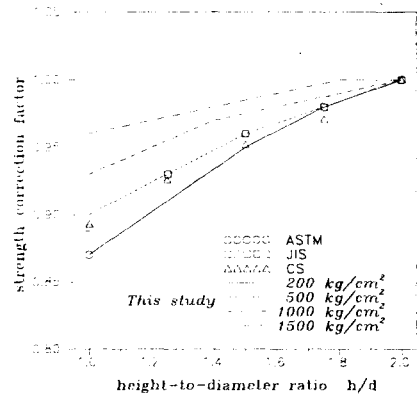


그림 6 각국 시방서 제안값과 본 논문에서 제안한 강도보정계수의 비교

## 6. 결 론

파괴역학에 근거한 콘크리트의 파괴거동으로부터 원주형 공시체의 압축강도에 대한 크기효과 관계식을 강도수준을 고려하여 제안하였고 일축압축강도에 대한 기존의 실험자료와 각국의 시방서에서 제시하고 있는 강도보정계수 및 여러 연구자들이 제안한 모델식을 비교·검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 일반적으로 공시체의 크기가 커질수록 압축강도는 작아지나, 강도수준에 따라 다른 경향을 나타내고 있다. 저강도 콘크리트에서는 구성재료간의 부착력 저하로, 재하하중이 증가할수록 내부 결함의 광범위한 성장에 의한 전반적인 파괴로 HSC보다 큰 크기효과를 나타낸다.
- (2)  $h/d$ 의 영향에 따른 강도비의 경향은 강도수준에 따라 그 차이가 있으며 콘크리트가 고강도화 될수록, 즉 구성재료간의 상대적인 균질도가 높을수록 동일한 크기 및 형상의 시편에 대해서  $h/d$ 의 영향이 작게 나타나 강도수준별로 보정계수를 따로 규정할 필요가 있음을 보여준다.
- (3) 각국의 시방서 및 여러 연구자들에 의해 제시되어 있는 강도보정계수와 비교한 결과, 대부분의 제안

값은  $500\text{kg}/\text{cm}^2$  이하의 콘크리트에 적합한 값이며 그 이상의 HSC에는 강도수준을 고려한 적절한 보정관계식을 적용해야 한다.

(4) 본 논문에서 제안한 관계식을 압축강도  $1200\text{kg}/\text{cm}^2$  이상의 초고강도 콘크리트 영역까지 확장하여 적용하기에는 실험자료의 부족으로 보다 많은 실험적 연구를 수행하여 제안식의 타당성을 검증할 필요가 있으며 실험결과 자료를 바탕으로 합리적인 회귀분석을 실시하고 적절한 강도보정계수 관계식을 규명하여야 하리라 판단된다.

## 참고문헌

1. Gonnerman H.F., Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete, ASTM Proceedings, Vol.25, pp.237-255, 1925.
2. 김진근, 조수연, 어석홍, 문영호, 실린더 크기에 따른 콘크리트 압축강도의 변화, 대한건축학회논문집, Vol.3, No.6, pp.225-234, 1987.
3. 김진근, 어석홍, 이성태, 비표준형 실린더 공시체에 대한 콘크리트 압축강도의 크기효과, 한국콘크리트학회 논문집, Vol.9, No.1, pp.105-113, 1997.
4. Bažant Z.P., Size Effect in Blunt Fracture : Concrete, Rock, Metal, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.110, No.4, pp.518-535, 1984.
5. 小阪義夫, 谷川恭雄, 各種骨材コンクリートの壓縮強度に及ぼす試験体寸法と載荷面の摩擦の影響について, セメント・コンクリート, No.265, pp.2-10, 1969.
6. Chung H.W., On Testing of Very Short Concrete Specimens, Cement, Concrete, and Aggregate(ASTM), pp.40-44, 1989.
7. 野口貴文, 友澤史紀, 高强度コンクリートの壓縮力學特性に及ぼす供試体寸法・形状の影響, 日本 建築學會構造系論文集, Vol.473, pp.19-28, 1995.
8. Tokyay M. & Özdemir M., Specimen Shape and Size Effect on the Compressive Strength of Higher Strength Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.27, No.8, pp.1281-1289, 1997.
9. Carrasquillo P.L., Slate F.O. & Nilson A.H., Microcracking and Behavior of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loading, ACI Journal, Vol.78, No.3, pp.179-186, 1981.
10. Murphy W.E., Discussion of the paper authored by Malhotra V.M., Contact Strength Requirements - Core Versus In Site Evaluation, ACI Journal, Vol.74, No.4, pp.163-172, 1977, & Vol.74, No.10, pp.521-530, 1977.
11. American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete, ASTM Designation, C42, pp.24-27, 1990.
12. 日本工業標準調査會, 콘크리트からのコア及びはりの取扱い方法並びに強度試験方法, 日本工業規格, JIS A 1107, pp.1-3, 1993.
13. Concrete Core Testing for Strength, Technical Report No.11, Concrete Society, London, 1976.