



콘크리트의 기건단위질량을 고려한 콘크리트 압축강도의 크기효과

심재일¹⁾ · 양근혁²⁾ · 이성태^{3)*}

¹⁾해평선(주) R&D팀 ²⁾경기대학교 플랜트·건축공학과 ³⁾인하공업전문대학 토목환경과

Size Effect of Concrete Compressive Strength Considering Dried Unit Weight of Concrete

Jae-II Sim,¹⁾ Keun-Hyeok Yang,²⁾ and Seong-Tae Yi^{3)*}

¹⁾R&D Team, Haepyeongseon Co., Ltd., Gwangju, 500-859 Korea

²⁾Department of Plant-Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, Kyonggi, 443-760 Korea

³⁾Department of Civil & Environmental Engineering, Inha Technical College, Incheon, 402-752 Korea

ABSTRACT Since the size effect law announced currently has been based on the normal weight concrete, for light weight concrete having different fracture characteristics, its application is questionable. Accordingly, in this study, a model equation to predict the effect of dried unit weight of the concrete on size effect of its compressive strength was developed and a database using existing research results was created. After determining the experimental constants of prediction models of Bažant based on nonlinear fracture mechanics, Kim and Eo, and this study using the database, their results are mutually compared. Finally, it was found that the prediction model of this study considered dried unit weight of concrete predicted well the test results for light weight concrete than that of the models of Bažant and Kim and Eo.

Keywords : size effect, compressive strength, dried unit weight, prediction model

1. 서 론

콘크리트의 크기효과는 Gonnerman¹⁾의 실험에 의해 최초로 증명되었으며, 이후 다양한 경우에 대한 실험을 통해 콘크리트의 크기효과가 콘크리트 공시체의 단면형태, 크기, 형상비 및 굵은골재의 최대치수 등에 영향 받음이 확인되었다.²⁻⁴⁾ Weibull은 Griffith의 가정을 도입하여 선형탄성 파괴역학에 근거한 통계적 접근 방법에 의해 최초로 크기효과법칙(size effect law)을 제시하였다.⁵⁾ 그러나 콘크리트의 파괴는 미세균열영역의 발달과 함께 주균열이 서서히 발생되면서 일어난다.⁶⁾ 이는 선형탄성 파괴역학의 가정과 모순되며 이를 해결하기 위해 비선형 파괴역학이 도입되었다. Bažant⁵⁾는 비선형 파괴역학에 기반하여 기하학적으로 유사한 공시체에 대한 크기효과법칙을 제안하였다. 이후 Kim and Eo⁷⁾는 크기와 무관한 항을 도입하여 Bažant⁵⁾의 크기효과법칙을 수정하였다. 그러나 지금까지의 크기효과법칙은 모두 보통중량 콘크리트에 기

반하고 있어 파괴특성이 다른 경량골재 콘크리트에서 그 활용성이 의문시되고 있다.

콘크리트의 파괴는 일반적으로 골재 파괴, 페이스트 파괴 및 골재와 페이스트의 계면 파괴 등으로 나눌 수 있으며, 콘크리트의 압축강도가 높으면 골재에 의해 그 내력이 결정된다. 콘크리트 내의 골재는 콘크리트 전체 체적의 약 60~70%로 골재의 강도와 강성에 의해 콘크리트의 역학적 특성이 결정된다. 이에 ACI 318⁸⁾ 및 CEB-FIP⁹⁾ 설계기준에서는 콘크리트의 역학적 특성을 예측할 때 콘크리트 기건단위질량의 함수로 골재의 특성을 나타내고 있다. 특히, Sim and Yang¹⁰⁾은 인공경량골재를 사용한 콘크리트 압축강도의 크기효과에 대한 실험을 통해 경량골재 콘크리트의 파괴진행영역은 보통중량 콘크리트보다 작고 골재의 파괴에 의해 크기효과에 더 민감해 짐을 보였다.

본 연구의 목적은 콘크리트의 기건단위질량을 고려하여 압축강도의 크기효과에 대한 예측모델을 개발하는 것이다. 이를 위해 비선형 파괴역학에 기반한 Bažant⁵⁾와 Kim and Eo⁷⁾의 예측모델들을 분석하여 콘크리트의 기건단위질량을 고려한 압축강도의 크기효과에 대한 예측모델을 제시하였다. 또한 예측모델의 정확성을 평가하기 위해 기

*Corresponding author E-mail : yist@inhatc.ac.kr

Received October 20, 2014, Revised December 12, 2014,

Accepted December 12, 2014

©2015 by Korea Concrete Institute

존 연구결과들을 데이터베이스화하여 이 연구에서 제시한 모델을 Bažant⁵⁾와 Kim and Eo⁷⁾의 모델과 비교하였다.

2. 기존 압축강도에 대한 크기효과 모델

2.1 Bažant의 크기효과 모델

Bažant는 에너지 평형법칙을 기반으로 비선형 파괴역학에 근거하여 기학학적으로 유사한 공시체에 대한 크기효과 모델을 식 (1)과 같이 제시하였다.

$$\sigma_N = \frac{Bf_{ck}}{\left(1 + \frac{d}{\lambda_0 d_a}\right)^{0.5}} \quad (1)$$

여기서, σ_N 는 공시체의 공칭파괴강도(MPa), f_{ck} 는 압축강도(MPa), d 는 공시체의 크기(mm), d_a 는 굵은골재의 최대치수(mm), B 와 λ_0 는 실험상수를 나타낸다.

이 모델의 기본가정은 콘크리트 공시체의 균열진전에 필요한 에너지는 균열길이(a)와 균열진행영역의 면적(nd_a)에 비례한다는 것이다. 균열진행영역의 면적은 균열길이와 균열 폭(nd_a)의 곱으로 계산되며, 균열의 폭은 균열의 진행양상을 분석하여 굵은골재 최대치수에 비례한다고 가정했다. 그러나 Bažant의 크기효과 모델은 공시체의 크기가 증가함에 따라 압축강도가 지속적으로 감소하여 Fig. 1에서와 같이 공시체의 크기가 무한대로 증가하면 압축강도가 '0'에 수렴하는 문제가 발생한다.

2.2 Kim and Eo의 크기효과 모델

Kim and Eo는 Bažant의 모델을 기반으로 특성길이(l_0) 및 공시체의 크기와 무관한 항($\alpha_1 f_{ck}$)을 도입하여 수정된 크기효과(modified size effect law) 모델을 식 (2)와 같이 제시하였다.

$$\sigma_N = \frac{Bf_{ck}}{1 + \frac{d}{l_0}} + \alpha_1 f_{ck} \quad (2)$$

여기서, α_1 는 크기와 무관한 1.0보다 작은 상수이다.

Kim and Eo는 기하학적으로 유사하며 상대균열길이의 비가 일정한 공시체로부터, Bažant의 크기효과 모델에서 매개변수(λ_0)는 상수가 아니라 a/d 의 함수임을 보였다. 이를 통해 최초 균열을 발생시키는데 필요한 응력으로 생각할 수 있는 상수항을 도입하였다. 또한 콘크리트의 제조를 위해 사용되는 굵은골재의 최대치수는 20~70 mm로 굵은골재의 최대치수가 미세균열영역의 폭에 미치는 영향이 크기 않으므로 굵은골재 최대치수의 영향을 무시하였다. Kim and Eo의 크기효과 모델은 Fig. 1과 같이

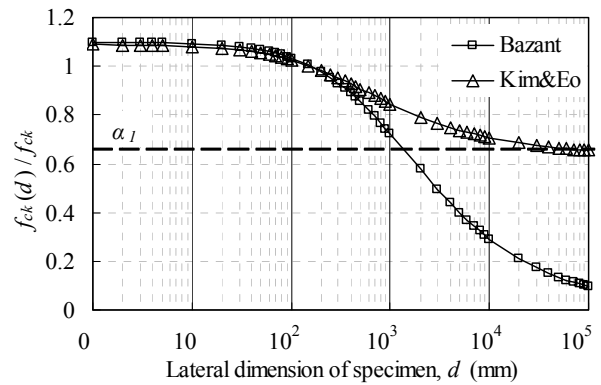


Fig. 1 Comparison of the size effect between Bažant model and Kim and Eo model

Bažant의 크기효과 모델을 효과적으로 개선하였다고 판단된다.

3. 모델의 개발

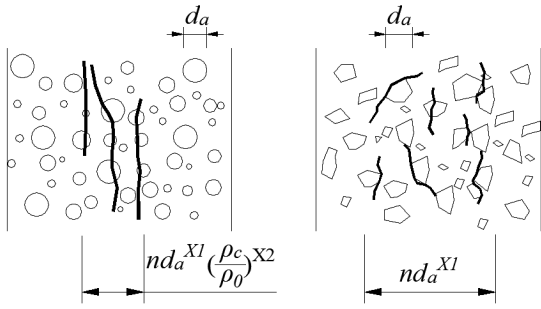
3.1 기본가정

경량골재 콘크리트의 압축강도에 대한 크기효과와 이 론모델을 제시하기 위한 가정은 다음과 같다.

- ① 콘크리트의 파괴가 일어날 때 소요되는 총에너지 해방량은 균열길이의 함수이고, 균열진행영역의 면적에 비례한다.
- ② 콘크리트의 균열진행영역의 폭은 굵은골재의 최대치수와 보통 콘크리트의 기건단위질량(ρ_0)을 콘크리트의 기건단위질량(ρ_c)으로 나눈 값(ρ_0/ρ_c)에 비례한다. 여기서, 보통 콘크리트의 기건단위질량은 2,300 kg/m³을 의미한다.
- ③ 콘크리트의 균열진행영역의 면적은 압축강도와 콘크리트의 기건단위질량에 반비례한다.

한편, 콘크리트의 균열진행영역의 면적은 균열진행영역의 폭과 길이의 곱으로 나타낼 수 있다. 균열진행영역의 폭은 사용재료와 시험체의 형상 등 다양한 변수의 영향을 받기 때문에 정확한 평가가 어렵다. 그러나 Bažant⁶⁾는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 콘크리트의 미세균열은 골재를 피해서 발생한다고 가정하여 균열진행영역의 폭을 굵은골재 최대치수(d_a)의 함수로 이상화하였다. 또한 Kim and Eo¹¹⁾는 Blank and McNamara의 실험결과²⁾를 분석하여 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 균열진행영역이 작아짐으로 균열진행영역의 폭은 굵은골재의 최대치수 뿐만 아니라 콘크리트의 압축강도에 영향이 있음을 보였다.

콘크리트에서 균열진행영역의 폭은 Fig. 2에서와 같이 콘크리트 기건단위질량의 함수로 나타낼 수 있다. 경량골재 콘크리트의 균열진행영역의 폭은 일반적으로 보통



(a) light weight concrete (b) normal weight concrete

Fig. 2 The width of the fracture process zone in concrete

중량 콘크리트보다 작는데, 이는 골재의 강도에 기인한 것으로 보통중량 콘크리트에서 균열이 골재를 만나면 강도가 큰 골재를 피해 골재와 시멘트 페이스트의 계면을 따라 성장한다. 그러나 경량골재 콘크리트는 균열이 경량골재의 낮은 강도로 인해 파괴 시 골재를 관통하여 성장하기 때문이다.

3.2 모델의 제안

콘크리트가 변형되기 위해 필요한 에너지(U)는 콘크리트의 체적 및 에너지 밀도($\sigma_N^2/2E_c$)에 비례하므로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta U = \frac{1}{2E_c} \sigma_N^2 Ah \times f(\alpha_1, \alpha_2) \quad (3)$$

여기서, A 는 콘크리트 공시체의 단면적으로 kd^2 , k 는 공시체 단면형태에 대한 계수로서 원형단면은 $\pi/4$, 각형단면은 1.0이다. h 는 콘크리트 공시체의 높이, $f(\alpha_1, \alpha_2)$ 는 보정계수로서 균열길이에 관련된 $\alpha_1 = \frac{a}{n_1 d}$ 와 균열진행 영역의 면적에 관련된 $\alpha_2 = \frac{w_c a}{hd}$ 의 합성함수이다. 여기서, w_c 는 균열진행영역의 폭이다.

Bazant and Oh가 제안한 균열띠 이론¹²⁾에 따르면, Fig. 3에 나타난 바와 같이 미세균열을 고려한 이산화된 응력-변형률 관계로부터 균열이 진전되기 위한 조건은 식 (4)와 같다.

$$W = n G_f X_3 d (n_1)^{X_4} a \quad (4)$$

여기서, G_f 는 단위길이의 균열을 진전시키는 데 필요한 파괴에너지, n 은 균열대 내의 균열개수, n_1 은 공시체의 형상비, a 는 균열길이, X_3 과 X_4 는 실험상수를 나타낸다.

에너지 평형조건에 의해 균열진전을 위한 콘크리트의 변형에너지는 균열대에서 균열발생을 위해 필요한 에너지와 같으며, 이는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

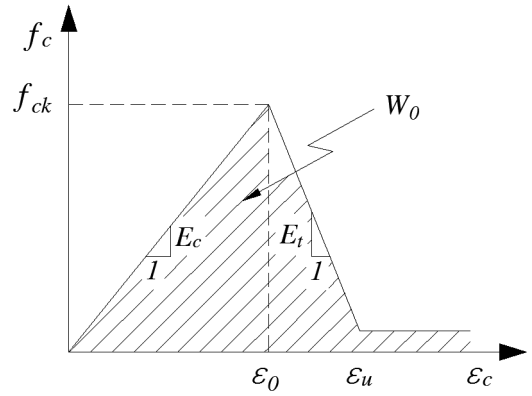


Fig. 3 Idealized tensile stress-strain curve of the concrete

$$\frac{\partial(\Delta U)}{\partial a} = \frac{\partial W}{\partial a} \quad (5)$$

식 (3)과 식 (4)를 식 (5)에 대입하여 σ_N^2 에 대해 정리하면, 식 (6)과 같이 된다.

$$\frac{1}{2E_c} \sigma_N^2 Ah \times \frac{\partial f(\alpha_1, \alpha_2)}{\partial a} = n G_f X_3 d (n_1)^{X_4}$$

$$\sigma_N^2 = \frac{2E_c n G_f X_3 d (n_1)^{X_4}}{Ah \frac{\partial f(\alpha_1, \alpha_2)}{\partial a}} \quad (6)$$

식 (6)에 나타난 두 개의 변수가 결합된 합성함수의 미분을 계산하기 위한 chain rule은 식 (7)과 같다.

$$\frac{\partial f}{\partial a} = \frac{\partial f}{\partial \alpha_1} \frac{\partial \alpha_1}{\partial a} + \frac{\partial f}{\partial \alpha_2} \frac{\partial \alpha_2}{\partial a} \quad (7)$$

$\frac{\partial f}{\partial \alpha_1} = F_1$ 과 $\frac{\partial f}{\partial \alpha_2} = F_2$ 로 치환하면 식 (7)은 식 (8)과 같이 된다.

$$\frac{\partial f}{\partial a} = F_1 \frac{\partial \alpha_1}{\partial a} + F_2 \frac{\partial \alpha_2}{\partial a} \quad (8)$$

식 (8)을 이용하여 식 (6)을 정리하면 식 (9)와 같다.

$$\sigma_N^2 = \frac{2E_c n G_f X_3 d (n_1)^{X_4}}{Ah \left(\frac{F_1}{n_1 d} + \frac{w_c F_2}{hd} \right)} \quad (9)$$

균열띠 이론¹²⁾에 의하면 G_f 는 $w_c \left(1 - \frac{E_c}{E_t} \right) \frac{f_{ck}^2}{2E_c}$ 와 같으므로, 이를 식 (9)에 대입하고 정리하면 식 (10)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \sigma_N^2 &= \frac{2E_c n G_f X_3 d (n_1)^{X_1}}{Ah \times \frac{w_c F_2}{hd} \left(\frac{F_1}{n_1} \frac{h}{w_c F_2} + 1 \right)} \\ &= \frac{2E_c n w_c \left(1 - \frac{E_c}{E_t} \right) \frac{f_{ck}^2}{2E_c} X_3 d (n_1)^{X_1}}{Ah \times \frac{w_c F_2}{hd} \left(\frac{F_1}{n_1} \frac{h}{w_c F_2} + 1 \right)} \\ &= \frac{n \left(1 - \frac{E_c}{E_t} \right) f_{ck}^2 X_3 d (n_1)^{X_1}}{kd^2 \times \frac{F_2}{d} \left(\frac{F_1}{n_1} \frac{h}{w_c F_2} + 1 \right)} \\ &= \frac{n \left(1 - \frac{E_c}{E_t} \right) f_{ck}^2 X_3 (n_1)^{X_1}}{k \times F_2 \left(\frac{F_1}{n_1} \frac{h}{w_c F_2} + 1 \right)} \end{aligned} \quad (10)$$

가정사항에서 균열진행영역의 폭(w)은 $d_a^{X_1} (\rho_0/\rho_c)^{X_2}$ 이며, 형상비(n_1)는 h/d 이다. 이를 식 (10)에 대입하여 정리하면 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_N^2 &= \frac{n \left(1 - \frac{E_c}{E_t} \right) f_{ck}^2 X_3 (h/d)^{X_1}}{k \times F_2 \left(\frac{F_1}{h/d} \frac{h}{d_a^{X_1} (\rho_0/\rho_c)^{X_2} F_2} + 1 \right)} \\ &= \frac{\frac{n X_3}{f_2} \left(1 - \frac{E_c}{E_t} \right) \frac{1}{k} f_{ck}^2 (h/d)^{X_1}}{\left(\frac{F_1}{F_2} \frac{d}{d_a^{X_1}} \left(\frac{\rho_c}{\rho_0} \right)^{X_2} + 1 \right)} \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)을 σ_N 에 대해서 정리하고 단순화하면 식 (12)와 같이 된다.

$$\sigma_N = \frac{A_1 \sqrt{\frac{1}{k} n_1^{X_1} f_{ck}}}{\left(1 + B_1 \frac{d}{d_a^{X_1}} \left(\frac{\rho_c}{\rho_0} \right)^{X_2} \right)^{0.5}} \quad (12)$$

여기서, A_1 은 $\sqrt{\frac{n X_3}{f_2} \left(1 - \frac{E_c}{E_t} \right)}$ 이고 B_1 은 $\frac{F_1}{F_2}$ 을 나타낸다.

Kim and Eo⁷⁾는 보통중량 콘크리트에서 굽은골재의 최대치수가 콘크리트의 균열폭이 미치는 영향이 미미함을 보였다. 특히, 경량골재 콘크리트에서는 경량골재를 관통하여 균열이 진전되므로 굽은골재 최대치수의 영향을 무시할 수 있다. 이에 식 (12)에서 굽은골재 최대치수의 영향을 무시하고 정리하면 식 (13)과 같다.

$$\sigma_N = \frac{A_1 \sqrt{\frac{1}{k} n_1^{X_1} f_{ck}}}{\left(1 + \frac{d}{\lambda_0} \left(\frac{\rho_c}{\rho_0} \right)^{X_2} \right)^{0.5}} \quad (13)$$

여기서, λ_0 는 실험상수이다.

식 (13)은 Bažant의 크기효과 모델과 같은 형식으로 공시체의 크기가 증가함에 따라 지속적으로 압축강도가 감소하게 되어 있다. 그러나 Kim and Eo가 제시한 것처럼 콘크리트 공시체의 크기가 증가해도 압축강도가 더 이상 감소하지 않고 수렴하는 부분이 나타나게 된다. 이를 고려하여 식 (13)을 수정하면 식 (14)와 같이 된다.

$$\sigma_N = \frac{A_1 \sqrt{\frac{1}{k} n_1^{X_1} f_{ck}}}{\left(1 + \frac{d}{\lambda_0} \left(\frac{\rho_c}{\rho_0} \right)^{X_2} \right)^{0.5}} + \sigma_0 \quad (14)$$

여기서, σ_0 는 콘크리트 공시체의 크기와 무관하게 공시체의 초기균열을 발생시키는 데 필요한 응력이다.

4. 모델의 검증

4.1 데이터베이스 구축

이 연구에서는 콘크리트의 크기효과에 대한 기존연구 결과들^{1,2,13-18)}을 데이터베이스로 구축하였다. 데이터베이스에서 정보가 제공되지 않은 공시체들의 기건단위질량은 제시된 배합표를 이용하여 ACI 318⁸⁾에 제시된 기건단위질량 예측모델에 의해 계산하였다. 구축된 데이터베이스의 주요변수들의 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 데이터베이스는 보통중량 콘크리트 1449개, 경량골재 콘크리트 251개로 총 1700개가 수집되었다. 데이터베이스의 압축강도 범위는 6.6~128 MPa이며, 압축강도 40 MPa 이하가 약 67%를 차지하였다. 공시체의 크기는 보통중량 콘크리트에서 37.5~915 mm, 경량골재 콘크리트는 50~400 mm 범위에 있었다. 전체 공시체 중에 300 mm 이상의 대형 공시체는 73개로 약 4.3%를 차지하고 있으며, 대부분이 100~200 mm 범위에 존재한다. 공시체의 형상비는 0.5~4.0 까지 다양하며, 전체 공시체의 약 55%는 형상비 2.0의 표준공시체였다. 굽은골재의 최대치수는 4.7~228.6 mm 범위에 있으며, 전체 공시체의 약 97%는 굽은골재 최대치수가 40 mm 이하에 분포하였다. 공시체의 높이는 38.1~1828.8 mm까지 넓은 분포를 보였다. 콘크리트의 기건단위질량은 1570~2510 kg/m³ 범위에 있으며, 전체 공시체의 약 62%는 기건단위질량 2300~2400 kg/m³의 보통중량 콘크리트이다.

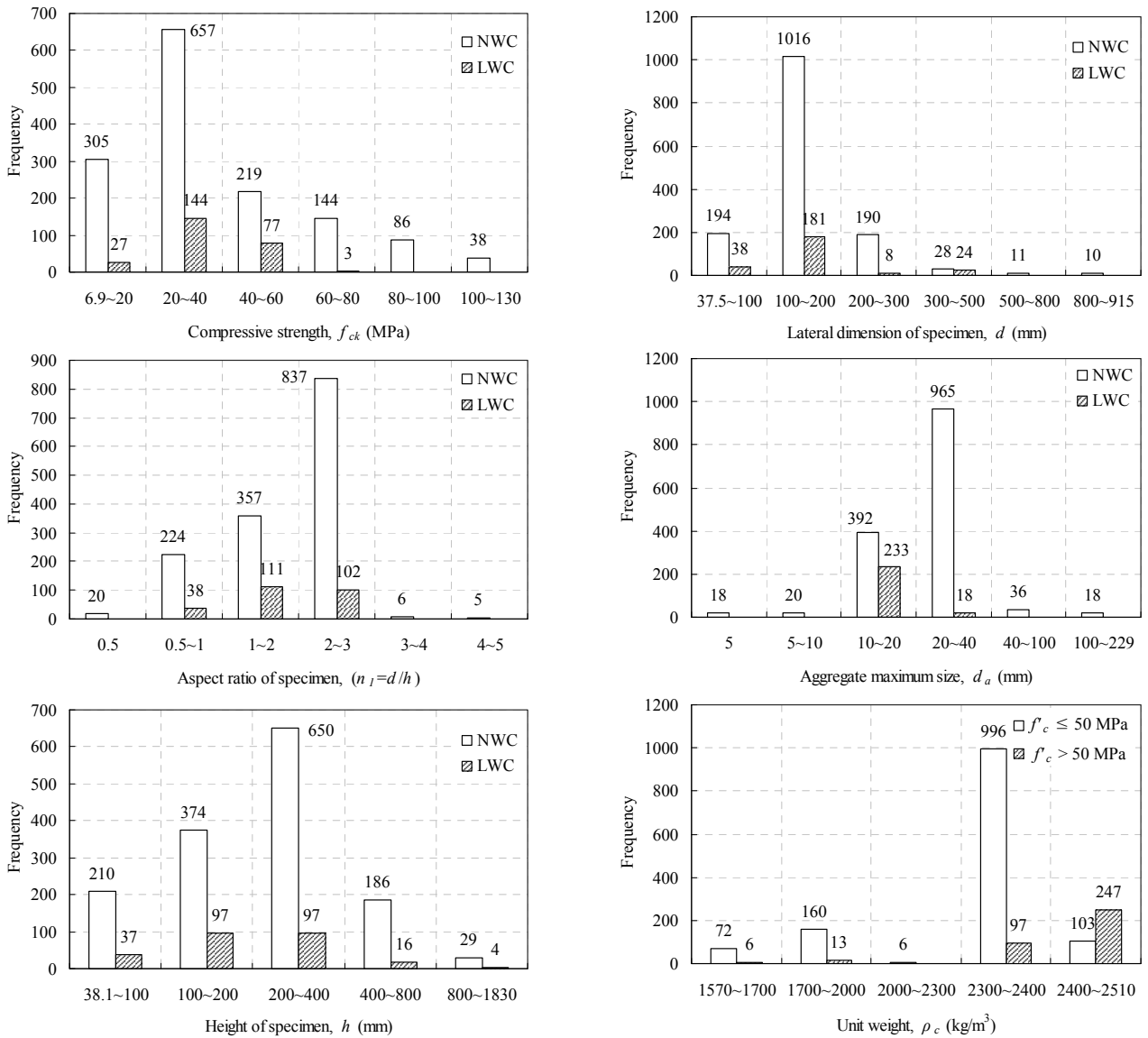


Fig. 4 Distribution of values with main parameter in the database. (NWC: normal weight concrete, SLWC; sand light-weight concrete, ALWC; all light-weight concrete)

4.2 기존 연구결과와의 비교

구축된 데이터베이스를 이용한 비선형 회귀분석을 통해 기존 예측모델들과 식 (14)에 대한 실험상수들을 결정하여 Table 1에 나타내었고 이 실험상수들을 이용하여 콘크리트의 기건단위질량에 따른 공시체 크기(d)와 압축강도 비의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 콘크리트의 기건단위질량이 2350 kg/m^3 에서 1650 kg/m^3 으로 감소함에 따라 콘크리트의 압축강도에 대한 크기효과가 더 확연하였다. 콘크리트의 기건단위질량인 1650±50 kg/m^3 에서 콘크리트 공시체의 크기가 300 mm일 때 $f_{ck}(d)/f_{ck}$ 는 평균 0.82정도였지만 기건단위질량이 2350±50 kg/m^3 에서 콘크리트 공시체의 크기가 300 mm일 때의 $f_{ck}(d)/f_{ck}$ 는 평균 0.87로 1.06배 높았다. 이는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 콘크리트의 기건단위질량이 콘크리트 파괴영역의 폭을 결

정하기 때문에 판단된다. 이 그림으로부터 콘크리트의 기건단위질량을 고려한 본 연구의 예측모델이 Bažant와 Kim and Eo의 예측모델보다 실험결과를 더 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

압축강도의 크기효과에 대해 구축된 데이터베이스의 실험결과와 위에서 분석된 예측모델들의 비교를 Fig. 6에, 그리고 실험결과에 대한 예측모델들의 평균($\gamma_{cs,m}$), 표준편차($\gamma_{cs,s}$), 변동계수($\gamma_{cs,v}$) 및 에러계수(e_{cf})를 Table 1에 나타내었다. Bažant의 예측모델은 d/d_a 를 주요 변수로 구성되어 있으며, d/d_a 가 10 이하에서는 단부구속효과로 인해 $f_{ck}(d)/f_{ck}$ 의 범위가 넓게 분포하고 있었다. d/d_a 가 10 이상에서 $f_{ck}(d)/f_{ck}$ 는 일반적으로 보통중량 콘크리트의 값이 경량골재 콘크리트보다 컸으며, 그 경향은 형상비가 감소할수록 증가하였다. Bažant의 예측모델은 실험결과에 대한 예측값의 평균은 보통중량 콘크리트와 경량골

Table 1 Statistical comparisons of predictions by some models and test results

Type		Bažant	Kim and Eo	This study
Prediction model		$\sigma_N = \frac{1.2f_{ck}}{\left(1 + \frac{d}{25d_a}\right)^{0.5}}$	$\sigma_N = \frac{1.1f_{ck}}{1 + \frac{d}{30}} + 0.63f_{ck}$	$\sigma_N = \frac{1.8\sqrt{\frac{1}{k}n_1^{-1.5}f_{ck}}}{\left(1 + \frac{d}{12}\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^{-1}\right)^{0.5}} + 0.63f_{ck}$
Light -weight aggregate	$\gamma_{cs,m}$	1.060	0.950	1.010
	$\gamma_{cs,s}$	0.135	0.112	0.117
	$\gamma_{cs,\nu}$	0.127	0.118	0.116
	e_{cf}	0.146	0.124	0.120
Normal -weight aggregate	$\gamma_{cs,m}$	1.050	1.010	1.010
	$\gamma_{cs,s}$	0.228	0.223	0.107
	$\gamma_{cs,\nu}$	0.217	0.220	0.106
	e_{cf}	0.226	0.220	0.125

Note] $\gamma_{cs,m}, \gamma_{cs,s}, \gamma_{cs,\nu}$ and e_{cf} are the mean, standard deviation, coefficient of variation, and error coefficient, respectively.

$e_{cf} = \frac{1}{f_{ck}(d)_M} \sum \left[\left(\frac{f_{ck}(d)_{EXP.} - f_{ck}(d)_{PRE.}}{n} \right)^2 \right]^{0.5}$ where $f_{ck}(d)_M$ is the mean of the measured compressive strengths and n is the number of measured points.

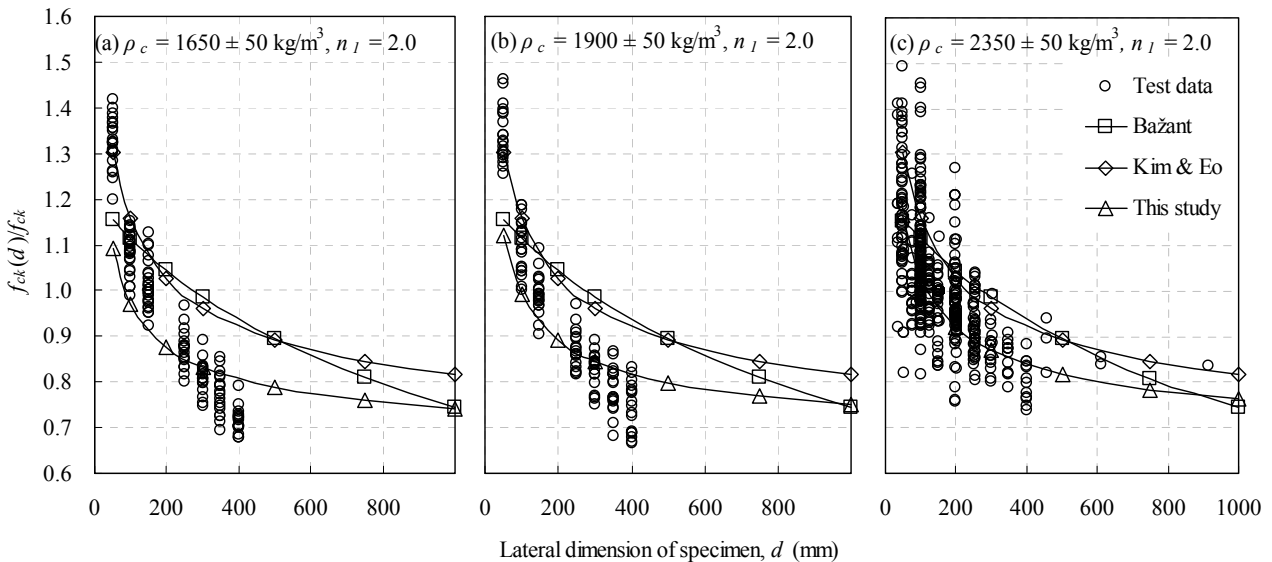
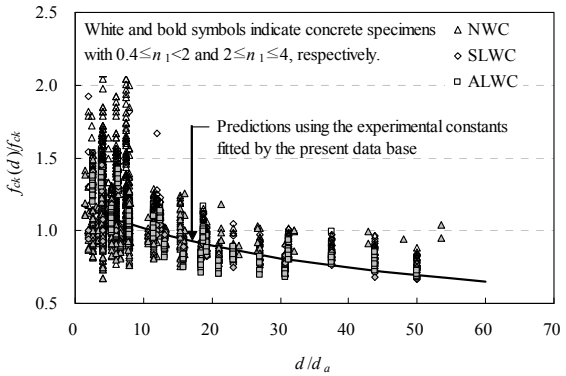


Fig. 5 $f_{ck}(d)/f_{ck}$ with lateral dimension of specimen

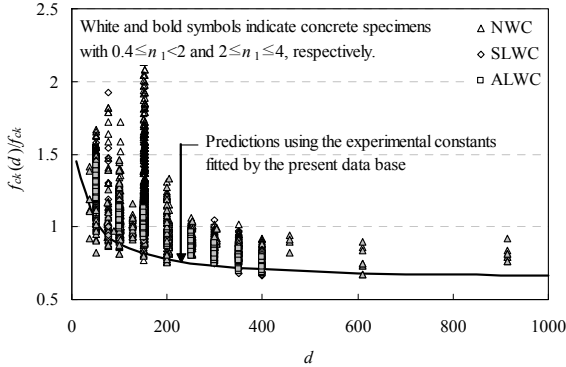
재 콘크리트에서 각각 1.050과 1.060이었다. 또한 에러계수는 경량골재 콘크리트가 보통중량 콘크리트의 약 65% 정도로 낮았다. 이는 경량골재 콘크리트에 대한 데이터의 수가 보통중량 콘크리트보다 적었기 때문으로 판단된다. 공시체의 크기를 제외한 모든 변수를 실험상수로 제시하고 있는 Kim and Eo의 예측모델은 공시체 크기가 200 mm 이하에서 형상비가 작을수록 더 넓은 분포를 보였다. 이는 형상비가 작을수록 단부구속의 영향이 더 민감하게 나타나기 때문으로 판단된다. Kim and Eo의 예측모델은 전반적으로 실험결과를 과소평가하고 있다. Kim and Eo의 예측모델은 실험결과에 대한 예측값의 평균이 보통중량 콘크리트에서 1.010으로 경량골재 콘크리트보다 더 잘 예측하였으며, 에러계수는 0.220으로 굵은골재 최

대치수를 변수로 사용한 Bažant의 예측모델보다 더 우수하였다. 이는 굵은골재의 최대치수보다는 또 다른 변수가 크기효과에 더 큰 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

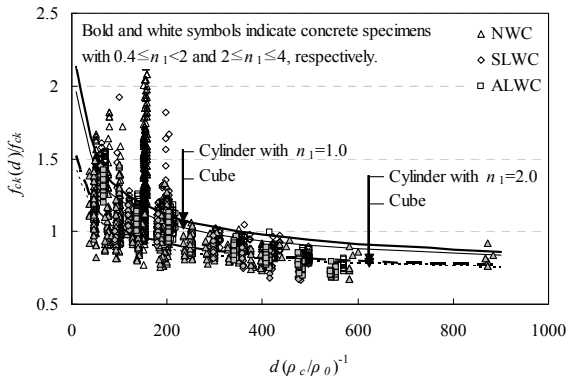
이 연구에서 제안된 예측모델은 기건단위질량을 포함한 $d(\rho_c/\rho_0)$ 를 주요 변수로 포함하고 있다. $d(\rho_c/\rho_0)$ 이 증가할수록 $f_{ck}(d)/f_{ck}$ 는 감소하였으며, 그 경향은 형상비가 클수록 증가하였다. $f_{ck}(d)/f_{ck}$ 는 $d(\rho_c/\rho_0)$ 가 200 이하에서는 넓은 분포를 보였지만 그 이상에서는 좁은 영역에서 일정한 경향을 보였다. 형상비가 2.0 이하인 공시체의 $f_{ck}(d)/f_{ck}$ 는 그 이상의 공시체보다 높았으며, 본 연구결과의 예측모델은 이를 잘 반영하고 있었다. 본 연구의 예측모델은 실험결과에 대한 예측값의 평균으로 보통중량 콘크리트와 경량골재 콘크리트에서 동일하게 1.010이었



(a) Bažant



(b) Kim and Eo



(c) This study

Fig. 6 $f_{ck}(d)/f_{ck}$ with main parameter (NWC: normal weight concrete, SLWC; sand light-weight concrete, ALWC; all light-weight concrete)

으며, 에러계수는 경량골재 콘크리트의 경우 보통중량 콘크리트보다 더 낮았다. 이는 콘크리트의 기건단위질량을 고려함으로써 콘크리트의 파괴진행영역에서의 경량골재의 영향을 잘 고려하였기 때문으로 판단된다.

한편, 굵은골재 최대치수의 영향은 Kim and Eo의 연구에서 처럼 그 영향을 무시하고 유도한 식 (14)가 실험결과를 가장 잘 예측하는 것으로 나왔으므로 이 치수가 압축강도에 미치는 영향은 매우 적다고 할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 콘크리트의 기건단위질량을 고려한 압축강도의 크기효과에 대한 예측모델의 개발하고 기존 연

구결과를 데이터베이스화하여 몇몇 연구자들의 연구결과와 비교·분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 현재까지 발표된 크기효과법칙은 보통중량 콘크리트에 기반하고 있어 파괴특성이 다른 경량골재 콘크리트에서 그 활용성이 의문시되고 있다.
- 2) 이에 이 연구에서는 비선형 파괴역학에 기반한 Bažant와 Kim and Eo의 예측모델들을 분석하고 콘크리트의 기건단위질량을 고려한 압축강도의 크기효과에 대한 예측모델을 제시하였다.
- 3) 기존의 연구결과들을 이용해 데이터베이스를 구축했으며 이에 대한 비선형 회귀분석을 통해 기존 예측모델들과 제안된 모델에 대한 실험상수들을 결정했다. 이로부터 콘크리트의 기건단위질량을 고려한 본 연구의 예측모델이 Bažant와 Kim and Eo의 예측모델보다 실험결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있었다.
- 4) 콘크리트 압축강도의 크기효과에 대한 통계적 분석 결과 본 연구의 예측모델은 Bažant와 Kim and Eo의 예측모델보다 변동계수와 에러계수가 더 작았다. 또한, 본 연구의 예측모델을 통해 경량골재 콘크리트에서 굵은골재의 최대치수가 압축강도에 미치는 영향은 미미함을 확인했다.

감사의 글

이 연구는 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-공공복지안전연구사업(No. 2013067519)의 지원을 받아 수행되었고, 이에 감사드립니다.

References

1. Gonnerman, H. F., "Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete", *ASTM Proceedings*, Vol. 25, No. 2, 1925, pp. 237-255.
2. Blanks, R. F. and McNamara, C. C., "Mass Concrete Tests in Large Cylinder", *ACI Journal Proceedings*, Vol. 31, No. 1, 1935, pp. 280-303.
3. Neville, A. M., "A General Relation for Strength of Concrete Specimens of Different Shape and Size", *ACI Journal Proceedings*, Vol. 63, No. 10, 1966, pp. 1095-1110.
4. 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*, Vol. 96, No. 1, 1999, pp. 88-94.
5. Bažant, Z. P., "Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 110, No. 4, 1984, pp. 518-535.
6. Bažant, Z. P. and Planas, J., *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*, CRC Press, 1998.
7. Kim, J. K. and Eo, S. H., "Size Effect in Concrete Specimens

- with Dissimilar Initial Cracks”, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 42, No. 153, 1990, pp. 233-238.
8. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary (ACI 318R-08)*, American Concrete Institute, Michigan, 2011.
 9. Comité Euro-International du Béton (CEB-FIP), *Structural Concrete : Textbook on Behaviour, Design and Performance*, International Federation for Structural Concrete (Fib), Lausanne, 1999.
 10. Sim, J. I. and Yang, K. H., “Influence of Specimen Geometries on the Compressive Strength of Lightweight Aggregate Concrete”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 3, 2012, pp. 339-347.
 11. Kim, J. K., Eo, S. H., Jang, J. S., and Cho, S. C., “Size Effect of Concrete Structures with Dissimilar Initial Cracks”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 2, No. 1, 1990, pp. 91-100.
 12. Bažant, Z. P. and Oh, B. H., “Crack Band Theory for Fracture of Concrete”, *Materials and Structures*, Vol. 16, No. 93, 1983, pp. 155-177.
 13. Kesler, C. E., “Effect of Length to Diameter Ratio on Compressive Strength—An ASTM Cooperative Investigation”, *Proceeding, ASTM*, Vol. 59, 1959, pp. 1216-1229.
 14. Yi, S. T., Yang, E. I., and Choi, J. C., “Effect of Specimen Sizes, Specimen Shapes, and Placement Directions on Compressive Strength of Concrete”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 236, 2006, pp. 115-127.
 15. Chung, H. W., “On Testing of Very Short Concrete Specimens”, *Cement, Concrete, and Aggregate*, ASTM, Vol. 11, No. 1, 1989, pp. 40-44.
 16. Aitcin, P. C., Miao, B., Cook, W. D., and Mitchell, D., “Effect of Size and Curing on Cylinder Compressive Strength of Normal and High-Strength Concretes”, *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No. 4, 1994, pp. 349-354.
 17. Sener, S., “Size Effect Tests of High Strength Concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 9, No. 1, 1997, pp. 46-48.
 18. Kang, S. C. and Eun, H. C., “A Study on Size Effects of Square Cross-Section Specimens on Compressive Strength of Concrete”, *Journal of Research Institute of Advanced Technology*, Vol. 11, No. 1, 2000, pp. 177-182.

요 약 현재까지 발표된 크기효과법칙은 보통중량 콘크리트에 기반하고 있어 파괴특성이 다른 경량골재 콘크리트에서는 그 활용성이 의문시되고 있다. 따라서 이 연구에서는 콘크리트의 기건단위질량이 압축강도의 크기효과에 미치는 영향을 예측할 수 있는 모델을 개발하고 기존 연구결과들을 모아 데이터베이스화하였다. 그리고 비선형 파괴역학에 근거한 Bažant와 Kim and Eo의 예측모델 및 이 연구에서 제안한 식에 대한 실험상수들을 결정한 후, 상호 비교·분석하였다. 그 결과, 콘크리트의 기건단위질량을 고려한 본 연구의 예측모델이 Bažant와 Kim and Eo의 예측모델보다 경량골재 콘크리트에 대한 실험결과를 더 잘 예측하고 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 크기효과, 압축강도, 기건단위질량, 예측모델