

# 고강도 콘크리트에 대한 탄성계수식 비교연구

## A Comparative Study on The Elastic Modulus Equations for High-Strength Concrete

박훈규\*                      윤영수\*\*                      한상묵\*\*\*                      장일영\*\*\*  
Park, Hoon Gyu              Yoon, Young Soo              Han, Sang Mook              Jang, Il Young

---

### Abstract

The aim of this study is to present the elastic modulus equation that suits to a domestic situation to coincide the improved mechanical properties of high-strength concrete. For this purpose, this study collected the laboratory data more than 400 connected with the modulus of elasticity that performed in this country and also compared with the existing equations. The compressive strength of investigated concrete ranged from 400 to 1,400kg/cm<sup>2</sup>.

As a result, it could confirm that the existing equations which were proposed by the ACI 363R, CEB-FIP, NS 3473, and New-RC have a tendency to the overestimation in general.

---

### 1. 서 론

콘크리트의 고강도화는 부재단면의 축소로 인한 자원절약과 경비절감의 경제적인 효과 외에도 콘크리트 부재의 프리 캐스트화, 장지간 스펠 및 초고층화를 가능하게 한다.

최근 국내에서도 콘크리트의 고강도화에 대한 관심이 높아짐과 동시에 이의 실용화와 관련된 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 국내 실정에 맞는 고강도 콘크리트 재료 모델 및 해석 이론의 개발이 부족하여 설계단계부터 믿고 적용할 수 있는 고강도 콘크리트 관련 국내 설계 기준이 확립되어 있지 않아 아직까지 고강도 콘크리트를 이용한 부재의 설계 및 구조 해석시 보통강도에 대해 정의된 기준식들을 사용하거나 대부분 외국의 기준식을 인용하여 적용하고 있는 실정이어서 경제적 손실이 크고 안전면에서의 보장도 어렵다.

---

\* 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 석사과정

\*\* 정회원, 삼성물산(주) 건설 기술연구소 선임연구원

\*\*\* 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수

따라서 경제성 및 안전성 확보를 위해서는 국내 실정에 맞는 고강도 콘크리트의 정확한 역학적 성질, 특히 콘크리트 구조물의 설계 및 해석에 있어서나 혹은 단지 구조물의 처짐 제어에 있어서도 가장 중요한 재료적 변수는 탄성계수이므로 고강도 콘크리트의 탄성특성과 그 특성에 영향을 미치는 변수에 대한 정립이 무엇보다 우선되어야 할 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 현재 철근 콘크리트 구조물의 거동과약에 주로 사용되고 있는 기존의 탄성계수 추정식들을 국내의 실측 자료들과 비교분석하여 국내의 고강도 콘크리트 구조물 설계 및 해석에 적합한 탄성계수식을 제시하고자 한다.

## 2. 기존 탄성계수식에 대한 고찰

콘크리트 구조물의 설계나 해석에 있어서 중요한 재료특성인 콘크리트의 탄성계수는 공시체에 대한 압축실험으로부터 얻은 응력-변형을 관계에서 최대 압축강도( $f'_c$ )의 40%에 대응하는 강도에 대한 할선계수(secant modulus)를 사용하도록 한 ASTM C469(1)의 규정을 일반적으로 따르고 있으며 국내에도 이 규정을 따르고 있다. 전술한 할선계수법과 원주공시체를 사용할 경우의 탄성계수를 비교적 간단하게 추정하기 위하여 제안된 식들의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

### 2.1 ACI 318-89식<sup>(2)</sup>

콘크리트의 탄성계수에 영향을 미치는 인자가 고려된 실험 결과를 이용하여 콘크리트 탄성계수를 단위중량과 압축강도의 함수로 나타낸 실험식이다. 최근까지 국내의 철근콘크리트 구조물의 설계 및 해석시 주로 사용되었으나 개정된 콘크리트 시방서 KCI 96<sup>(3)</sup>에서는 압축강도 300kg/cm<sup>2</sup>이하인 경우에 대해서만 식(1)의 ACI 318-89 기준식을 사용하도록 규정하였다. 실제로 최근의 많은 연구<sup>(4,5)</sup>에서 이 식이 콘크리트 압축강도 420kg/cm<sup>2</sup>이상인 경우에 대해서는 실측치 보다 과대 평가하는 것으로 지적하고 있다.

$$E_c = \gamma_c^{1.5} \cdot 4270 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (\text{kg/cm}^2) \\ (1.442\text{t/m}^3 \leq \gamma_c \leq 2.483\text{t/m}^3) \dots\dots\dots (1)$$

### 2.2 ACI 363식 (1984년)<sup>(7)</sup>

ACI 363에서는 ACI 318의 식이 과대 평가됨을 고려하여 1981년 Carrasquillo등<sup>(7)</sup>에 의해 제안된 탄성계수식(식(2))을 압축강도가 420kg/cm<sup>2</sup>이상이고 단위중량이 2.346t/m<sup>3</sup>인 보통 중량의 콘크리트에 대한 수정식으로 제시하였으며, 이 식은 다수의 실험치와 어느정도 양호한 상관관계를 갖는 것으로 보고되고 있다<sup>(4,5)</sup>. 그러나 이 식이 국내의 고강도 콘크리트에 대한 실험치에 비해서 여전히 높게 (약 5%) 평가되고 있는 것으로 지적된 바 있다<sup>(8,9)</sup>.

한편 1996년에 개정된 국내 콘크리트 시방서 KCI 96 에서는 압축강도 300kg/cm<sup>2</sup>이상인 경우에 대해 식(2)를 간략화한 식(3)을 제시하고 있다.

$$E_c = (10,500 \cdot \sqrt{f'_c} + 70,000 \cdot \left(\frac{\gamma_c}{2.346}\right)^{1.5}) \quad (\text{kg/cm}^2) \dots\dots\dots (2)$$

여기서, 2.32t/m<sup>3</sup> ≤  $\gamma_c$  ≤ 2.42t/m<sup>3</sup>

$$326\text{kg/cm}^2 \leq f'_c \leq 786\text{kg/cm}^2 \quad (\Phi 15.2 \times 30.5\text{cm})$$

$$E_c = 10,500 \cdot \sqrt{\alpha_c} + 70,000 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $\alpha_c$  = 재령 28일 설계기준강도  $\geq 300 \text{ kg/cm}^2$

### 2.3 CEB-FIP MODEL CODE 90식 (1990년)<sup>(10)</sup>

CEB-FIP MC 90의 보통중량 콘크리트에 대한 탄성계수 추정식은 식(4) 및 식(5)와 같다.

이 추정식은 ACI 363 기준식에 비해 전반적으로 약 12~15%정도 높게 평가되고 있으며, 최근의 고강도 또는 초고강도 콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구에 의하면 이 추정식이 콘크리트 압축강도가 410~460kg/cm<sup>2</sup> 이상인 경우 대체로 실측치에 비해 과대 평가됨을 보고하고 있다<sup>(11)</sup>. 한편 野口貴文(12)는 다양한 골재를 이용한 콘크리트(150~1,700kg/cm<sup>2</sup>)의 탄성계수 추정식에 관한 비교연구에서 이 기준식은 굵은골재의 비중이 증가할수록 실측치와의 오차가 감소하는 경향이 있음을 보고하였다.

$$E_c = \alpha \cdot 47,000 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (4)$$

$$E_c = \alpha \cdot 47,000 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (5)$$

여기서,  $f_{ck}$  : 콘크리트의 강도

$f_{cm}$  : 재령 28일 압축강도 ( $\phi 15.2 \times 30.5 \text{ cm}$ ) }  $\leq 816 \text{ kg/cm}^2$

$\alpha = 1.2$  : 현무암, 경질석회암

1.0 : 석영암

0.9 : 석회암

0.7 : 사암

### 2.4 Norwegian Code NS 3473식 (1992년)<sup>(13)</sup>

NS 3473은 단위중량이 2.2t/m<sup>3</sup> 이상, 콘크리트 압축강도가 85MPa(867kg/cm<sup>2</sup>) 이하인 보통중량 콘크리트의 탄성계수 기준식을 식(6)으로써 제시하고 있으며, 압축강도가 85MPa 이상인 보통중량 콘크리트와 경량 콘크리트에 대해서는 실험에 의하도록 규정하고 있다. CEB-FIP MC 90식에 비해 12~15%정도 낮은 값을 나타내고 있는 것으로 알려지고 있다.

$$E_c = 48,300 \cdot f_{ck}^{0.3} \cdot \left(\frac{\gamma_c}{2.4}\right)^{1.5} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (6)$$

여기서,  $204 \text{ kg/cm}^2 \leq f_{ck} \leq 755 \text{ kg/cm}^2$  ( $\phi 15.2 \times 30.5 \text{ cm}$ )

$255 \text{ kg/cm}^2 \leq f_{ck} \leq 867 \text{ kg/cm}^2$  ( $10.0 \times 10.0 \times 10.0 \text{ cm}$ )

### 2.5 일본 건축학회(AIJ)<sup>(14)</sup>의 RC 구조계산 기준식 및 New RC 탄성계수 추정식<sup>(15)</sup>

현재 한국 건축학회 기준식으로 사용되는 일본 건축학회(AIJ)의 RC 구조계산 기준식(식(7))은 설계강도가 36MPa(367kg/cm<sup>2</sup>) 이하인 보통강도 콘크리트에 적용되어지며 실제로 이 식은 강도가 증가할수록 실측치와의 오차도 커지는 것으로 지적되고 있다<sup>(12,16)</sup>. 이에 따라 1988년부터 실시된 철근콘크리트 건축물의 초경량·초고충화 기술의 개발(약칭: New RC) 과제에서, 고강도 콘크리트의 탄성특성이 혼화재와 골재의 특성과 첨가정도에 따라 크게 변화됨을 고려하여, 많은 연구자들이 다양한 재료를 사용하여 실험한 데이터로부터 콘크리트 강도 36MPa 이상인 경우에 대해서 식(8)의 탄성계수 추정식을 제안하였다.

$$E_c = 210,000 \cdot \left(\frac{\gamma_c}{2.3}\right)^{1.5} \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{200}} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (7)$$

$$E_c = k_1 \cdot k_2 \cdot 40,250 \cdot \left(\frac{\gamma_c}{2.4}\right)^2 \cdot \sqrt[3]{f_c'} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (8)$$

여기서,  $f_c'$  : 콘크리트 설계기준강도  $\leq 367\text{kg/cm}^2$

$$1.5\text{t/m}^3 \leq \gamma_c \leq 2.5\text{t/m}^3$$

$$204\text{kg/cm}^2 \leq f_c' \leq 1,632\text{kg/cm}^2$$

$k_1 = 1.2$  : 석회암 쇄석, 보크사이트 쇄석

= 0.95 : 석영편암 쇄석, 현무암 쇄석, 안산암 쇄석, 옥석 쇄석, 점판암 쇄석

= 1.0 : 기타 굵은골재

$k_2 = 1.1$  : 플라이 애쉬

= 0.95 : 실리카흙, 고로 슬래그 미분말, 플라이애쉬 미분말

= 1.0 : 기타 혼화재, 혼화재 무혼입

### 3. 국내 실험치와 각 추정식 비교

본 연구에서는 1979~1996년 사이의 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 콘크리트학회지, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한건축학회 학술발표 논문집, 대한건축학회 논문집 등의 학술지와 국내 대학의 연구 논문으로부터 공시체 크기  $\phi 10 \times 20\text{cm}$ , 재령 28일, 수중양생한 보통중량의 고강도 콘크리트 및 초고강도 콘크리트 배합비, 압축강도, 탄성계수 및 단위중량에 관한 실험 데이터 440개를 수집하였으며<sup>(17)</sup>, 수집된 실험치와 기존의 탄성계수식으로부터 구한 추정치의 비로써 기존의 탄성계수식들을 평가하였다. 그 결과는 그림 1~4와 같다. 가로축은 콘크리트의 압축강도를 나타내며 세로축은 탄성계수식으로부터 구한 추정값을 실험값으로 나누어 무차원화한 비를 나타낸 것이다. 또한 계산된 값들을 회귀분석하여 평균개념의 직선을 표시하였다.

그림 1에서 ACI-363의 제안식이 국내 실험치에 비해 대체로 4~12%정도 높게 평가하고 있음을 볼 수 있다. 또한 이 식은 압축강도와 단위중량이 증가할수록 오차가 커지는 경향이 있는 것으로 보인다. 고강도 콘크리트를 실용화할 경우  $420\text{kg/cm}^2$  이상의 고강도 콘크리트에 대해 제안한 ACI 363식을 약  $700\text{kg/cm}^2$ 의 범위내에서 국내의 고강도 콘크리트 구조물 설계에 반영하는 것은 다소 온건한 것으로 보인다. 그러나 그 이상의 강도에서는 10%이상 과대평가하고 있어  $700\text{kg/cm}^2$ 이상의 초고강도 콘크리트에의 적용은 어려울 것으로 사료된다.

그림 2에서 CEB-FIP식은 전반적으로 국내의 실험치에 비해 전반적으로 10%이상 과대평가하고 있음을 볼 수 있으며, 단위중량과 압축강도가 증가함에 따라 실험치와의 차이가 감소하는 경향을 보인다.

그림 3에서는 일본의 New-RC Projcet 에서 제안된 새로운 탄성계수식이 국내의 실험치와 비교하여 압축강도가 증가할수록 실험치에 근접하는 경향이 있음을 볼 수 있다.

즉 압축강도  $700\text{kg/cm}^2$ 이상의 초고강도 콘크리트의 경우에는 대체적으로 적절히 안전측으로 평가하고 있으나 그 이하의 강도에서는 평균적으로 6~12%정도 높게 평가하고 있다. 한편 콘크리트의 단위중량의 변화에 따른 평가는 어느 정도 적절한 것으로 보인다.

그림 4에서는 NS식이 대체로 압축강도  $850\text{kg/cm}^2$ 이하의 강도에 대해서는 실험치에 비해 높게 평

가하고, 그 이상의 강도에 대해서는 낮게 평가하고 있음을 볼 수 있다.

이와 같이 국내의 실험치와 비교하여 기존식들은 탄성계수를 전반적으로 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 더욱이 전술한 수치들은 회귀분석한 평균 직선과 추정값과 측정값과의 비가 1인 곳과의 차이만을 나타낸 것으로서 부분적으로는 상당한 오차를 보이고 있는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있다. 이것은 구조물 설계시에 있어서 강성의 과대평가를 초래하여 안전성에 대한 문제의 소지가 있으므로 국내의 고강도 및 초고강도 콘크리트 구조물에 대한 설계 적용시 부적합한 것으로 사료된다

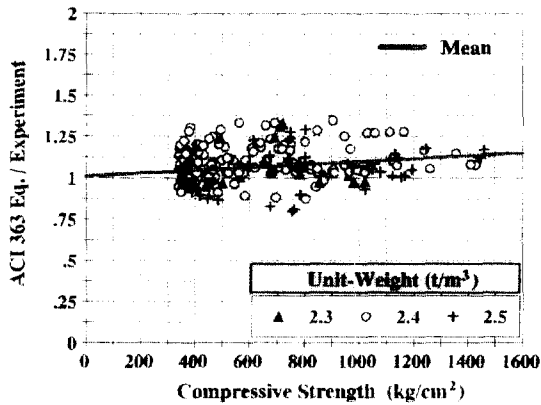


그림 1 압축강도와 탄성계수 오차값의 관계 (ACI 363식/국내 실험치)

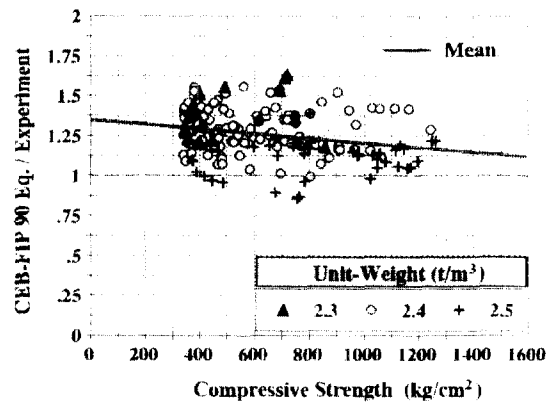


그림 2 압축강도와 탄성계수 오차값의 관계 (CEB-FIP MC식/국내 실험치)

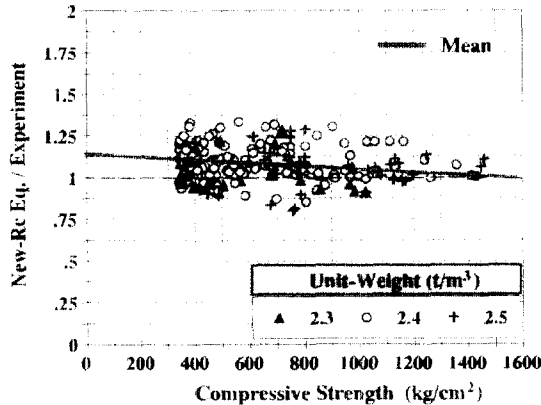


그림 3 압축강도와 탄성계수 오차값의 관계 (New RC식/국내 실험치)

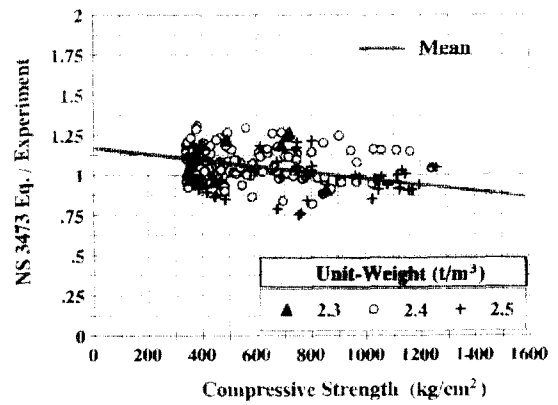


그림 4 압축강도와 탄성계수 오차값의 관계 (NS 3473식/국내 실험치)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 철근 콘크리트 구조물의 거동파악에 사용되고 있는 기존의 탄성계수 추정에 관한 기준식들을 국내의 고강도 콘크리트에 대한 실측 자료들과 비교 분석하여 고강도 콘크리트 구조물 설계 및 해석에 적합한 탄성계수식을 제시하고자 하였다.

440개의 고강도 콘크리트 및 초고강도 콘크리트의 압축강도와 탄성계수와의 관계에 대한 실험 데이터를 이용한 비교에서 기존식들은 탄성계수를 전반적으로 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. 이것은 구조물 설계시에 있어서 강성의 과대평가를 초래하여 안전성 문제의 소지가 있으므로 국내 고강도

콘크리트 구조물에 대한 설계시 적용이 부적합한 것으로 사료된다. 따라서 고강도 콘크리트에 대한 실험연구가 많이 수행되어 이를 기초로한 탄성계수식 정립이 있어야 하겠다. 또한 콘크리트의 강도가 고강도화 될수록 탄성계수는 사용골재의 종류에 따라 매우 큰 폭으로 변화하므로<sup>(12,15)</sup> 탄성계수식 정립이 있어서 이러한 특성에 대한 고려가 있어야 할 것으로 사료된다.

## ● 참고문헌 ●

1. ASTM Designation C 469 : Method of Test for Static Young's Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio in Compression of Cylindrical Concrete Specimens.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89)", ACI, Detroit, 1989.
3. 건설교통부, 콘크리트표준시방서, 1996.
4. Martinez, S., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Spirally-Reinforced High-Strength Concrete Columns", Department Report No.82-10, Structural Engineering Department, Cornell Univ. Ithaca, New York, 1982., pp. 255.
5. Zia, P., Leming, M. L., and Ahmad, S. H., "high-Performance Concrete: A State-of-Art Report", Research Report SHRP-C/FR-91-103, Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, N.C., January 1991.
6. ACI Committee 363, "State-of-Art Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-84)", ACI, Detroit, 1984.
7. Carrasquillo, R. L., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Properties of High-Strength Concrete Subject to Short-Term Loads", J. of ACI, Vol.78, No.3, 1981., pp. 171-178
8. 이장화 외 3인, "고강도 콘크리트의 실용화를 위한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제3권2호, 1991. 11., pp. 140-145.
9. (株)大宇 建設技術研究所, 高強度 콘크리트의 實用化를 위한 部材試驗 研究, DEP-C014-89, 1989.
10. CEB-FIP, Bulletin D'Information No.197, High-Strength Concrete State of Art Report, Aug. 1990.
11. Zhang, M. H., R nning, T. F., and Gj rvy, O. E., "Mechanical Properties High-Strength Concrete", Utilization of H.S.C., Lillehammer, Norway, June 20-24, 1993., pp. 1271-1279.
12. 野口貴文, 高強度コンクリートの基礎的力學特性に関する研究, 1995. 3.
13. Norwegian Codes 3473, Design of Concrete Structures, 1989.
14. 日本建築學會, 鐵筋 構造計算規準·同解説, 丸善, 1991.
15. (財)國土開發技術センター : New RC研究開發概要報告集, 1988.
16. 김무한 외 3인, "고강도 콘크리트의 개발과 공학적 특성에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 논문집, 제5권 2호 통권22호, 1989. 4., pp. 153-163.
17. 장일영 외 3인, "국내 실정에 적합한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수식 제안", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제8권2호, 1996. 11.