

# 국내의 실험자료를 이용한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수식 제안

## A Proposal of Elastic Modulus Equation for High-Strength and Ultra-High-Strength Concrete



장일영\*

Jang, Il-Young



박훈규\*\*

Park, Hoon-Gyu



윤영수\*\*\*

Yoon, Young-Soo

### 요 약

최근 들어 고강도 및 초고강도 콘크리트의 사용이 국내외적으로 비약적인 증가 추세에 있으며, 국내에서도 이와 관련된 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 재료개발 및 현장적용 측면에서의 연구가 활발하여 많은 성과를 얻어내고 있다. 그러나 설계단계부터 고강도의 콘크리트를 적용하는 차의미의 실용화 정도는 매우 미진한 실정이다. 이것은 설계단계부터 믿고 적용할 수 있는 고강도 콘크리트 관련 국내 설계기준이 확립되어 있지 않은 것이 가장 큰 원인이 되고 있다.

따라서 본 연구에서는 고강도 및 초고강도 콘크리트 설계기준 정립에 있어서 기초적 자료가 될 수 있는 탄성계수의 추정식을 제안하였다. 이것은 국내에서 실험된 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수 값들을 근거로 통계적 수법을 이용한 것으로 압축강도 400~1,000kg/cm<sup>2</sup>에 대해 적용할 수 있다. 또한 국외에서 발표된 탄성계수식을 국내의 실험값과 비교, 분석한 결과 전반적으로 과대평가하고 있음이 확인되어 본 연구에서 제안된 탄성계수 추정식이 국내실정에 적합할 것으로 사료된다.

\* 성희원, 금오공과대학교 토목공학과 교수

\*\* 성희원, 금오공과대학교 토목공학과 석사과정

\*\*\* 성희원, 삼성물산(주) 건설 기술연구소 선임연구원

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 2월 27일까지 학회로 보내주시면 1997년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## Abstract

This paper presents the improved elastic modulus equation more appropriate to predict the modulus of elasticity of structural elements designed and made by high- and ultra high-strength concrete under domestic situation in Korea.

To justify and assess the proposed elastic modulus equation, more than 400 laboratory test data domestically available in the literature and having the range of 400 to 1,000kg/cm<sup>2</sup> in concrete compressive strength were collected and analyzed statistically.

Comparison of the proposed elastic modulus equation with the previously suggested equations in the ACI363R, CEB-FIP, NS3473 and New-RC were also presented to demonstrate the applicability to practice.

**Keywords :** compressive strength, high-strength concrete, modulus of elasticity, unit weight, elastic modulus equation, ACI363R, CEB-FIP, NS3473, New-RC

## 1. 서 론

콘크리트의 고강도화는 부재단면 축소로 인한 자원절약과 경비절감의 경제적인 효과 외에도 콘크리트 부재의 프리캐스트화, 장기간 스펠 및 초고층화가 가능하다는 점 등 보통강도 콘크리트에 비해 많은 구조적 장점이 입증됨에 따라 실제 구조물의 적용이 최근 들어 국내외적으로 비약적인 증가 추세에 있다. 국외의 경우 일본이나 북미 지역에서는 고강도 콘크리트 실용화 초기 단계를 지나 토목 구조물, 특수 구조물 및 고층 건축물에 적용이 일반화 되어 있으며, 국내에서도 그에 대한 관심이 높아짐과 동시에 이의 실용화와 관련된 많은 연구가 이루어지고 있다.

미국, 일본 등 선진 외국에서는 고강도 및 초고강도 콘크리트에 대한 연구를 바탕으로 이미 자국의 재료특성을 고려한 실험적, 이론적 구성식들을 독자적으로 제시하고 있음에도 불구하고 국내의 경우, 국내 재료의 특성을 고려한 고강도 및 초고강도 콘크리트 재료모델 및 해석이론의 개발이 부족하여 설계단계부터 믿고 적용할 수 있는 국내 설계 규준이 확립되어 있지 않은 실정이며, 또한 아직까지 고강도 콘크리트를 이용한 부재의 설계 및 구조 해석 시 보통강도에 대해 정의된 규준식들을 사용하거나 대부분 외국의 규준식을 인용하여 적용하고 있는 실정이다.

따라서 국내 고강도 콘크리트 기술의 발전과 실용화를 위해서는 국내 콘크리트 구성재료의 특성을 고려한 독자적인 고강도 및 초고강도 콘크리트의 역학적 성질, 즉 탄성계수, 응력-변형률 특성, 포아송비, 인장강도 특성 등을 명확하게 규명하여 이를 바탕으로 기존의 규준식과 해석방법에 대한 체계적인 재정립이 절실히 필요하다. 특히 콘크리트 구조물의 설계 및 해석에 있어서나 혹은 단지 구조물의 치짐 제어에 있어서도 가장 중요한 재료적 변수는 탄성계수이므로 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성특성과 그 특성에 영향을 미치는 변수에 대한 정립이 무엇보다 우선되어야 할 것이다.

기존의 국내 실험 결과에 의하면 콘크리트의 강도가 고강도화 될 수록 탄성계수 값이 외국의 경우에 비해 비교적 작은 값을 나타내고 있다<sup>1)2)</sup>. 실제로 현재 국내의 철근콘크리트 구조물의 설계 및 해석시에 적용하고 있는 미국 ACI 318-89<sup>3)</sup> 및 ACI 363<sup>4)</sup>의 탄성계수식과 일본 AIJ<sup>5)</sup>의 규준식이 400kg/cm<sup>2</sup> 이상의 고강도 콘크리트에 대해서는 실측치 보다 과대 평가됨이 국내외에서 수행된 다수의 연구결과<sup>6)7)8)</sup>에서 지적되고 있다.

따라서 본 연구에서는 고강도 및 초고강도 콘크리트에 대해 수행된 국내의 탄성계수 실험치를 근거로 하여 국내의 실험치와 기존의 탄성계수식에 관한 외국의 규준 및 최근의 제안식들의 비교 및 고찰을 수행하여 국내의 고강도 및 초고강도 콘크리트

트에 관한 설계기준 정립에 있어서 기초적 자료가 될 수 있는 탄성계수 추정식을 제안하고자 한다.

## 2. 기존 탄성계수식에 대한 고찰

본 장에서는 최근에 많이 이용되고 있는 콘크리트의 탄성계수 추정식들의 특징을 고찰하고, 국내 실험치와의 비교를 통하여 국내의 실정에 적합한가를 평가하고자 한다.

### 2.1 기존의 탄성계수식

콘크리트 구조물의 설계나 해석에 있어서 중요한 재료특성인 콘크리트의 탄성계수는 공시체에 대한 압축시험으로 얻은 응력-변형을 관계에서 최대 압축강도( $f'_c$ )의 40%에 대응하는 강도에 대한 할선계수(secant modulus)를 사용하도록 한 ASTM C469<sup>(11)</sup>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.

#### (1) ACI 318-89식<sup>(12)</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>(13)</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>(14,15)</sup>에서 이 식이 콘크리트 압축강도 420kg/cm<sup>2</sup> 이상인 경우에 대해서는 실측치 보다 과대 평가하는 것으로 지적하고 있다.

$$E_c = \gamma_c^{1.5} \cdot 4,270 \cdot \sqrt{f'_c} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (1)$$

$$(1.442t/m^3 \leq \gamma_c \leq 2.483t/m^3)$$

#### (2) ACI 363식 (1984년)<sup>(16)</sup>

ACI 363에서는 ACI 318의 식이 과대 평가됨을

고려하여 1981년 Carrasquillo등<sup>(13)</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 어느 정도 양호한 상관관계를 갖는 것으로 보고되고 있다.<sup>(18)</sup> 그러나 이 식이 국내의 고강도 콘크리트에 대한 실험치에 비해서 여전히 높게(약 5%) 평가되고 있는 것으로 지적된 바 있다.<sup>(11,14)</sup>

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

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

$$\begin{cases} 2.32t/m^3 \leq \gamma_c \leq 2.42t/m^3 \\ 214kg/cm^2 \leq f'_c \leq 867kg/cm^2 (\phi 15.2 \times 30.5cm) \end{cases}$$

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

여기서,  $\sigma_{ck}$  = 재령 28일 설계 기준 강도  $\geq 300kg/cm^2$

#### (3) CEB-FIP MODEL CODE 90식(1990년)<sup>(14)</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>(16)</sup> 한편 野口貴文<sup>(19)</sup>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.

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

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

여기서,  $f_{ck}$  : 콘크리트의 강도  
 $f_{cm}$  : 재령 28일 압축강도

( $\phi$  15.2×30.5cm)

$\alpha = 1.2$  : 현무암, 경질석회암

1.0 : 석영암

0.9 : 석회암

0.7 : 사암

$$\} \leq 816\text{kg/cm}^2$$

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

여기서,  $f_{ck}$  : 콘크리트 설계 기준 강도  $\leq 367\text{kg/cm}^2$

$$\begin{cases} 1.5\text{t/m}^3 \leq \gamma_c \leq 2.5\text{t/m}^3 \\ 204\text{kg/cm}^2 \leq f'_c \leq 1,632\text{kg/cm}^2 \end{cases}$$

$k_1 = 1.2$  : 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 : 실리카흄, 고로 슬래그 미분말,

플라이 애쉬 미분말

= 1.0 : 기타 혼화재, 혼화재 무혼입

## 2.2 국내 실험치와 각 추정식 비교

(4) Norwegian Code NS 3473식 (1992년)<sup>(17)</sup>

NS 3473은 단위중량이 2.2t/m<sup>3</sup> 이상, 콘크리트 압축강도가 85MPa(867kg/cm<sup>2</sup>) 이하인 보통중량 콘크리트의 탄성계수 표준식을 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.

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

$$\begin{cases} 204\text{kg/cm}^2 \leq f_{cr} \leq 755\text{kg/cm}^2 (\phi 15.2 \times 30.5\text{cm}) \\ 255\text{kg/cm}^2 \leq f_{cr} \leq 867\text{kg/cm}^2 (10.0 \times 10.0 \times 10.0\text{cm}) \end{cases}$$

(5) 일본 건축학회(AIJ)<sup>(1)</sup>의 RC 구조계산 기준식 및 New RC 탄성계수 추정식<sup>(18)</sup>

현재 한국 건축학회 표준식으로 사용되는 일본 건축학회(AIJ)의 RC 구조계산 기준식(식(7))은 설계강도가 36MPa(367kg/cm<sup>2</sup>) 이하인 보통강도 콘크리트에 적용되며 실제로 이 식은 강도가 증가할수록 실측치와의 오차도 커지는 것으로 지적되고 있다.<sup>(9,10)</sup> 이에 따라 1988년부터 실시된 철근콘크리트 건축물의 초경량·초고층화 기술의 개발(약칭: New RC) 과제에서, 고강도 콘크리트의 탄성특성이 혼화재와 골재의 특성과 첨가정도에 따라 크게 변화됨을 고려하여, 많은 연구자들이 다양한 재료를 사용하여 실험한 약 3,000개의 수집 데이터로부터 콘크리트 강도 36MPa 이상인 경우에 대해서 식(8)의 탄성계수 추정식을 제안하였다.

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

본 연구에서는 콘크리트 압축강도 400kg/cm<sup>2</sup> 이상을 고강도 콘크리트라 정의하고, 국내 콘크리트 구성재료의 특성이 고려된 고강도(400~700kg/cm<sup>2</sup>) 및 초고강도(700~1,400kg/cm<sup>2</sup>) 콘크리트의 탄성계수 추정식을 제안하기 위하여 1979~1996년 사이의 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집,<sup>(19~47)</sup> 콘크리트학회지,<sup>(48~52)</sup> 대한토목학회 학술발표회 논문집,<sup>(53)</sup> 대한건축학회 학술발표회 논문집,<sup>(54)</sup> 대한건축학회 논문집<sup>(55~59)</sup> 등의 학술지와 국내 대학의 연구 논문<sup>(60~63)</sup>으로부터 공시체 크기  $\phi$  10×20cm, 재령 28일, 수중 양생한 보통중량의 압축강도가 350kg/cm<sup>2</sup> 이상인 콘크리트의 배합비, 압축강도, 활산탄성계수 및 단위중량에 관한 실험 데이터 440개를 수집하였다.

수집된 실험치와 기존의 탄성계수식으로부터 구한 추정치의 비로써 기존의 탄성계수식들을 평가하였으며, 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 증가

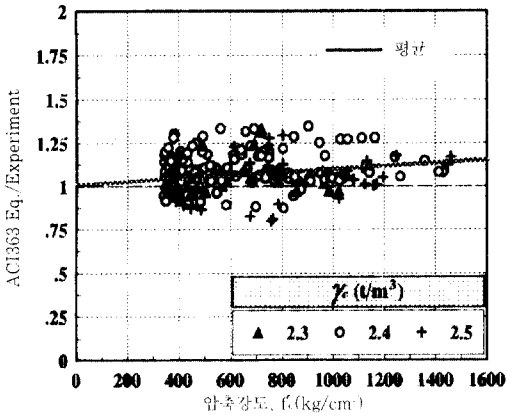


그림 1 압축강도와 탄성계수 오차값의 관계 (ACI 363식/국내 실험치)

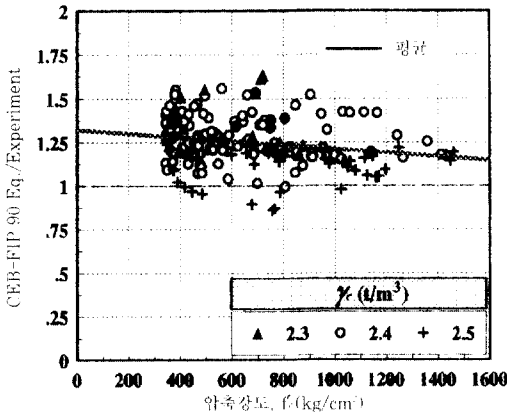


그림 2 압축강도와 탄성계수 오차값의 관계 (CEB-FIP MC 90식/국내 실험치)

12% 정도 높게 평가하고 있다. 한편 콘크리트의 단위중량의 변화에 따른 평가는 어느 정도 적절한 것으로 보인다.

그림 4에서는 NS식이 대체로 압축강도 850kg/cm<sup>2</sup> 이하의 강도에 대해서는 실험치에 비해 높게 평가하고, 그 이상의 강도에 대해서는 낮게 평가하고 있음을 볼 수 있다.

이와 같이 국내의 실험치와 비교하여 기존식들은 탄성계수를 전반적으로 과대평가하고 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 설계

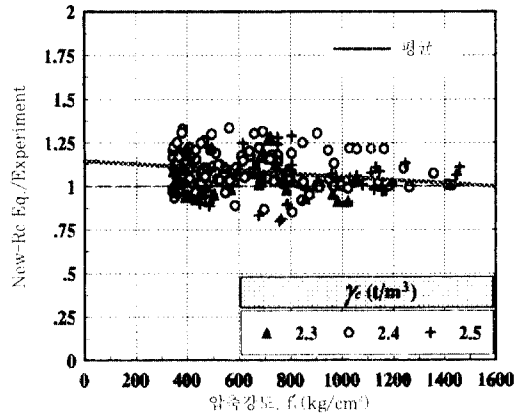


그림 3 압축강도와 탄성계수 오차값의 관계 (New-RC식/국내 실험치)

할 수록 오차가 커지는 경향이 있는 것으로 보인다.

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 Project 에서 제안된 새로운 탄성계수식이 국내의 실험치와 비교하여 압축강도가 증가할 수록 실험치에 근접하는 경향이 있음을 볼 수 있다.

즉 압축강도 700kg/cm<sup>2</sup> 이상의 초고강도 콘크리트의 경우에는 대체적으로 적절히 안전측으로 평가하고 있으나 그 이하의 강도에서는 평균적으로 6~

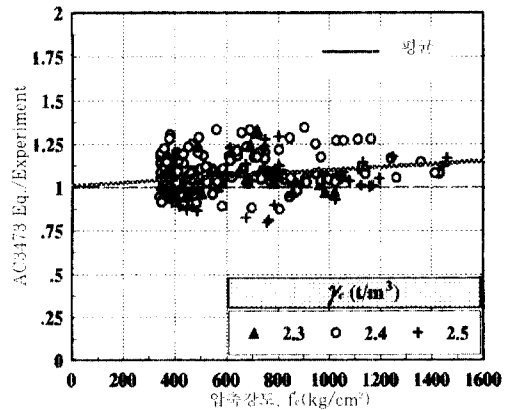


그림 4 압축강도와 탄성계수 오차값의 관계 (NS 3473식/국내 실험치)

시에 있어서 강성의 과대평가를 초래하여 안전성에 대한 문제의 소지가 있으므로 국내의 고강도 및 초고강도 콘크리트 구조물에 대한 설계 적용이 부적합한 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서 수집된 자료중 국내 고강도 및 초고강도 콘크리트 관련 실험 자료의 부족으로 인하여 검증이 되지 않은 자료가 포함되어졌음에도 불구하고 국내 실험치와 기존의 식을 비교한 결과가 콘크리트의 강도가 고강도화될 수록 탄성계수 값이 외국의 경우에 비해 비교적 작은 값을 나타내고 있음을 보고한 국내 실험 결과<sup>(1,2)</sup>와 일치함을 볼 때, 국내 고강도 및 초고강도 콘크리트에 대한 새로운 규준식 제립은 불가피한 것으로 사료된다.

### 3. 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수 식 제안

#### 3.1 단위중량의 평가

콘크리트의 단위중량은 전체용적의 60~80%를 차지하는 골재의 영향을 주로 받으며, 특히 고강도 콘크리트의 단위중량은 같은 재료를 사용하는 일반 콘크리트에 비해 단위수량이 감소함에 따라 상대적으로 약간 증가하는 경향이 있다. 따라서 고강도 콘크리트의 경우는 구조설계용 단위중량을 검토할 필요가 있다. 기존의 콘크리트 구조물의 설계에 적용되는 콘크리트의 단위중량은 통상 2.3~2.4t/m<sup>3</sup> 정도이다. 그러나 국내에서 실험된 자료를 이용하여 그림 5에서와 같이 압축강도와 단위중량과의 관계를 도시하여 보면 다소 분산성은 있으나 고강도 및 초고강도 콘크리트의 단위중량은 대체로 2.25t/m<sup>3</sup>~2.55t/m<sup>3</sup>의 범위내에 분포하고 있는 것으로 나타났다. 그림 5로부터 콘크리트의 단위중량과 콘크리트의 압축강도와의 관계를 회귀분석(상관계수 0.6)하여 식(9)를 도출하였으며, 압축강도가 증가함에 따라 단위중량도 완만히 증가하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 압축강도 400~1,000kg/cm<sup>2</sup> 범위의 콘크리트 구조물 설계시 적용될 단위중량은 2.37~2.45t/m<sup>3</sup> 정도로 분석될 수 있다. 실제로 기존의 실험들<sup>(1,46)</sup>에 의하면, 고강도 콘크리트의 경우 일반적으로 물-시멘트 비와 고성능 감수제 첨가량

에 관계없이 표준 수중 양생의 경우 2.40~2.45t/m<sup>3</sup>, 대기 양생의 경우 2.39~2.41t/m<sup>3</sup>의 값을 나타내고 있는 것으로 보고되고 있다.

또한 콘크리트 배합으로부터 산출한 단위중량으로부터 굳은 콘크리트의 단위중량을 평가하기 위하여, 수집된 재령 28일 수중 양생의 보통중량 콘크리트에 대한 데이터로 부터 배합 단위중량과 경화 후 굳은 콘크리트 단위중량의 관계에 대해 다음의 그림 6 및 식(10)과 같은 선형관계(상관계수 0.78)를 도출하였다. 그림 6에서 굳은 콘크리트 단위중량이 배합으로부터 산출된 콘크리트 단위중량에 비해 증가함을 볼 수 있는데, 이것은 양생방법 및 재령에 따라 차이가 있는 것으로 수중양생이나 밀봉양생할 경우 배합시의 반죽 단위중량에 비해 굳은 후의 단위중량이 증가하는 반면, 기중양생할 경우 재령의 증가에 따라 다소 감소하는 경향이 있다.<sup>(9)</sup>

$$\gamma_c = 1,933.1f_c^{0.034} \quad (9)$$

$\gamma_c$  : 굳은 콘크리트의 단위중량(kg/m<sup>3</sup>)

$f_c$  : 콘크리트의 압축강도(kg/cm<sup>2</sup>)

$$\gamma_b = 600 + (0.76 \times \gamma_c) \quad (10)$$

$\gamma_b$  : 굳은(압축강도 측정시) 콘크리트의 단위중량(=  $\gamma_c$ , kg/m<sup>3</sup>)

$\gamma_c$  : 콘크리트 배합 단위중량 (kg/m<sup>3</sup>)

#### 3.2 국내의 실험자료를 이용한 탄성계수식의 제안

CEB-FIP 90식과 New-RC식에서 각각  $\alpha$ 와  $k_1$

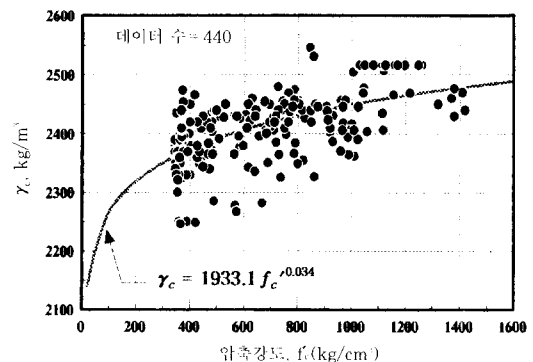


그림 5 굳은 콘크리트 단위중량과 압축강도와의 관계

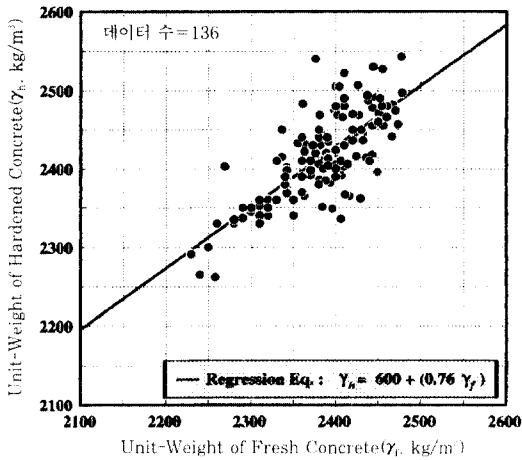


그림 6 콘크리트 배합으로부터 산출된 단위중량과 굳은 콘크리트 단위중량과의 관계

의 변수를 사용하여 구성재료의 지역적차이를 고려한 독자적 규준식을 마련하고 있음을 볼 때, 국내에서 적용되어질 탄성계수식 정립을 위해서는 국내 실험자료를 근거로 하여야 할 것이며, 콘크리트의 탄성계수를 추정하기 위하여 하나의 식으로써 제안할 경우 제안식의 신뢰성 확보를 위해서는 근본적으로 동일배합으로 공시체를 제작, 각각의 실험을 근거로 하여 탄성계수를 구하여야 한다.

그러나 콘크리트의 탄성계수는 각 구성재료의 탄성특성과 체적비, 굵은골재와 시멘트 페이스트 사이의 부착강도, 혼화재료의 사용량, 양생방법 및 습윤상태, 재하속도, 시험자, 시험기구, 시험방법, 공시체 가압면의 처리방법 등의 수많은 변수들에 의해 영향을 받으므로, 이러한 변수들을 고려한 실험을 통하여 콘크리트의 탄성적 특성을 명확하게 규명하여 하나의 식으로 수식화하는 것은 매우 어렵다<sup>(9,10)</sup>. 최근 일본의 New-RC Project에서 약 3000여개의 자국 실험데이터를 수집하여 이를 근거로 고강도 콘크리트에 대한 New-RC 탄성계수식<sup>(10)</sup>을 제시한 것도 이러한 까닭에서 일 것이다.

그러나 일반적으로 탄성계수식은 실용적 측면에서 측정이 용이한 단위중량과 압축강도만의 함수로써 식 (11)과 같이 간략하게 정의되어지고 있다<sup>(11)</sup>.

$$E_c = a((f'_c + b)^c + d) \cdot \gamma_c \quad (11)$$

$E_c$  : 탄성계수 추정치

$f'_c, \gamma_c$  : 콘크리트 압축강도 및 단위중량 추정값

$a, b, c, d, e$  : 회귀상수

따라서 본 연구에서도 수집한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 압축강도, 활산탄성계수 및 콘크리트 단위중량에 대한 데이터를 식(11)의 형태로써 다중 회귀분석을 수행하였다.

여기서, 콘크리트의 단위중량은 수집한 데이터의 평균치인 2.4t/m<sup>3</sup>에 대한 비로써 무차원화 하였다.

그림 7은 콘크리트의 단위중량에 따른 탄성계수와 압축강도와의 관계를 도시한 것으로서 회귀분석 결과로 식(12)의 탄성계수 추정식을 도출하였다(상관계수=0.806).

또한 단위중량 2.3t/m<sup>3</sup>, 2.4t/m<sup>3</sup>, 2.5t/m<sup>3</sup>에 대한 회귀분석 곡선을 그림 중에 나타냈으며, 이것은 단위중량의 증가에 따라서 탄성계수도 증가하는 경향을 나타내고 있다.

$$E_c = (10,000 \sqrt{f'_c} + 73,000) \cdot \left(\frac{\gamma_c}{2.40}\right)^{1.5} \quad (12)$$

여기서,

$E_c$  : 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수 (kg/cm<sup>2</sup>)

$f'_c$  : 재령 28일의 콘크리트 압축강도

(400~1,000kg/cm<sup>2</sup>,  $\phi 10 \times 20$ cm)

$\gamma_c$  : 콘크리트의 단위중량(2.25~2.55t/m<sup>3</sup>)

그림 8은 본 연구의 제안식(식(12))과 ACI 363 식(식(2)), CEB-FIP식(식(4)), New-RC식(식

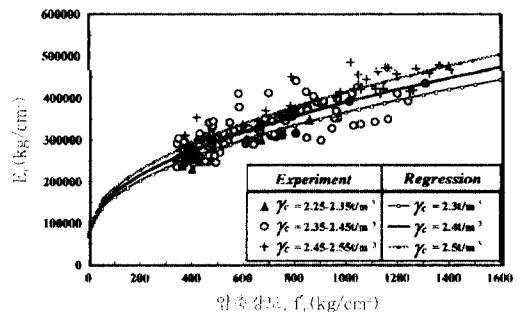


그림 7 콘크리트 단위중량에 따른 압축강도와 탄성계수의 관계

(8))의 관계를 나타낸 것으로서, 기존의 탄성계수 추정식들에 비해 국내의 실험값을 근거로 한 본 제안식의 값이 다소 작게 나타나는 경향을 보이고 있다.

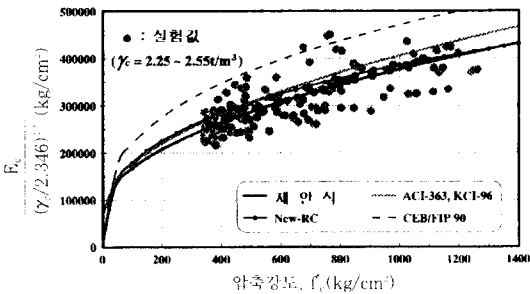


그림 8 탄성계수 추정에 관한 기존의 규정식과 제안식의 비교

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고강도 및 초고강도 콘크리트에 대해 수행된 국내의 탄성계수 실험치를 근거로 하여 기존의 탄성계수식들과의 비교, 분석 및 고찰을 하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 국내에서 실행된 고강도 및 초고강도 콘크리트에 대한 탄성계수 실험치와 기존의 탄성계수 추정식들을 비교한 결과, 기존의 추정식들은 탄성계수를 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. 이것은 구조물 설계시에 있어서 강성의 과대평가를 초래하여 안전성 문제의 소지가 있으므로 국내의 고강도 및 초고강도 콘크리트 구조물에 대한 설계시 적용이 부적합한 것으로 사료된다. 또한 수집된 자료 중에는 실험자료의 부족으로 인하여 검증이 되지 않은 자료가 포함되어졌음에도 불구하고 콘크리트의 강도가 고강도화 될 수록 탄성계수 값이 외국의 경우에 비해 비교적 작은 값을 나타내고 있음을 보고한 국내 실험 결과<sup>(1,2)</sup>와 일치하는 것을 볼 때 국내 고강도 및 초고강도 콘크리트에 대한 새로운 탄성계수식 정립이 불가피한 것으로 사료된다.

(2) 건조단위중량과 압축강도와의 관계식(식(9))과 배합시 단위중량과 경화후 건조단위중량과의 관계식(식(10))을 제안하였다. 그 결과, 압축강도가 증가함에 따라 단위중량도 완만히 증가하는 경향이 있으며, 압축강도 400~1,000kg/cm<sup>2</sup> 범위의 콘크리트 구조물 설계시 적용될 단위중량은

2.37~2.45t/m<sup>3</sup> 정도로 분석되어졌다.

(3) 단위중량과 압축강도를 변수로하는 고강도 및 초고강도 콘크리트에 적합한 탄성계수식(식(12))을 새로이 제안하였으며, 이식은 기존식들에 비해 작은 탄성계수값을 나타내며, 일부 검증이 되지 않은 자료를 포함하고 있으나 다수의 국내 실험치를 근거로한 것이므로 국내실정에 적합할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 건설교통기술연구개발사업의 "국내실정에 맞는 고강도 콘크리트의 개발 및 실용화 연구"에서 도움을 받았으므로 감사의 뜻을 전합니다.

#### 참 고 문 헌

1. 이상화 외 3인, "고강도 콘크리트의 실용성 향상을 위한 실험적 연구", 콘크리트학회지, 제4권2호, 1992. 6., pp. 83-92.
2. 대우엔지니어링 기술연구소, 고강도 콘크리트의 경제적 배합비 결정 및 실용화에 관한 연구, DWERI-CE-10, 1988. 4.
3. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-89), ACI, Detroit, 1989.
4. ACI Committee 363, State-of-Art Report on High-Strength Concrete(ACI 363R-84), ACI, Detroit, 1984.
5. 日本建築學會, 鐵筋 構造計算規準·同解説, 丸善, 1991.
6. S. P. Shah, and S. H. Ahmad, High Performance Concretes and Applications, St Edmundsbury Press, London, 1994.
7. 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.
8. Zia, P., Leming, M. L., and Ahmad, S. H., "High-Performance Concrete: A State-of-Art Report", Research Report SHRP-C/FR-91-103, North Carolina State University, Raleigh, N.C., January 1991.



9. 野口貴文, 高強度コンクリートの基礎的力學特性に關する研究, 東京大學, 博士論文, 1995. 3.
10. 김무한 외 3인, "고강도 콘크리트의 개발과 공학적 특성에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 논문집, 제5권2호 통권22호, 1989. 4., pp. 153-163.
11. ASTM Designation C 469: Method of Test for Static Young's Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio in Compression of Cylindrical Concrete Specimens.
12. 건설교통부, 콘크리트표준시방서, 1996.
13. 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
14. (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.
15. CEB-FIP, Bulletin D'Information No.197, High-Strength Concrete State of Art Report, Aug. 1990.
16. Zhang, M. H., Rnning, T. F., and Gjrv, O. E., "Mechanical Properties High-Strength Concrete", Lillehammer, Norway, June 20-24, 1993., pp. 1271-1279.
17. Norwegian Codes 3473, Design of Concrete Structures, 1989.
18. (財)國土開發技術センター: New RC研究開發概要報告集, 1988.
19. 이강건 외 3인, "중심 축력을 받는 고강도 철근 콘크리트 기둥의 내력 및 연성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제2권2호, 1990. 10., pp. 57-62.
20. 최창식 외 3인, "反復荷重을 받는 鐵筋콘크리트 低型 剪斷壁의 履歴舉動에 關한 實驗的 研究(1)", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제3권1호, 1991. 5., pp. 75-80.
21. 권영호 외 2인, "高強度 콘크리트의 配合方法과 運搬特性에 關한 實驗的 研究", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제4권1호, 1992. 5., pp. 7-12.
22. 남상원, 김무한, "高強度 콘크리트의 工學的 特性에 미치는 單位시멘트량의 影響에 關한 實驗的 研究", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제4권1호, 1992. 5., pp. 41-46.
23. 박기철 외 2인, "고강도 재료를 사용한 철근 콘크리트 보·기둥 외부접합부의 전단내력에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제4권1호, 1992. 5., pp. 59-66.
24. 김진근, 박찬규, "주철근비에 따른 고강도 콘크리트 보의 휨거동", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권1호, 1994. 5., pp. 71-76.
25. 최근도 외 4인, "전단보강비에 따른 고강도 철근콘크리트 내력벽의 이력특성", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권1호, 1994. 5., pp. 85-90.
26. 김무한 외 4인, "콘크리트 密室化에 의한 鹽害對策 및 傍聽效果에 關한 實驗的 研究", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권1호, 1994. 5., pp. 142-147.
27. 이상화 외 3인, "콘크리트 장기특성 실험연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권1호, 1994. 5., pp. 187-190.
28. 오병환 외 3인, "고강도 콘크리트의 역학적 특성 및 현장타설 실험 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권2호, 1994. 11., pp. 83-86.
29. 김진근, 김훈, "양생온도에 따른 콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권2호, 1994. 11., pp. 93-98.
30. 김진근, 이철성, "부순모래 콘크리트의 파괴역학적 특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권2호, 1994. 11., pp. 99-104.
31. 윤영수 외 6인, "고강도 콘크리트의 내부온도이력과 경화콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권2호, 1994. 11., pp. 127-132.
32. 소현장 외 3인, "1,200kg/cm<sup>2</sup> 초고강도 콘크리트에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권2호, 1994. 11., pp. 133-136.
33. 이리형 외 5인, "반복 횡하중을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥의 이력거동", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권2호, 1994. 11., pp. 337-342.
34. 김무한, 권영진, "流動化콘크리트의 施工性向上 및 強度特性에 關한 基礎的 研究(II)", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제1권1호, 1989. 11., pp. 21-24.
35. 김무한 외 5인, "재생골재콘크리트의 공학적 특성에 미치는 재생골재 혼합조건의 영향에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제5권1호, 1993. 5., pp. 16-25.
36. 김진춘, 최광일, "조강슬래그시멘트를 이용한 콘크리트의 기초물성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제7권1호, 1995. 5., pp. 72-77.
37. 김무한 외 3인, "플라이애시를 혼입한 재생골재콘크리트

- 리트의 시공성 및 역학적 특성에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제7권1호, 1995. 5., pp. 78-83.
38. 김무한 외 3인, “플라이애시 및 실리카흙을 사용한 고강도유동화 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제7권1호, 1995. 5., pp. 84-87.
39. 오영훈 외 3인, “고강도 콘크리트 보-기둥-슬래브 접합부의 반복하중 실험”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제7권1호, 1995. 5., pp. 339-344.
40. 김진근 외 3인, “초유동 콘크리트의 재료특성에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제7권2호, 1995. 11., pp. 56-62.
41. 박철림 외 4인, “열병합발전소 플라이애시의 품질 및 콘크리트의 역학적 특성”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제7권2호, 1995. 11., pp. 69-74.
42. 박종협, 정영수, “해사를 사용한 고강도 콘크리트의 물성실험 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제7권2호, 1995. 11., pp. 159-163.
43. 김무한 외 4인, “고강도영역 재생골재의 현장적용을 위한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제7권2호, 1995. 11., pp. 256-261.
44. 김무한 외 5인, “골재의 종류에 따른 고강도 콘크리트의 시공 특성에 관한 기초적 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제8권1호, 1996. 5., pp. 12-23.
45. 김진철 외 5인, “강관충전용 콘크리트의 재료 개발에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제8권1호, 1996. 5., pp. 101-106.
46. 문한영, 김진철, “실리카흙 혼입 고강도 콘크리트의 기초물성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제3권2호, 1991. 11., pp. 21-25.
47. 김진근 외 2인, “고강도 콘크리트의 재료역학적 특성 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제4권2호, 1992. 11., pp. 111-118.
48. 배수호 외 3인, “고성능 감수제를 사용한 콘크리트의 품질 특성에 관한 연구”, 콘크리트학회지, 제6권6호, 1994. 12., pp. 135-142.
49. 구봉근 외 2인, “강섬유 보강이 고강도 콘크리트의 강도 특성에 미치는 영향”, 콘크리트학회지, 제4권2호, 1992. 6., pp. 93-101.
50. 장일영 외 2인, “초고강도 콘크리트의 재료특성 및 휨 거동에 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회지, 제4권2호, 1992. 6., pp. 111-118.
51. 김진근, 이철성, “강모래 및 부순 모래 콘크리트의 파괴특성에 관한 연구”, 콘크리트학회지, 제7권4호, 1995. 8., pp. 129-136.
52. 오병환, 이성로, “고강도 콘크리트의 통계적 특성을 이용한 품질관리”, 콘크리트학회지, 제3권1호, 1991. 3., pp. 33-41.
53. 오병환, “고강도 콘크리트의 효율적인 품질관리 기법”, 대한토목학회지, 제42권4호, 1994. 8., pp. 17-27.
54. 이성준 외 2인, “고강도 콘크리트의 특성이 극한강도설계시 부재단면에 미치는 효과에 관한 연구”, 대한건축학회 학술발표논문집, 제6권2호, 1986. 10., pp. 403-406.
55. 김무한 외 2인, “실리카 흙을 혼입한 고강도콘크리트의 개발 및 그 응용에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집, 제8권5호, 통권43호, 1992. 5., pp. 179-188.
56. 김무한, 윤석천, “고성능 감수제를 사용한 콘크리트의 시공성향상에 및 강도특성에 관한 기초적 연구”, 대한건축학회 논문집, 제4권5호, 통권19호, 1988. 10., pp. 323-333.
57. 김무한, 김문한, “고성능감수제를 사용한 콘크리트의 유동화성능 및 강도특성에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집, 제5권1호, 통권21호, 1989. 2., pp. 153-165.
58. 윤승조, 김성수, “고강도 콘크리트 기둥의 강도와 연성에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집, 제10권10호, 통권72호, 1994. 10., pp. 193-197.
59. 임경택, 정현수 “구속된 고강도 철근 콘크리트 기둥의 거동에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집, 제8권10호, 통권48호, 1992. 10., pp. 163-171.
60. 安泰松, 高強度 콘크리트의 基礎의 性質에 關한 研究, 漢陽大學校 土木工學科 碩士論文, 1979. 7.
61. 宋基賢, 플라이애시를 混入한 高強度 콘크리트의 施工性 및 工學의 特性에 關한 實驗의 研究, 忠南大學校 建築工學科 碩士論文, 1992. 10.
62. 文大重, 실리카흙을 混入한 高強度 콘크리트의 諸性質에 對한 實驗의 研究, 漢陽大學校 土木工學科 碩士論文, 1993. 12.
63. 엄주환, 고유동성 콘크리트를 이용한 보부재의 충전 상황별 휨 거동 연구, 금오공과대학교 토목공학과 석사논문, 1995. 11.

(접수일자 : 1996. 7. 20)