

# 고강도 콘크리트의 탄성계수 추정에 관한 연구

## Prediction of Elastic Modulus of High-Strength Concrete

장일영<sup>\*</sup>      박훈규<sup>\*\*</sup>      이승훈<sup>\*\*\*</sup>      김규동<sup>\*\*\*\*</sup>      손유신<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
Jang, Il Young   Park, Hoon Gyu   Lee, Sung Hoon   Kim, Gyu Dong   Sohn, Yu Shin

### 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-strength concrete.

To propose the elastic modulus equation, more than 300 laboratory specimen tests having the range of 500 to 800kgf/cm<sup>2</sup> in concrete compressive strength were conducted and analyzed statistically. The equation derived in terms of empirical constant, the elastic moduli of coarse aggregate and mix proportions.

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

### 1 서론

콘크리트 탄성계수는 콘크리트 구조물의 설계 및 해석에서나 구조물의 처짐제어에 있어서 가장 중요한 변수이다. 콘크리트 탄성계수는 각 구성재료의 탄성특성과 체적비, 굵은골재와 시멘트 페이스트 사이의 부착강도, 혼화재료의 사용량, 양생방법 및 습윤상태, 재하속도, 시험방법, 공시체 가압면의 처리방법 등의 수많은 변수들에 의해 영향을 받으며, 실제로 측정된 탄성계수는 동일한 압축강도 에서도 30~40%이상 큰 차이로 측정되고 있다<sup>(1)</sup>. 따라서 본 연구에서는 국내 고강도 콘크리트 기술의 발전과 배합재료 활용의 극대화를 위한 방법으로 국내 콘크리트 구성재료 특성을 고려한 동일한 압축강도에서 최대의 탄성계수를 얻기 위한 방안을 모색하기 위하여, 물-결합재비(W/B) 24~38%, 단위수량(W) 161~181kg/m<sup>3</sup>, 굵은골재 용적율(V<sub>G</sub>) 0.31~0.38, 굵은골재 최대치수(D<sub>G</sub>) 13~25mm를 변수로 하여 재령 28일, 56일 각 150개의 공시체에 대한 탄성계수 실험을 수행하였다. 또한 실험결과에 대한 상관분석, 주성분분석의 통계적 연구를 통하여 탄성계수에 미치는 배합재료의 영향을 분석하였으며, 그 결과 단위수량, 시멘트량, 잔골재량 또는 잔골재율의 배합변수를 독립변수로 하여 회귀분석을 수행할 경우 배합재료로부터 탄성계수를 추정할 수 있는 적절한 모델식을 도출할 수 있는 것으로 나타났다<sup>(2)</sup>.

이러한 연구 결과를 바탕으로 본 연구에서는 배합설계단계부터 압축강도 등급에 상관없이 고강도 콘크리트 탄성계수를 추정할 수 있는 모델식을 제시하여 탄성계수 향상을 위한 적절한 배합재료 량을 선정함에 있어서 효과적인 자료를 마련하고자 한다.

- \* 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수
- \*\* 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 강사
- \*\*\* 정회원, 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 선임연구원
- \*\*\*\* 정회원, 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 전임연구원
- \*\*\*\*\* 정회원, 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 연구원

## 2 합성모델을 이용한 경화전 콘크리트 탄성계수 추정식

### 2.1 기존 합성모델식

콘크리트는 굵은골재와 모르타의 합성체로 간주할 수 있으므로, 골재의 형태나 용적량에 대한 정확한 정보가 주어질 경우 합성모델을 이용한 콘크리트 탄성거동 해석방법은 큰 불확실성을 가지고 있는 경험적 추정식에 비해 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

합성모델에서 콘크리트 탄성계수는 내부 골재 입자(굵은골재 또는 굵은골재+잔골재)와 입자를 둘러싸고 있는 매트릭스(모르타 또는 시멘트 풀)의 탄성계수와 용적량에 근거하여 계산된다. 따라서 흔히 2개 재료의 합성으로 가정된다<sup>(3)</sup>.

기존에 제시된 콘크리트 탄성계수를 추정하기 위한 합성모델 중 가장 단순한 형태는 Reuss-Voigt 모델이다. Reuss-Voigt의 모델로부터 발전하여 Hirsch 모델, Counto 모델, Hanson 모델 등이 제시되어 왔으며, Nielsen, Baalbaki 등은 이러한 모델이 고강도 콘크리트에서도 적절히 적용될 수 있음을 시사한바 있다. 이러한 기존의 대표적인 합성모델을 Table 1에 정리하였다<sup>(4)</sup>.

Table 1 Composite models for applied to concrete

Researcher	Equation	
Dantu-Hansen	$E_c = V_a E_a + (1 - V_a) E_m$	(1)
Dantu-Hansen	$E_c = 1 / \{ (1 - V_a) / E_m + V_a / E_a \}$	(2)
Hirsch	$E_c = 1 / [K_1 V_a / E_a + K_2 (1 - V_a) E_m]$ $K_1 = 1 - 2Z / \pi \cdot [1 - 1 / \{ (1 - V_a) E_a / E_a + V_a \}]$ $K_2 = 1 - 2Z / \pi \cdot [1 - 1 / \{ (1 - V_a) + V_a E / E_m \}]$	(3)
Dougill-Hirsch	$E_c = 1 / [0.5 / \{ V_a E_a + (1 - V_a) E_m \} + 0.5 / \{ V_a / E_a + (1 - V_a) / E_m \}]$	(4)
Counto	$E_c = 1 / \{ (1 - \sqrt{V_a}) / E_m + \sqrt{V_a} / \{ \sqrt{V_a} E_a + (1 - \sqrt{V_a}) / E_m \} \}$	(5)
Illston	$E_c = 1 / \{ (1 - \sqrt[3]{V_a}) / E_m + \sqrt[3]{V_a} / \{ \sqrt[3]{V_a} E_m^2 + (1 - \sqrt[3]{V_a^2}) E_m \} \}$	(6)
Hashin	$E_a = E_m (1 - 2\nu_c) / (1 - \nu_m) \{ [E_m (1 - V_a) / (1 - \nu_m) + \{ (1 + \nu_m) / 2 (1 - 2\nu_m) + V_a \} \cdot E_a / (1 - 2\nu_a) ] / [ \{ 1 + (1 + \nu_m) V_a / 2 \cdot (1 - 2\nu_a) \} E_m / (1 - 2\nu_m) + (1 - V_a) (1 + \nu_m) \cdot E_a / 2 (1 - 2\nu_m) (1 - 2\nu_a) ] \}$	(7)
Maxwell	$E_c = E_m \{ 2E_m + E_a - 2V_a (E_m - E_a) \} / \{ 2E_m + E_a + V_a (E_m - E_a) \}$	(8)
Notations		
$E_c$ : Modulus of elasticity of concrete	$Z$ : Empirical factor of Hirsch	
$E_a$ : Modulus of elasticity of coarse aggregate	$\nu_c$ : Poisson ratio of concrete	
$E_m$ : Modulus of elasticity of mortar	$\nu_a$ : Poisson ratio of coarse aggregate	
$V_a$ : Volume fraction ratio of coarse aggregate	$\nu_m$ : Poisson ratio of mortar	

그러나 이러한 합성모델의 단점은 콘크리트가 단지 모르타와 골재와 같이 두 개의 성분으로 구성된 것이 아니라 모르타와 골재 접촉면의 천이영역(공극)이 함께 존재하기 때문에 더욱 정확한 해석을 위해서는 천이영역을 포함한 3개 요소의 합성으로 모델화하여야 하는 어려움이 있다.

### 2.2 탄성계수 추정식 제안

본 연구에서는 가장 간단한 형태의 합성모델식을 실험결과에 적용하여 배합설계단계부터 콘크리트의 탄

성계수를 추정할 수 있는 모델식을 개발하고자 한다.

Table 1의 모델식 중 가장 단순한 형태는 식(1)과 식(2)일 것이다. 이 중 식(1)은 경량골재 콘크리트와 같이 모르터 매트릭스의 강성에 비해 골재의 강성이 작은 경우에 적합하며, 식(2)는 모르터 강성에 비해 골재의 강성이 큰 일반 콘크리트에 적용이 가능하다. 따라서 식(2)로부터 콘크리트 탄성계수는 다음 식(9)로 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{E_c} - \frac{V_a}{E_a} = \frac{V_m}{E_m} = \frac{1 - V_a}{E_m} \quad (9)$$

식(9)에 대해 콘크리트 탄성계수 실험값( $E_c$ )과 굵은골재 용적률( $V_a=V_G$ ), 사용된 굵은골재의 탄성계수( $E_a=650000\text{kgf/cm}^2$ )를 적용하여 모르터 성분과 굵은골재의 영향을 고려하여 다음 식(10)과 (11)의 관계로 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{E_c} - \frac{V_G}{E_a} = \frac{1 - V_G}{E_m} = [a + b(W/B)] [cW^d] \quad (10)$$

$$\frac{1}{E_c} - [a + b(W/B)] [cW^d] = \left[ \frac{V_G}{E_a} \right] eD_G^f \quad (11)$$

위 식에서 a, b, c, d, e, f는 회귀상수 이며, 식(10)의 우변항은 동일한 굵은골재량( $V_G$ )에서 콘크리트 탄성계수에 미치는 모르터 성분의 영향을 나타내는 것이다. 식(11)의 우변항은 동일 단위수량(W)에서 굵은골재량과 최대치수의 영향을 표현한다.

Fig.1은 재령 28일 및 56일에 대한 동일한 굵은골재량에서 모르터 성분의 영향을 나타낸 것으로 식(4.9)의 좌변항과 상관성이 가장 좋은 물-결합재비의 항으로 표현하였다.

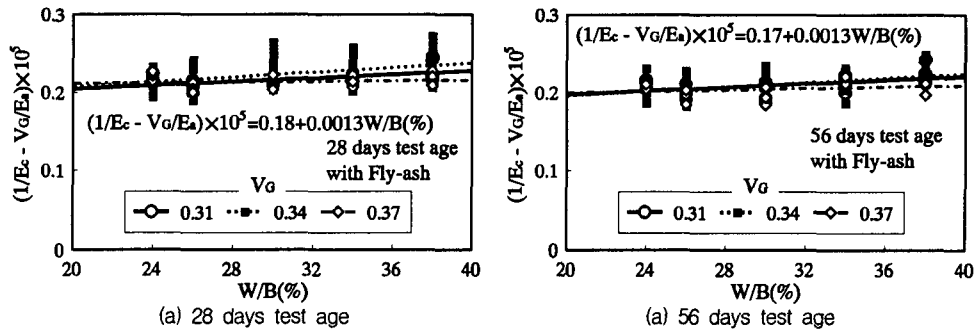


Fig.1 Relations between  $(1/E_c - V_G/E_a)$  and  $W/B$

식(10)과 식(11)의 관계에 대해 다중회귀분석을 수행하여 식(12) 및 식(13)과 같이 재령 28일 및 56일 각각에 대한 탄성계수 추정식을 도출하였다.

재령 28일:

$$\frac{1}{E_c} = 0.97 \left[ \frac{0.18 + 0.0013(W/B(\%))}{100000} \right] \cdot \sqrt{\frac{W}{161}} + \frac{V_G}{E_a} \left( \frac{1.6}{D_G^{0.16}} \right) \quad (12)$$

재령 56일:

$$\frac{1}{E_c} = 0.97 \left[ \frac{0.17 + 0.0013(W/B(\%))}{100000} \right] \cdot \sqrt{\frac{W}{161}} + \frac{V_G}{E_a} \quad (13)$$

### 2.3 제안식 검토

실험을 통하여 얻은 탄성계수 값과 식(12) 및 식(13)으로부터 구한 각 재령에 대한 탄성계수값 비교를 Fig.2와 Fig.3에 나타내었다.

비교결과에서 볼 수 있듯이 식(12)와 (13)의 추정식은 측정된 고강도 콘크리트 압축강도 전반에 걸쳐  $\pm 10\%$ 오차 범위내에서 실험결과와 적절히 일치함을 알 수 있다. 따라서 제시된 탄성계수 추정식은 본 연구의 실험자료 범위(W/B)=24~38%, W=161~181kg/m<sup>3</sup>, V<sub>G</sub>=0.31~0.38, D<sub>G</sub>=13~25mm)내에서 압축강도 등급에 상관없이 고강도 콘크리트 탄성계수 향상을 위한 적절한 배합재료의 량을 선정함에 있어서 효과적인 자료가 될 수 있을 것이다.

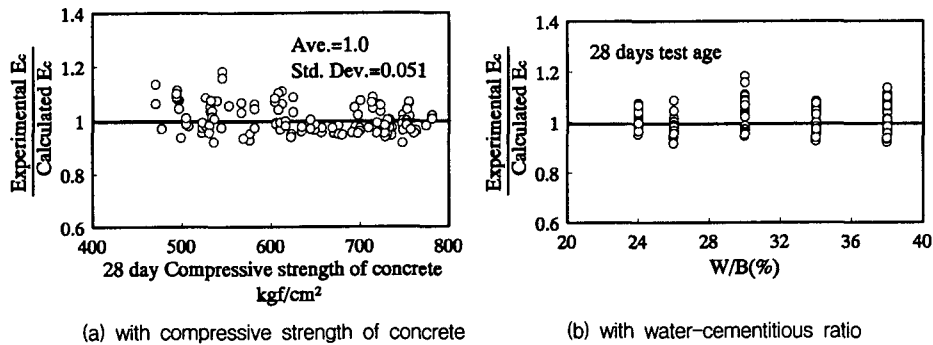


Fig.2 Comparison of predicted and experimental modulus of elasticity of high-strength concrete at 28 days test age

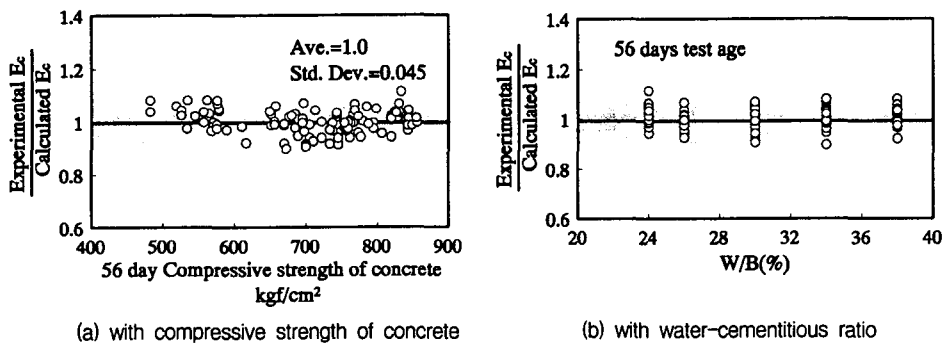


Fig.3 Comparison of predicted and experimental modulus of elasticity of high-strength concrete at 56 days test age

### 3. 경화후 콘크리트 탄성계수 추정식

콘크리트 구조물의 설계나 해석에 있어서 중요한 재료특성인 콘크리트의 탄성계수는 공시체에 대한 압축실험으로 얻은 응력-변형률 관계에서 최대 압축강도의 40%에 대응하는 강도에 대한 할선계수(secant modulus)를 사용하도록 한 ASTM C469의 규정을 일반적으로 따르고 있으며 국내에도 이 규정을 따르고 있다. 할선계수법과 원주공시체를 사용할 경우 고강도 콘크리트의 탄성계수를 비교적 간단하게 추정하기 위하여 제안된 대표적인 식은 ACI 363식과 New-RC 탄성계수 추정식 등이 있다. 이러한 대표적인 기준식들은 일반적으로 실용적 측면에서 측정이 용이한 단위중량과 압축강도만의 함수로써 식(20)과 같이 간략하게 정의되고 있다.

$$E_c = a[(f_c + b)^c + d] \cdot \gamma_c^e \quad (20)$$

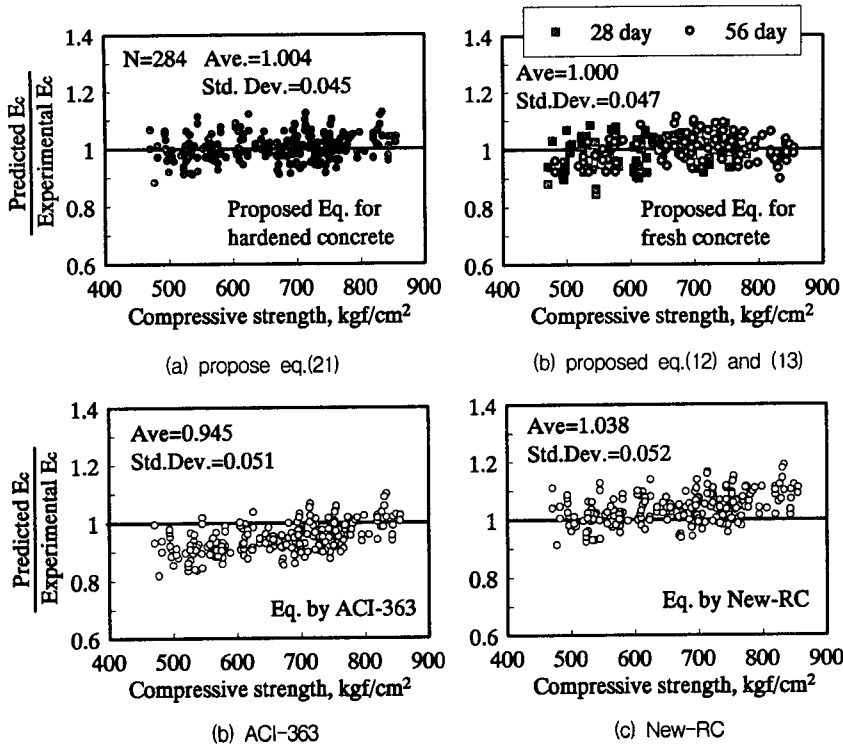


Fig.5 Comparison of predicted and experimental modulus of elasticity of high-strength concrete

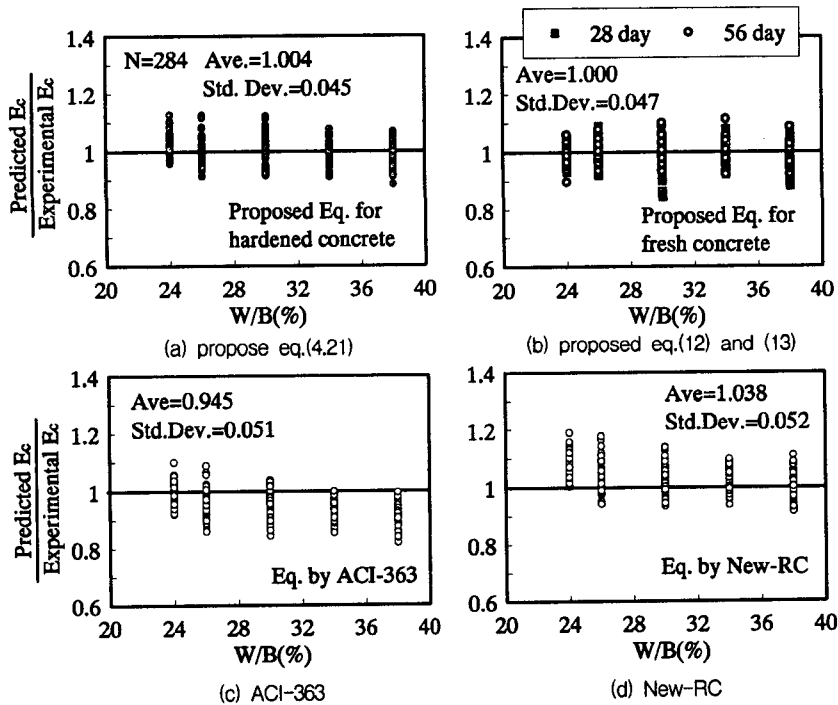


Fig.6 Comparison of predicted and experimental modulus of elasticity of high-strength concrete

식(20)에서 a, b, c, d, e는 회귀상수 이다. 본 연구에서는 압축강도( $f_c=500\sim 850\text{kgf/cm}^2$ ,  $\Phi 15\times 30\text{cm}$ ), 탄성계수 및 콘크리트 단위중량에 대한 실험결과를 식(20)의 형태로써 다중 회귀분석을 수행하여 식(21)의 경화 후 고강도 콘크리트의 탄성계수를 추정하기 위한 식을 도출하였다.

$$E_c = (220000\sqrt{f_c} + 6000) \cdot \frac{\gamma_c}{2.4} \quad (21)$$

Fig.5와 Fig.6은 실험결과와 본 연구 제안식 및 ACI 363, New-RC식의 차이를 비교한 것이다.

비교에서 기존의 식에 비해 본 연구 제안식이 고강도 콘크리트의 압축강도 전반에 걸쳐 실험결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 또한 Fig.5(b) 및 Fig.6(b)에서 볼 수 있듯이 사용된 배합재료 량을 이용한 탄성계수 추정 결과와 경화후 압축강도와 단위중량으로 추정한 결과의 정확도 차이가 없음을 알 수 있어, 식(12)와 (13)의 배합비로부터 탄성계수를 추정하기 위한 본 연구 제안식의 적용성을 확인 할 수 있다.

그러나 이러한 연구에도 불구하고 양호한 품질의 동일한 압축강도내에서 품질관리가 잘 된 동일한 탄성계수로 취급할 수 있는 탄성계수 변동정도에 대한 한계값이 얼마 인가하는 문제점은 여전히 남아있다.

따라서 엄격한 품질관리하에서 많은 동일 배합에 대한 고강도 콘크리트 탄성계수 실험을 통하여 탄성계수 품질 등급을 결정하기 위한 연구가 필요할 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 국내 고강도 콘크리트 기술의 발전과 배합재료 활용의 극대화를 위한 방법으로 국내 콘크리트 구성재료 특성을 고려한 동일한 압축강도에서 최대의 탄성계수를 얻기 위한 방안을 모색하기 위한 연구를 수행하였으며, 그 결과 가장 간단한 형태의 합성모델식을 실험결과에 적용하여 배합설계단계부터 콘크리트의 탄성계수를 추정할 수 있는 모델식을 제시하였다. 제시된 탄성계수 추정식은 본 연구의 실험자료 범위( $W/B=24\sim 38\%$ ,  $W=161\sim 181\text{kg/m}^3$ ,  $V_G=0.31\sim 0.38$ ,  $D_G=13\sim 25\text{mm}$ )내에서 압축강도 등급에 상관없이 고강도 콘크리트 탄성계수 향상을 위한 적절한 배합재료의 량을 선정함에 있어서 효과적인 자료가 될 수 있다.

#### 참고문헌

1. 장일영, 윤영수, 박훈규, “국내의 실험자료를 이용한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수식”, 한국콘크리트학회지, 제8권6호, 1996년 12월
2. 이승훈 외 4명, “고강도 콘크리트의 탄성계수에 미치는 배합재료의 영향 평가”, 한국콘크리트학회 학술발표회, 2001년 5월
3. Young, J. F., Concrete, Prentice-Hall, Inc., 1981
4. 콘크리트의 調合設計指針・同解説, 日本建築學會, 1999