

# 새로운 겉보기 활성화에너지 함수에 의한 콘크리트의 재료역학적 성질의 예측

## Prediction of Mechanical Properties of Concrete by a New Apparent Activation Energy Function

한 상 훈\*      김 진 근\*\*  
Han, Sang Hun      Kim, Jin Keun

### ABSTRACT

New prediction model is investigated estimating splitting tensile strength and modulus of elasticity with curing temperature and aging. New prediction model is based on the model which was proposed to predict compressive strength, and splitting tensile strength and modulus of elasticity calculated by this model are compared with experimental values. New prediction model well estimated splitting tensile strength and elastic modulus as well as compressive strength.

### 1. 서 론

양생온도와 재령에 따른 콘크리트의 압축강도 변화에 대한 예측 모델식은 많은 연구자들에 의해 제시되었지만 탄성계수와 쪼갬인장강도를 양생온도와 재령에 따라 예측하는 모델식은 거의 없다. 그렇다고 해서 탄성계수와 쪼갬인장강도의 양생온도와 재령에 따른 예측이 중요하지 않은 것은 아니다. 어떤 면에서는 탄성계수와 쪼갬인장강도가 압축강도보다 더 중요한 재료역학적 성질이 될 수 있다. 예를 들어, 수화열에 의한 콘크리트의 온도응력을 예측하고자 한다면 먼저 온도해석을 통해 각 지점들의 온도 변화를 구하여 변형률을 구하고 그 지점의 양생온도와 재령에 따른 탄성계수를 파악하여 온도응력을 계산한다. 또한 이러한 온도응력에 의한 구조물의 균열발생 여부를 예측하기 위해서는 콘크리트의 인장강도를 알아야 한다. 즉, 양생온도와 재령의 변화에 따른 콘크리트의 쪼갬인장강도와 탄성계수를 알면 압축강도를 구하지 않고도 수화열에 의한 균열의 발생여부를 예측할 수 있다<sup>(1)(2)</sup>.

본 연구에서는 양생온도와 재령에 따른 쪼갬인장강도와 탄성계수의 변화를 예측할 수 있는 모델식을 압축강도 예측을 위해 제안했던 모델식을 바탕으로 제시하였다<sup>(3)</sup>. 또한 제시된 모델식의 현장 적용성을 평가하기 위해 1종과 5종 시멘트 콘크리트를 변온 조건으로 양생시켜 그 실험값을 모델식에 의한 예측값과 비교하였다.

\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과, 박사과정

\*\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과, 교수

## 2. 예측 모델식

온도와 재령의 복합거동을 모델링하는 가장 일반적인 방법은 속성도 함수를 이용하는 것이다. 그러나 기존의 속성도함수들은 온도와 재령이 강도에 미치는 영향을 과대 또는 과소평가한다. 예를 들어, Nurse-Saul 속성도 함수는 온도가 콘크리트 강도에 미치는 영향을 초기재령에서는 과소평가하고 장기재령에서는 과대평가한다. 또한 Arrhenius 함수를 바탕으로 한 속성도 함수는 장기재령에서 온도의 강도에 대한 영향을 과대평가한다<sup>(3)~(5)</sup>. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 참고문헌 3에서는 결보기 활성에너지를 재령의 함수로 가정하여 다음과 같은 모델식을 제시하였다.

$$\frac{S}{S_{28}} = R_u \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + A \sum_{i=1}^n \left( e^{-\frac{E_o}{RT_i}} e^{-\alpha t_i} + e^{-\frac{E_o}{RT_i}} e^{-\alpha t_{i-1}} \right) (t_i - t_{i-1})}} \right] \quad (1)$$

여기서,  $S$  = 강도

$S_{28}$  = 재령 28일의 강도

$R_u$  = 한계상대강도 (=  $S_u/S_{28}$ )

$S_u$  = 한계강도

$E_o$  = 초기 결보기 활성에너지 (J/mole)

$t_{i-1}$ ,  $t_i$  = 양생온도가  $T_i$  인 재령의 시작점과 종료점

$R$  = 가스상수 (8.3144 J/K-mole)

$T_i$  = 재령  $t_{i-1}$  과  $t_i$  사이에서의 양생온도 (Kelvin)

$A$  = 비례상수

$\alpha$  = 비례상수

위의 모델식은 압축강도에 적용한 경우에 상당히 정확한 예측값을 제시하였으며<sup>(3)</sup> 기존 모델식에서 나타났던 양생 온도의 강도에 대한 영향을 초기재령과 장기재령에서 과소평가하거나 과대평가하지 않았다. 이 모델식이 탄성계수나 조깁인장강도의 예측에서도 압축강도와 같은 정확성과 적용성을 가지고 있다면 탄성계수나 조깁인장강도에 대한 좋은 예측 모델식이 될 것으로 사료된다.

위의 예측 모델식을 탄성계수와 조깁인장강도에 적용하는 방법은 결보기 활성에너지를 보는 관점에 따라 달라진다. 결보기 활성에너지를 고려하는 관점은 크게 거시적 측면과 미시적 측면으로 나눌 수 있다. 거시적인 관점에서는 결보기 활성에너지가 압축강도의 발현속도, 즉 압축강도-재령 곡선의 기울기와 관련이 깊다고 가정한다. 따라서 압축강도와 곡선의 형태가 다른 탄성계수와 조깁인장강도에 Arrhenius 함수를 바탕으로 한 기존의 모델식들이나 위의 모델식을 적용한다면 결보기 활성에너지가 압축강도에서와는 다른 값을 가질 수 있다. 한편, 미시적인 관점에서는 결보기 활성에너지가 시멘트 수화반응과 관련이 깊고 재료적 성질을 나타내는 값으로 가정한다. 이러한 경우에는 기존의 모델식이나 위의 모델식을 조깁인장강도와 탄성계수의 실험결과에 적용하여도 압축강도에서와 같은 결보기 활성에너지를 가져야 할 것이다. 현재에는 어느 쪽 관점이 옳다고 이야기할 수 없지만 시멘트의 수화반응과 결보기 활성에너지를 파악하기 위한 연구들이 행해지고 있어<sup>(4)~(5)</sup> 결보기 활성에너지를 미시적 관점에서 보는 것이 타당할 것으로 사료된다. 본 논문에서는 이러한 관점을 바탕으로 결보기 활성에너지가 탄성계수, 조깁인장강도, 압축강도에서 같은 값을 가질 것으로 가정한다.

앞에서 결보기 활성에너지가 수화반응과 관련이 깊다고 가정하여 조깁인장강도와 탄성계수의 예측식에서도 압축강도와 같은 결보기 활성에너지를 가질 것으로 가정하였으므로 앞서 압축강도의 실험결과를 바탕으로 제시한<sup>(3)</sup> 다

음과 같은 겉보기 활성화에너지의 일반 예측 모델식을 조깅인장강도와 탄성계수에도 그대로 적용할 수 있다.

$$E = E_o e^{-\alpha t} \quad (2)$$

$$\alpha = 0.00017 T_c \quad (3)$$

$$E_o = 42,830 - 43 T_c \quad (4)$$

여기서,  $E$  = 겉보기 활성화에너지 (J/mole)

$T_c$  = 양생온도 (°C)

$t$  = 재령 (days)

압축강도와 탄성계수 및 조깅인장강도는 서로 발현 양상이 다르기 때문에 이러한 차이를 식 (1)의 모델식에서 고려해 주어야 하는데 이것은 반응률 상수에 사용되는 비례상수  $A$  를 조정하여 모델링하였다. 위의 예측 모델식 (3)과 (4)를 식 (1)에 대입한 후에 실험결과들을 식 (1)로 회귀분석하여 대략적인  $A$  값을 정하였다. 이  $A$  값을 평균하여 각각의  $A$  값을 구하였는데, 압축강도의  $A$  값은  $1 \times 10^7$ 을, 탄성계수와 조깅인장강도의  $A$  값은 각각  $5 \times 10^7$ 과  $2.5 \times 10^7$ 이다.

위의 식 (1)에서 고려되어야 할 또 하나의 변수는 강도와 탄성계수의 발현시점과 관련이 있는  $t_o$  이다. 이 값은 시멘트 수화의 유도기와 관련이 깊은 것으로 이 시점까지는 콘크리트가 거의 점소성의 상태에 있어 강도나 탄성계수의 값을 가질 수 없다. 이러한 시점은 압축강도와 탄성계수 및 조깅인장강도에서 크게 다르지 않을 것으로 사료되어 압축강도에서 제안한<sup>(3)</sup> 다음과 같은 일반화된 모델식을 적용하고자 한다.

$$t_o = 0.66 - 0.011 T_c \quad (t_o \geq 0) \quad (5)$$

식 (1)에 사용되는 변수 중에서  $E_o$ ,  $\alpha$ ,  $t_o$  이 결정되었으므로 식 (1)을 이용하여 실험결과들을 회귀분석하면 한계상대강도(또는 한계상대탄성계수)인  $R_u$  를 얻을 수 있고 이 값은 표 1에 나타내었다. 겉보기 활성화에너지와 관

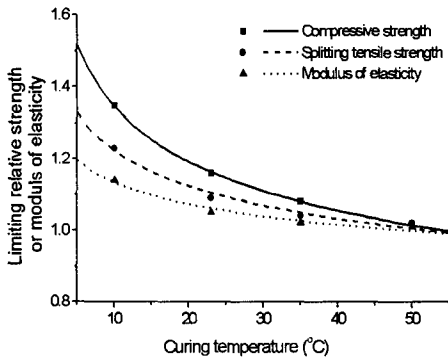


그림 1 한계상대강도 또는 한계상대탄성계수

계된  $E_o$  와  $\alpha$  는 식 (3)과 (4)의 모델식을 사용하므로 한계상대강도(또는 한계상대탄성계수)의 예측 모델식만 있으면 등온양생 콘크리트의 양생온도와 재령에 따른 탄성계수와 조깅인장강도를 예측할 수 있다. 표 1의 회귀분석결과를 이용하여 다음과 같은 한계상대강도(또는 한계상대탄성계수)의 양생온도에 따른 예측모델식을 제시하였고 이것을 그림 1에 나타내었다.

$$\text{압축강도} : R_u = 2.02 T_c^{-0.176} \quad (6)$$

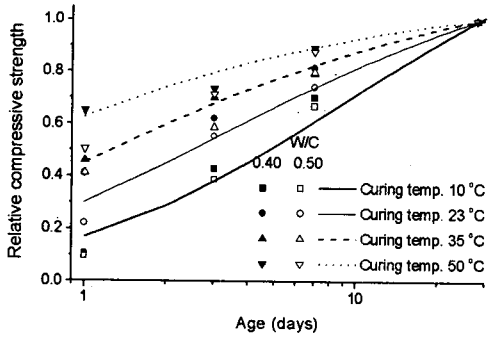
$$\text{조깅인장강도} : R_u = 1.62 T_c^{-0.122} \quad (7)$$

$$\text{탄성계수} : R_u = 1.36 T_c^{-0.079} \quad (8)$$

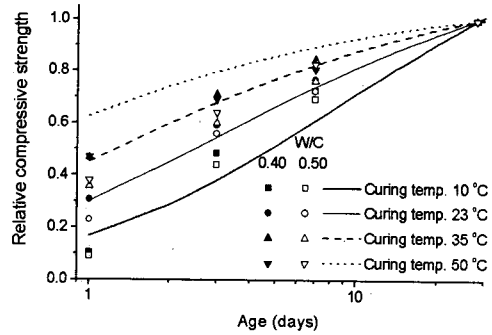
그림에 나타난 바와 같이 압축강도의 한계값이 가장 크고 재령에 따른 발현속도가 가장 빠른 탄성계수의 한계값이 가장 작다. 또한 양생온도가 50 °C 이상이 되면 한계값이 거의 1이므로 재령 28일 이후에는 50 °C로 양생한 콘크리트의 강도와 탄성계수가 거의 증가하지 않음을 알 수 있다.

표 1 한계상대강도 또는 한계상대탄성계수 ( $R_u$ )

온도 (°C)	$R_u$		
	압축강도	탄성계수	조깅인장강도
10	1.35	1.14	1.23
23	1.16	1.05	1.09
35	1.08	1.02	1.04
50	1.02	1.01	1.02

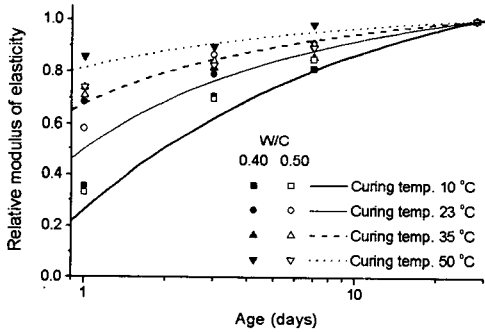


(a) 1종 시멘트

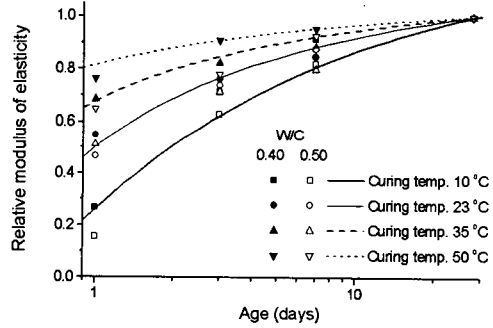


(b) 5종 시멘트

그림 2 모델식에 의한 압축강도

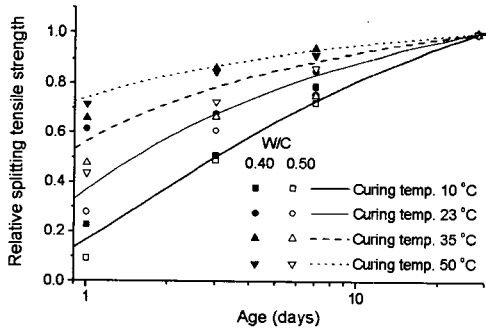


(a) 1종 시멘트

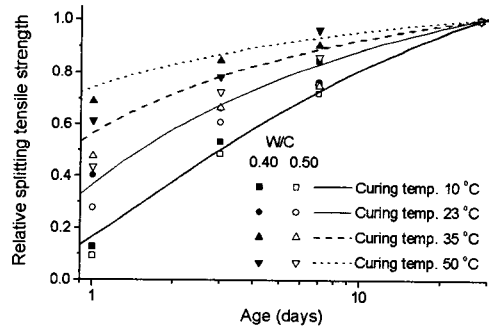


(b) 5종 시멘트

그림 3 모델식에 의한 탄성계수



(a) 1종 시멘트



(b) 5종 시멘트

그림 4 모델식에 의한 조깅인장강도

그림 2에서 4는 이러한 예측 모델식에 의한 값과 실험값을 비교하고 있다. 이러한 실험값과 예측값의 시멘트 종류와 양생온도에 따른 값의 차이는 그림 5에서 좀 더 분명히 관찰할 수 있다. 그림 5에 나타난 바와 같이 탄성계수의 경우가 가장 실험값과 예측값의 차이가 작고 쪼갬인장강도의 실험값과 예측값이 그 차이가 가장 크다. 이것은 사용한 모델식이 결보기 활성화에너지를 미시적인 개념을 바탕으로 모델링한 것에서도 그 원인을 찾을 수 있다. 시멘트의 수화반응은 콘크리트의 모든 부분에서 발생하고 이와 관련 있는 결보기 활성화에너지는 콘크리트 전체에 대한 평균적인 값이다. 또한 탄성계수도 콘크리트 시료 전체에 대한 변형률-응력 곡선의 기울기를 의미하므로 평균적인 값이라고 볼 수 있다. 그러나 강도는 어느 특정지점의 결합이 원인이 되어 그 결합의 긴전으로 파괴가 발생하여 얻어지는 값이므로 시료 전체에 대한 평균적인 값으로 보기는 어렵다. 이러한 이유로 탄성계수의 경우가 강도의 경우보다 실험값과 예측값의 차이가 작을 수 있다. 또한 1종 시멘트 콘크리트가 5종 시멘트 콘크리트보다 실험값과 예측값의 차이가 조금 작는데 이것은 모델식에 사용한 결보기 활성화에너지의 값이 1종 시멘트 콘크리트의 실험결과를 바탕으로 하고 있기 때문인 것으로 생각된다.

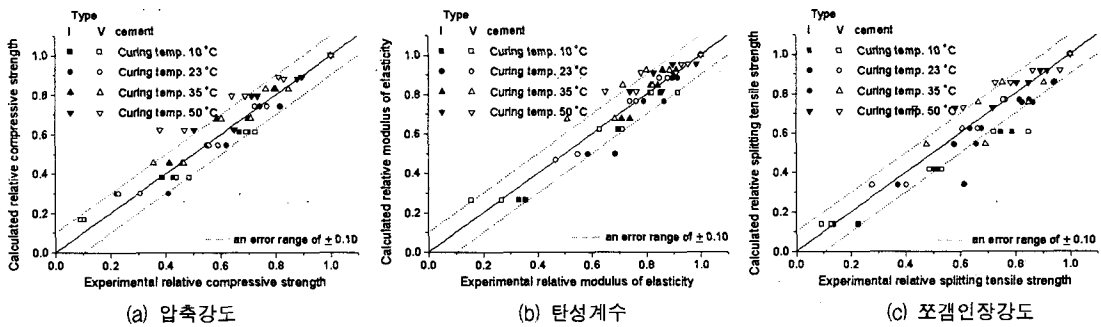


그림 5 실험값과 예측값의 비교

### 3. 변온양생조건에 예측 모델식을 적용

앞에서 언급한 실험값과 예측값들은 모두 등온양생 조건에서 실험하고 해석한 것이다. 그러나 실제 수화열로 인한 구조물 내부의 온도상승이나 계절적 변화에 의한 외부온도는 시간에 따라 연속적으로 변한다. 따라서 실제 구조물의 재료역학적 성질을 예측하기 위해서는 이러한 변온양생에 대한 예측 모델식의 적용성을 검토해보는 것이 필요하다고 사료된다.

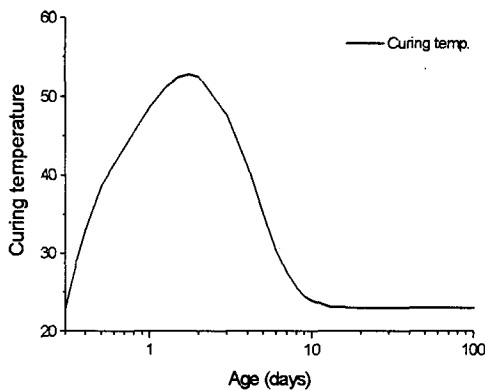


그림 6 변온양생

원자력 발전소의 격납구조물의 텐던 갤러리에 대한 온도해석 결과<sup>(2)</sup>를 바탕으로 그림 6과 같은 온도변화 곡선을 구하였다. 온도해석은 한국과학기술원에서 개발된 수화열 해석 프로그램을 사용하였다<sup>(2)</sup>. 그림 6과 같은 온도이력에 따라 콘크리트를 양생하면서 재령 1일, 3일, 7일, 28일에서 강도와 탄성계수 실험을 수행하였다.

그림 7은 변온양생 콘크리트의 실험값과 예측값을 비교하고 있다. 변온양생한 콘크리트와 23 °C와 50 °C의 등온으로 양생한 콘크리트의 한계상대강도의 차이를 알아보기 위해 23 °C와 50 °C의 등온양생에 의한 예측값도 그림에 나타내었다. 그림 7의 (a)는 압축강도의 실험값과 예측값을 비교하고 있는

데 그림에 나타난 바와 같이 실험값과 변온양생조건으로 예측한 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 (b)에 나타난 탄성계수의 경우도 압축강도와 마찬가지로 실험값과 변온양생조건으로 예측한 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. (c)의 쪼갬인장강도의 경우에는 재령 3일의 실험결과를 제외하고는 실험값과 예측값이 잘 일치한다. 전체적으로 볼 때, 실험값과 예측식에 의한 예측값이 유사함을 알 수 있다. 따라서 변온양생 콘크리트의 강도와 탄성계수를 예측하는데 모델식을 큰 오차없이 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

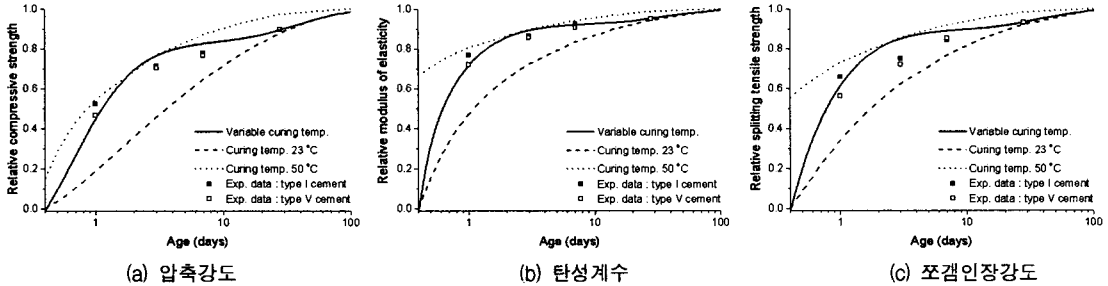


그림 7 변온양생 콘크리트의 실험값과 예측값

#### 4. 결 론

양생온도와 재령에 따른 콘크리트의 강도와 탄성계수를 예측하기 위한 연구를 통하여 다음의 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 양생온도와 재령에 따라 쪼갬인장강도와 탄성계수를 압축강도와 상관관계식 없이 직접 예측할 수 있는 모델식을 제시하였다. 제시된 모델식은 실험값에 근사한 쪼갬인장강도와 탄성계수를 예측하였다.
- 2) 제안된 모델식의 현장 적용성을 평가하기 위해, 실제 구조물에 대한 온도해석을 바탕으로 구조물 내부의 온도이력을 구하고 이러한 온도이력을 바탕으로 양생한 콘크리트의 실험값과 모델식에 의한 예측값을 비교하였다. 제안된 예측식에 의한 예측값은 실험결과와 큰 차이를 나타내지 않아 모델식을 현장 콘크리트의 강도와 탄성계수 예측에 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 한국과학기술평가원(KISTEP)의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 김진근, 한상훈, 송영철, "콘크리트의 재료역학적 성질에 대한 양생온도와 재령의 효과(I)," (심사중)
2. 김진근, 양은익, 외 3명, "겨울철 텐던켈러 벽체의 온도응력에 대한 연구," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제10권 1호, 1998. 5, pp. 193-198.
3. 김진근, 한상훈, 문영호, "수정 반응을 상수 모델에 의한 콘크리트 압축강도의 예측," 한국콘크리트학회 논문집, 제12권 2호, 2000. 4, pp. 31-42.
4. Kjellsen, K. O. and Detwiler, R. J., "Later Ages Strength Prediction by a Modified Maturity Method," ACI Materials Journal, Vol. 90, No. 3, 1993, pp. 220-227.
5. Chanvillard, G., and D'Aloia, L., "Concrete Strength Estimation at Early Ages: Modification of the Method of Equivalent Age," ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 6, 1996, pp. 520-530.