

수정 반응률 상수 모델에 의한 콘크리트의 강도의 예측

Prediction of Concrete Strength by a Modified Rate Constant Model

한 상 훈*
Han, Sang-Hun

김 진 근**
Kim, Jin-Keun

ABSTRACT

This paper discusses the validity of models to predict the compressive strength of concrete subjected to various temperature histories and the shortcomings of existing rate constant model and apparent activation energy concept.

Based on the discussion, a modified rate constant model is proposed. The modified rate constant model, in which apparent activation energy is a nonlinear function of curing temperature and age, accurately estimates the development of the experimental compressive strengths by a few researchers. Also, the apparent activation energy of concrete cured with high temperature decreases rapidly with age, but that cured with low temperature decreases gradually with age. Finally a generalized model to predict apparent activation energy and compressive strength is proposed, which is based on the regression results.

1. 서론

시멘트 수화열에 의한 콘크리트 구조물 내부의 온도상승은 콘크리트의 압축강도에 큰 영향을 미치므로 구조물의 거동과 내구성을 예측하기 위해서는 양생온도에 따른 강도변화를 파악해야 할 필요가 있다. 또한 계절에 따라 콘크리트 구조물의 주변온도가 상승하거나 감소하므로 이에 대한 영향을 고려하기 위해서도 양생온도에 따른 콘크리트의 강도변화를 정확히 예측할 수 있는 모델식의 개발이 필요하다.

이러한 필요성에 의해 양생온도에 따른 콘크리트의 강도를 예측하기 위한 많은 식들이 제안되었고 현재에도 많은 연구자들에 의해 연구결과가 발표되고 있다. 그러나 기존의 연구는 주로 등온(isothermal)양생 콘크리트에 연구가 집중되어 양생온도의 증감에 따른 콘크리트 강도의 변화를 고려할 수 없다. 또한 강도에 대한 양생온도의 영향은 재령에 따라 변화하므로 같은 온도라도 그 양생시점이 다른 콘크리트는 다른 성질을 가지는데 이러한 현상을 기존의 모델식으로는 고려할 수 없다.

이에 본 연구에서는 양생온도의 변화, 양생시점의 변화 등을 고려할 수 있는 새로운 강도 예측 모델식을 기존의 반응률 상수 모델을 바탕으로 제시하고 이 모델식을 기존의 여러 실험결과들을 바탕으로 그 유효성을 검토하였다.

2. 새로운 겉보기 활성화에너지 함수를 도입한 수정 반응률 상수 모델식

기존의 반응률 상수 모델을 등가재령 형태로 변형시키고 이를 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같은 곡선들을 구할 수 있다. 양생조건이 등온(isothermal)조건이라면 Fig. 1의 t_1 , t_2 와 t_r 의 관계는 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

1) *정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

2) **정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

$$t_r = \frac{k_1}{k_r} = e^{-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_r} \right)} t_1 \quad (1)$$

$$t_r = \frac{k_2}{k_r} = e^{-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_r} \right)} t_2 \quad (2)$$

여기서, k_r , t_r = 기준온도 T_r 에 대한 반응률 상수, 등가재령

k_1 , t_1 = 양생온도 T_1 에서의 반응률 상수, 재령

k_2 , t_2 = 양생온도 T_2 에서의 반응률 상수, 재령

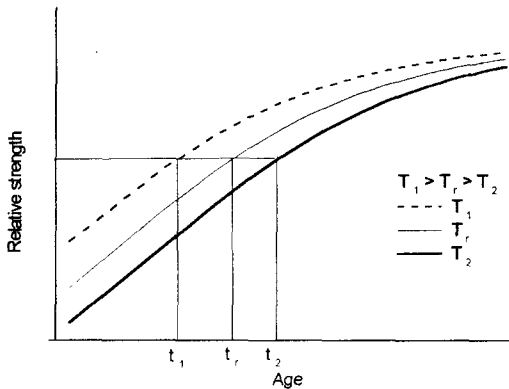


Fig. 1 Relative strength by rate constant model

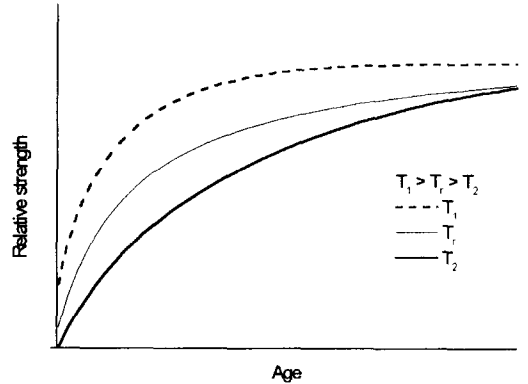


Fig. 2 Hypothetical relative strength

t_1 , t_2 에 상수를 곱한 t_r 을 기존의 반응률 상수 모델에 대입하면 압축강도를 구할 수 있다. 그러나 이러한 관계식은 실제의 재령-압축강도 거동과는 거리가 있다. 양생온도가 기준온도보다 높으면 초기재령에서의 강도발현 속도는 빠르지만 재령이 경과할수록 느려진다. 이와는 반대로 양생온도가 기준온도보다 낮으면 초기재령에서의 강도발현 속도는 느리지만 재령이 경과할수록 고온양생 콘크리트보다 빨라진다. 즉 강도의 변화율은 양생온도와 재령에 따라 변화한다(Fig. 2 참조). 그러나 양생온도에 따른 재령-상대강도의 관계가 일정상수배의 곱으로 나타내어지는 현재의 반응률 상수 모델로는 실제 거동을 정확하게 예측할 수 없다. 따라서 식 (1), (2)의 exponential 함수의 지수부분이 양생온도 뿐만 아니라 재령에 따라서도 변화하여 Fig. 2와 같은 곡선형태가 되어야 할 것으로 사료된다. 그런데 R은 상수이고 양생온도 T_1 과 T_r 은 정해진 값이므로 재령에 따라 변화할 수 있는 값은 길보기 활성화에너지(E) 밖에 없다.

재령과 양생온도에 따른 길보기 활성화에너지의 변화양상을 추정해 보면 다음과 같다. 초기재령에서는 양생온도의 증감이 화학반응속도를 증가시키거나 감소시키므로 양생온도가 수화반응속도와 강도에 미치는 영향이 매우 크다. 그러나 재령이 경과함에 따라 확산장벽과 같은 시멘트 페이스트 구조와 성질이 화학반응보다 더 많은 영향을 콘크리트에 미치므로 양생온도의 강도와 수화반응속도에 영향은 급격히 줄어든다. 앞에서 언급한 바와 같이 초기재령에서는 양생온도의 영향이 크므로 길보기 활성화에너지는 장기재령보다 크고 이러한 길보기 활성화에너지는 재령이 경과함에 따라 감소할 것으로 추정된다. 또한 수화가 진행됨에 따라 수화물에 의한 단단하고 두꺼운 장벽이 시멘트 입자 주위에 형성되는데 이러한 장벽은 시멘트 입자 성분의 확산을 방해하여 콘크리트의 강도발현을 억제한다. 그런데 초기재령의 강도발현속도가 빠른 고온양생 콘크리트가 더 두꺼운 장벽을 가지게 되어 장기재령에서의 강도발현 속도가 저온양생 콘크리트보다 느려지게 된다. 즉 재령이 경과할수록 고온양생 콘크리트는 확산장벽의 영향이 상온보다 좀더 빨리 나타나므로 길보기 활성화에너지는 상온에서 양생한 시료보다 빨리 감소하고 양생온도가 감소하면 확산장벽의 영향이 상온보다 늦게 나타나므로 길보기 활성화에너지는 상온에서 양생한 시료보다 늦게 감소한다. 이러한 길보기 활성화에너지의 재령에 따른 변화양상을 다음과 같은 함수를 사용하여 추정하고자 한다.

$$E = E_0(1 + at) e^{-at} \quad (3)$$

여기서, E = 결보기 활성화에너지
 E_0 = 초기 결보기 활성화에너지
 t = 재령
 α = 비례상수

위의 결보기 활성화에너지 함수를 기존의 반응률 상수 모델식에 적용하고 양생온도에 따른 강도변화양상을 좀 더 뚜렷하게 관찰하기 위해 재령 28일 강도를 1로 설정하면 모델식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k_T(t) = A e^{-\frac{E_0(1+\alpha(t-t_0))e^{-\alpha(t-t_0)}}{R}} \frac{1}{T} \quad (4)$$

$$\frac{S}{S_{28}} = R_u \frac{A e^{-\frac{E_0(1+\alpha(t-t_0))e^{-\alpha(t-t_0)}}{R}} \frac{1}{T} (t-t_0)}{1 + A e^{-\frac{E_0(1+\alpha(t-t_0))e^{-\alpha(t-t_0)}}{R}} \frac{1}{T} (t-t_0)} \quad (5)$$

여기서, $k_T(t)$ = 반응률 상수
 R = 가스상수 (8.3144 J/K-mole)
 R_u = 한계상대강도비($S_u = R_u S_{28}$)
 A = 비례상수
 t_0 = 강도 발현이 시작되는 재령

3. 기존의 실험결과 분석

기존의 여러 실험값들을 위의 수정 반응률 상수 모델식에 적용하면 Table 1과 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기서 A 는 양생온도와 재령의 함수가 아니고 물/시멘트비나 시멘트의 종류 등에 따라 조금씩 달라지는 값이다. 그러나 그 값이 각 실험결과와 회귀분석에 미치는 영향이 크지 않아 여기서는 동일한 값을 사용하였다. 또한 이러한 회귀분석결과를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 3이다.

Fig. 3은 Carino의 콘크리트 실험결과를 수정 반응률 상수 모델로 회귀분석한 결과를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 수정 반응률 상수 모델식은 실험결과와 변화양상을 잘 추정하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 3은 재령과 양생온도에 따른 결보기 활성화에너지의 변화율도 나타내고 있다. 초기재령에서는 재령에 따른 결보기 활성화에너지의 변화율이 크지 않지만 재령이 경과할수록 결보기 활성화에너지는 급격히 감소하여 앞에서 예측한 형태의 곡선과 유사한 모양을 나타낸다. 또한 양생온도가 높은 콘크리트는 저온에서 양생한 콘크리트보다 초기재령에서 결보기 활성화에너지가 조금 작거나 거의 유사하지만 재령이 경과할수록 고온에서 양생한 콘크리트의 결보기 활성화에너지의 감소량이 저온에서 양생한 콘크리트의 결보기 활성화에너지 감소량보다 커진다. 나머지 연구자들의 실험값에 대한 회귀분석결과도 Carino의 회귀분석결과와 유사한 경향을 나타내었다.

4. 결론

기존의 반응률 상수 모델식은 양생온도가 콘크리트의 수화진행과정에 미치는 영향을 제대로 모사할 수 없었다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 새로운 결보기 활성화에너지 개념을 바탕으로 한 수정 반응률 상수 모델식을 제시하였으며 이를 기존의 여러 연구자들의 실험결과에 적용해 보았다. 본 연구로부터 얻어진 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 초기재령에서 콘크리트의 수화는 화학반응에 의해서 크게 영향을 받지만 재령이 경과할수록 화학반응의 영향은 줄어들고 수화물의 확산에 의한 장벽효과가 더 큰 영향을 미친다. 이에 따라 양생온도가 수화반응에 미치는 영향이 재령이 경과할수록 감소하는데 기존의 여러 모델식들은 이를 고려하지 못하였

Table 1 Regression results

	Curing temperature (°C)	E_o (J/mol)	α	R_u	t_o (days)
Carino-concrete w/c=45%	10	41,460	0.0067	1.13	0.82
	21.5	40,883	0.0156	1.02	0.35
	41	39,534	0.0245	1.00	0.21
Lew-concrete w/c--	2	41,122	0.0001	1.21	0.00
	13	40,464	0.0004	1.12	0.00
	23	40,983	0.0179	1.02	0.00
Klieger-concrete w/c=77%	4.4	43,505	0.0079	1.39	0.97
	13	43,088	0.0031	1.26	0.43
	23	42,736	0.0197	1.03	0.00
Brooks-concrete w/c=42%	20	38,657	0.0157	1.01	0.38
	40	40,737	0.0173	1.00	0.00
	47	40,154	0.0160	1.00	0.00
Kjellsen-mortar w/c=50%	5	40,602	0.0030	1.17	0.86
	13	40,538	0.0052	1.11	0.44
	20	40,064	0.0064	1.04	0.29
	35	40,193	0.0064	1.03	0.00
Carino-mortar w/c=43%	5.5	42,575	0.0084	1.25	1.11
	12.5	42,326	0.0065	1.23	0.55
	23	41,502	0.0133	1.03	0.33
	35	42,177	0.0155	1.01	0.26
	50	42,231	0.0140	1.00	0.18

* 모두 Type I cement를 사용하여 실험한 결과이다.

* 회귀분석시 모든 실험자들의 실험결과들에 대해 A 는 10^7 값을 사용했다.

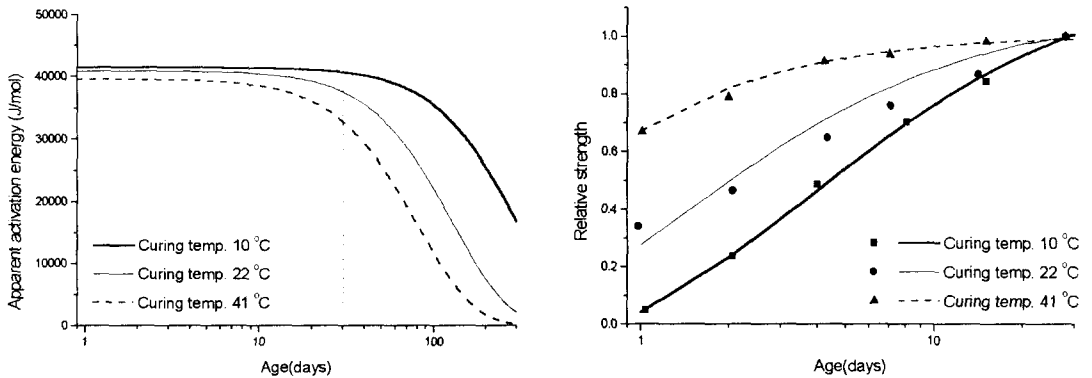


Fig. 3 Apparent activation energy and relative strength by modified rate constant model

- 다. 이러한 양생온도의 영향을 길보기 활성화에너지의 재령에 따른 변화로 모델링할 수 있었다.
- 2) 양생온도와 재령에 따라 변화하는 새로운 길보기 활성화에너지 함수를 반응물 상수 모델에 적용하여 기존의 실험결과들을 회귀분석하였다. 새로운 반응물 상수 모델은 양생온도와 재령에 따른 기존의 압축강도 변화를 잘 묘사하였다.

참고문헌

1. Tank, R. C., and Carino, N. J., "Rate Constant Functions for Strength Development of Concrete," ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 1, 1991, pp. 74-83.