

# 콘크리트의 수화도 및 단열온도상승량 예측모델 개발

## Mathematical Modelling of Degree of Hydration and Adiabatic Temperature Rise

오 병 환\*      차 수 원\*\*      신 경 준\*\*\*      하 재 담\*\*\*\*      김 기 수\*\*\*\*\*  
Oh, Byung Hwan      Cha, Soo Won      Shin, Kyeung Jun      Ha, Jae Dam      Kim, Ki Soo

### ABSTRACT

Hydration is the main reason for the growth of the material properties. A exact parameter to control the chemical and physical process is not the time, but the degree of hydration. Therefore, it is reasonable that development all material properties should be formulated in terms of degree of hydration.

Mathematical formulation of degree of hydration is based on combination of reaction rate functions. The effect of moisture conditions as well as temperature on the rate of reaction is considered in the degree of hydration model. This effect is subdivided into two contributions: water shortage and water distribution. The former is associated with the effect of on the progress of hydration. The water needed for progress of hydration do not exist and there is not enough space for the reaction products to form. The latter is associated with the effect of free capillary water distribution in the pore system. Physically absorption layer does not contribute to progress of hydration and only free water is available for further hydration.

### 1. 서론

콘크리트는 수화발열과정으로 재료의 특성이 변화하고 경화된다. 수화의 진행은 엄밀한 의미에서 수화도에 의해 제어되므로, 경화가 진행되는 콘크리트의 재료특성과 미세구조 형성과정은 수화도에 의해 정식화되어야 한다.

수화도 ( $\alpha_c$ )는 시멘트의 반응정도에 따라 다음 식 (1)과 같이 정의할 수 있으나, 시멘트의 반응정도를 정량적으로 구하기 어려우므로, 일반적으로 수화반응에 기인한 발열량 (heat liberated,  $Q$ ) 이나 결합수량 (chemically bound water,  $W_n$ ) 의 크기로 식 (2)과 같이 수화도를 정의할 수 있다.<sup>(1)</sup>

$$\alpha_c(t) = \frac{\text{시간 } t \text{에서 반응한 시멘트량}}{\text{시간 } t = 0 \text{에서 총 시멘트량}} \quad (1)$$

$$\alpha_c(t) = \frac{Q(t)}{\max Q} = \frac{W_n(t)}{\max W_n} \quad (2)$$

\* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 서울대학교 토목공학과 대학원 박사수료

\*\*\* 서울대학교 토목공학과 대학원 석사과정

\*\*\*\* 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트 연구실 선임연구원

\*\*\*\*\* 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트 연구실장

수화도의 발현속도는 콘크리트의 사용시멘트 종류, 물-시멘트비, 양생온도 및 수분상태에 영향을 받는다.<sup>(1)</sup> 따라서 본 연구는 콘크리트의 수화진행정도에 영향을 미치는 인자를 고찰하고 이를 해석적으로 모델링하여 콘크리트의 수화도를 예측하고, 이를 토대로 식 (2)의 수화도의 정의에 따라 단열온도상승량을 예측하는 기법을 제시하였다.

## 2. 콘크리트의 수화도 예측모델의 개념

콘크리트의 사용 재료가 결정된 경우 시멘트와 물과의 수화반응 속도는 콘크리트의 양생온도 및 내부수분상태에 따라 결정되며, 이는 다음 식 (3)과 같이 기준상태 (20℃, 수중양생)의 수화도의 반응 속도에 세 가지의 속도함수의 곱으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \alpha_c(t)}{\partial t} = \beta_T \beta_{w/c} \beta_w \left. \frac{\partial \alpha_c(t_{eq})}{\partial t} \right|_{ref} \quad (3)$$

여기서 속도함수  $\beta$ 의 아래첨자는 각각 양생온도, 물-시멘트비, 수분분포의 영향을 나타낸다.

식 (3)에서의 수화도는 다음 식 (4)과 같이 표현할 수 있다.<sup>(2)</sup>

$$\alpha_c = \exp\left(-\lambda_1 \left(\ln\left(1 + \frac{t_{eq}}{t_1}\right)\right)^{-\kappa_1}\right) \quad (4)$$

여기서  $\lambda_1$ ,  $t_1$ ,  $\kappa_1$ 는 사용 시멘트의 화학조성에 따라 결정되는 재료상수이다.

식 (3)과 (4)에서  $t_{eq}$ 는 등가재령을 나타내고 있으며, 이는 양생온도와 내부수분상태가 상이한 경우 동일한 수화도를 얻는데 소요되는 시간을 의미한다. 따라서, 등가재령은 다음 식 (5)으로 표현할 수 있다.

$$t_{eq} = \int \beta_T \beta_{w/c} \beta_w dt \quad (5)$$

## 3. 콘크리트의 수화도에 영향을 미치는 인자.

### 3.1 시멘트의 화학조성이 수화도에 미치는 영향

포틀랜드 시멘트의 주요 성분은 C<sub>3</sub>S (alite), C<sub>2</sub>S (belite), C<sub>3</sub>A (aluminate)와 C<sub>4</sub>AF (ferrite)으로 구분되며, 이들 화합물은 동일한 양생 조건에서 각각 다른 수화도를 보인다.<sup>(3)</sup> 따라서, 콘크리트의 수화도는 각 화합물의 수화도의 가중평균을 취하므로써 구할 수 있다.

$$\alpha = \alpha_1 W_{C_3S} + \alpha_2 W_{C_2S} + \alpha_3 W_{C_3A} + \alpha_4 W_{C_4AF} \quad (6)$$

여기서  $\alpha_i$ 는 각 화합물의 수화도이고,  $W_i$ 는 시멘트량에 대한 화합물의 중량비이다.

따라서, 식 (6)을 회귀 분석하여 식 (4)의 재료상수를 구하므로써 콘크리트의 전체수화반응속도

(overall kinetics of reaction)를 얻거나 식 (2)의 정의에 따라 실험적으로 정할 수도 있다.

### 3.2 양생 온도가 수화도에 미치는 영향

화학반응 속도는 온도의 함수이며, 시멘트의 수화반응 역시 온도 또는 온도이력에 따라 변화한다. 1950년대의 연구초기 단계에서는 온도와 반응속도와 선형적인 관계를 가정하였다. 그러나 Friesleben Hansen과 Pedersson (1977), Byfors (1980)의 연구에 따르면 반응속도함수는 온도활성화에 대한 Arrhenius 형태의 함수에 선형적인 관계를 가진다.<sup>(4), (5)</sup>

$$\beta_T = \exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T+273}\right)\right) \quad (7)$$

여기서  $E/R$  은 활성화온도(K)를 의미하는 재료상수이고, 이는 시멘트의 성분과 온도에 따라 변화한다. 그림 1은 온도에 대한 반응함수를 나타내고 있고, 그림 1에서 점선과 실선은 활성화온도의 차이에 따른 온도 반응속도함수이다.

### 3.3 세공구조의 수분상태가 수화도에 미치는 영향

#### 3.3.1 물-시멘트비가 수화도에 미치는 영향

시멘트의 수화가 진행됨에 따라 배합에 사용된 수량은 수화에 소모되어 세공구조 (pore system)에서 수화에 사용될 물이 부족하게 된다. 사용 시멘트가 모두 수화될 수 있는 이론적인 최소 물-시멘트비는 약 40% 정도이다.<sup>(6)</sup> 물-시멘트비가 40%이하인 경우 최대 수화도 ( $\alpha_{max}$ )는 1이하의 값을 가지고, 최대 수화도에 이르면 수화가 사용될 물이 거의 남지 않으므로 수화반응이 정지된다. 따라서 물-시멘트비에 따른 반응함수는 다음 식 (8)으로 표현할 수 있다.

$$\beta_{W/C}(\alpha_c) = \left(\frac{\alpha_{max} - \alpha_c}{\alpha_{max}}\right)^n \quad (8)$$

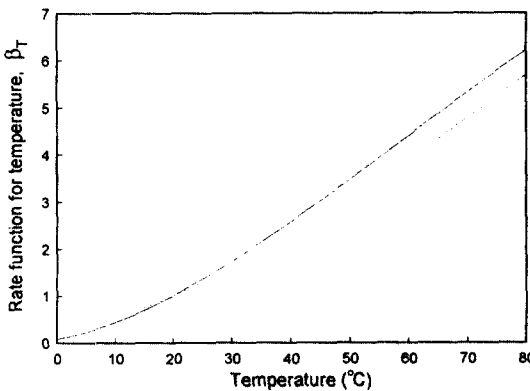


그림 1. 양생온도에 따른 반응속도 함수

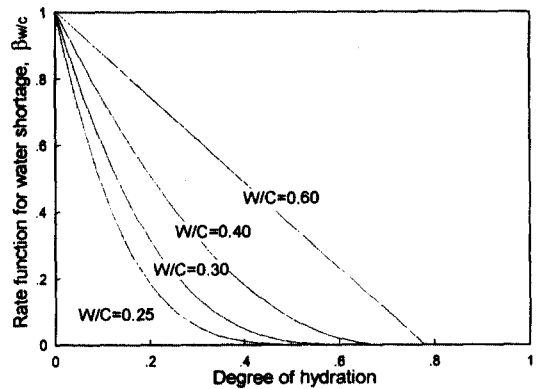


그림 2. 물-시멘트비에 따른 반응속도 함수

### 3.3.2 콘크리트의 수분분포가 수화도에 미치는 영향

콘크리트는 모세공극 (capillary pore)은 수십 A에서 수십  $\mu\text{m}$ 의 다양한 크기를 가진다.<sup>(7)</sup> 기지의 수화도에서 수화에 사용될 수 있는 콘크리트 내부의 수분은 3.3.1에서 서술한 것과 일정하나, 작은 직경을 가지는 모세공극은 물이 자유수 (capillary free water) 상태로 존재하지만 보다 큰 모세공극의 물은 모세공극의 표면에 물리적으로 결합된 (physically bound) 형태로 존재한다. 본 연구에서 물리적인 결합수 (physically bound water or absorbed water)는 수화의 진행에 소요될 수 없고, 자유수만이 수화반응에 사용될 수 있는 것으로 가정한다.

따라서, 그림 3에서 나타낸 콘크리트의 미세구조에서 수분상태에 기초하여 수분분포가 수화반응에 미치는 영향을 식 (9)으로 나타낼 수 있다.

$$\beta_w(\alpha_c) = \frac{A_{wat}(\alpha_c)}{A_{tot}(\alpha_c)} \quad (9)$$

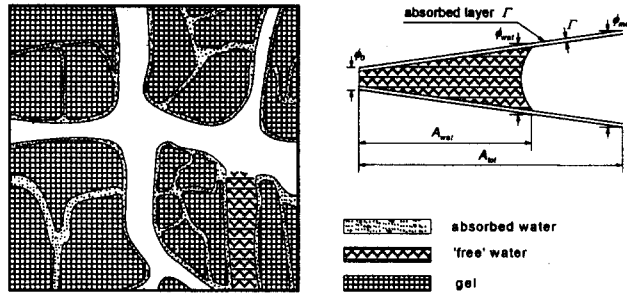


그림 3. 콘크리트 세공구조에서의 수분분포 상태

### 4. 콘크리트의 수화도 예측모델과 실험과의 비교

본 연구에서 제시한 콘크리트의 수화도 예측모델과 실험에서 구한 수화도 측정값과 비교하면 그림 5와 같다. 그림 5에서 수화도 측정값은 열중량분석 (thermogravimetric analysis) 을 통한 결합수 (chemically bound water) 의 측정을 통하여 얻은 값이다. 그림 5에서 제안된 콘크리트 이론적인 수화도 모델이 실제 측정값과 매우 근사함을 알 수 있다.

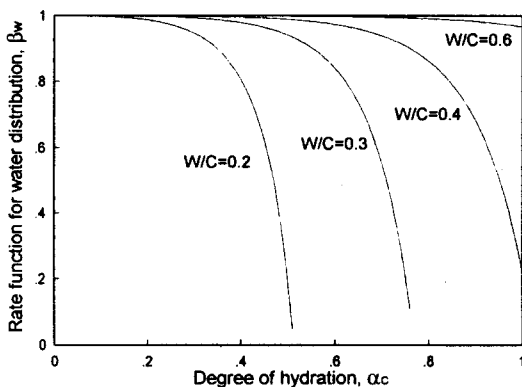


그림 4. 콘크리트 수분분포에 따른 반응속도 함수

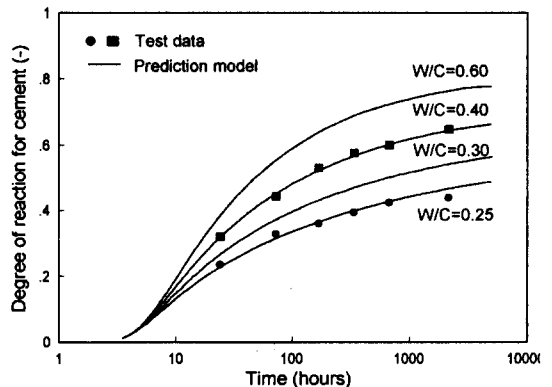


그림 5. 제안된 수화도 예측모델과 실험과의 비교

## 5. 결론

본 연구에서 제시한 콘크리트의 수화도 예측모델은 기존의 온도영향만을 고려하는 반응속도함수를 콘크리트내부의 수분분포 상태를 고려하여 모델을 개선하였으며, 이는 실제 측정된 수화도와 매우 근접하여 그 유용성을 검증하였고, 수화도의 정의에 따라 단열상태의 발열량을 모사할 수 있다. 제안된 모델은 수화가 진행되는 콘크리트의 여러 재료 특성 및 미세구조 형성과정을 표현하는데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete*, 4<sup>th</sup> ed., Addison Wesley Longman Ltd.
2. Jonasson, J-E. (1985). *Slipform construction - calculation for assessing protection against early freezing*, Swedish Cement and Concrete Research Institute.
3. Taylor, H. F. W. (1990). *Cement chemistry*, Academic Press, London.
4. Friesleben Hansen, P. and Pedersen, E. J. (1977). "Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete." *Journal of the Nordic Federation*, No 1, pp 21-25
5. Byfors, J. (1980). *Plain concrete at early ages*. CBI report
6. Powers, T. C. (1947). "A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete." *Proceedings of the Highway Research Board*, 27, pp 178-188.
7. Young, J. F. et. al., Document prepared by RILEM TC 69, p27