

콘크리트의 수화도 및 단열온도상승량 예측모델 개발

차수원¹⁾*

¹⁾한경대학교 토목공학과

(2001년 12월 4일 원고접수, 2002년 1월 11일 심사완료)

Mathematical Modeling of Degree of Hydration and Adiabatic Temperature Rise

Soo-Won Cha¹⁾*

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Hankyong National University, Ansong, 456-749, Korea

(Received on December 4, 2001, Accepted on January 11, 2002)

ABSTRACT

Hydration is the main reason for the growth of the material properties. An exact parameter to control the chemical and physical process is not the time, but the degree of hydration. Therefore, it is reasonable that development of all material properties and the formation of microstructure 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 W/C ratio 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.

In this study, the effects of chemical composition of cement, W/C ratio, temperature, and moisture conditions on the degree of hydration are considered.

Parameters that can be used to indicate or approximate the real degree of hydration are liberated heat of hydration, amount of chemically bound water, and chemical shrinkage, etc. Thus, the degree of heat liberation and adiabatic temperature rise could be determined by prediction of degree of hydration.

Keywords : degree of hydration, temperature condition, moisture condition, progress of hydration, reaction rate function, adiabatic temperature rise

1. 서 론

콘크리트는 수화발열과정으로 재료의 특성이 변화하고 경화된다. 수화의 진행은 엄밀한 의미에서 수화도(degree of hydration, α_c)에 의해 제어되므로, 경화가 진행되는 콘크리트의 재료특성과 미세구조 형성과정은 수화도에 의해 정식화되는 것이 바람직하다.

수화도는 시멘트의 반응정도에 따라 다음 식 (1)과 같이 정의할 수 있으나, 시멘트의 반응정도를 정량적으로 구하기 어렵다. 따라서 실제 수화도를 근사적으로 추정하는 수단으로, 일반적으로 수화반응에 기인한 발열량(heat liberated, Q)이나 결합수량(chemically bound water, W_n)의 크기로 식 (2)와 같이 간접적으로 수화도를 표현할 수

있다¹⁾.

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

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

또한 식 (2)에서 임의의 시간에서 수화도가 결정되면 발열량과 화학적 결합수량을 정할 수 있고, 이로부터 단열 온도상승량을 구할 수 있고, 또한 화학수축량(chemical shrinkage)과 자기수축량(autogenous shrinkage)의 발생 양상과 직접적인 연관성이 있다¹⁾.

수화도의 발현속도는 콘크리트의 시멘트 종류, 물-시멘트비 등의 배합특성과 양생온도 및 수분상태 등의 양생조건에 영향을 받는다²⁾. 따라서 본 연구는 물성이 급변하는 초기재령 콘크리트의 특성을 정확히 표현하기 위하여 콘

* Corresponding author

Tel : 011-790-4611 Fax : 02-872-3775
E-mail : chasw@simmani.com

크리트의 수화진행도에 영향을 미치는 인자를 고찰하고, 이를 해석적으로 모델링하여 콘크리트의 배합 및 환경조건에 따라 수화도를 예측하고, 이를 토대로 식 (2)의 수화도의 정의에 따라 단열온도상승량을 예측하는 기법을 제시하였다.

2. 콘크리트의 수화도 예측모델의 개념

기존의 연구에 의하면 콘크리트의 수화 진행에 영향을 미치는 요인으로 온도에 관한 반응속도함수만을 고려하였으나^{1,3,4,5)}, 실제 콘크리트 요소는 온도 뿐 만 아니라 내부수분상태에 따라 수화도가 변화한다⁶⁻⁸⁾.

따라서 콘크리트의 사용 재료가 결정된 경우 시멘트와 물과의 수화반응 속도는 콘크리트의 양생온도 및 내부수분상태에 따라 결정되며, 이는 다음 식 (3)과 같이 기준상태의 수화도의 반응속도에 세 가지의 속도함수의 곱으로 표현할 수 있다⁹⁾.

$$\frac{\partial a_c(t)}{\partial t} = \beta_T \beta_{WC} \beta_w \frac{\partial a_c(t_{eq})}{\partial t} \Big|_{ref} \quad (3)$$

여기서, 속도함수 β 의 아래첨자는 각각 양생온도 (temperature), 물-시멘트비(W/C ratio), 수분분포(water distribution)의 영향을 나타낸다.

식(3)의 기준상태는 세가지 속도함수가 단위값을 가지는 것을 의미하며, 양생온도 20 °C, 습도 100 % 완전 포화된 (fully saturated) 양생조건에서 사용시멘트 전량이 수화되는 가상적인 콘크리트의 상태를 기준으로 한다. 이는 실제 콘크리트에서 물-시멘트비가 낮을수록 사용 시멘트량의 상당부분이 수화되지 않는다는 사실에 근거하여 반응속도함수를 표현하고, 이를 통하여 최종 수화도(ultimate degree of hydration)가 배합조건, 특히 물-시멘트비에 가장 큰 영향을 받는 것을 나타낸다.

식 (3)에서 수화도는 배합, 온도와 습도를 고려하므로 성속도 개념 중 등가재령을 적용할 수 있고, Fig. 1과 같이 배합후 6시간 내외의 수화휴지기를 모사하기 위하여 2 변수보다 3변수 형태의 수화도가 적절하며, 다음 식 (4)과 같이 표현할 수 있다¹⁾.

$$a_c = \exp \left[-\lambda_1 \ln \left(1 + \frac{t_{eq}}{t_1} \right)^{-x_1} \right] \quad (4)$$

여기서, λ_1 , t_1 , x_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.

$$t_{eq} = \int_0^t \beta_T \beta_{WC} \beta_w dt \quad (5)$$

3. 콘크리트의 수화도에 영향을 미치는 인자

3.1 시멘트의 화학조성이 수화도에 미치는 영향

포틀랜드 시멘트의 주요 성분은 C₃S(alite), C₂S(belite), C₃A(aluminate)와 C₄AF(ferrite)으로 구분되며, 이 들 화합물은 동일한 양생 조건에서 각각 다른 수화도를 보인다.⁽³⁾ 따라서, 콘크리트의 수화도는 각 화합물의 수화도의 가중평균을 취하므로써 구할 수 있다⁹⁾.

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

여기서 α_i 는 각 화합물의 수화도이고, W_i 는 시멘트량에 대한 화합물의 중량비이다.

식 (6)에서 시멘트 각 성분의 수화도 α_i 는 기존 실험결과¹¹⁻¹³⁾를 식(5)의 형태로 비선형 회귀분석하여 수행하여 그 결과를 정리하면, 다음 Table 1과 같다. Fig. 2의 각 성분별 수화도를 가중평균하여 시멘트 종류(Table 2)에 따른 콘크리트의 전체 수화반응속도(overall kinetics of reaction)를 Fig. 3과 같이 얻을 수 있다.

3.2 양생 온도가 수화도에 미치는 영향

화학반응 속도는 온도의 함수이며, 시멘트의 수화반응역시 온도 또는 온도이력에 따라 변화한다. 1950년대의 연구초기 단계에서는 온도와 반응속도와 선형적인 관계를

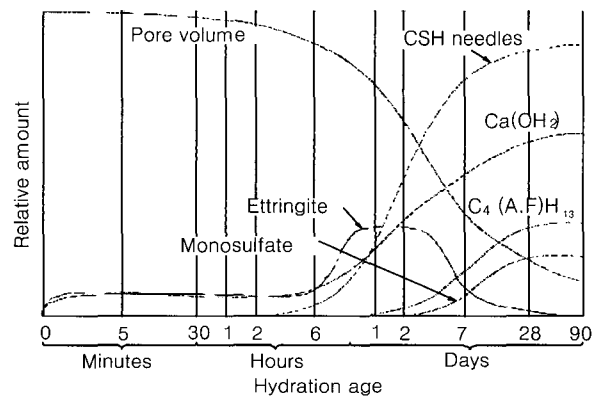


Fig. 1 Schematic presentation of the formation of individual hydration products¹⁰⁾

가정하였다. 그러나 Friesleben Hansen과 Pedersson (1977), Byfors (1980)의 연구에 따르면 반응속도함수는 온도활성화에 대한 Arrhenius 형태의 함수에 선형적인 관계를 가진다^{1,4,5,8)}.

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

여기서 E/R 은 활성화온도(K)를 의미하는 재료상수이고, 이는 시멘트의 성분과 온도에 따라 변화한다. Fig. 4는 온도에 대한 반응함수를 나타내고 있고, Fig. 4에서 점선과 실선은 기존 연구자들의 활성화온도의 차이에 따른 온도 반응속도함수이다^{5,8)}.

3.3 세공구조의 수분상태가 수화도에 미치는 영향

3.3.1 내부수분상태와 수화도

기존 연구자들은 내부수분상태가 수화도에 미치는 영향을

Table 1 Material constants of the major compounds in Eq. (4) and (6)

Material constants in Eq.(4) and (6)	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
λ_1	2.0	3.9	1.5	2.4
t_1	3.4	7.2	4.0	8.5
K_1	1.4	1.5	1.4	1.3

Table 2 Composition of portland cement

Types of cement	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Type I	49	23	10	9
Type II	42	37	6	12
Type IV	23	58	3	9
Type V	46	32	4	13

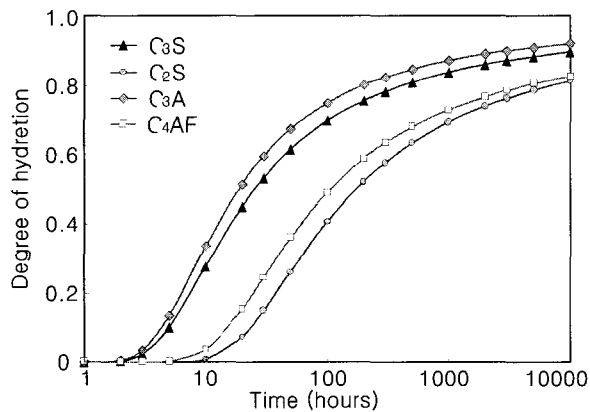


Fig. 2 Rates of hydration of the major constituents of Portland cement

내부 상대습도의 함수(β_θ)로 표현하였다. 그러나 상대습도 함수는 실제 수화기구(mechanism of hydration)를 반영하지 못하고, 단지 각 연구자가 수행한 실험조건과 배합조건에만 부합하는 결과를 보인다. Fig. 5는 기존 연구자들의 실험결과와 상대습도함수 제안식을 보여주고 있고, 각 실험결과와 제안식은 큰 차이를 보인다^{5,8,14,15)}.

따라서 본 연구는 이러한 기존 제안식의 단점을 보완하

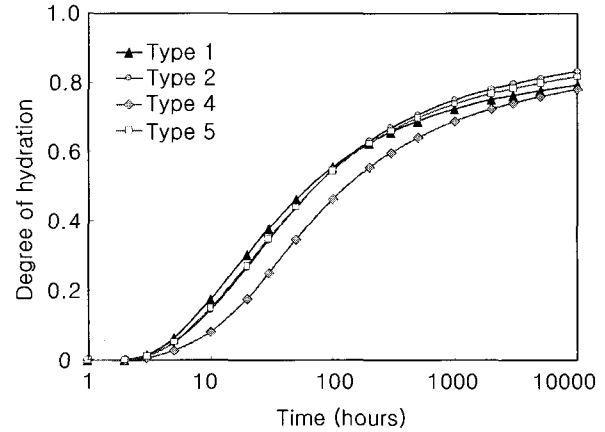


Fig. 3 The degree of hydration of the various types of Portland cement

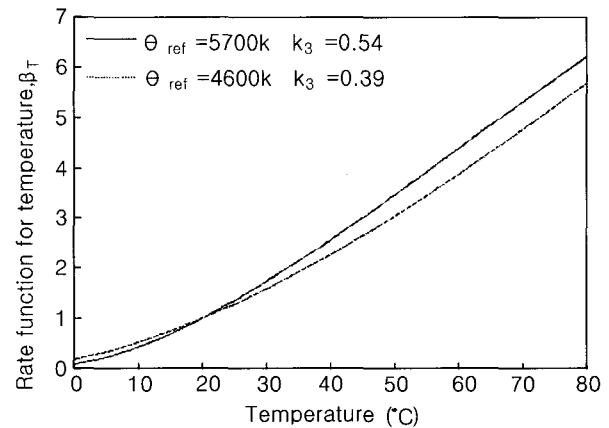


Fig. 4 Temperature rate factor for Portland cement

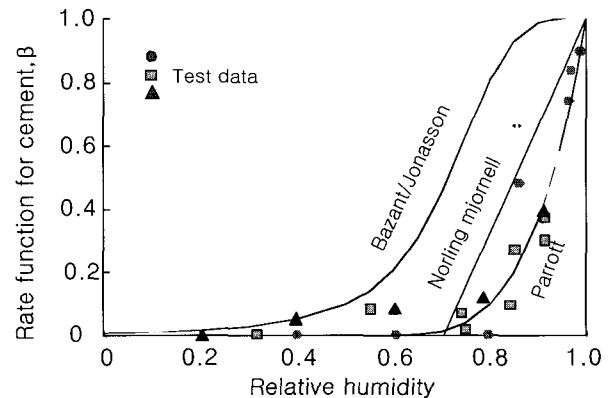


Fig. 5 Relative humidity concept affecting the rate of reaction

기 위하여 배합특성의 영향과 세공구조(pore structure)내의 수분상태를 고려하여 속도함수를 모델링하였다.

3.3.2 물-시멘트비가 수분상태와 수화도에 미치는 영향

시멘트의 수화가 진행됨에 따라 배합에 사용된 수량은 수화에 소모되어 세공구조에서 수화에 사용될 물이 부족하게 된다. 사용 시멘트가 모두 수화될 수 있는 이론적인 최소 물-시멘트비는 약 40% 정도이다¹⁶⁾. 물-시멘트비가 40%이하인 경우 사용 시멘트가 모두 수화되지 않으므로 최종 수화도(ultimate degree of hydration, α_{max})는 1이하의 값을 가지고, 최종 수화도에 이르면 수화가 사용될 물이 거의 남지 않으므로 수화반응이 정지된다. 따라서 물-시멘트비에 따른 반응함수는 다음 식 (8)으로 표현할 수 있다.

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

이론적으로 시멘트를 모두 수화시킬 수 있는 물-시멘트비는 밀봉양생(sealed curing)인 경우 40%, 수증양생(saturated curing)인 경우 32.3%이다. 이는 시멘트가 수화되면서 사용되는 화학적 결합수량과 물리적 결합수량을 기초로 계산된 값이다^{2,16,17)}.

그러나 실제의 경우는 다음 두가지 측면에서 시멘트가 완전 수화되기 어렵다. 첫째 수화가 진행되면서 시멘트입자 표면부터 수화가 시작되어 표면부 수화생성물(outer product)은 치밀한 외피(dense shell)를 형성하여 시멘트입자의 내부를 수화시키는 물질의 침투를 차단하는 역할을 하고, 상대적으로 입자가 큰 시멘트는 완전 수화되기 어렵다^{18,19)}. 둘째 수화과정에서 수화생성물의 증가에 따라 시멘트입자 사이의 공간이 감소하여 새로운 수화생성물이 차지할 공간이 줄어들면 수화는 정지된다²⁰⁾.

이러한 두가지 관점에서 최종 수화도는 실험적으로 결정된 다음 식 (9)와 같이 표현할 수 있고, Fig. 6은 물-시멘트비에 따른 최종 수화도에 관한 이론적인 접근과 실제적인 접근을 보여주고 있다.

$$\alpha_{max} = \frac{1.031 \cdot W/C}{0.194 + W/C} \quad (9)$$

식 (8)의 재료상수 r 은 물-시멘트비가 낮을수록 상대적으로 단위시멘트량이 많아지고 수화에 사용될 수량이 감소하는 현상을 표현한다. 따라서 물-시멘트비가 작은 경우 수화진행에 따라 속도함수 $\beta_{w/c}$ 는 급격한 감소를 나타내고, 이를 반영하는 재료상수 r 은 물-시멘트비에 따라 Fig. 7의 값을 사용할 수 있다.

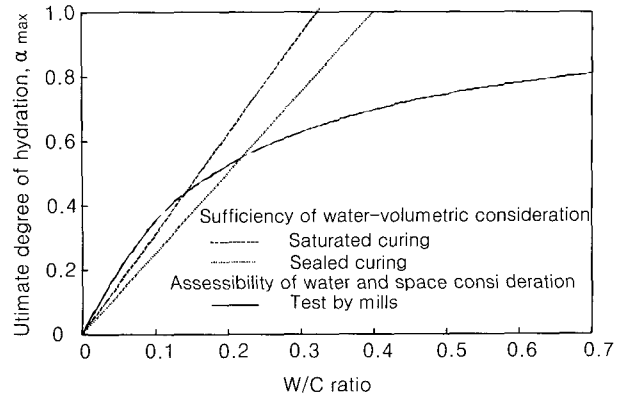


Fig. 6 Theoretical and realistic ultimate degree of hydration

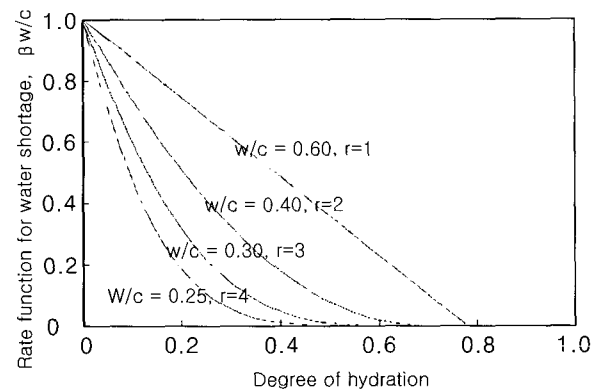


Fig. 7 The rate factor for water shortage as a function of the degree of hydration and W/C ratio

3.3.3 콘크리트의 수분분포가 수화도에 미치는 영향

콘크리트의 공극구조는 크게 젤공극(gel pore)과 모세공극(capillary pore)으로 나눌 수 있고, 젤공극내의 물리적 결합수는 그 결합력이 강하여 일반적인 대기 습도상태에서 이동하지 않는다²⁾. 따라서 수화도에 영향을 미치는 수분은 모세공극 내의 물이다.

Fig. 8은 세공조직내의 물의 상태를 보여주고 있다. 모세공극은 실제 매우 복잡한 형상을 가지고 있으나, 일반적

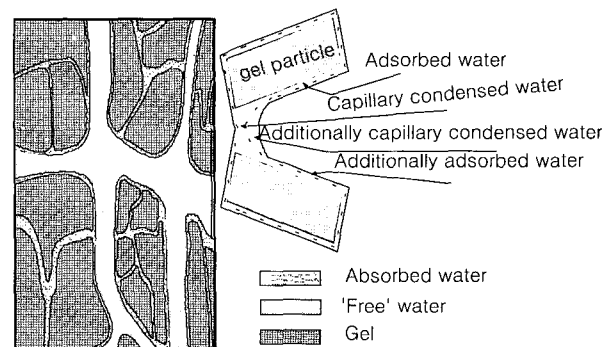


Fig. 8 The state of water in pore system

으로 이상적인 원통형 공극(cylindrical pore)을 가정한다. 모세공극의 범위는 연구자에 따라 많은 차이를 보이고 일반적으로 수십 Å에서 수십 μm의 다양한 크기를 가진다²⁾.

일정한 수화도에서 수화에 사용될 수 있는 콘크리트 내부의 수분량은 3.3.2에서 서술한 것과 일정하나, 작은 직경을 가지는 모세공극은 물이 자유수(capillary free water) 상태로 존재하지만 보다 큰 모세공극의 물은 겔 표면에 흡착되어 물리적으로 결합된(physically bound) 형태로 존재한다. 이러한 흡착수는 겔을 형성하는 물질의 일부로 겔과의 결합력이 상당히 크므로 흡착수의 이동이 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서 물리적인 결합수(physically bound water or absorbed water)는 수화를 진행시키는 데 사용될 수 없고, 자유수만이 추가적인 수화 반응에 사용될 수 있는 것으로 가정한다.

모세공극내의 수분분포를 알기 위하여 모세공극의 분포 모델이 필요하다. 콘크리트의 공극분포(pore size distribution)를 실험적으로 구하는 방법으로 질소흡착법(nitrogen adsorption)과 수은압입법(mercury intrusion porosimetry)이 가장 보편적이다. 본 연구는 상대적으로 크기가 큰 모세공극의 분포가 요구되므로 수은압입법에 의한 모세 공극분포 실험을 근거로 Fig. 9와 같은 공극부피(pore volume)와 공극직경의 대수값이 선형적인 관계를 가지는 모델을 사용하였다²¹⁾. 또한 본 연구에서 모세공극의 범위는 원통형 공극구조 가정하에 공극직경 0.002~10μm으로 정하였고, 이는 수은압입법으로 측정할 수 있는 모세공극의 범위이다.

Fig. 9의 모세 공극분포모델을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$V_{por} = a \ln\left(\frac{\phi}{\phi_0}\right) \quad (10)$$

여기서, V_{por} 은 공극직경 ϕ 보다 작은 직경을 가지는 공극의 누적 모세공극 부피이고, ϕ_0 는 모세공극의 최소직경으로 겔공극과의 경계에 해당하며 본 연구의 분류에 따라 0.002μm이다. 또한 a 는 무차원의 값이고, 공극구조에

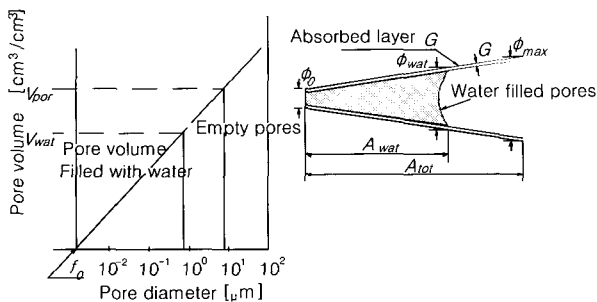


Fig. 9 Modeling of pore size distribution

관계하는 상수값으로 분말도가 작은 시멘트(coarse cement)는 0.05, 분말도가 큰 시멘트(fine cement)는 0.11 정도의 값을 가진다.

Fig. 10은 수은압입법에 의한 모세공극분포 실험결과를 보여주고 있고²²⁾, Fig. 11은 식 (10)에 의한 공극분포 모델을 보여주고 있다.

Fig. 8과 9에서 모세공극내의 물은 자유수와 흡착수로 나눌 수 있고, 최종적으로 자유수를 결정하기 위하여 흡착수의 양을 구해야 한다. 흡착수의 양은 공극내 증기압 또는 상대습도(vapor pressure or relative humidity)에 따라 변화한다. Hagymassy의 실험에 의하면, 상대습도 20%일 경우 흡착수는 두께 3Å의 1개 단일층(1 mono-layer)을 형성하고 상대습도 80%에서 100%로 증가할 때 3개의 단일층(3 mono-layer)에서 6개의 단일층(6 mono-layer)으로 급격히 증가하는 양상을 보인다²³⁾. 따라서 흡착수의 두께는 최대 18Å이 된다. 이러한 현상에 기초하여 흡착수의 두께(Γ , Å)와 상대습도(ϕ)와의 관계는 다음 식 (11)로 나타낼 수 있다²⁴⁾.

$$\Gamma = 3.95 - 1.89 \cdot \ln(-\ln \phi) \quad (11)$$

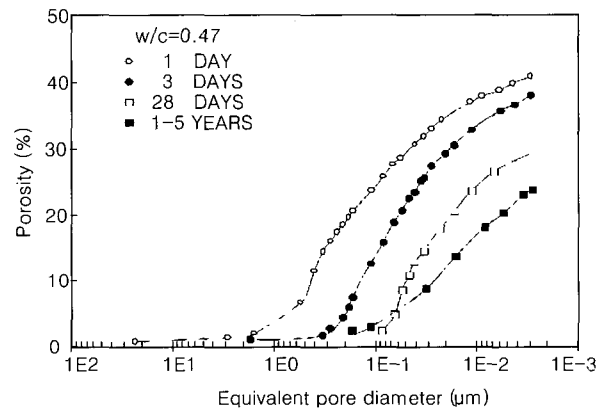


Fig. 10 Pore size distribution measured by Feldman (1986)

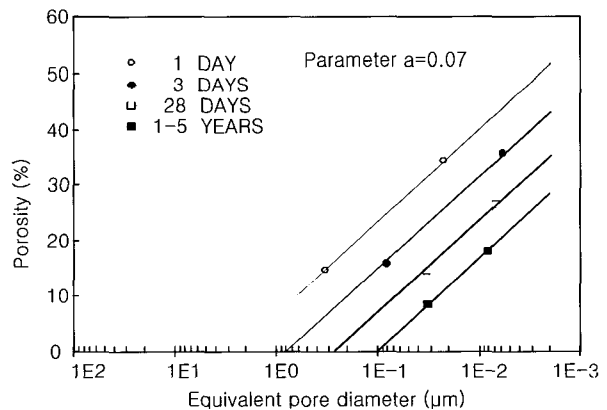


Fig. 11 Model for pore size distribution

따라서, Fig 9에서 보인 바와 같이 전체 공극의 표면적 (A_{tot})과 추가적인 수화에 사용될 자유수가 존재하는 공극의 표면적(A_{wat})의 비로 미세구조에서 수분분포가 수화 진행에 영향을 미치는 속도함수(β_w)를 식 (12)로 나타낼 수 있다.

$$\beta_w = \beta_w(\alpha_c) = \frac{A_{wat}(\alpha_c)}{A_{tot}(\alpha_c)} \quad (12)$$

Fig. 12는 수화도에 따른 수분분포에 관한 속도함수를 보여주고 있고, 물-시멘트비가 0.6 이상일 경우 수화 진행에 사용될 자유수는 충분하지만 낮은 물-시멘트비의 배합에서 최종 수화도에 접근하면 수화가 정지되는 현상을 나타내고 있다.

4. 콘크리트의 수화도 예측모델과 실험결과와의 비교

본 연구에서 제시한 콘크리트의 수화도 예측모델과 실험에서 구한 수화도 측정 결과와 비교하면 Fig. 13과 같다.

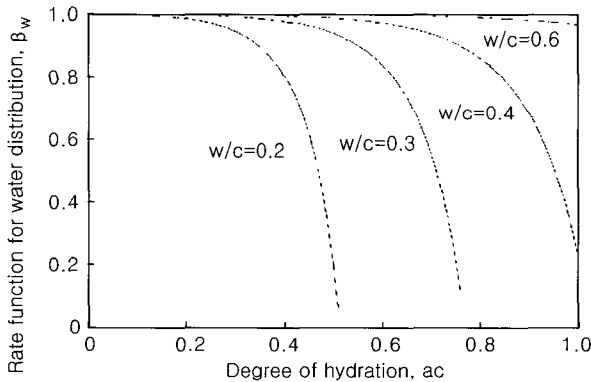


Fig. 12 The rate factor for distribution of capillary water

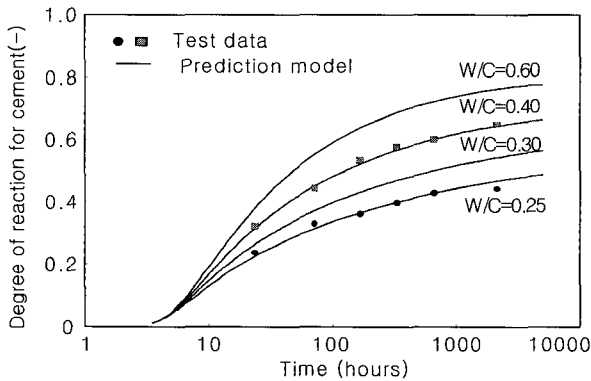


Fig. 13 Calculated and measured degree of hydration versus time with different W/C ratio

Fig. 13의 실험은 열중량 분석(thermogravimetric analysis)을 통한 화학적 결합수(chemically bound water)의 측정을 통하여 얻은 값이다²⁵⁾. Fig. 13에서 제안된 콘크리트 이론적인 수화도 모델이 실제 측정값과 매우 근사함을 알 수 있다.

식(2)에서 수화도의 정의에 따라 각 시간단계에서 수화도가 결정되면 내부발열량을 알 수 있고, 이로부터 단열온도상승곡선을 추정할 수 있다. 수화의 진행, 즉 성숙도의 증가는 온도 및 수분상태에 따라 결정되며, 이러한 과정은 콘크리트 단면 내의 온도, 습도 및 수화도 분포가 각 시간 단계별로 동시에 구해져야 한다. 따라서 콘크리트 요소의 단열온도상승곡선을 추정하기 위하여 온도, 습도 및 수화도를 유한요소법을 수치적으로 결정하였다⁹⁾.

Fig. 14는 Table 2의 화학조성을 가지는 1종 및 4종 시멘트를 대상으로 단열온도상승시험을 수행한 결과를 보여주고 있고⁹⁾, 본 연구에서 제시한 수화도 모델을 이용한 예측곡선을 비교한 것이다. Fig. 15는 Fig. 14의 단열온도상승실험과 콘크리트 표준시방서에서 제시한 발열곡선의 형태로 회귀 분석한 결과를 비교한 것이다. Fig. 14와 15를 통하여 본 연구에서 제시한 모델이 실제 콘크리트의 발열 상태를 보다 정확히 모사할 수 있음을 알 수 있다.

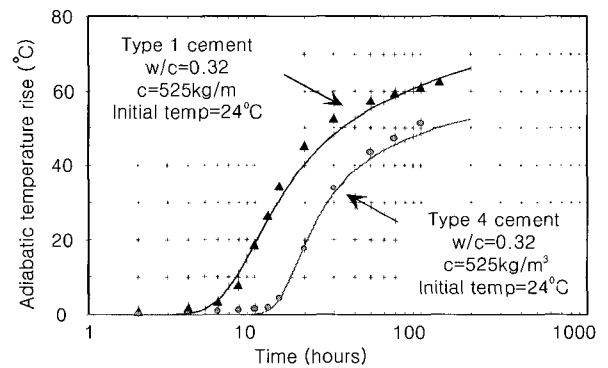


Fig. 14 Calculated and measured adiabatic hydration curves

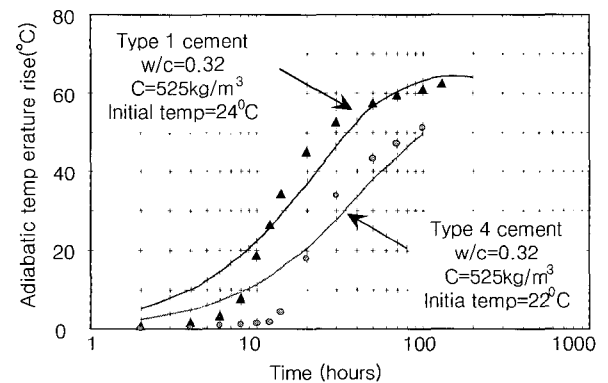


Fig. 15 Measured and fitted adiabatic hydration curves

5. 결 론

본 연구는 초기재령 콘크리트의 온도 및 습도에 의한 변형과 응력을 예측하는 해석 기법을 도출하기 위한 기본적인 연구 단계로 수화도 및 단열온도상승량을 예측하는 모델을 개발하는데 그 목적이 있으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 본 연구에서 제시한 콘크리트의 수화도 예측모델은 기존의 온도영향만을 고려하는 반응속도함수를 콘크리트 내부의 수분분포 상태를 고려하여 모델을 개선하였다.

2) 본 연구에서 제안된 수화도 모델을 이용하여 미세구조의 형성과정, 온도 및 습도와 관련된 재료상수, 역학적 특성 등과 같은 모든 재료특성을 정식화할 수 있을 것으로 사료된다.

3) 초기재령 콘크리트의 수화도는 단면 내 온도 및 수분상태에 의하여 결정되므로 실제 구조물의 해석을 위하여 수화도와 온도 및 습도분포를 수치적으로 구하는 해석 프로그램이 요구되며, 본 연구의 후속 단계로 이를 결정하는 유한요소 해석 프로그램을 개발하여 수화도 및 단열온도상승량 실험결과와의 비교 및 검증에 적용하였다.

4) 본 연구의 수화도 모델의 예측값은 열중량분석에 의하여 실제 측정된 수화도에 매우 근접한 결과를 보임으로써 그 유용성을 검증하였고, 수화도의 정의에 따라 단열상태의 발열량을 정확히 모사할 수 있다.

5) 제안된 모델을 이용하여 수화과정이 온도 및 습도상태를 결정하는 초기재령 콘크리트의 단면 내 온·습도상태를 추정하여 궁극적으로 초기재령 콘크리트의 균열 위험성을 평가하는데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Byfors, J., "Plain Concrete at Early Ages," Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1980.
2. Neville, A. M., "Properties of Concrete," 4th ed., Addison Wesley Longman Ltd, 1995.
3. Nurse, R. W., "Steam Curing of Concrete," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 1, 1949, pp.79~88.
4. Friesleben Hansen, P., and Pedersen, E. J., "Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete," *Journal of the Nordic Federation*, No. 1, 1977, pp.21~25.
5. Jonasson, J-E., "Slipform Construction Calculation for Assessing Protection Against Early

- Freezing," Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1985.
6. Powers, T. C., and Brownyard, T. L., "The Thermodynamics of Adsorption of Water on Hardened Cement Paste," *ACI Journal*, Vol. 18, 1947, pp.549~602.
7. Parrott, L. J., "Measurement and Modelling of Porosity in Drying Cement Paste," *Materials Research Society Symposium Proceedings on Microstructural Development During Hydration of Cement*, Vol. 85, 1986, pp.91~104.
8. Norling, M. K., "Self-desiccation in Concrete," Licentiate Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 1994.
9. Cha, S. W., "Modeling of Hydration Process and Analysis of Thermal and Hygral Stresses in Hardening Concrete," Ph.D Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 1999.
10. Locher, F. W., "Zement, Kalk, Gips," *Jhg.* 29, No.10, 1976, pp.435~442.
11. Copeland, L. E., and Kantro, D. L., "Hydration of Portland Cement," *International Symposium Proceedings on the Chemistry of Cements*, Tokyo, Vol. II, 1968, pp.387~421.
12. Bezjak, A., "On the Determination of Rates Constants for Hydration Processes in Cement Pastes," *Cement and Concrete Research*, Vol. 10, No. 4, 1980, pp.553~563.
13. Taylor, H. F. W., *Cement Chemistry*, Academic Press, London, 1990.
14. Parrott, L. J., "Cement Hydration Under Partially Saturated Conditions," *International Symposium Proceedings on the Chemistry of Cements*, Rio de Janeiro, Vol III, 1986, pp.46~50.
15. Bazant, Z. P., and Najjar, L. J., "Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete," *Materials and Structures*, Vol. 5, No. 25, 1972, pp.3~20.
16. Powers, T. C., "A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete," *Proceedings of the Highway Research Board*, Vol. 27, 1947, pp.178~188.
17. Powers, T. C., "Physical Properties of Cement Paste," *International Symposium Proceedings on the Chemistry of Cement*, Washington, Vol II, 1960, pp.577~699.
18. Jennings, H. M., and Johnson, S. K., "Simulation of Microstructure Development During the Hydration of a Cement Compound," *Journal*

- of the American Ceramic Society, Vol. 69, No.1 1, 1986, pp.790~795.
19. Jennings, H. M., and Tennis, P. D., "Model for the Developing Microstructure in Portland Cement Pastes," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 77, No. 12, 1994, pp.3161~3172.
 20. Powers, T. C., and Brownyard, T. L., "Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement," *Bulletin 22 of Research Laboratories of the Portland Cement Association*, Vol. 22, 1948, pp.276~287.
 21. Breugel, K. van, "Simulation of Hydration and Formation of Structure in Hardening Cement-based Materials," Ph.D Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1991.
 22. Feldman, R. F. *International Symposium Proceedings on the Chemistry of Cements*, Rio de Janeiro, Vol. 1, 1986, pp.336~356.
 23. Hagymassy, J., Brunauer, J. R., and Mikhail, R. S., "Pore Structure Analysis by Water Vapor Adsorption t-curves for Water Vapour," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 9, No. 3, 1969, pp.485~491.
 24. Badmann, R., Stockhausen, N., and Setzer, M. J., "The Statistical Thickness and Chemical Potential of Adsorbed Water Films," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 82, No. 2, 1981, pp.534~542.
 25. Atlassi, E., "A Quantitative Thermogravimetric Study on the Nonevaporable Water in Mature Silica Fume Concrete," Ph.D Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 1993.

요 약

콘크리트는 수화과정을 통하여 재료가 성숙되고, 경화된다. 수화의 진행은 엄밀한 의미에서 재령에 의하지 않고 수화도에 의해 제어되므로, 경화가 진행되는 콘크리트의 모든 재료특성과 미세구조 형성과정은 수화도에 의해 정식화되는 것이 바람직하다. 기존 연구는 주로 양생온도가 수화발열속도에 미치는 영향을 고려한 반응함수 개념을 주로 사용하였고, 또한 내부 수분상태의 영향을 습도함수의 형태로 고려한 연구결과는 실제 수화기구를 반영하지 못하고 단지 각 연구자의 실험조건과 배합조건에만 부합하는 결과를 보인다.

따라서 본 연구는 기존 제안식의 단점을 보완하기 위하여 수화기구와 미세구조 형성 과정에 기초하여 반응속도함수를 모델링하였다. 수화반응속도는 온도 및 수분상태에 따라 변화하므로, 본 연구에서는 수화발열 속도에 영향을 미치는 인자로, 시멘트 종류, 물-시멘트비 등의 배합특성과 양생온도 및 세공조직의 내부수분상태를 고려하였다.

본 연구에서 제시한 콘크리트의 수화도 예측모델은 기존의 온도영향만을 주로 고려하는 반응속도함수를 콘크리트내부의 수분 분포 상태를 고려하여 모델을 개선하였으며, 이는 실제 측정된 수화도에 매우 근접하여 그 유용성을 검증하였다. 또한 수화도의 정의와 제시한 모델을 이용하여 콘크리트 요소내의 온도, 습도 및 수화도를 수치적으로 결정하여 단열온도상승곡선을 정확히 묘사할 수 있었다.

제안된 모델은 수화가 진행되는 콘크리트의 여러 역학적 특성 및 미세구조 형성과정을 적절히 표현하고, 수화과정이 온도 및 습도상태를 결정하는 초기재령 콘크리트의 단면 내 온·습도상태를 추정하여 궁극적으로 초기재령 콘크리트의 균열 위험성을 평가하는데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 수화도, 미세구조 형성, 온도 및 수분상태, 반응속도함수, 단열온도상승곡선, 초기재령 콘크리트