

매스 콘크리트의 수화열과 온도응력 해석

Analysis of Heat of Hydration and Thermal Stresses in Mass Concrete

박 영 진^{*} 김 진 근^{**} 전 상 은^{***} 방 기 성^{****}
Park, Young-Jin Kim, Jin-Keun Jeon, Sang-Eun Pang, Gi-Sung

ABSTRACT

Nonlinear temperature distribution induced by the hydration heat generates thermal stress in mass concrete. At early ages, such thermal stress may induce thermal cracks in the structure which can affect on the durability and safety of the structure.

Up to now, a lot of works have focused on the prediction of temperature distribution and thermal stress in the structure. In most of such works, however, the inside of structure was considered as adiabatic state to predict temperature distribution and the thermal stress. And due to the lacks of appropriate analysis models after crack, there was little research on the crack occurrence.

This paper deals with the prediction of the temperature distribution in the structure using the rate of hydration heat generation and also estimates the behavior of structure before and after cracking due to hydration heat using crack band model.

1. 서론

1930년대 Boulder Dam에 관한 연구⁽¹⁾를 시작으로 매스 콘크리트에서의 온도상승에 관한 연구가 수행된 이후 현재까지 많은 연구가 이루어 졌으며, 온도균열을 제어하기 위해 수화열에 의한 균열 발생 시점 등을 예측할 수 있는 프로그램들이 많이 개발되었다. 그러나 대부분의 기존 프로그램들은 구조물 내부를 단열이라고 하는 특수한 상황으로 가정하여 온도이력을 예측하였다. 이러한 가정은 댐과 같이 두께가 매우 큰 구조물에서는 유효하지만 벽체와 같이 두께가 크지 않은 구조물 내부를 단열상태로 가정하여 온도 예측을 하는 것은 실제의 온도보다 과다하게 평가할 우려가 있다. 또한 온도응력해석에 있어서도 기존의 해석 프로그램들은 탄성해석에 의존하여 콘크리트의 거동과 온도균열의 발생 여부를 예측하므로 구조물에 균열이 발생하였을 경우 온도균열에 의한 응력 재분배의 영향을 고려할 수 없다.

본 논문에서는 수화발열 모델과 균열띠 이론을 적용한 콘크리트 구조물의 수화열 해석 프로그램을 개발하여 구조물의 실제 온도분포와 온도균열이 발생한 후의 콘크리트 파괴거동을 예측하고 온도균열의 시작과 그 진전 양상 등도 살펴보고자 하는데 그 목적이 있다.

2. 유한 차분법을 이용한 온도 해석

2.1 콘크리트 내부 발열량

- 1) * 정회원, VSL Korea 연구원
- 2) ** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수
- 3) *** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
- 4) **** 정회원, 한국전력공사 전력연구원 연구원

구조물 내의 콘크리트 부재가 실제로 받는 온도이력은 구조 부재의 각 위치마다 다양하다. 비교적 작은 구조물에서는 방열 등의 영향에 의해 단열상태와 비교하여 수화발열 과정이 크게 다른 부위가 존재하게 된다. 따라서 단열온도상승 실험으로부터 얻어진 수화열이 전단면에 동일하게 발생한다고 가정한다면, 실험을 통해 얻어진 값보다 큰 값을 갖게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 시멘트의 수화반응 모델을 이용하여 구조물 내의 온도상승을 예측할 수 있는 방법이 연구되어 왔다. 수화반응 모델은 식(1)로 표현되는 등가수화시간 t_e 를 이용하여 시멘트 단위 질량당 수화발열을 $\dot{H}(t_e)$ 를 계산하는 방법이다. $\dot{H}(t_e)$ 는 계산되어진 등가수화시간 t_e 와 Fig. 1을 이용하여 구할 수 있다.

$$t_e = \int_0^t \beta_t(x, t') dt' \quad (1)$$

$$\beta_T(x, t') dt' = \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T(x, t')} \right) \right]$$

여기서, R : 기체상수

U : 시멘트 수화 활성화에너지

T_0 : 기준온도 (°K)

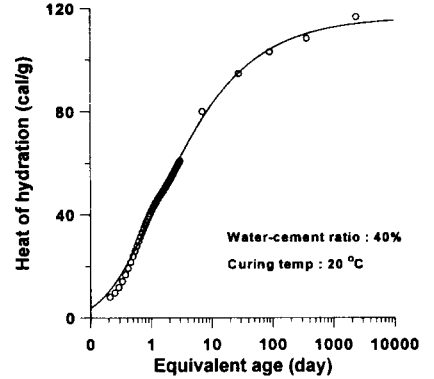


Fig. 1 Development of heat of hydration

2.2 온도해석을 위한 수식화

원자력 발전소 격납 건물 등과 같은 두꺼운 벽체 혹은 부재 치수가 큰 구조물의 온도해석에 있어서는 1차원 문제로 국한시켜 해석을 수행하는 것이 가능하므로 본 논문의 온도해석에서는 1차원 열흐름이 발생하는 구조물을 가정하였다. 이러한 구조물 내부에서 임의시간 t 에서 온도분포는 $T(x, t)$ 로 나타낼 수 있다. 1차원 방향의 열유속이 존재하게 되며 1차원 열전도에 관한 평형방정식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$dq_x - dq_{x+dx} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \quad (2)$$

그리고 1차원 미소요소에 대한 열평형 방정식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho_c \dot{H}(t_e) \quad (3)$$

여기서, ρ : 콘크리트의 단위중량

C : 콘크리트의 비열

ρ_c : 콘크리트 단위부피당 시멘트 질량

한편 콘크리트가 타설된 직후, 초기 조건은 x 방향에 대하여 모두 동일한 온도를 갖게 된다는 것이다. 여기서 외기와 접해 있는 콘크리트의 표면부는 외기온도 T_e 와 동일하다고 가정하면 벽체의 표면부에서 경계조건은 $T \approx T_e$ 가 된다. 그런데 콘크리트 표면부에 설치되는 거푸집은 어느 정도 단열재 역할을 하므로, 이 거푸집의 효과를 해석에 고려해야 한다. 거푸집의 단열 효과를 h_e 의 외기대류계수를 사용하여 고려해 주면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} = h_e (T - T_e) \quad (4)$$

3. 균열띠 이론을 이용한 응력 해석

최근에 이루어진 파괴진행영역에서의 미세 균열 형성에 관한 많은 관찰로부터 하나의 단일균열에 의해 이루어지는 것이 아니라 미세균열이 임의의 폭을 갖는 띠와 같은 형상으로 발전하여 파괴가 일어나는 것이 밝혀졌다. 이러한 미세 균열 영역을 실제적으로 해석에 이용하고자 균열띠 이론이 제안되었다.⁽²⁾

균열띠 이론은 균열이 발생한 파괴 영역을 하나의 연속체로 생각하는 개념이다. 균열띠 모델에서는 미세 균열이 요소내에 분포하여 균열이 진전한다고 생각한다. 균열띠 모델에서는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 등방성의 탄성 컴플라이언스를 인장에 의한 미세 균열 영역을 설명하는 컴플라이언스 매트릭스로 치환하여 사용하므로 기존의 요소망을 균열이 발생함에 따라 재구성할 필요가 없고, 균열의 방향에 관계없이 유한 요소 프로그램에 쉽게 추가될 수 있다.

Fig. 3에서 1차원 문제로 고려하기 위해서 평면내의 변형도 ϵ_y 는 벽두께 방향(x 축)으로 일정하고 외부에서 작용하는 응력은 없으며 단면 내에는 오직 온도응력만이 발생한다고 가정하였다. 따라서 균열방향에 수직인 y 방향과 z 방향의 응력만이 단면 내에 작용하게 된다. Fig. 3과 같이 표면부에 균열이 발생하게 되면 균열폭은 시간과 위치의 함수 $w(x, t)$ 로 표현할 수 있다. 시간 t 에서 y 축 방향의 균열 변형률 $\xi(t)$ 는 $w(x, t)/s$ 로 정의된다. 따라서 균열과 균열 사이에서 시간에 따른 콘크리트의 전체 변형률은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon(t) - \xi(t) = \int_t^0 J(t, t') \sigma(x, t') + \alpha [T(x, t) - T_0] \quad (5)$$

여기서, $J(t, t')$ 은 2축 컴플라이언스 함수

식 (5)에서 인접한 균열과 균열 사이에서 발생하는 변형률 $\xi(t)$ 는 균열진전영역에서의 인장응력 분포를 가정하여 구할 수 있다. 본 논문에서는 균열진전 영역에서의 응력-균열 변형을 관계를 CEB-FIP Model Code에서 제시한 식^{(3),(4)}으로 사용하였다. 이 관계는 Fig. 4와 같으며 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma &= f_t - (f_t - \sigma_1) \omega / \omega_1 & \text{for } \omega \leq \omega_1 \\ \sigma &= \sigma_1 - \sigma_1 (\omega - \omega_1) / (\omega_c - \omega_1) & \text{for } \omega_1 > \omega \end{aligned} \quad (6)$$

CEB-FIP Model Code에서 식(6)의 ω_c 는 최대 골재 크기인 d_a 의 함수이며, d_a 가 8mm, 16mm, 32mm일 때 ω_c 는 각각 0.12mm, 0.15mm, 0.25mm를 갖도록 규정하고 있다. σ_1 은 $0.15f_t$ 로 규정하고 있으며, ω_1 은 mm단위로서 식(7)과 같이 규정하고 있다.

$$\omega_1 = \frac{G_F - 22\omega_c (G_F/k_d)^{0.95}}{150 (G_F/k_d)^{0.95}} \quad (7)$$

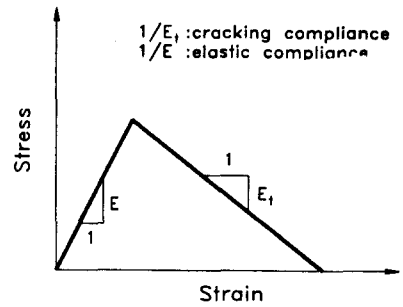


Fig. 2 Stress-strain curve for the microcrack band

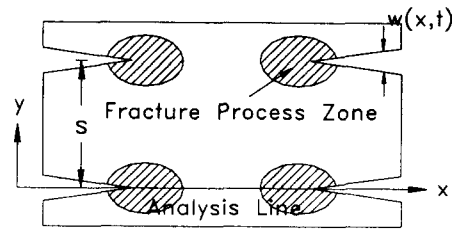


Fig. 3 1-dimensional structure after crack

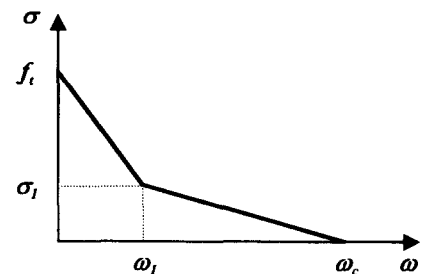


Fig. 4 Stress-elongation curve at fracture process zone

식 (7)의 k_d 역시 최대 골재 크기인 d_a 의 함수이며, d_a 가 8mm, 16mm, 32mm일 경우 k_d 는 각각 4, 6, 10을 사용하도록 규정하고 있다. ω_c 와 k_d 는 최대 골재 크기의 함수이므로, 최대 골재 크기가 다른 콘크리트에 대해서는 위에서 주어진 값을 이용하여 직선보간하여 사용할 수 있다. G_F 는 실험으로부터 측정되어야 하는 파괴 변수로서 만약 실험으로부터 측정된 값이 없을 경우에는 식 (8)과 같은 경험식을 이용하여 구할 수 있도록 규정하고 있다.

$$G_F = k_d f_c^{0.7} \quad (8)$$

여기서, f_c 는 MPa이고, G_F 는 N/m이다.

외부 하중이 작용하지 않는 구조물은 시간 t 에서 단면 내부에 식 (9)와 같은 평형이 성립하게 된다.

$$\int_h^0 \sigma(x, t) dx = N(t) \quad (9)$$

여기서, h : 구조물의 두께

$N(t)$: 단면 내의 합력

4. 해석 결과와 결과 분석

4.1 온도 해석 결과

수화발열 모델과 단열온도상승 모델을 사용한 온도해석결과를 비교하기 위해서는 먼저 각 모델에서 발생되는 내부발열량이 같도록 설정을 해야한다. 수화발열 모델에서는 등가수화재량을 계산하기 위해 수화도에 따른 활성화에너지와 시멘트 종류에 따른 수화발열 곡선이 필요하다. 그러나 아직 이에 대한 실험값이 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 1의 수화발열곡선을 회귀분석하여 식 (10)과 같은 수화발열 곡선으로 선정하였다.

$$H(t_e) = \exp\left(4.76 - \frac{1.09}{t_e^{0.5}}\right) \quad (10)$$

식 (10)에서 등가수화시간 t_e 는 식 (1)과 같이 활성화에너지의 함수이다. 그러나 활성화에너지도 수화발열곡선과 같이 실험값이 부족하여 실제값을 정하기가 매우 어렵다. 따라서 단열온도상승량과 동일한 내부 발열량을 발생시키는 활성화에너지값을 설정하기 위해, 단열상태의 경계조건을 적용하여 수화발열 모델을 적용한 온도해석을 활성화에너지를 변수로 하여 실시하였다. Fig. 5는 단위시멘트량 440kg/m^3 를 사용한 수화발열 모델의 온도상승량을 나타낸다. 이 결과로부터, 수화발열 모델의 U/R 값에 관계없이 유사한 수화발열곡선을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

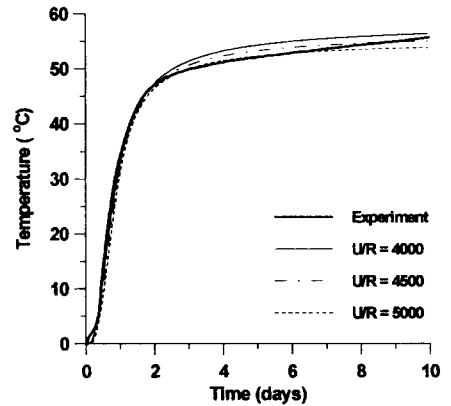


Fig. 5 Temperature variation with U/R

온도 해석을 수행하기 위해 두께 1.2m의 1차원 무한 벽체를 설정하였다. Table 1은 해석에 사용된 변수값들을 나타내었다.

Fig. 6은 각 모델을 적용한 온도 해석 결과를 나타낸다. 구조물 내부의 온도 분포는 중심부를 중심으로 대칭을 이루므로 출력 위치는 표면부에서 중심부 방향으로 표면부로부터 0cm, 15cm, 30cm, 60cm(각각 node 1, node 7, node 13, node 25)위치를 선택하였다.

Table 1 Input data for analysis

	1D Program
Cement Content	440kg/m ³
Placing Temp	20°C
Ambient Temp	20°C
Coefficient of Convection	9.8kcal/m ² · hr · °C
Specific Heat	0.235kcal/g · °C
Coefficient of Conductivity	2.1kcal/m · hr · °C
Density	2320kg/m ³
Water-Cement Ratio	40 %
Compressive Strength	330 kg/cm ²
Coefficient of Thermal Expansion	1.0×10 ⁻⁵ /°C

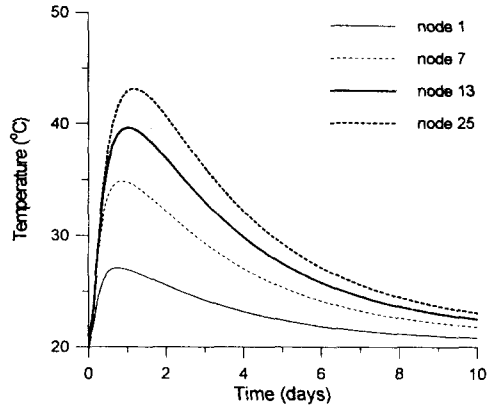


Fig. 6 Temperature history

4.2 응력 해석 결과

길이 방향의 시간에 따른 변형율이 일정한 구조물을 해석하기 위해 양단이 고정된 구조물을 선정하였다. 해석 결과는 부재 높이 방향으로 출력하도록 하였다.

Fig. 7, Fig. 8은 콘크리트 타설 후 10일까지의 응력해석 결과를 나타낸다. Fig. 7은 인장강도를 30kg/cm²로 선정하여 구조물에 균열이 발생하지 않았을 경우를 나타내며 Fig. 8은 인장강도를 7kg/cm²로 설정하여 균열이 발생하였을 경우를 나타낸다. 응력해석 결과는 대칭 구조물이므로 표면부로부터 중앙부까지를 출력하였다.

Fig. 7 (a), (b)에서 보는 바와 같이 초기에는 단면 전체에 압축응력이 발생하게 되고 2일경에 최대 -15kg/cm²의 압축응력이 발생하게 된다. 그리고 표면부에서는 2일, 중앙부에서는 3일 정도에서 압축응력으로부터 인장응력으로의 전환이 이루어졌다. 이는 단면에 발생하는 온도가 1~2일경에 최대온도에 도달하게 되고, 이후로의 온도가 감소하기 때문이다. 또한 표면부에서는 외부로의 열방출이 활발하여 중심부보다 일찍 최대온도에 도달하기 때문에 표면부에서 인장응력으로의 전환이 빨리 이루어지게 된다.

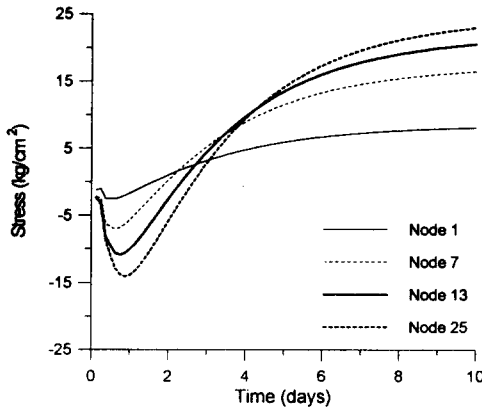
Fig. 7과 Fig. 8을 비교해 보면 발생 인장응력이 인장강도를 초과하지 않았을 경우, 즉 균열이 발생하지 않도록 하였을 경우 계속적인 응력 증가가 나타나는데 비해, 인장강도를 초과하여 균열을 유발시켰을 경우에는 더 이상의 인장응력 증가가 없음을 알 수 있다. 이는 기존의 수화열 해석 결과가 균열 발생 후, 구조물의 실제 거동을 제대로 모사하지 못함을 나타내는 것이다.

Fig. 8 (c)에서는 균열이 발생하였을 경우 균열변형율의 시간에 따른 진전 형태를 나타낸 것이다. Fig. 8(b)의 응력분포로 미루어 보아, 약 3일 근처에 node 7에서 균열 발생이 시작됨을 예측할 수 있다. Fig. 8 (c)에서는 균열이 이 위치에서 시작되어 점차적으로 진전되어 가고 있음을 보여주고 있다. 또한 구조물 전체 두께에 균열이 진전되어 관통균열을 확인할 수 있다.

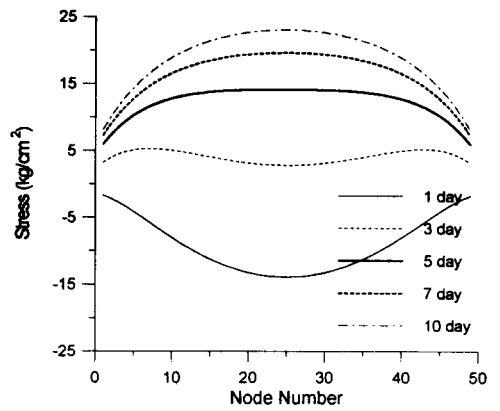
5. 결론

1) 단열온도상승 모델을 사용할 경우 실제 구조물의 온도 이력을 과대평가 할 수 있으며, 수화발열 모델을 사용하는 것이 실제에 가까운 온도이력을 예측할 수 있다. 그러나 본 논문에서 수행된 온도해석 결과는 시간에 따른 수화발열율과 활성화에너지를 가정한 상태에서 이루어졌으므로 보다 정확한 해석을 위해서는 연구결과의 축적이 필요하다.

2) 균열이 발생한 후의 구조물 내 응력분포와 응력이력은 탄성해석과 많은 차이를 나타내었으며, 균열뒤틀 이론을 적용하여 균열 발생 시점, 균열 폭의 형상, 균열 폭 진전 양상을 예측할 수 있었다. 그러나 본 논문에서는 1차원 구조물로 제한하여 해석을 수행하였는데 다차원 구조물과 다양한 대상 구조물에 대해서 적용가능한 프로그램의 개발이 연구되어야 할 것이다.

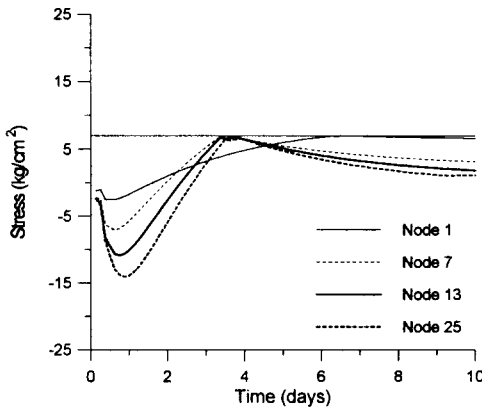


(a) stress history

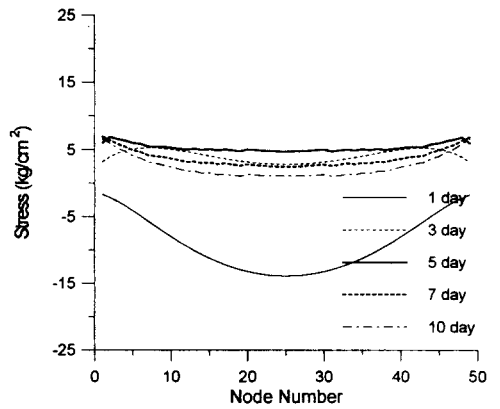


(b) stress distribution

Fig. 7 Result for tensile strength of 30kg/cm²



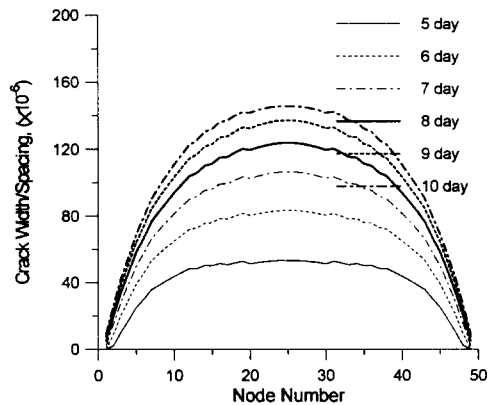
(a) stress history



(b) stress distribution

참고문헌

1. U.S. Bureau of Reclamation, "Cooling of Concrete Dam Final Reports, Boulder Canyon Project, Part VII-Cement concrete Investigations", Bulletin 3, 1949, pp.256
2. Bazant Z. P., and Oh, B. H. "Crack Band Theory for fracture of Concrete," *Materials and Structures*, RILEM, Vol. 16, 1983, pp.155-177
3. Hilsendorf, H. K., and Brameshuber, W., "Code-Type Formulation of Fracture Mechanics Concepts for Concrete," *International Journal of Fracture*, Vol. 51, 1991, pp.61-72
4. CEB-FIP Model Code 1990, First Predraft 1988, Bulletin d'Information No. 190a, 190b, Comite Euro-International du Beton(CEB), Lausanne.



(c) Propagation of crack

Fig. 8 Result for tensile strength of 7kg/cm²