

크리이프를 고려한 메스콘크리트의 수화열에 대한 온도응력 해석  
Thermal Stress Analysis on the Heat of Hydration  
for Mass Concrete Considering Creep Effect

김진근\* 이종대\*\* 김국한\*\*\*  
Kim, Jin-Keun Lee, Jong-Dae Kim, Kuk-Han

ABSTRACT

The heat of hydration of cement causes the internal temperature rise at early age, particularly in massive concrete structures such as a footing of nuclear reactor building or a dam. As the result of the temperature rise and restraint of foundation, the thermal stress may induce cracks in concrete. Therefore, the prediction of the thermal stress is very important in the design and construction stages in order to control the cracks developed in massive concrete structures. And, in case of young concrete, creep effect by the temperature load is larger than that of old concrete. Thus the effect of creep must be considered for checking the cracks, serviceability, durability and leakage.

This study is composed of two items. The first, it is to develop a finite element program which is capable of simulating the temperature history in mass concrete. The second, when the thermal stress of mass concrete structures considering creep is calculated by using the modified elastic modulus due to the inner temperature change.

It is shown that the analytical results of this study is in comparably good agreement with JCI's analytical results.

1. 서론

최근에 토목및 건축 분야에서 콘크리트 구조물이 특수화, 대형화 되어가고, 특히 원자력 발전소와 같은 중요 구조물의 경우에 부배합 콘크리트의 사용이 날로 증대되어가고 있다. 이에 콘크리트의 응결 경화과정에서 시멘트의 수화발열반응에 의해 구조물에 생기는 큰 온도변화에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히 온도변화로 인해 생기는 인장응력은 경화 후에도 잔류응력으로 남게 되어 콘크리트 구조물에 균열을 발생시켜 구조물의 안전성, 내구성및 방수성등에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 연구의 필요성이 날로 증대되고 있다.

온도에 관한 연구는 1930년에 Boulder Dam<sup>(1)</sup>에 관한 연구를 시작으로 하여 Carlson<sup>(2)</sup>, A.D.Ross<sup>(3)</sup>등에 이르기까지는 단순 경계조건에 대해 간단한 계산식을 제안함으로써 이루어 졌다. 그러나, 오늘날 컴퓨터의 보급이 확산됨에 따라 유한요소법에 의한 온도응력의 해석이 가능하게 되었고, 특히 중요도가 매우 큰 구조물에 대해서 종래에 2차원, 또는 1차원의 해석기법을 사용하는 것보다는, 3차원과 축대칭에 대해 열전달 해석을 하는 것이 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있으므로 이에 대한 연구가 필요하게 되었다.

\* : 한국과학기술원 토목공학과 부교수  
\*\*\* : 한국도로공사 도로연구소 연구원

\*\* : 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

매스 콘크리트에서 온도의 영향은 인장응력에 의한 균열의 문제뿐만 아니라, 초기재령에서의 하중이라는 점에서 콘크리트 구조물에 더욱 큰 영향을 미친다. 즉 콘크리트는 초기재령에서 탄성계수, 압축강도와 인장강도 등이 작고 초기에 발생하는 온도하중에 대하여 많은 크리이프 변형을 수반하므로 이에 대한 영향이 고려되어야 한다.

그러므로 본 연구에서는 유한요소법에 의해 매스콘크리트에 있어서의 온도이력을 구하고, 그 온도이력에 의한 하중과 크리이프를 고려하여 구조물을 해석하고자 한다.

## 2. 재료의 모델링

### 2.1 수화열의 모델링

매스콘크리트 내부의 온도분포와 온도이력은 콘크리트의 단열온도상승 모델식과 표면으로 부터의 열확산 성질에 의해 산정될 수 있으므로 콘크리트 열특성, 거푸집의 재질과 두께, 양생조건, 환경조건 등과 같은 영향 인자들의 신중한 검토가 필요하다. 따라서 중요도가 큰 구조물에 대해서는 실험을 통하여 단열온도상승식의 변수를 측정하는 것이 요구되고 있으나, 여기서는 단위 시멘트량 및 타설시의 온도를 실험변수로 하여 최대상승온도(K)와 반응속도( $\alpha$ )를 구한 일본 매스콘크리트 온도응력연구위원회에서 제시한 모델식 (1)과 [표 1]을 사용하였으며(4), 콘크리트의 단열 온도상승에 의한 단위시간, 단위체적당 내부 발열량( $\dot{Q}$ )은 식(2)를 사용하였다.

$$T = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

여기서, T : 단열 온도상승치(°C)      K : 최대상승온도(°C)  
 $\alpha$  : 반응속도                              t : 재령 (일)

$$\dot{Q} = \frac{\rho_c C_c \Delta T}{\Delta t} \quad (2)$$

여기서,  $\dot{Q}$  : 단위시간의 단위체적당 발열량(Kcal/hr·m<sup>3</sup>)  
 $\Delta T$  : 콘크리트의 단열온도상승에 의한 온도차(°C)  
 $\Delta t$  : 시간차분(시간)

[표 1] K,  $\alpha$  의 값

시멘트 종류	K	$\alpha$	온도
보 통	K = 0.0831C + 17.48	$\alpha = 0.00174C + 0.097$	10 °C
	K = 0.1108C + 8.86	$\alpha = 0.00415C - 0.271$	20 °C
	K = 0.0961C + 9.96	$\alpha = 0.00624C - 0.499$	30 °C
플라이애쉬	K = 0.1587C - 7.18	$\alpha = 0.00286C - 0.081$	20 °C
중 용 열	K = 0.0753C + 10.24	$\alpha = 0.00092C + 0.377$	20 °C
고 로	K = 0.1299C - 0.56	$\alpha = 0.00174C + 0.236$	20 °C

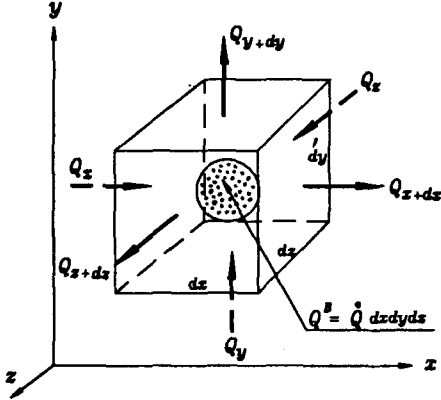
\* C 는 단위 시멘트량(kgf/m<sup>3</sup>)을 의미함

### 2.2 크리이프의 모델링

일반적으로 널리 사용되고 있는 ACI 모델식을 사용하였으며, 수치해석방법으로는 다수의 응력이력의 합에 대한 응답은 각각의 응력이력에 대한 응답의 합과 같다는 「중첩의 원리」를 이용한 단계적 해석법을 사용하였다.

### 3. 유한 요소법에 의한 해석

#### 3.1 수화열에 관한 유한요소해석



[그림 1] 미소체적에서의 열평형 관계

열전달 상태의 해석에서 모든 물체는 온도의 변화율에 의해 열흐름이 일어난다는 Fourier의 법칙에 따라 열유속(heat flux : 단위시간, 단위 면적당 이동되는 열량)은 식(3)과 같이 나타낼 수 있으므로, [그림 1]에서와 같은 3차원 미소체적에서 x-방향에 대한 열평형 관계는 아래와 같다.

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3)$$

$$(dq_x)_{in} = -(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) dy dz dt$$

$$(dq_x)_{out} = -[(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) dx] dy dz dt$$

$$(dq_x)_{in} - (dq_x)_{out} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) dx dy dz dt$$

따라서, 3차원 직교좌표계의 미소체적에 대한 비정상 열전도방정식은 식(4)와 같이 구할 수 있으며, 열전도율이 등방성을 가진다고 가정하면 식(5)와 같은 내부 열흐름 평형방정식이 성립된다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \dot{Q} \quad (5)$$

여기서,  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  : x, y, z 방향의 열전도계수(Kcal/hr · m · °C)  
 $T$  : 온도(°C)

유한요소 공식화를 위해, 절점온도와 요소내의 온도를 결합시켜주는 형상함수  $N[(x, y, z)]$ 와 시간에 따른 요소의 절점온도를 나타내는 함수  $\{\phi(t)\}$ 의 곱으로 요소내의 온도분포를 식(6) 같이 표현하여 식(5)를 정리하면 식(7)과 같다. 외기의 대류(air convection), 냉각관의 대류(water convection), 복사(radiation), 열흐름(heat flow)등의 경계조건을 고려한 비정상 열전도방정식의 유한요소식은 식(8)과 같다.(5)

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)]\{\phi(t)\} \quad (6)$$

$$\int_{V_e} [N]^T \{ \lambda (\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) + \dot{Q} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \} dV = 0 \quad (7)$$

$$[K]\{\Phi\} + [C]\{\frac{\partial \Phi}{\partial t}\} = \{F\} \quad (8)$$

여기서,  $[K] = \sum_e \int_{V_e} \lambda (\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z}) dV$

$$+ \sum_e \int_{S_e} \alpha_c [N]^T [N] dS + \sum_e \int_{S_e} \alpha_r [N]^T [N] dS$$

$$[C] = \sum_e \int_{V_e} \rho c [N]^T [N] dV$$

$$[F] = \sum_e \int_{V_e} \dot{Q} [N]^T dV - \sum_e \int_{S_e} q_o [N]^T dS + \sum_e \int_{S_e} \alpha_c T_c [N]^T dS + \sum_e \int_{S_e} \alpha_r T_c [N]^T dS$$

시간 영역에 대해 식(8)의 해를 구하기 위한 해법은, 시간간격의 선택에 관계 없이 비교적 안정된 해를 가지는 NEWMARK- $\beta$  방법(6)을 사용하였다.

### 3.2 온도와 크리이프하중에 의한 유한요소해석

최소일의 원리를 이용하여 온도와, 크리이프 하중에 대해 정리하면 식(9)와 같다.

$$[K]\{d\} = \{F\} + \{F\}_c + \{F\}_T \quad (9)$$

$$[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad : \text{강성 행렬}$$

$$\{F\}_c = \int_V [B]^T [D] \{\epsilon\}_c dV \quad : \text{크리이프하중} \quad \{F\}_T = \int_V [B]^T [D] \{\epsilon\}_T dV \quad : \text{온도 하중}$$

이때, 콘크리트는 유효재령에 따라서 탄성계수값이 변하므로 강성행렬은 시간과 요소의 온도에 따라서 재구성되어야 하므로, 유효재령과 탄성계수값은 보통 포트랜드 시멘트에 관한 ACI 모델식(10)을 사용하였다.

$$t_e = \frac{1}{30} \sum_i (20 + T_i) \Delta t_i, \quad E_c(t_e) = \frac{t_e}{4.0 + 0.85t_e} E_{c,28} \quad (10)$$

## 4. 해석 및 결과분석

### 4.1 수화열 및 온도응력의 해석 결과분석

[그림 2]의 축대칭 구조물과 [그림 3]의 3차원 매스콘크리트에 대해 해석을 행하여 참고문헌[4]의 해석결과와 비교함으로써 개발된 프로그램의 유용성을 보이고자 한다.

해석에 사용한 콘크리트의 배합표와 재료의 물성 및 콘크리트와 암반의 열적 성질은 참고문헌 [4]에서 주어진 값들을 이용하였으며, [표 2]와 [표 3]에 각각 주어져 있다. 콘크리트 타설시의 외부온도는 20 °C, 암반의 초기온도는 상부에서 20 °C, 하부에서 15 °C의 선형적 분포로 가정하였으며, 대기와의 열전달율은 10 kcal/m<sup>2</sup> hr °C 로 하였다. 또, 암반의 탄성계수는 축대칭의 경우에 10<sup>5</sup> kgf/cm<sup>2</sup>, 3차원의 경우에 10<sup>4</sup> kgf/cm<sup>2</sup> 로 하였으며 포아송비는 0.20으로 하였다.

[표 2] 배합표 및 물리적 성질

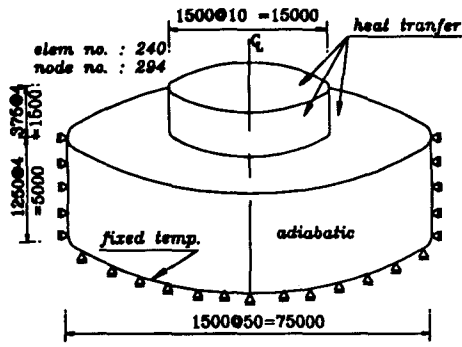
배합 번호	사 용 구조물	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	단위량 (kgf/m <sup>3</sup> )				E <sub>c,28</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	포아송비 (ν)
					물	시멘트	세골재	조골재		
1	축 대칭	12	3-5	39	156	400	674	1090	3.5E5	0.167
2	3 차원	3	3-5	53	159	300	708	1145	2.3E5	0.167

[표 3] 콘크리트와 암반의 열적 성질

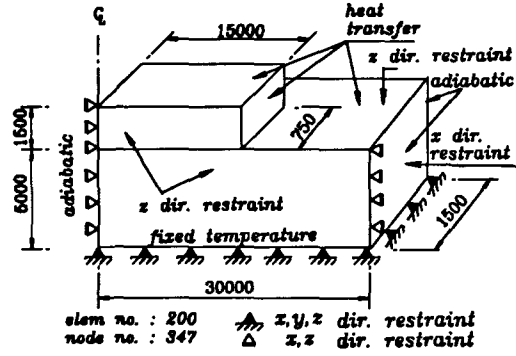
재 료		단위체적중량 (kg/m <sup>3</sup> )	비 열 (kcal/kg °C)	K	α	열전도율 (Kcal/m · hr °C)	열팽창율 (1/°C)
콘크 리트	1	2320	0.31	52.4	1.39	2.50	10 <sup>-5</sup>
	2	2312	0.31	41.8	0.98	2.50	
암 반		2600	0.25	*	*	1.94	10 <sup>-5</sup>

[그림 4]와 [그림 5]는 온도이력에 대한 유한요소 해석결과로서 참고문헌[4]와 동일한 결과를 보여주고 있으나, 온도응력의 해석결과인 [그림 6]과 [그림 7]은 참고문헌[4]의 결과와 다소간의 차이를 보여주고 있다.

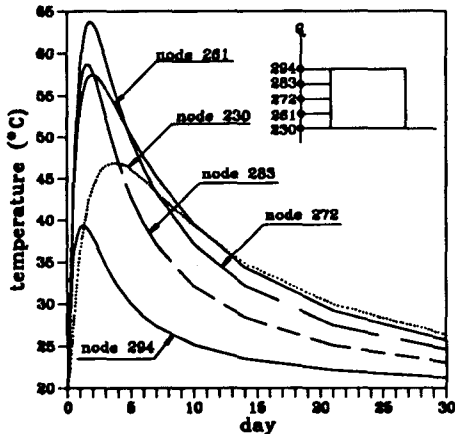
온도 응력에 대한 결과의 차이는 초기 탄성계수값에 기인하는 것으로서 참고문헌에서는 대칭 단면 중심위치에서의 온도가 최고점에 이르는 시간까지 모든 요소에 대해 동일하게 모델식에서 계산된 탄성계수의 1/2를 취한 반면, 본 해석에서는 각 요소마다 온도이력을 구하여 그 요소의 온도가 최고점에 이르는 순간까지 1/2의 탄성계수값을 사용함으로써 시간 간격마다 각 요소의 탄성계수를 다르게 취하였기 때문이다. 초기재령에 대한 콘크리트 탄성계수 계산에 있어서 앞의 ACI 식(10)의 타당성에 관해서는 계속 연구가 수행되어야 할 것으로 보인다.



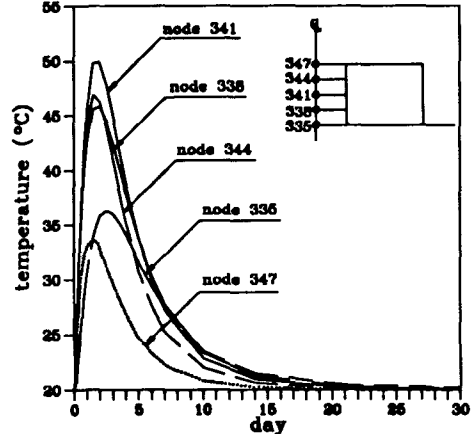
[그림 2] 축대칭 구조물



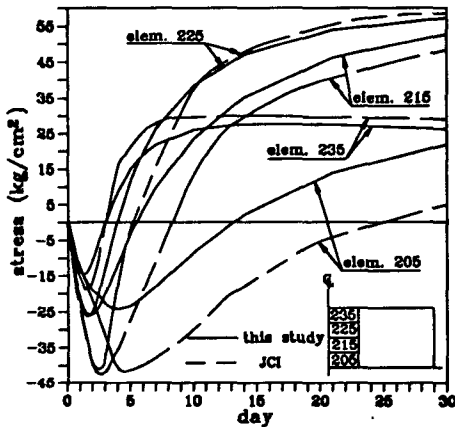
[그림 3] 3차원 매스 콘크리트



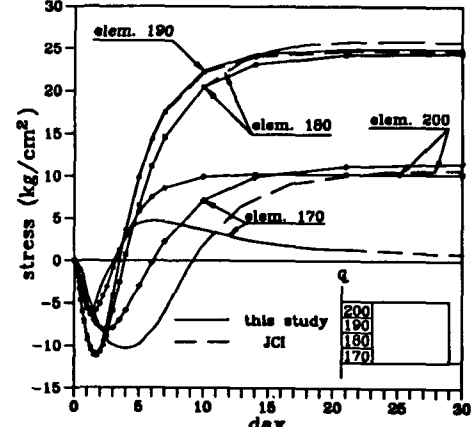
[그림 4] 축대칭의 온도이력



[그림 5] 3차원의 온도이력

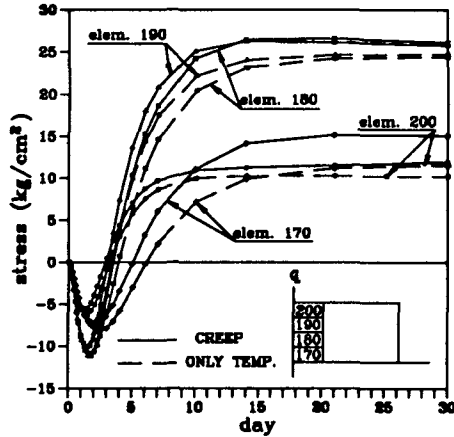


[그림 6] 축대칭의 온도응력



[그림 7] 3차원의 온도응력

#### 4.2 온도 하중에 대한 크리이프 해석과 결과 분석



[그림 8] 크리이프를 고려한 3차원 온도응력

크리이프계수의 산정을 위해서는 타설에 사용된 시멘트량, 슬럼프치, 공기함유량, 조립율, 타설시의 온도, 물-시멘트비등의 값이 요구되며 주어진 배합표에 의해 인자를 계산하여 행한 해석결과는 [그림 8]과 같다.

이 결과에서 보여주듯이 크리이프를 고려하는 경우에 압축의 영역에서는 압축응력이 감소하는 추세에 있으나, 인장으로 반전되는 단계에서는 인장응력이 크리이프를 고려하지 않은 경우보다 더 큰 응력이 발생하고 시간이 경과한 후에는 다시 인장응력도 감소하는 경향을 보일것으로 예측된다.

#### 5. 결론

- 1) 온도이력에 대한 결과는 양호한 결과를 얻을 수 있었으므로 수화열에 의한 온도이력 해석에 본 연구의 적용 가능성을 보여주고 있다.
- 2) 시간에 따른 온도응력 해석 결과는 다소간의 차이를 보여주고 있는데, 이는 굳지 않은 콘크리트의 초기 탄성계수의 차이에 기인하며 이의 해결을 위해서는 초기재령의 탄성계수에 대한 실험을 행하여 타당한 모델식을 선정하는 것이 필요하다고 판단되며, 이에 대한 연구가 진행중에 있다.
- 3) 초기 수화열에 의한 온도응력 해석은 잔류 인장응력의 산출을 위해 반드시 필요한 것이며, 이러한 측면에서 본 해석의 결과는 비교적 좋은 결과를 보여주고 있으므로, 콘크리트의 인장응력을 제어하기 위해 사용될 철근의 배근시 이용할 수 있으리라 생각 된다.
- 4) 압축과 인장이 시간에 따라 변화하는 경우 크리이프가 항상 응력을 줄여주지는 않으므로 크리이프에 대한 고려가 필요함을 보여주고 있다.
- 5) 매스콘크리트에서 전 단면에 걸쳐서 동일한 건조수축(drying shrinkage)을 고려한 경우에 응력의 변화는 없었다. 따라서 확산이론(diffusion theory)에 의한 건조수축 모델식이 필요하다고 판단되며, 이에 대한 연구가 진행중에 있다.

#### 참고문헌

1. Boulder Canyon Project Final Reports : "Cooling of Concrete Dam," Denver, Colorado, 1949
2. Carson, R. W. : "A simple method for the computation of temperatures in concrete structures," ACI Proc. vol. 34(1938)
3. Ross, A.D. and Bray J.W. : "The Principle of Temperatures in Mass Concrete by Numerical computation," Magazine of Concrete Research (London), Vol. No. 1, Jan. 1949.
4. 日本 콘크리트工学協會 : "마스콘크리트의 온도응력 研究委員會 報告書", Nov. 1985
5. 矢川元基, 宮崎則幸 : "有限要素法による 熱應力, 크립, 熱傳導解析". 사이엔스社, 1985
6. Bathe, Klaus-Jurgen : "Finite Element Procedures in Engineering Analysis," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982, pp.511-514.
7. 김진근, 김국한 : "크리이프와 건조수축 영향을 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력 해석," 한국콘크리트 학회 논문집 제4권 1호 (통권 제6집), 1992