

# 매스 콘크리트의 적정 타설높이 산정을 위한 수화열 해석

## Hydrate Heat Analysis for the Determination of Optimized Thickness in Mass Concrete

신성우 <sup>*</sup>	이광수 <sup>**</sup>	유석형 <sup>***</sup>
Shin, Sung Woo	Lee, Kwang Soo	Yoo, Suk Hyung
김선호 <sup>****</sup>	황동규 <sup>*****</sup>	박기홍 <sup>*****</sup>
Kim, Sun Ho	Hwang, Dong Gyu	Park, Ki Hong

### ABSTRACT

The thermal crack in mass concrete is mainly due to the difference of concrete temperature, which is generated by hydration heat of cement. As the thickness of mat foundation increases, the difference of temperature becomes bigger.

The purpose of this study is to estimate the optimum placing depth. The temperature of real mat foundation was observed and the thermal analysis by Finite Element Method was executed. Finally, the crack index according to the placing depth was estimated.

### 1. 서론

콘크리트 구조물의 균열요인은 구조설계 및 시공상의 원인으로 나눌 수 있으나, 기본적으로 콘크리트가 갖고 있는 재료상의 특성 중 수화열 부분이 전체 균열의 50% 이상을 차지하고 있다. 더욱이 최근의 구조물은 대형화, 지하화 됨에 따라 부재 단면이 큰 매스콘크리트가 사용될 뿐만 아니라, 콘크리트의 고강도화에 의한 단위 시멘트량의 증가에 따라 그 위험성이 훨씬 증가하고 있다.

콘크리트의 온도상승량에 영향을 미치는 요인으로서는 단위시멘트량, 시멘트의 종류, 그리고, 콘크리트의 온도등을 생각할 수 있으며, 외부로의 열방출에 대해서는 콘크리트의 두께 및 콘크리트 외부와의 경계조건도 중요한 요인이 된다. 그리고, 외부구속에 영향을 미치는 요인으로서는 구속체와 피구속체간의 탄성계수의 차이와 피구속체의 크기를 들 수 있다. 이러한 온도균열을 제어하기 위하여 온도철근의 배근, 줄눈의 설치, 단위시멘트량의 조절, 혼화재의 사용, 재료의 프리쿨링 등 설계·재료상의 대책과 타설 시간간격 및 타설높이의 조절, 파이프쿨링 및 양생방법 등 시공상의 대책을 마련하여야 한다.

본 연구에서는 매트기초에 사용된 매스콘크리트의 수화열에 의한 내·외부 온도차를 줄이기 위한 시공상의 대책

\* 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수

\*\* 정회원, 여주대학교 건축학과 교수

\*\*\* 정회원, 한양대학교 건축공학과 박사과정

\*\*\*\* 정회원, 한양대학교 건축공학과 석사과정

\*\*\*\*\* 정회원, 두산건설(주) 기술연구소 차장

\*\*\*\*\* 정회원, 두산건설(주) 기술연구소 과장

을 강구하기 위하여 실구조물의 온도를 측정하고, 범용 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 온도해석을 수행함으로써 타설깊이에 따른 적정 양생 조건을 제시하고자 한다.

## 2. 매스 콘크리트 수화열 해석

콘크리트의 수화열에 의한 온도해석은 콘크리트내부의 전도에 의한 열전달과 외기에 노출된 면에서의 대류에 의한 열전달 방정식을 구함으로써 수식화 할 수 있다. 전도에 의한 열전달 방정식은 단위면적당의 열전달율(heat flow rate), 즉 열속(heat flux)이 열류 방향의 온도기울기에 비례하므로 다음과 같이 수식화할 수 있다.

$$q_x = -k \frac{dT}{dX} \quad (1)$$

$$q_{x+dx} = -k \frac{dT}{dX_{x+dx}} \quad (2)$$

식 (2)를 테일러 급수로 확장하고 3차 이상을 무시하면

$$q_{x+dx} = -\left[ k \frac{dT}{dX} + \frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dX} \right) dx \right] \quad (3)$$

단위시간당  $dx$  구간에서 열량의 변화는  $\Delta U/dt$  이고,  $\Delta U = c(\rho A dx)dT$  이므로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

여기서 매스 콘크리트의 수화발열이 진행되는 동안의 온도분포를 파악하기 위하여 시간에 따른 온도변화가 존재하는 ( $\partial T/\partial t \neq 0$ ) 과도해석(transient solution)이 요구되고, 또한 수화열에 의하여 내부열원(heat generation)이 지속적으로 변하므로 다음과 같이 비선형 해석이 가능한 행렬식을 구성할 수 있다.

$$[C]\{T\} + [K]\{T\} = \{Q(t)\} \quad (5)$$

여기서  $[C]$  : 열용량,  $\{T\}$  : 단위시간당 온도의 변화,  $[K]$  : 열전도 계수

$\{T\}$  : 절점의 온도,  $\{Q(t)\}$  : 온도하중

대류의 경우 열속은 고체표면의 온도( $T_w$ )와 유체온도( $T_\infty$ )의 차이에 비례하므로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$q = h(T_w - T_\infty) \quad (6)$$

여기서  $h$  : 대류 열전달계수,  $T_\infty$  : 외기온도

이를 식(4)의 대류 열전달방정식과 동시에 고려하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + h(T_w - T_\infty) \quad (7)$$

### 3. 온도계측 및 해석

#### 3.1 실구조물 온도측정

온도측정을 위한 대상 구조물은 ○○사의 ○○현장으로서 매트 기초의 크기는 38×12×0.8m이며, 1회 타설 되었고 타설 후 비닐을 덮어 양생하였다. 콘크리트의 배합비는 다음 표 1과 같이 Fly ash 치환율 10%와 별도의 지연제를 사용하지 않았다. 온도계측은 K type의 thermal guage를 사용하였고, TDS 303을 이용하여 처음 3일간은 30분간격으로 이후 6일까지 1시간간격으로 data를 취득하였다. guage의 설치 위치는 장변, 단변 그리고 대각선 방향의 수평온도 분포와 수직상의 온도분포를 파악하기 위하여 그림 1과 같이 설치하였다.

표 1 콘크리트 배합표

W/C (%)	S/A (%)	단위재료량(kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	FA	S	G	AD
49.1	49.3	154	338	37	864	876	1.5

#### 3.2 FEM 온도해석

온도해석은 범용유한요소 프로그램인 ANSYS의 Thermal Solid 70 Element를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 매트 기초의 온도분포는 수직방향으로 상하 경계면에 걸쳐 변화하지만, 수평방향으로 측면 경계면으로 부터 일정구간을 지나서 일정하므로 대칭조건을 이용하여 전구간의 1/4구간만 모델링 하였다. 수화열에 의한 온도발현을 입력하기 위한 내부 열원(Heat Generation rate)은 단위시간당, 단위 부피당 발생하는 열이므로, 식 (8)과 같이 「콘크리트 표준시방서」에서 제시하는 단열온도상승량에 대한 회귀식을 시간에 대하여 미분한 후 비열과 밀도를 곱하여 식 (9)와 같이 구성하였다.

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t}) \quad (8)$$

여기서  $Q_{\infty}$ : 최종단열온도상승량,  $\gamma$ : 온도상승속도에 관한 계수

$$HG = c * \rho * Q_{\infty} * \gamma * \exp(-\gamma * day) / 24 / 3600 \quad (9)$$

해석모델은 그림 1과 같이 콘크리트가 연속되는 면은 단열경계, 지반은 고정온도 그리고 외기에 접하는 면은 외기온도와 대류계수를 이용하여 경계조건을 구현하였다. 시방서에서 제시하는 단열온도 상승량과 표면열전달율은 실측결과에 따라 표2와 같이 수정되었으며, 시방서상의 수치들은 모두 적게 제시하고 있어서 설계상 불안정한 것으로 나타났다.

표 2 해석 입력자료

밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	비열 (J/kg℃)	열전도율 (J/ms℃)	단열온도 상승량*		표면열전달율	
			$Q_{\infty}$	$\gamma$	비닐	거푸집
2300	1134	2.57	55	1.8	29.2	19.8

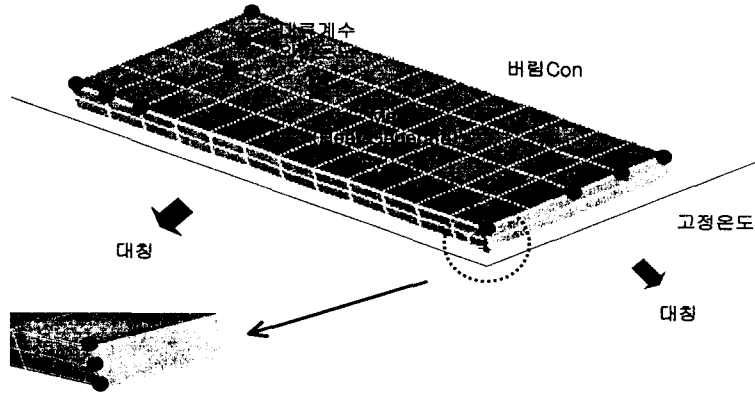


그림 4 해석모델의 경계조건

### 3.3 실측 및 해석 결과

수화발열에 의한 시간별 온도분포의 온도해석결과는 그림 2와 같이 실측과 거의 일치하게 나타났다. 수직적으로는 그림 2에서와 같이 중간높이에서 가장 온도가 높고 완만한 시간이력곡선을 나타내었으나, 외기에 접하는 상부는 일교차에 의한 영향으로 주기적인 온도변화를 나타내었다. 수평적으로는 그림 3과 같이 측면거푸집에 접한 경계면이 외기의 영향으로 인하여 가장 낮고 1.5m 이내에서는 일정한 온도분포를 나타내어 이 구간에서 온도구배가 발생함으로 알 수 있다.

타설깊이에 따른 온도발현을 해석한 결과 타설깊이의 증가에 따라 부재중심의 최고온도와 최고온도 도달시기는 증가하지만 증가의 폭은 점점 감소함을 알 수 있다.

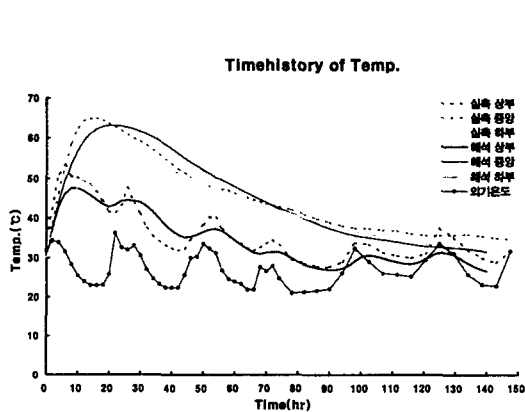


그림 5 수직온도분포

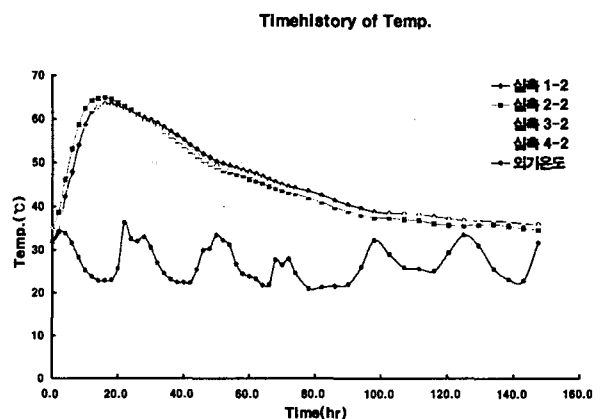


그림 6 수평온도분포

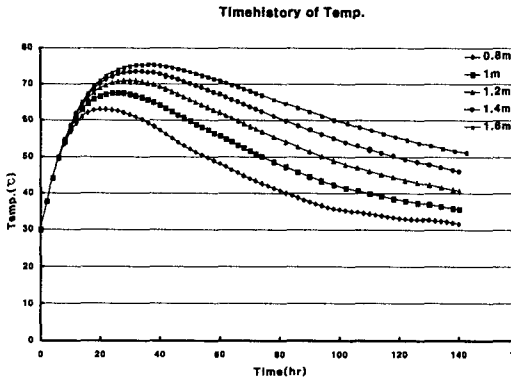


그림 7 타설깊이에 따른 온도증가

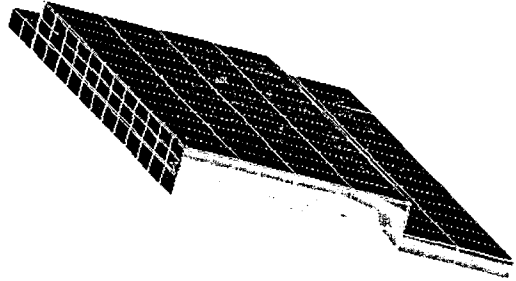


그림 8 3D 온도해석 결과

#### 4. 균열지수 평가

균열발생에 대한 안전성의 척도인 균열지수는 내부구속이 큰 경우 식 (10)을 이용하여 구할 수 있으며, 여기서  $\Delta T_i$ 는 내부온도가 최고일 때의 내부와 표면과의 온도차이다. 그러나 일반적으로 내부와 표면의 온도차가 가장 크게 나타나는 시간은 내부온도가 최고일 때보다는 외기온도가 최저일 때 발생하게 된다. 따라서  $\Delta T_i$ 를 내부와 외부의 온도차가 가장 큰 값으로 정의하여야 안전치 일 것으로 판단된다.

$$I_{cr}(t) = \frac{15}{\Delta T_i} \quad (10)$$

구조물에 요구되는 성능의 수준에 따라 구분된 균열지수에 해당하는 내·외부 온도차를 식 (10)을 이용하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 그림 6과 같이 시간에 따른 내·외부 온도차를 구하고 각 균열지수에 따른 한계온도를 초과하는 구간을 고찰하였다.

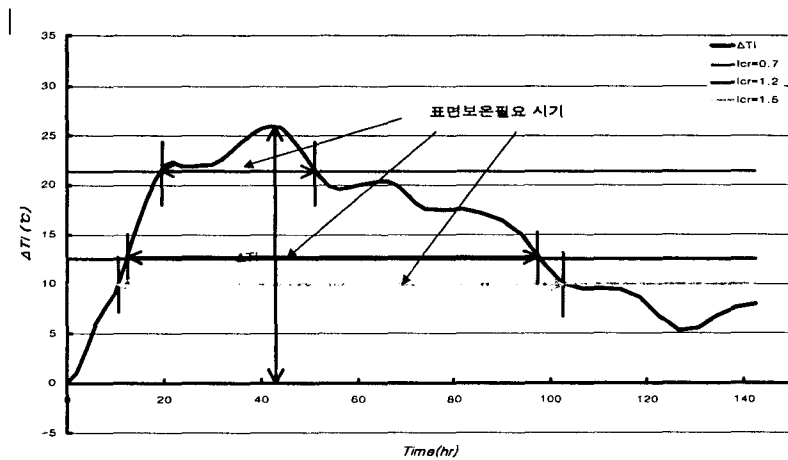


그림 9 시간에 따른 내·외부 온도차

유해한 균열발생을 제한하기 위하여 시방서 상에서 제시하는 균열지수 0.7이상을 만족하기 위한 온도차를 초과하는 시간을 표 3에 정리하였다. 두께가 작을 경우 온도차이는 주로 초기 외기온도가 저하하는 시간에 크게 발생하지만 두께가 클수록 외기온도에 상관없이 부재 중심에서의 발열량에 따라 온도차이가 크게 발생함을 알 수 있다. 이 기간에는 표면의 방열을 억제할 수 있도록 보온성이 좋은 재료를 이용하여 양생하여야 할 것으로 판단된다.

표 3 두께에 따른 표면보온요구 시기

슬래브 두께(m)	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
타설 후 보온 필요시기(hr)	-	20~50	20~90	20~100	20~120

## 5. 결론

- (1) 유한요소 프로그램을 이용하여 매스콘크리트의 수화열에 의한 온도해석결과는 실측결과와 거의 일치하여 양생조건, 콘크리트 배합비, 타설 깊이 등의 변화에 대한 예측이 가능하다.
- (2) 실험 및 해석결과 시방서에서 제시하는 단열온도상승 특성 및 표면 열전달율은 다소 적게 제시하고 있어 안전율이 작은 것으로 판단된다.
- (3) 타설깊이가 증가할수록 부재최고온도와 도달시간은 증가하지만 증가의 폭은 점점 줄어들음을 알 수 있다.
- (4) 해석결과 슬래브 두께 1m를 초과할 경우 유해한 균열발생을 제한하기 위하여 표면 보온조치가 필요한 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 정상진, ANSYS 열전달 해석, 태성 S & E, 2001. 2.
2. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서, 1999.
3. 홍성현 외 3인, “타설순서를 고려한 매스콘크리트 구조물의 해석 및 계측을 통한 온도응력 평가에 관한 연구,” 대한건축학회 논문집, 2001. 1, 17권 1호, pp.99-106.