

# 매스콘크리트 온도응력해석을 위한 온도분포함수 제안

## A Suggestion on Thermal Distributed Function for Thermal Stress Analysis in Mass Concrete

김 현 겸\*      김 승 익\*\*      한 재 호\*\*\*      이 창 수\*\*\*\*  
Kim, Hyeon Kyeom      Kim, Seung Ik      Han, Jae Ho      Lee, Chang Soo

### ABSTRACT

The domestic concrete standard specification(1999) reports roughly about heat transfer analysis and thermal stress analysis for mass concrete. Engineers cannot but choice after all numerical method such FEM, FDM to escape review. It seems to us that the specification is room for reconsideration because above methods are vary expensive and without popularity.

This study suggests thermal distributed function in mass concrete. The function consists of two independent variables, curing time and depth. It's results have been tested a sensitivity for unit cement content, form condition, curing condition, and shape(depth, width). Results of the function are made a comparison with analytical values of MIDAS/CIVIL and a few measurement values. The researchers could meet with coherent and good results for variable cases.

### 1. 서론

건설분야의 설계기술, 재료성능, 시공기술 등이 발전함에 따라 콘크리트 구조물은 점점 대형화 되어 가고 있다. 특히, 특수거푸집 공법으로 시공되는 교량들은 대부분 교폭과 지간이 크기 때문에 상부구조물의 자중이 상당히 된다. 따라서, 하부구조물이 지지해야할 하중이 증가될 수밖에 없으며, 아울러 기초는 편칭전단 발생이 우려되어 단면의 두께가 필연적으로 증가하게 된다. 상기한 바와 같이 상부구조물의 규모 증가로 인해 필연적으로 기초는 매스콘크리트의 특성을 나타내게 된다. 이러한 매스콘크리트는 특히, 콘크리트의 강도발현이 부족한 초기 재령상태에서 시멘트 수화에 의한 온도균열 발생이 우려되므로 적절한 평가와 조치가 취해져야 한다.

현재 국내의 콘크리트표준시방서(1999)는 매스콘크리트에 관한 별도의 장이 구성되어 있으나, 온도균열 평가에 있어서 근본이 되는 온도해석(열전달해석) 및 온도응력해석(열응력해석)에 관한 내용이 매우 광범위하게 기술되어 있으며, 온도균열에 관한 평가방법 중 간이적인 방법은 정확성이 매우 낮아 엔지니어들은 결국 유한요소법이나 유한차분법과 같은 수치해석법을 통해 결과를 얻을 수밖에 없는 상황이다. 즉, 현행 시방은 대중성 및 편리성이 다소 낮음을 알 수 있다. 본 연구는 수화현상에 의한 온도분포 시간이력을 관찰하여, 온도균열 평가를 편리하고 정확하게 수행하기 위한 첫 단계로 다양한 조건하에서 매스콘크리트의 양생시간 및 단면깊이에 관한 온도분포함수를 제안하려고 한다.

\* 정회원, (주)후레씨네코리아 기술부 대리  
\*\* 정회원, (주)후레씨네코리아 상무이사  
\*\*\* 정회원, 서울특별시 지리정보담당관 담당관  
\*\*\*\* 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

## 2. 접근방법

온도균열 평가를 위한 증추적인 과정으로 내부구속, 외부구속이 고려된 실제적인 응력분포를 얻기 위해 우선 내부구속의 근본이 되는 깊이별 응력분포를 구해야 한다. 내부구속에 의한 응력분포는 수화현상에 기인한 온도분포에 따른 자유변형을 구체가 억제함으로써 발생되며, 온도분포 자체가 비선형분포를 이루고 있기 때문에 내부구속에 의한 응력분포도 비선형분포를 나타낸다.

실제 구조물(확대기초)의 계측과 전산해석프로그램의 시뮬레이션을 관찰한 결과, 깊이별 온도분포는 쌍곡선 함수의 개형을 갖는 것을 알 수 있었으며, [식 1]로 깊이별 온도분포를 근사시켰다. 또한, 단열상승온도곡선은 현행 콘크리트표준시방서(1999)에서 제시하는 함수를 사용하였다.

$$f(y) = 2 - \frac{1}{1 - \left[ \beta \frac{H - 2y}{H} \right]^4}, \quad -\frac{H}{2} \leq y \leq \frac{H}{2} \quad (\text{식 1})$$

여기서, H : 구체 전체 깊이  
 y : 확인하려는 위치의 깊이  
 β : 실험상수

임의의 깊이에 대한 온도분포 시간이력은 [그림 1]과 같은 개념으로 근사하였다. 수화발열 초기에 발생하는 손실은 없는 것으로 가정하였고, 일정기간 후에 본격적으로 방열되는 시간을 결정하여 이를 지연시간( $t_d$ )이라 하였다. 이것은 개념두께, 열전도율, 열전달율, 깊이에 관한 함수로 [그림 2]와 같은 분포를 갖는다.

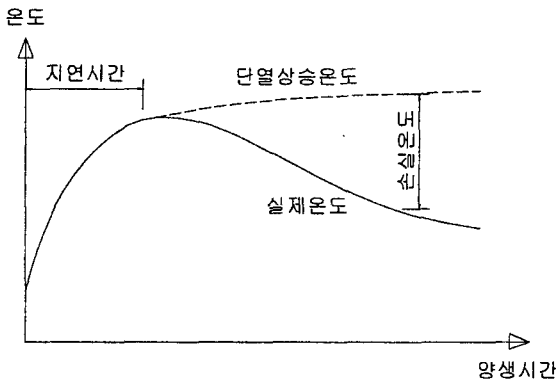


그림 1 온도분포 시간이력 개념적 접근

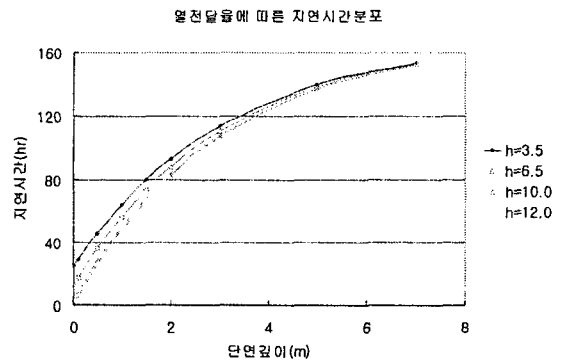


그림 2 열전달율에 따른 지연시간분포

깊이별 손실함수 시간이력은 지배미분방정식 [식 2]의 우변을 이용하여 [식 3]과 같이 재구성하였다. 재구성한 손실함수는 열전도율이 각각의 축에 대해 독립적으로 작용하고 깊이의 제곱에 반비례한다는 것에 착안하여 등가의 유효열전달율( $h_{eff}$ )을 이용하였고, 개념두께는 윤변-면적비를 사용하지 않고 면적-부피비를 사용하였다. 일반화된 온도분포함수는 시간과 거리에 관한 2변수 함수이며, [식 3]은 이러한 관계를 전체적으로 나타내고 있다. 여기서, 손실을 보정함수( $p_{eff}$ )는 개념두께에 관한 함수이다.

$$\frac{K_u}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{Q}{\rho c} = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{h p}{\rho c A} (T - T_{s,i}) \quad (\text{식 2})$$

여기서,  $K_u$  : 열전도율       $\rho$  : 단위중량       $A$  : 단면적  
 $Q$  : 내부생성열       $c$  : 비열       $T$  : 표면온도  
 $h$  : 열전달율       $p$  : 외기노출윤변       $T_{ext}$  : 대기온도

$$T(t, y) = T_{casi} + T_{os}(t) f(y) - \max[0, T_{loss}(t, y)] \quad (\text{식 } 3)$$

$$T_{loss}(t, y) = \frac{h_{eff}(y) p_{eff}(y)^2}{\rho c V} [T(t, 0) - T_{ext}(t)] [t - t_d]$$

여기서,  $T(t, y)$  : 온도분포 시간이력       $T_{loss}(t, y)$  : 손실온도 시간이력  
 $T_{casi}$  : 타설온도       $h_{eff}(y)$  : 유효열전달율  
 $T_{os}$  : 단열상승온도       $p_{eff}(y)$  : 손실을 보정함수

### 3. 결과분석

제안한 온도분포함수의 타당성을 검증하기 위해 전산해석프로그램 MIDAS/CIVIL ver. 6.1.0을 사용하여 비교하였고, 실제 계측된 자료와도 비교하였다. 또한, 수화열에 의한 온도분포 시간이력은 다양한 변수들이 복합적으로 작용하고 있기 때문에 각 변수에 관한 민감도 분석을 수행하였다. 분석에 사용된 변수와 오차를 [표 1]에 정리하였다. 몇몇의 결과를 [그림 3]에서 [그림 8]에 나타내었다.

표 1 온도분포함수의 민감도 분석

모델번호	부재형상	열전달율(kcal/m <sup>2</sup> -hr-T)		단위시멘트량(kgf/m <sup>3</sup> )	외기온도(T)	최대편차(깊이, 시간, 온도차)
		양생조건	거푸집			
M11111	15×15×3	12.0 (기건)	7.0 (목재)	349	10	0.5m, 168hr, 1.8℃
M12111	15×15×3	6.5 (막)	7.0 (목재)	349	10	0.5m, 42hr, 1.5℃
M13111	15×15×3	3.5 (막+포)	7.0 (목재)	349	10	0.0m, 30hr, 4.5℃
M21111	15×15×2	6.5 (막)	7.0 (목재)	349	10	0.5m, 168hr, 3.2℃
M31111	15×15×4	6.5 (막)	7.0 (목재)	349	10	1.0m, 168hr, 3.3℃
M41111	15× 9×3	6.5 (막)	7.0 (목재)	349	10	0.5m, 168hr, 2.0℃
M11211	15×15×3	6.5 (막)	12.0 (강재)	349	10	0.5m, 42hr, 1.5℃
M11121	15×15×3	6.5 (막)	7.0 (목재)	450	10	0.1m, 168hr, 2.6℃
M11112	15×15×3	6.5 (막)	7.0 (목재)	349	20	0.0m, 18hr, 4.5℃

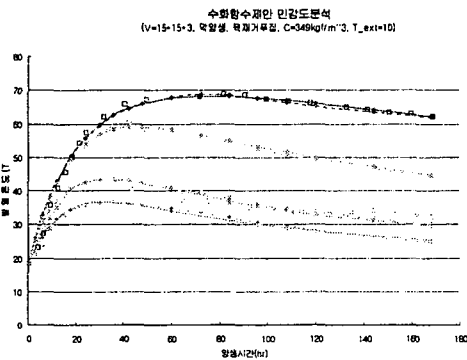


그림 3 모델 M12111의 결과

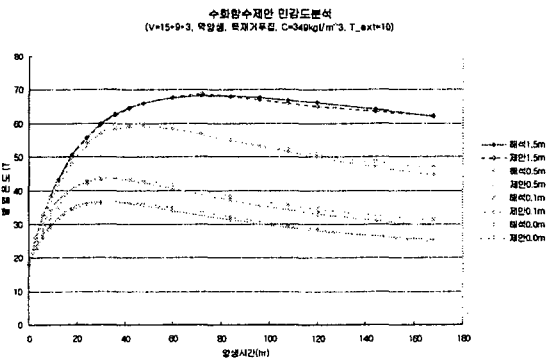


그림 4 모델 M41111의 결과

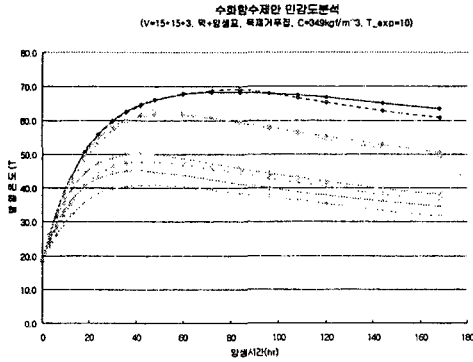


그림 5 모델 M13111의 결과

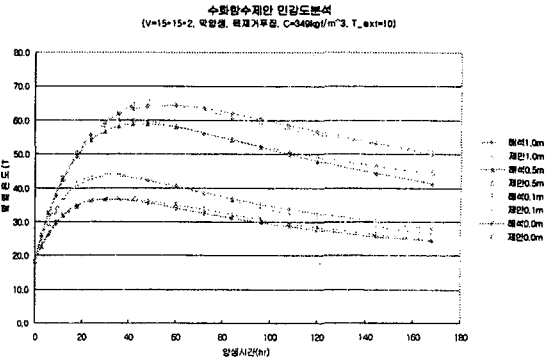


그림 6 모델 M21111의 결과

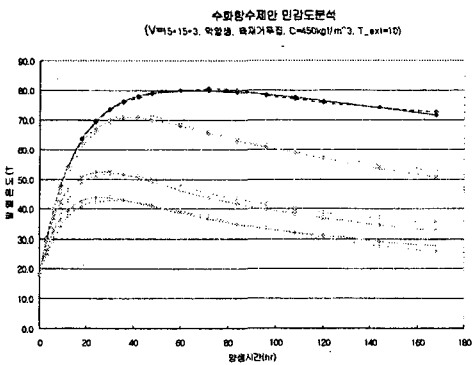


그림 7 모델 M11121의 결과

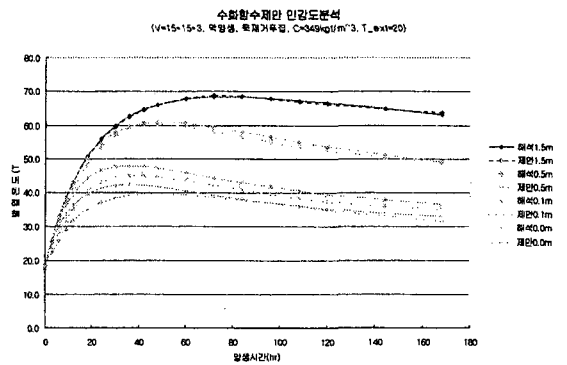


그림 8 모델 M11112의 결과

민감도 분석결과를 관찰하면, 유사한 현상을 나타내는 [그림 5]와 [그림 8]은 각각 보온성이 우수한 양생조건과 외기온도가 높아 방열이 낮은 모델의 결과로써 결국, 표면의 온도방출이 낮은 조건을 갖는 것들이다. 기타 모델들의 결과는 매우 우수한 근사를 보이고 있다. 종합적으로 정리하면 제안한 온도 분포함수는 매트기초와 같이 넓고 두꺼운 슬래브 구조에서 우수한 결과를 제공하는 것을 알 수 있었으며, 표면으로부터 깊이 0.5m~1.0m 구간에서 다소의 오차를 보이는 것으로 분석되었다.

#### 4. 결론

본 연구는 최종적인 목표인 수화에 의한 온도균열평가 시스템 구성의 증추적인 과정으로써 제안한 온도분포함수를 이용하여 간편하고 정도 높은 결과를 깊이별 시간별로 직접 예측할 수 있었다. 이것을 이용하여 내부구속응력을 직접적으로 얻어낼 수 있으며, 그 오차는 매우 작을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Gray R. Mass, Woodrow L. Burgess, "Mass Concrete," ACI 207.1R-96, 1999.
2. Daryl L. Logan, "A First Course in the Finite Element Method," PWS Publishing Company, 1992.
3. 한국콘크리트학회, "콘크리트표준시방서 해설," 기문당, 2000.