

유한요소법에 의한 매스콘크리트 構造物의 溫度解析 프로그램 開發

Development of Temperature-Analysis Program
for Mass Concrete Using Finite Element Method

김은겸*

김래현**

신치범***

Kim, Eun Kyum Kim, Lae Hyun Shin, Chee Burm

요 약

본 연구에서는 매스콘크리트 양생시 수화열에 의한 온도 상승을 예측할 수 있는 온도해석 프로그램 『TAMCON』을 개발하였다. 수치해석 방법으로는 복잡한 형태를 지니고 다양한 경계조건을 만족시켜야 하는 구조물에 대한 온도해석을 용이하게 하기 위하여 유한요소법이 채택되었다. 『TAMCON』의 타당성을 검증하기 위하여 벽상구조물과 기초매트에 대하여 이미 문헌에 보고된 수치해석 및 실험치를 본 연구의 해석 결과와 비교한 바 이들이 서로 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 『TAMCON』은 콘크리트 구조물의 온도균열 방지를 위한 온도제어 및 필요한 양생방법의 도입을 위한 시공관리에 효과적으로 활용될 수 있다.

Abstract

A temperature-analysis program, named 『TAMCON』, was developed to predict the temperature rise due to the heat of hydration in hardening concrete. Finite element method was employed to facilitate the temperature analysis for the structures with complex geometry and various boundary conditions. In order to test the validity of the program, the results obtained from TAMCON for the wall-type structure and the mat foundation were compared with the numerical analysis and experimental data reported previously. As a result, it was found that they were in good agreement. TAMCON may be useful for the temperature control to restrain thermal cracking and the construction management to design the reasonable curing method in mass concrete.

Keywords : mass concrete, heat of hydration, finite element method, temperature analysis, thermal cracking, wall-type structure, mat foundation, curing method

* 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 서울산업대학교 화학공학과 교수
*** 정회원, 아주대학교 화학공학과 조교수

• 본 논문에 대한 토의를 1996년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 1996년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 콘크리트 구조물은 세계적으로 대형화 및 시공방법의 진보에 의한 大量 急速 시공이 계속적으로 증가하고 있다. 따라서 시멘트의 水和熱에 의한 콘크리트 구조물의 온도변화에 의해 생기는 온도응력이 구조물에 균열을 발생시키거나 혹은 구조물의 설계에 있어서 무시할 수 없는 영향을 주는 경우가 빈번히 일어나고 있다.^(1,6) 한국에서도 교량의 長大化에 의한 교각 및 앵커 구조물의 대형화, 지하철 및 고속전철의 건설, 대형 빌딩의 基礎를 비롯하여 대형 취수지, 정수지 등의 축조 등에서 수화열에 의한 온도균열의 문제가 설계 및 시공시 콘크리트 구조물의 기능 및 내구성을 확보하는 관점에서 매우 중요한 과제로 부각되고 있다.

매스콘크리트에 대한 최초의 연구는 1935년 미국의 후버댐 건설에서 비롯되었으며, 파이프 쿨링을 이용하여 244만³m³의 塊體 콘크리트를 2년간의 단기간에 콘크리트치기를 끝냄으로써 성공을 거두었다.⁽⁷⁾ 1973년 ACI에서는 매스콘크리트에 대한 보고서⁽⁸⁾를 발간하여 온도응력제어에 관한 실제 사용 가능한 정량적 수법을 제시하였다. 日本 콘크리트工學協會(이하 JCI라 칭함)에서는 1980년 5월에 『콘크리트 균열調査·補修指針』, 1986년 3월에는 『매스콘크리트 균열 制御指針』⁽²⁾을 발간하였다. 또한, JCI에서는 1989년에 『매스콘크리트 온도·응력 계산용 프로그램』⁽⁹⁾을 개발하여 매스콘크리트의 온도해석 및 온도응력해석에 큰 성과를 얻고 있다. 또한 『RILEM』에서는 1994년 10월에 온도균열에 대한 국제회의를 개최하였으며, 세계 각국으로부터 56편의 논문⁽¹⁰⁾이 발표되어 水和熱에 의한 온도해석 및 온도응력 해석에 대한 관심을 고조시키는 계기가 되었다. 한국에서는 김진근,^(11,12) 오병환⁽¹³⁾에 의해 크리프 및 건조수축을 고려한 매스콘크리트의 온도응력 해석에 대한 연구가 수행되었으며, 변근주, 이장화⁽¹⁴⁾에 의한 수화열의 실험적 연구가 실시되었다.

시멘트의 水和熱에 의한 온도균열의 문제는 콘크리트 댐 혹은 부재 치수가 특별히 큰 콘크리트 구조물에서 일어나는 특유의 현상으로 알고 있는

것이 보통이지만, 사용재료, 시공조건 등에 따라서는 비교적 크기가 작은 구조물이라 하더라도 水和熱에 의한 유해한 균열이 발생하는 사례가 적지 않다.

온도응력에 의한 균열은 콘크리트 치기 초기의 단계에 발생하는 内部拘束에 의한 표면 균열과 재령이 어느 정도 경과한 후에 발생하는 外部拘束에 의한 관통 균열의 두가지 형태로 발생한다. 이들 균열은 매스콘크리트 구조물에 요구되는 기능 및 품질에 손상을 주게 되므로, 온도균열을 제어하기 위해서는 적절한 콘크리트의 품질 및 시공방법의 선정, 균열제어 철근의 배치 등에 대한 적절한 조치를 강구해야 한다.⁽⁶⁾ 이들의 조치를 합리적으로 취하기 위해서는 온도응력에 대한 정확한 해석이 이루어져야 하며, 정확한 온도응력의 평가는 콘크리트 구조체의 온도해석이 선결되어야만 가능하다.

본 연구는 시멘트의 수화열에 의한 온도균열 제어 및 건설 현장에서의 시공관리를 원활하게 뒷받침해 줄 수 있는 汎用的인 支援體制를 구성하기 위해, 제1단계의 연구로서 온도해석 패키지 프로그램 『TAMCON』을 개발하는 데 목적을 두었다.

해석에는 여러가지 복잡한 境界條件을 쉽게 만족시킬 수 있도록 하기 위해 有限要素技法을 사용하였다. 해석법의 타당성을 입증하기 위해서는 JCI의 해석결과⁽¹⁵⁾ 및 日本電力中央研究所의 原子爐 格納施設 매트기초의 실측자료^(16,17)를 이용하였다. 해석 검증 결과, 본 연구에서 개발한 온도해석용 프로그램은 온도균열에 필요한 정보의 제공은 물론, 매스 콘크리트의 현장 시공시에도 적절한 양생방법 등에 대한 시공관리 계획을 수립하는데 매우 유효한 수단이 될 것으로 기대된다.

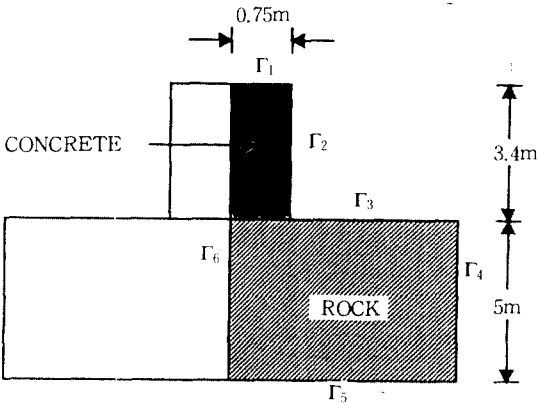
2. 온도해석 모델링

2.1 해석모델의 선정

온도해석에는 내부구속의 영향이 큰 매트기초 구조물과 외부구속의 영향이 큰 壁狀 구조물을 해석모델로 사용하였다.

Fig. 1의 벽상구조물은 JCI가 개발한 『매스콘

크리트의 온도·응력계산용 프로그램⁽⁹⁾을 이용하여 온도응력 해석을 실시한 모델로서, 그 해석 결과는 『매스콘크리트 공사의 온도응력制御演習』⁽¹⁵⁾에 보고되어 있다. Fig. 2는 실제로 건설된 原子爐 格納施設 매트기초로서 시공 당시 온도계, 변형계 및 응력계 등을 사용하여 온도 및 응력을 계측한 매트기초모델⁽¹⁶⁾이며, 그 계측실험결과가 보고되어 있다. 따라서 해석모델로 선정된 Fig. 1 및 Fig. 2는 개발한 해석프로그램『TAMCON』⁽¹⁸⁾의 타당성을 입증하는 데 매우 적절하다고 판단된다.



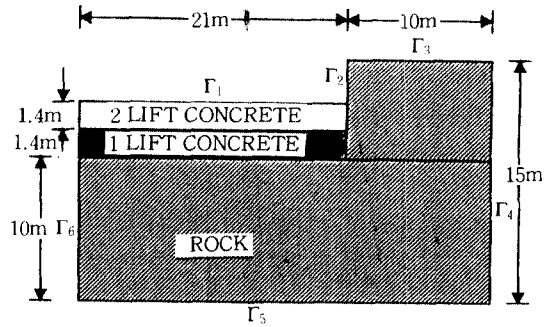
- Γ₁ : Thermal convection B.C.
- Γ₂ : Thermal convection B.C.
- Γ₃ : Thermal convection B.C.
- Γ₄ : Adiabatic B.C.
- Γ₅ : Fixed temperature B.C.
- Γ₆ : Adiabatic B.C.

Fig. 1 Heat transfer analysis model of the wall-type structure.

2.2 비정상 열전도 기본식

일반적으로 구조물은 두께와 폭에 비하여 길이가 길기 때문에 온도해석에서는 길이방향에 대한 온도변화를 무시할만 하다고 생각하여 2차원 문제로 해석한다. 2차원 구조물의 온도분포 및 경계에서의 열전달 흐름은 다음과 같은 Fourier's Law의 비정상 열전도 방정식(transient heat-conduction equation)^{19,21)}을 사용한다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$



- Γ₁ : Thermal convection B.C.
- Γ₂ : Thermal convection B.C.
- Γ₃ : Thermal convection B.C.
- Γ₄ : Adiabatic B.C.
- Γ₅ : Fixed temperature B.C.
- Γ₆ : Adiabatic B.C.

Fig. 2 Heat transfer analysis model of the mat foundation.

$$Q = K[1 - \exp(-\alpha t^\beta)] \quad (2)$$

여기서, T는 온도, t는 시간, k, ρ, C_p는 각각 콘크리트의 열전도율, 단위중량, 비열이며, x, y는 직교좌표계의 축이고, Q는 단열온도 상승량을 나타내며, K와 α는 실험정수이다. 이때 $\frac{dQ}{dt}$ 는 수화열에 의한 단위 체적당의 발열량을 의미한다.

벽상구조 및 매트기초에 사용된 경계조건은 각각 Fig. 1 및 Fig. 2에 보인 바와 같으며 Γ₁, Γ₂, Γ₃는 열전달 경계, Γ₄, Γ₆은 단열온도경계, Γ₅는 고정온도경계를 나타낸다. 이들의 조건식은 각각 다음과 같다.

$$\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3 : -k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{air}) \quad (3)$$

$$\Gamma_4, \Gamma_6 : \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

$$\Gamma_5 : T = T_g \quad (5)$$

대기와 접하고 있는 경계는 열대류경계조건(식(3))을, 지하 5m 위치에서는 고정온도경계조건(식(5))을 사용하였다. Γ₄에 적용한 경계조건은 Γ₄에 수직한 방향으로 온도의 변화가 없음을 의미한다. Γ₆에 적용된 경계조건은 온도분포가

중심축에 대하여 대칭이라는 것을 나타낸다. 여기서 T_{air} 와 T_g 는 각각 대기온도와 지반온도이며, h 는 공기와 접하는 경계의 열전달계수이다.

벽상구조물 해석에 사용된 초기조건은 다음 식과 같다.

$$T = T_0(x, y) \quad (t=0) \quad (6)$$

$$T_0(x, y) = \begin{cases} T_i \text{ (벽체)} \\ T_g + \frac{y}{5}(T_{air} - T_g) \text{ (암반기초)} \end{cases} \quad (7)$$

여기서, $T_0(x, y)$ 는 초기온도분포, T_i 는 콘크리트 치기온도를 나타낸다. 초기온도는 T_{air} 에서 T_g 로 지표면에 수직하게 선형으로 변한다. 매트 기초 구조물의 온도해석에 사용된 초기조건은 벽상 구조물의 경우와 유사하다.

2.3 콘크리트의 열적특성

해석에 사용된 콘크리트의 열적특성치는 실제 현장에서 채 넣은 콘크리트 실험결과로부터 얻은 JCI 자료⁽¹⁵⁾ 및 日本電力中央研究所 자료^(16,17)를 사용하였으며, 그 값은 Table 1에 주어져 있다.

Table 1 Thermal properties of concrete

			Wall-type structure	Mat foundation
Adiabatic temperature rise in concrete		K (°C)	45.5	41.9, 39.8
		α (h ⁻¹)	0.86	0.976, 1.270
		β	1.00	0.931
Weight per unit Vol.	Concrete	ρ	2287	2422
	Rock	(kg /m ³)	2600	2600
Thermal conductivity	Concrete	k	2.50	1.945
	Rock	(kcal /m h °C)	1.94	1.94
Specific heat	Concrete	C _p	0.31	0.321
	Rock	(kcal /kg °C)	0.25	0.25

2.4 수치 해석 방법

열전달 기본식과 적용된 경계조건 및 초기조건을 만족하는 해는 통상의 Galerkin 유한요소법⁽²²⁾을 사용하여 구한다. 벽상구조물 해석에 사용된 mesh는 Fig. 3과 같다. 계산의 정확도를 유지하되 전산기 사용시간을 절약하기 위하여 온도경사가

심하게 일어나는 영역은 세밀한 요소를, 그렇지 않은 영역은 큰 요소를 사용하였다. Fig. 3에 나타난 요소는 벽상구조의 경우로서 464개의 bilinear quadri-lateral element(522 nodes)가 사용되었다.

또한, 시간에 따른 온도분포의 변화를 추적하기 위하여 implicit predictor multicorrector 방법이 사용되었다. 계산은 HP workstation 715 /50에서 수행하였으며, 한 time step을 계산하는 데 걸리는 CPU 시간은 1.5초였다.

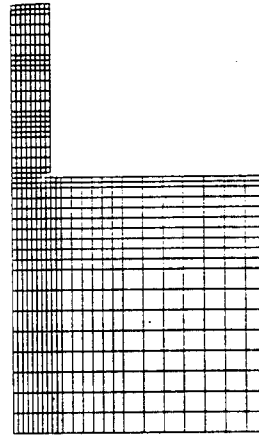


Fig. 3 Finite element mesh used for the wall-type structure.

3. 콘크리트 온도해석

3.1 벽상 구조물

3.1.1 벽상 구조물의 온도해석

온도해석에 사용된 콘크리트 치기시의 외기온도는 콘크리트 치기 시기를 10월경으로 정하여 $T_{air}=17.0^{\circ}\text{C}$ 로 하였으며, 치기시 콘크리트 온도는 $T_i=20^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였다. 또한, 암반의 초기온도분포는 지하 5m 위치에서의 연평균기온 $T_g=15.1^{\circ}\text{C}$ 를 고정온도경계로 하는 직선온도분포로 가정하였다.

Fig. 4는 Table 2에 제시한 조건을 사용하여 Fig. 1의 벽상구조모델에 대한 온도해석결과를 보인 것이다. 이 그림으로부터 수화열에 의한 콘크리트의 최대온도는 콘크리트 치기 시점으로부터 약 50시간이 경과한 후 52°C 정도의 값을 나타내

고 있으며, 콘크리트 치기 온도에 비해 32℃ 정도의 온도상승이 있음을 알 수 있다.

Table 2 Conditions for thermal analysis
(Wall-type structure)

Concrete placement Temp.	$T_c(°C)$	22.0
Air Temp. in concrete placement	$T_{air}(°C)$	17.0
Heat Transfer Coef.	Sheet	h
	Non Sheet	(kcal/m ² h °C)
		5.0
		12.0
Rock Temp. (at underground 5m)	$T_g(°C)$	15.1

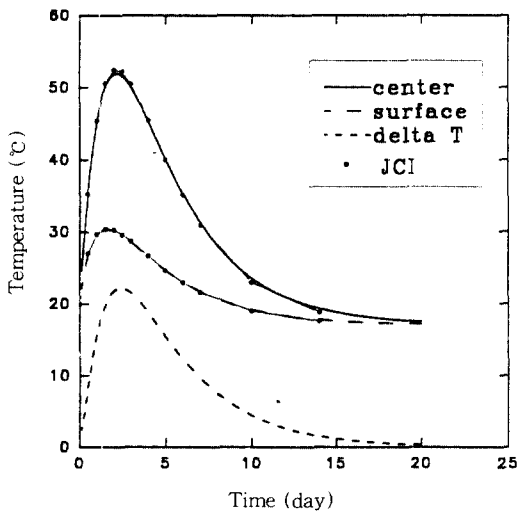


Fig. 4 Comparison of the temperature history of the present study for the wall-type structure with that of JCI presented in Ref. 15.

또한, 콘크리트의 표면온도와 내부의 최고온도와의 차이는 22℃ 정도이며, 콘크리트 치기 후 20여일이 경과한 후에야 비로소 콘크리트의 내부온도와 대기온도가 완전히 평형상태를 이루고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 본 연구에서 개발한 온도해석 프로그램 'TAMCON'의 타당성 여부를 검증하기 위하여 JCI 해석결과를 동시에 나타낸 것이다. JCI의 온도해석 프로그램은 이미 매스콘크리트의 온도해석을 실시하는 데 있어서 그에 대한 유용성이 입증된 것으로서, JCI 해석 결과는 본 해석 프로그램의 타당성을 명확히 하는 데 매우 중요한 자료

라고 판단된다. 보통 매스콘크리트의 온도해석을 실시하는 데 있어서 특히 중요하다고 생각되는 것으로서는 콘크리트의 온도상승속도, 최대온도, 최대온도상승시기 및 온도강하속도 등을 들 수 있다. 이러한 관점에서 Fig. 4에 보인 해석결과는 JCI 해석결과와 비교하여 볼 때 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

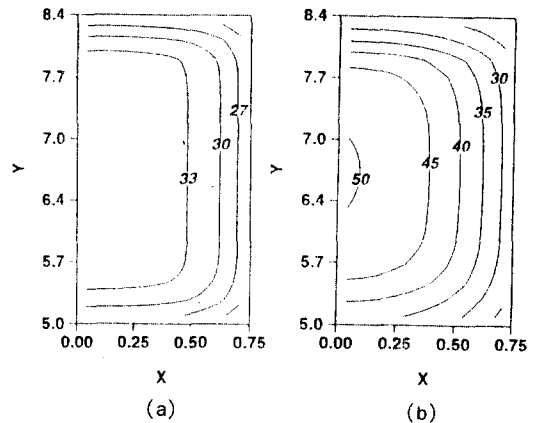


Fig. 5 Contour plots of temperature distribution for the wall-type structure at different curing times (a) 12hr (b) 48hr

Fig. 5는 수화열에 의한 콘크리트 내부의 온도상승 및 온도강하의 시간적인 변화를 등온선을 이용하여 위치별로 알기 쉽게 나타낸 것이다. 콘크리트 치기 후 12시간이 경과한 때에는 벽체 내부의 온도는 대부분이 33℃ 정도로서 13℃의 온도상승에 불과하지만, 48시간이 경과한 경우에는 내부의 온도가 50℃ 정도로서 30℃의 온도상승이 있음을 보여주고 있다

3.1.2 시트양생 조건을 고려한 온도해석

온도균열을 제어하기 위한 대책으로는 ① 콘크리트의 온도변형을 줄이는 것, ② 콘크리트의 역학적 성질을 개선시키는 것, ③ 온도응력의 발생 원인이 되는 구속작용을 줄이는 것, ④ 철근 혹은 이음부 등에 의해 균열폭과 위치를 제어하는 것 등 4가지를 들 수 있다. 이 가운데 양생중에 실시할 수 있는 중요한 대책으로서 세번재 양생온도를 제어함으로써 콘크리트의 구속작용을 줄이는 방법이 대표적으로 사용되고 있다. 즉, 단열양

생 및 가열양생은 구조물 내부의 온도경사를 완화시켜 내부구속을 줄이는데 매우 유효하다.

앞에서는 JCI 해석결과로 부터『TAMCON』에 의한 온도해석의 타당성을 입증하였다. 따라서, 시트에 의한 단열양생방법 및 그의 효과를 고찰하는데 있어서 본 해석프로그램은 유용성이 클 것으로 생각된다. 여기서는 시공중 발생할 수 있는 균열을 억제하기 위한 수법으로서 노출된 콘크리트면을 시트를 사용하여 단열양생시키는 경우에 대해 고찰해 보기로 한다. 거푸집은 강제거푸집을 사용하였으며, 콘크리트의 양생방법으로서 거푸집 표면을 시트로 덮은 온도제어양생을 실시하는 것으로 하였다. 이 때, 강제 거푸집의 열전달율은 $h=12\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$, 시트양생의 열전달율은 $h=5\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 의 값을 사용하였다.⁽¹⁵⁾

Fig. 6은 콘크리트 치기 후 거푸집 표면을 2일간 시트로 덮은 경우에 대해 『TAMCON』에 의한 온도해석을 실시한 결과를 보인 것이다. 이 경우 재령 2일에서 콘크리트 내부의 최고온도는 53°C 이며, 표면온도는 38°C 로서 15°C 의 온도차를 보이고 있다. 이것은 Fig. 4의 시트양생을 하지 않은 경우에 비하여 재령 2일 시점에서의 온도차는 현저히 줄어 든다. 그러나 재령 2일 이후에서 시트를 제거할 경우, 재령 3일째 되는 날 콘크리트 표면과 내부의 온도차는 23°C 정도를 나타내고 있다. 따라서, 2일간의 시트양생으로서는 시트양생의 효과를 거의 기대할 수 없는 것으로 생각된다.

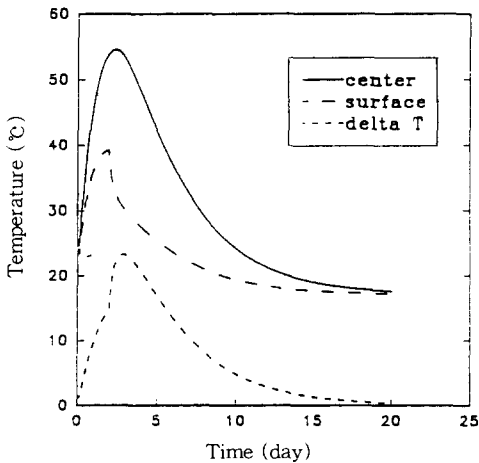


Fig. 6 Temperature history of the wall-type structure with sheet curing for 2 days.

이번에는 시트양생을 재령 5일까지 실시한 경우에 대하여 검토해 보자. Fig. 7은 시트양생을 5일간 실시한 경우에 대하여 콘크리트 표면과 중심위치에서의 온도이력을 보인 것이다. 시트를 제거하면 바로 온도가 상승하여 결국 온도차는 대략 17°C 정도를 나타내며, 전체 양생기간 중 어떠한 재령에서도 이 값을 초과하는 일은 없다. 따라서, 이 경우 5일간 시트양생을 실시하면 콘크리트 내부와 외부의 온도차가 현저히 줄어들게 됨으로서 시트양생의 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

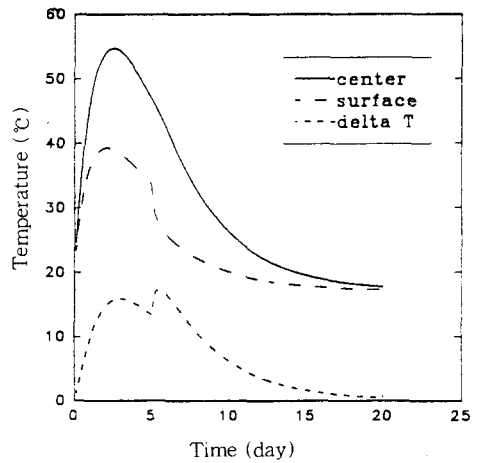


Fig. 7 Temperature history of the wall-type structure with sheet curing for 5 days.

3.2 기초 매트 구조

이 구조물은 硬水爐 加壓水型 原子爐 格納施設의 기초매트로서 지름 42m, 높이 10.5m의 원형이며, 콘크리트를 칠 때 블럭 분할에 의해 수방향 방사선으로 4블럭, 높이 방향으로 7층으로 분할한 것이다. 각 층의 두께는 1.4~1.8m로서 계단 형태로 콘크리트를 친 것이며, 1블럭의 최대 콘크리트량은 약 500m^3 이다.

콘크리트 치기시의 외기온도는 $T_{\text{air}}=20.0^\circ\text{C}$ 이며, 치기시 콘크리트 온도는 1 Lift의 경우 $T_1=28.0^\circ\text{C}$, 2 Lift의 경우는 $T_1=24.5^\circ\text{C}$ 이다. 또한, 암반의 초기온도분포는 표면에서 $T_g=19.0^\circ\text{C}$ 를 고정온도경계로 하였다.

Table 3 Conditions for thermal analysis
(Mat foundation)

		1 Lift	2 Lift
Concrete Placement Temp.	T_c (°C)	28.0	24.5
Air Temp. in Concrete Placement	T_{air} (°C)	20.0	20.0
Heat Transfer Coef.	h (kcal/m ² h °C)	9.6	9.6
Rock Temp. (Surface)	T_g (°C)	19.0	-

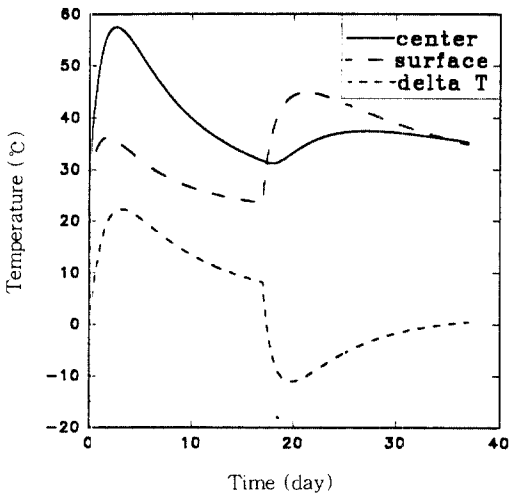


Fig. 8 Temperature history of the first lift of the mat foundation.

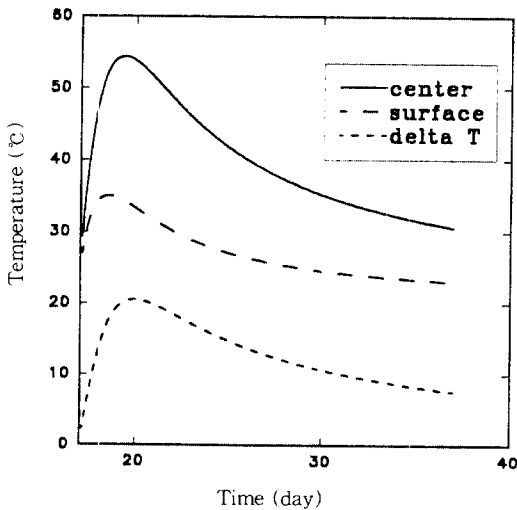


Fig. 9 Temperature history of the second lift of the mat foundation.

Fig. 8은 Table 3의 조건을 사용하여 Fig. 2의 매트기초모델의 제 1 Lift에 대한 온도해석결과를 보인 것이다. 제2 Lift 콘크리트는 제1 Lift 콘크리트를 쳐놓고 17일이 경과한 후에 콘크리트 치기를 실시하였다. 그 이유는 제1 Lift의 수화열이 제2 Lift 콘크리트의 온도상승에 큰 영향을 주지 않도록 하기 위해서이다. 제1 Lift는 재령 2일에서 최대온도는 57°C 정도이며, 콘크리트 표면온도와 비교해 볼 때 23°C만큼 큰 값이다. 또한, 재령 17일 후에는 콘크리트 내부온도는 31°C로서 26°C 정도의 온도강하를 나타내고 있지만, 이 시점에서 제2 Lift의 콘크리트 치기로 인하여 내부온도가 다소 상승한 데 비해, 표면온도는 24°C에서 46°C로 무려 22°C의 온도상승을 보이고 있다. 이것은 제1 Lift 위에 이어서 제2 Lift의 콘크리트를 쳐 넣음으로서 일어난 결과이다.

Fig. 9는 제2 Lift의 온도해석 결과이다. 콘크리트 내부의 최고온도는 콘크리트 치기 후 2일이 되는 날 54°C를 기록하고 있으며, 표면온도와는 21°C의 차이를 보이고 있다. 제1 Lift의 경우에 비하여 최고온도가 3°C 정도 작은 것은 제2 Lift 콘크리트의 치기온도가 낮은 것이 원인으로 생각된다.

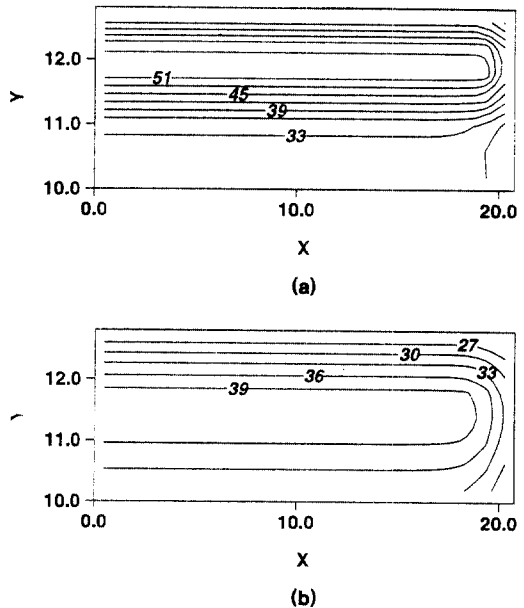


Fig. 10 Contour plots of temperature distribution of the mat foundation cured (a) for 2.5 days and (b) for 10 days after the placement of the second lift.

Fig. 10은 제1 lift를 쳐 넣고 17일이 경과한 후 다시 제2 lift를 쳐 넣은 다음 각각 재령 2일 및 10일후의 온도분포를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 쳐 넣은 지 2일째의 온도는 매우 높으며, 10일이 경과하면 제2 Lift 표면은 물론 제1 Lift 쪽으로도 열이 전달되어 두 층이 모두 한 층과 같이 거동하고 있음을 알 수 있다.

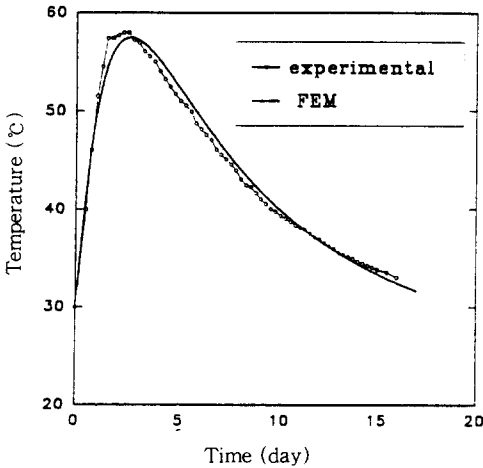


Fig. 11 Comparison of the temperature analysis for the first lift of the mat foundation with the experimental data presented in Ref. 16 and 17.

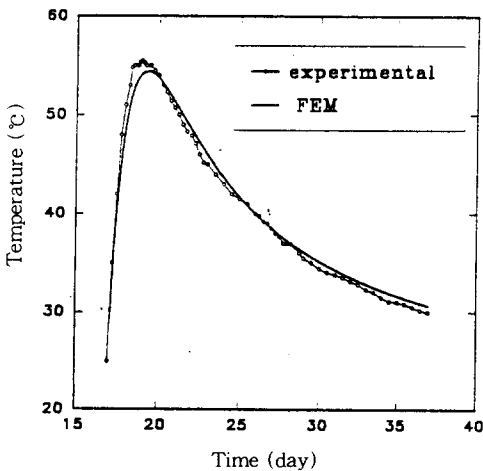


Fig. 12 Comparison of the temperature analysis for the second lift of the mat foundation with the experimental data presented in Ref. 16 and 17.

Fig. 11은 제1 Lift의 온도해석결과를 실험으로부터 얻은 실측결과와 비교한 것이다. 온도상승 및 온도강하시의 경사, 최고온도, 최고온도에 도달하는 시기 등 시간에 따른 온도이력이 실측결과와 잘 일치하고 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 12에서 확인할 수 있듯이 제2 Lift의 경우에서도 동일한 결과를 얻었다.

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 매스콘크리트 구조물의 온도해석을 위한 온도해석 프로그램『TAMCON』을 개발하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 수치해석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 매트기초에 대한 온도해석 결과는 실험치와 잘 일치하였으며, 제2 Lift의 콘크리트 치기시 제1 Lift의 온도영향도 합리적으로 잘 표현되었다.

2. 본 해석 프로그램은 대표적인 매스콘크리트 구조물로 인식되고 있는 벽상 구조물과 매트기초 구조물의 온도해석에 있어서 유용성이 입증되었다.

3. 열 응력을 완화시키는 수법의 하나인 단열양생 효과에 대한 온도해석 결과 수치모사에 대한 재현성이 입증되었다. 그러므로 본 프로그램은 현장에서 합리적인 양생방법 등의 도입을 검토하는데 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 본 해석 프로그램은 건설현장등에서 콘크리트 치기시 온도관리 계획등을 통합 시스템 체계로 운용하는 데 효과적으로 활용할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 大韓土木學會, 콘크리트표준시방서, 1989.
2. JCI, マスコンクリートのひびわれ制御指針, 1986.
3. 長瀧重義, 佐藤良一, “コンクリートのひびわれと對策”, セメント・コンクリート, No.428, 1982.10. pp.52-59.
4. 長瀧重義, 佐藤良一, “マスコンクリートにおける溫度ひびわれ制御の動向”, JCI, Vol.26, No.5, 1988.5. pp.4-12.

- 5.塚山隆一, “マッシブな鐵筋コンクリート構造物の溫度ひびわれ”, セメント・コンクリート, No.370, 1977.12. pp.11-17.
- 6.土木學會, マスコンクリート技術の現状と動向, コンクリート技術シリーズ No.8, 1994.10.
- 7.田邊忠顯, “マスコンクリートの溫度應力制御技術の現状”, 土木學會論文集, No.372/V-5, 1986.8. pp.1-16.
8. ACI Committee 207 Report: Effect of Restraint, Volume change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, ACI Proc., Vol.70-45, July, 1973.
9. JCI, ユーザ-マニュアルマスコンクリートの溫度應力計算用パソコンプログラム集, 1989.6.
10. Proceeding of the International RILEM Symposium: Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, E & FN SPON, 1994.10
11. 김진근, 김국한, “크리프와 건조수축 영향을 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력 해석”, 韓國콘크리트學會誌, 제4권, 제3호, 1992. 9. pp.101-111.
12. 김진근, 이종대, “크리프를 고려한 매스콘크리트의 수화열에 대한 온도응력 해석”, 大韓土木學會論文集, 제14권, 제4호, 1994.7. pp.771-780.
13. 오병환, 백신원, 조양희, “매스 콘크리트 구조의 열응력 해석에서의 크리프 및 건조수축 효과”, 大韓土木學會論文集, 제15권, 제1호, 1995.1. pp. 97-106.
14. 이장화, 변근주, “매스 콘크리트 수화온도의 합리적 평가를 위한 실험 및 해석 연구”, 大韓土木學會論文集, 제15권, 제2호, 1995.3. pp.337-346.
15. JCI, マスコンクリート工事の溫度應力制御演習
16. 原口 晃, 山川秀次, 阿部博俊, “原子力・火力發電所の基礎マツトコンクリートの溫度・變形・應力の實測ならびに解析”, 電力土木, No.175, 1981. 11. pp.63-72.
17. 小野 定, 長田晴道, “基礎マツトスラブコンクリート溫度の實測と解析”, JCI, マスコンクリートの溫度應力發生メカニズムに關するコロキウム論文集, 1982. pp.45-48.
18. 申熙範, 金銀謙, 金來鉉, 慎治範, “FEM에 의한 매스콘크리트 구조물의 온도해석 소프트웨어 개발”, 1994년도 대한토목학회 학술발표회 논문집 (I), 1994.10. pp.143-146.
19. 長田晴道, 小野 定, “溫度解析方法に關する既往の研究成果について”, JCI, マスコンクリートの溫度應力發生メカニズムに關するコロキウム論文集, 1982. pp.35-44.
20. 塚山隆一, “マッシブな鐵筋コンクリートの溫度上昇ならびに溫度ひびわれに關する基礎研究”, 東京大學博士學位論文, 1974.
21. Ch. WANG and W.H. DILGER, “Prediction of temperature distribution in hardening concrete”, Proceeding of the International RILEM Symposium: progress in Munich, E&FN SPON, 1994.10.
22. T.J.R. Hughes, The Finite Element Method, Prentice-Hall, 1987.

(접수일자 : 1995. 3. 16)