

온도저감 공법을 고려한 콘크리트의 수화열 해석기법에 관한 연구

Thermal Analysis of the Heat of Hydration in Concrete with Considering Heat Reduction Techniques

김진근*

김국한**

양주경***

Kim, Jin Keun Kim, Kook Han Yang, Joo Kyoung

요 약

매스콘크리트 구조물에서 시멘트의 수화발열반응에 발생된 열은 약재령 콘크리트에서 내부온도의 증가와 체적변화를 일으키게 된다. 이와같은 온도증가에 외부구속조건이 존재하게 되면, 구조물에는 인장응력이 발생하고 이는 구조물에 균열을 일으킬 수 있다. 따라서 매스콘크리트 구조물 건설시 수화열에 의한 온도증가를 제어하기 위해 다양한 시공기법을 이용하고 있으며, 이들 공법중 하나가 관에 냉각수를 유입시켜 온도를 하강시키는 파이프쿨링 공법이다.

이 논문의 목적은 파이프쿨링을 실시할 때 수화열로 인한 온도이력을 모사할 수 있는 유한요소해석 프로그램을 개발하는 것이다. 이 연구에서 개발된 해석 프로그램의 결과와 실제 구조물의 기초부(11×22m)의 실측 결과가 잘 일치함을 보였다. 따라서 여기서 제시된 방법은 파이프쿨링으로 인한 콘크리트의 수화온도 예측에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract

The heat generation of hydration of cement causes the internal temperature rise and volume change at early age, particularly in massive concrete structures. As the results of the temperature rise and external restraint conditions, the thermal stress may induce cracks in concrete. Therefore, various techniques of the thermal stress control of the mass concrete have been widely used. One of them is pipe-cooling which reduces the temperature of concrete with flowing water.

The objective of this paper is to develop a finite element program which is capable of simulating the temperature history considering pipe-cooling effect. The numerical results in this study are in good agreement with experimental data measured in the footing(11×22m). Therefore, this study may provide available method to predict the hydration temperature of concrete with pipe-cooling.

Keywords : pipe-cooling, hydration heat, massive concrete, finite element analysis, temperature history

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수
** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
*** 정회원, 대림산업(주)

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

1. 서 론

콘크리트는 경화과정에서 시멘트의 수화발열에 의한 온도의 상승이 강도의 발현을 비롯하여 콘크리트의 제성질에 영향을 미치게 되며, 특히 내외부의 온도차에 의하여 콘크리트에 균열이 발생하게 된다. 이와같은 수화열에 의한 온도증가는 내부온도의 발산이 어려운 매스 콘크리트 구조물에서 크게 일어날 뿐 아니라, 내외부 콘크리트의 온도차로 인하여 균열이 발생할 원인이 된다. 특히 최근 콘크리트 구조물의 대형화·특수화·고강도화 추세로 인하여 수화열에 의한 균열 피해가 시공현장의 주요 문제점으로 대두되고 있으며, 이에 따라 수화열에 의한 균열을 예방하기 위한 각종 공법에 많은 관심을 기울이고 있는 상황이다.

수화열에 의한 온도증가를 억제시킬 수 있는 방안은 여러가지 있지만, 일반적으로 냉각수나 사용골재를 냉각시키는 전냉각(pre-cooling)공법과 파이프관에 냉각수를 유입시키는 파이프 쿨링(pipe-cooling)공법이 많이 사용되고 있다. 수화열에 의한 온도이력을 예측하기 위한 방법으로 이들의 영향을 고려한 해석기법이 개발된다면, 현장에서 효율적으로 온도제어 및 균열제어를 실시할 수 있으므로 시공성의 향상, 경제성 확보 및 콘크리트의 강도증진 등 여러가지 측면의 문제점 개선 효과를 기대할 수 있을 것이다.

따라서 파이프 쿨링공법을 실시할 때 수화열 저감효과 및 균열예방 효과 등을 효율적으로 예측할 수 있는 파이프 쿨링을 고려한 수화열 해석 프로그램 개발하는 것이 이 연구의 주목적이다. 이 유한요소 프로그램 개발시에 콘크리트는 8절점 체적요소(solid element)^(1,2)를 사용하고 파이프는 2절점 선요소(line element)^(3,4)를 이용하였다. 그리고 개발된 해석 프로그램의 유용성을 검증하기 위하여, 파이프 쿨링공법이 적용된 서해대교 기초부⁽⁵⁾의 온도계측자료와 비교 검토하였다.

2. 수화열에 대한 모델링

2.1 콘크리트의 열적 특성치

콘크리트의 열적 특성은 여러가지 요인에 의해

영향을 받는다. 온도해석에 이용되는 주요 열적 특성인 열전도율의 경우, 콘크리트의 건조·습윤 상태, 콘크리트의 온도 등에 영향을 많이 받는다. 또한 사용된 골재, 시멘트의 종류와 사용재료의 체적 및 무게비에 따라 열전도율 및 비열의 값이 달라진다. 중·경량 골재가 아닌 일반골재를 사용하였을 경우 대표적인 열특성 값은 표 1과 같다.⁽⁶⁾ 여기서 열확산계수(thermal diffusivity : μ : m^2/hr)는 물체의 에너지 발산 정도를 나타내는 것으로 다음과 같이 표현된다.

$$\mu = \frac{k}{\rho \cdot c_c} \quad (1)$$

외기와 콘크리트가 접하는 경계부에서는 대류에 의한 열교환이 식 (2)와 같이 발생되며, 외기와 경계 매질의 온도가 일정할 때 외기와 대류정도는 외기대류계수(h_a)의 크기에 의해 결정된다. 외기대류계수는 풍속에 따라 변화하며, 풍속이 2~3m/sec인 경우 大森川담의 실험에서는 12~13Kcal/m²·hr·℃, 山川의 실험에서는 8~11Kcal/m²·hr·℃라고 보고되고 있으며,⁽⁶⁾ 小澤⁽⁷⁾은 이들의 결과를 분석하여 아래의 식 (3)을 제안하고 있다.

Table 1 Thermal properties of concrete

Property	Value
Conductivity, k (Kcal/m·hr·℃)	2.15~2.51
Specific heat capacity, c_c (Kcal/kg·℃)	0.27~0.31
Diffusivity, μ (m ² /hr)	3.02~3.71×10 ⁻³

$$q^a = h_a(T_x - \theta^S) \quad (2)$$

여기서, q^a : 외기대류에 의한 열교환량

(Kcal/m²·hr)

h_a : 외기 대류계수(Kcal/m²·hr·℃)

θ^S : 대류경계점의 온도(℃)

T_x : 외기의 온도(℃)

$$h_a = 9.60 + 1.12v \quad (3)$$

여기서, v : 풍속(m/sec)

그리고 파이프 쿨링시 파이프를 흐르는 냉각수와의 접촉매질간에도 대류에 의한 열교환이 이루어지며, 이는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 식 (4)는 식 (2)의 관계식과 유사하지만, 냉각수에 의한 열교환이 외기대류에 의한 열교환보다 크므로 냉각유수의 대류계수(h_w)는 외기대류계수보다 큰 계수값을 가지게 된다.

$$q^w = h_w(T_w - \theta^s) \quad (4)$$

여기서, q^w : 냉각대류에 의한 열교환량

(Kcal / m² · hr)

h_w : 냉각유수의 대류계수

(Kcal / m² · hr · °C)

θ^s : 냉각대류 경계절점의 온도(°C)

T_w : 냉각수의 온도(°C)

일본 콘크리트공학협회⁽⁶⁾에서는 유수대류계수(h_w)는 냉각수의 속도에 따라 변하며, 유속이 20~60cm/sec일 경우 아래의 식을 추천하고 있다.

$$h_w = 4.75u + 43.0 \quad (5)$$

여기서, u : 유속(cm/sec)

2.2 콘크리트의 단열온도 상승식

콘크리트내의 시멘트가 수화반응으로 인해 증가되는 온도이력을 추정하는 식을 단열온도 상승식이라고 하며, 정확한 온도해석을 위해서는 앞절의 열특성치의 선택도 중요하지만 얼마나 정확한 단열온도 상승식을 사용하는냐 하는 것이 가장 중요하다.

단열온도 상승식의 모델식은塚山の 실험식⁽⁸⁾과 시멘트 수화열에 의한 실험식⁽⁹⁾ 및 일본콘크리트공학협회 제안식⁽⁶⁾ 등이 있으며, 이들 모델식은 통상적으로 수화 휴지기를 고려하지 않는 식 (6)과 같은 형태를 사용하고 있다.

$$T = K(1 - e^{-at}) \quad (6)$$

여기서, T : 단열온도 상승량(°C)

t : 재령(day)

K : 최대 상승온도(°C)

α : 반응속도 계수

그런데 이들 모델식의 경향을 분석하여 보면,塚山の 실험은 반응속도(α)값은 실측치와 근사한 반면 최고상승온도(T)는 지나치게 과소평가된 결과를 보인다. 이는塚山の 실험이 1m이하의 얇은 콘크리트 구조물에서 실험이 실시되었기 때문이다. 반면 시멘트 수화열에 의한 실험식은 최고상승온도(T)는 잘 예측하지만, 반응속도(α)값이 과소평가되는 결과를 보인다.

따라서 수화열에 의한 단열온도 상승식을 결정하기 위해 최고상승온도(T)는塚山の 실험식을 이용하고 반응속도(α)는 시멘트 수화열에 의한 실험식을 선택한 후, Fig. 1과 같은 K , α 값의 보정계수를 이용하여 최종단열온도 상승식을 구한다.⁽¹⁾

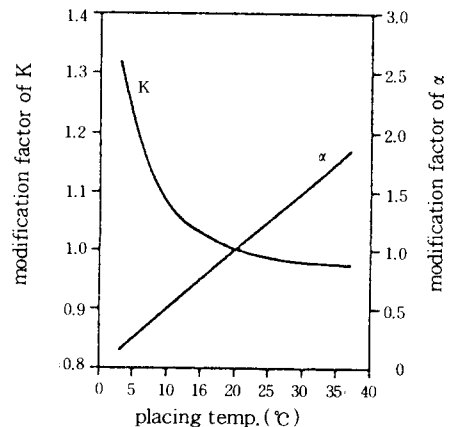


Fig. 1 Modification factor of K , α

2.3 콘크리트의 내부발열량

식 (6)으로부터 구한 수화열에 의한 내부온도의 상승을 내부발열량으로 바꾸기 위해서는 아래 식을 이용할 수 있다. 즉 콘크리트의 단위체적당 내부발열량(q^B)은 수화열에 의한 발열온도를 시간에 대하여 미분한 후 체적적열 용량($\rho_c C_c$)으로 곱하면 된다

$$q^B = \frac{\rho_c C_c \Delta T}{\Delta t}$$

$$= \frac{1}{24} \rho_c C_c \alpha K e^{-x/24} \quad (7)$$

여기서, q^B : 단위시간의 단위체적당 발열량
(Kcal/hr · m³)

ΔT : 콘크리트의 수화열에 의한
온도차(°C)

Δt : 시간차분(hr)

3. 유한요소법에 의한 열전달 정식화

3.1 열흐름 평형 방정식

고체 매질내의 임의의 시간 t 에서의 온도분포를 $T(x,y,z,t)$ 로 나타낼 때 온도의 변화율에 의해 열흐름(heat flux, q_i)이 일어나게 된다. 일반적으로 온도는 x, y, z 방향으로 모두 변하므로 각 방향으로 열흐름이 존재하며, 이는 Fourier's 법칙을 이용한 열전도 구성방정식^(2,3)으로 다음식과 같은 표현이 가능하다.

$$q_{xi} = -k_{xi} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad q_{xi+dxi} = q_{xi} + \frac{\partial q_{xi}}{\partial x_i} dx_i \quad (i=1,2,3) \quad (8)$$

여기서, q_{xi} : 단위시간, 단위면적당 열흐름

k_{xi} : x_i 방향의 열전도계수

T : 온도(°C)

그리고 임의의 3차원 미소체적에서 열의 공급과 손실이 발생할 경우, 내부발열량(q^B)과 식 (8)의 열전도 구성방정식을 이용하여 열흐름 평형방정식을 정리하면 다음식과 같다.

$$\sum_i \frac{\partial}{\partial x_i} (k_{xi} \frac{\partial T}{\partial x_i}) + q^B = 0 \quad (9)$$

3.2 대류경계조건 및 기지온도조건

식 (9)에 의한 열흐름 평형방정식은 내부발열량에 의한 열흐름만을 포함하고 있다. 따라서 파이프 쿨링을 고려한 수화열 해석을 위해서는 외기대류 및 유수대류에 의한 열흐름을 나타내는 경계조건이 필요하다. 그리고 열흐름의 조건에 상관없이 임의의 절점에서는 항상 일정한 온도가 작용하는 기

지온도항의 표현도 필요하다.

외기와 구조물의 접촉 경계면(Γ_{Sa})에서 발생하는 외기대류로 인한 열흐름은 식 (10)과 같고, 파이프관의 접촉경계면(Γ_{Sw})에서 발생하는 유수대류로 인한 열흐름은 식 (11)과 같다.

$$q^a = k_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{Sa}} \quad (10)$$

여기서, q^a : 외기대류에 의한 열흐름

k_n : 열전도계수

n : 대류작용 방향

$$q^w = k_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{Sw}} \quad (11)$$

여기서, q^w : 유수대류에 의한 열흐름

열흐름상태에 관계없이 일정한 온도를 유지하는 기지온도(prescribed temperature)에 관한 조건을 나타내기 위해, 임의의 시간(t)에서의 임의의 위치(x_i)에서의 구조물의 온도는 T^*_A 임을 식 (12)와 같이 표현된다.

$$T = T^*_A(x_i, t) \quad x_i \in \Gamma_A \quad (12)$$

3.3 공간영역에서의 유한요소 정식화

위의 식 (9)의 열흐름 평형방정식과 식 (10)~(12)의 경계조건 및 초기조건을 Gauss 부분적분 공식과 변분법(variation formulation)을 이용하여⁽²⁾, 유한요소법으로 해석 가능한 행렬방정식 형태로 만들면 식 (13)과 같다.

$$[C] \{\dot{T}\} + [K] \{T\} = \{Q\} \quad (13)$$

여기서, $[C] = [C^{SOL}] + [C^{PIPE}]$

$$[K] = [K^{KSOL}] + [K^{KPIPE}] + [K^{CASOL}] + [K^{CWPIPE}]$$

$$\{Q\} = \{Q_{CASOL}\} + \{Q_{CWPIPE}\} + \{Q_{HYD}\}$$

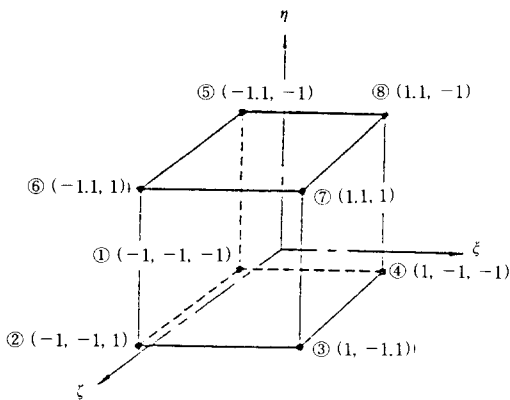
식 (13)의 $[C]$ 는 열용적 행렬로 비정상해석(transient analysis)을 위해 도입된 항목이며, $[K]$ 는 열전도 매트릭스로서 콘크리트와 파이프의 열전도를 효과를 고려하며, $\{Q\}$ 는 외기대류, 유수대류 및 수화발열에 의한 총열량을 산정하는 항목

이다.

3.4 체적요소와 선요소의 연결 방법

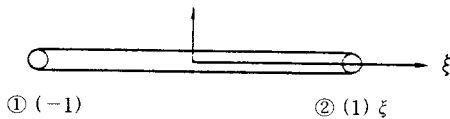
이 연구에서 개발된 수화열 해석 프로그램은 콘크리트의 형상을 모델링하기 위해 Fig. 2와 같은 8절점 체적요소(solid element)를 사용하였으며, 자연좌표계(natural coordinate)로 변환하는 보간함수(interpolation function) N_i 값은 Fig. 2와 같다. 그리고 파이프의 형상을 모델링하기 위해 Fig. 3과 같은 2절점 선요소(line element)를 사용하였으며, 이 요소의 보간함수가 그림에 주어져 있다.

이와같이 콘크리트와 파이프를 각각 다른 요소로 모델링하므로, 식 (13)과 같은 형태의 행렬을 구성하기 위해서는 이들 요소를 적절히 연결시켜야 한다. 이를 위해 Fig. 4와 같이 2절점 선요소를



$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta) & N_5 &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta) \\
 N_2 &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1+\zeta) & N_6 &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta) \\
 N_3 &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1+\zeta) & N_7 &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1+\zeta) \\
 N_4 &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta) & N_8 &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta)
 \end{aligned}$$

Fig. 2 8 Node solid element



$$N_1 = \frac{1}{2}(1-\xi) \quad N_2 = \frac{1}{2}(1+\xi)$$

Fig. 3 2 Node line element

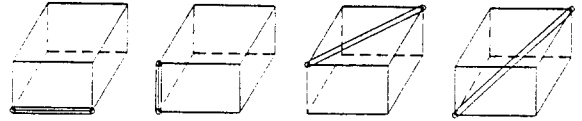


Fig. 4 Connection solid element and line element

8절점 체적요소상의 임의의 두 절점에 위치시켜 두개의 요소를 결합시킨다. Fig. 4와 같이 선요소는 체적요소의 모서리부에 위치할 수 있을 뿐 아니라, 체적요소내를 관통할 수도 있다.

3.5 내부유동(internal flow)의 정식화

파이프쿨링을 실시할 경우, 파이프수는 관내를 유동하면서 초기유입시의 온도보다 증가하게 된다. 이와같은 유수의 온도증가량은 파이프의 배근 길이, 콘크리트의 단열온도상승량 등에 따라 달라지며, 또한 파이프의 위치와 시간에 따라 각기 다른 값을 보인다. 이와같은 유수의 내부유동에 의한 각 위치에서의 온도변화는 관내부에서의 에너지 보존법칙⁽¹⁰⁾을 이용하여 계산할 수 있다. 여기서, 에너지 보존법칙은 수화발열에 의해 관내부로 공급되는 열량과 파이프 유수에 의해 냉각되는 열량은 동일하다는 이론으로서, 관내부의 대류일 경우 내부유동(internal flow)이라 명칭을 정하여 대류에 의한 열전달 문제를 해결한다. 일반적으로 내부유동에 의한 열전달 문제를 해결하는 방법은 여러가지 이론과 실험식을 이용하여 이루어지며, 전체적인 해석 순서는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이, 관내 유동수가 층류인지 난류인지를 Reynold 수를 구하여 판별한 후, 이 값을 이용하여 유속이 일정한 분포를 보이는 영역(완전발달된 유체역학적 영역)을 산정할 수 있다. 또한 Reynold 수를 이용하여 관내의 온도분포가 일정한 영역(완전발달된 열적 영역)을 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 각각의 영역에서의 유수대류계수(h_w)를 계산하는 방법은 유수의 온도경계층을 이용하여 에너지 미분 방정식을 확립한 후, 이 미분방정식을 적절한 경계조건을 주어 계산하여야 한다.⁽¹⁰⁾ 이와같이 유수대류계수(h_w)를 계산하는 방식은 이론적이고 합리적인 접근법이

기는 하지만, 관의 위치에 따라 유수대류계수를 변화시켜야 할 뿐 아니라 층류와 난류의 구분에 따라 값의 차이가 매우 크다. 그리고 파이프관의 표면거칠기나 관의 형상변화가 있을 때마다 이를 고려하여야 하며, 파이프관 표면과 파이프와 접하고 있는 콘크리트부의 온도가 시간에 따른 지연효과(delay effect)가 없이 항상 일정할 경우에만 만족스럽게 적용할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 유수대류계수를 산정함에 있어, Fig. 5의 내부유동 이론을 따르지 않고 일본 콘크리트공학협회⁽⁶⁾에서 제안한 식 (5)의 실험식을 적용하였다.

Fig. 5에서 보여 주듯이 관내부 유동냉각수의 온도를 계산하기 위해서는 Newton의 냉각법칙과 대류열전달식을 이용하며, 이를 Fig. 6의 내부유

동 개념도를 이용하여 설명하면 다음과 같다. 유입구와 유출구의 거리가 L이며, 유입구 및 유출구의 파이프관의 온도는 $T_{s,i}$, $T_{s,o}$ 이며, 유수의 온도는 $T_{w,i}$, $T_{w,o}$ 이라고 할 때, 내부유동에 의한 에너지 보존법칙을 이용하여 전술한 4가지의 온도값 중에서 세가지의 값을 알고 있으면, 미지의 1개의 온도값을 구할 수 있다.

즉 Newton의 냉각법칙에 의하여 파이프관 주위로 단위시간당 공급되는 열량(q_s^*)을 나타내면 식 (14)와 같다.

$$q_s^* = h_w \cdot A_w \cdot \left(\frac{T_{s,i} + T_{s,o}}{2} - \frac{T_{w,i} + T_{w,o}}{2} \right) \quad (14)$$

여기서, h_w : 유수대류계수(Kcal/m²·hr·°C)

A_w : 물과 접하는 파이프관의 면적(m²)

그리고 대류 열전달식에 의하여 유수에 의해 단위시간당 냉각되는 열량(q_{cov})을 나타내면 식 (15)와 같다.

$$q_{cov} = \dot{Q} \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_{w,o} - T_{w,i}) \quad (15)$$

여기서, \dot{Q} : 단위시간당 물의 유입량(m³/hr)

ρ_w : 물의 비중(kg/m³)

c_w : 물의 비열(Kcal/kg·°C)

에너지 보존법칙에 의하면 식 (14)와 식 (15)는 동일하고, 이로부터 미지의 1개의 온도값을 계산할 수 있다.

위의 식 (14)와 (15)를 적용하기 위해서는 다음의 다섯가지 가정이 만족하여야 한다. 첫째, 유동수는 비압축성 액체이며, 둘째, 유동수는 관의 직경방향으로의 열전도는 무시할 정도로 작으며, 셋째, 유동수는 운동에너지와 포텐셜 에너지의 변화는 미소하며, 넷째, 유동수에는 열에너지 변화와 유동일만 존재하며 유동일은 유체를 이동시키는 데 모두 소모된다고 가정하며, 다섯째, 표면의 열적조건에 상관없이 적용된다.

4. 예제해석 및 결과분석

4.1 해석 구조물의 모델링

프로그램의 유용성을 검증하기 위하여 서해대

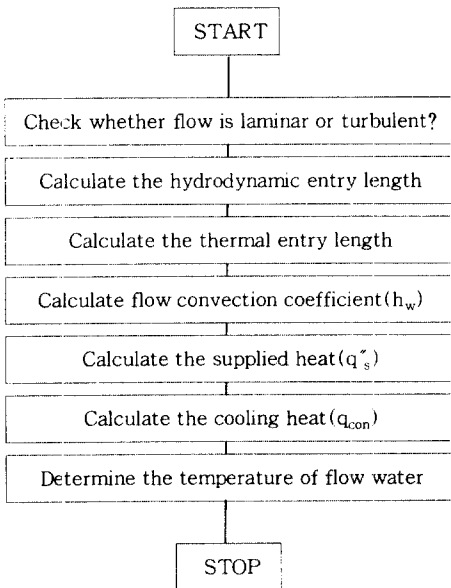


Fig. 5 Analytical procedure of internal flow

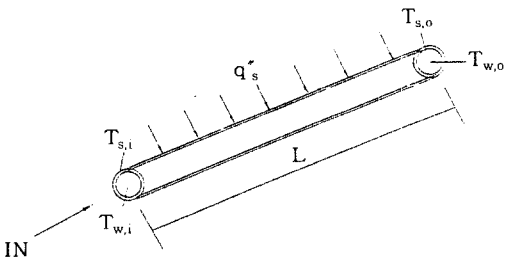


Fig. 6 Concept diagram of internal flow

교 기초부의 온도계측결과(5)와 이 연구에서 개발된 해석 프로그램의 결과를 비교검토했다. 해석을 수행한 서해대교 교각 24번의 기하학적인 형상은 Fig. 7과 같다. 해석시 하부층의 온도전달에 의한 효과를 모델링하기 위하여 콘크리트 타설위치 아래로 2m 깊이까지 기타설 콘크리트 구조로 가정하였다. 이때 하부층 기타설 콘크리트는 타설 경과 시간이 상당하여, 수화열에 의한 더 이상의 온도증가가 발생하지 않는 안정된 상태로 보며, 기타설 콘크리트의 열적 특성계수는 타설 콘크리트의 열특성계수와 동일한 것으로 가정하였다. Fig. 7의 타설부 콘크리트 2m 높이의 중앙에 X-Z 면상에 위치하게 될 파이프의 배근방법은 Fig. 8과 같다.

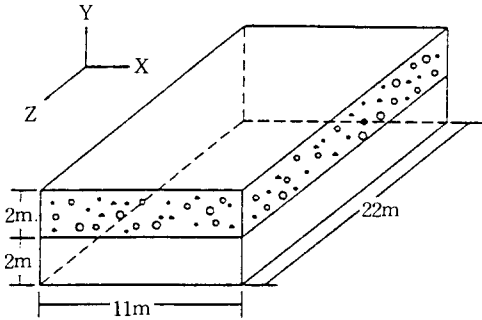


Fig. 7 Layout of pier 24

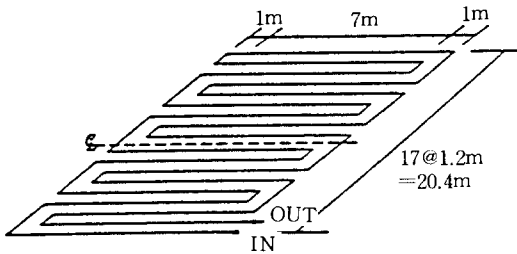


Fig. 8 Layout of pipe setting

수화열 프로그램을 해석하기 위한 콘크리트의 격자는 Fig. 9와 같이 구성하였다. 기타설 콘크리트부는 온도의 전달이나 수화열 발생에 큰 영향을 미치지 않으므로, Fig. 9와 같이 체적요소의 Y방향 치수는 1m로 하였고, 타설 콘크리트부의 치수는 0.5m로 하였다. 그리고 Z방향의 체적요소 치수는

0.6m로 Z방향 총분할수는 36개이다. 또한 X방향의 체적요소 치수는 1.0m이므로, X방향 총분할수는 11개이다. 따라서 체적요소의 총요소수는 2376개이며, 총절점수는 3108개이다. 선요소의 모델링은 Fig. 10과 같이 유수의 진행방향으로 실시하였으며, 따라서 선요소의 총수는 214개이다. 따라서 체적요소와 선요소의 합은 2590개이다.

해석결과와 측정결과와의 비교지점인 Fig. 9의 Section A의 요소번호와 형상은 Fig. 11과 같다.

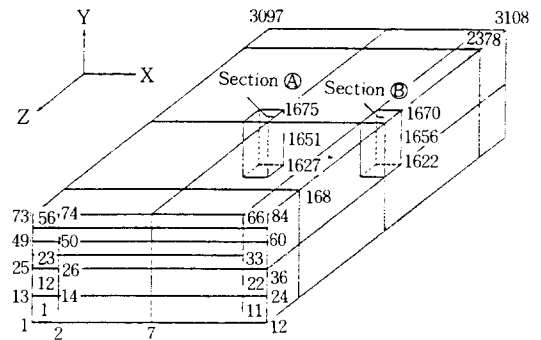


Fig. 9 Solid element modeling

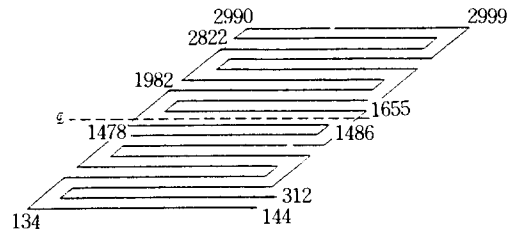


Fig. 10 Line element modeling

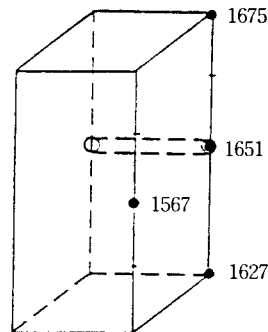


Fig. 11 Layout of Section A

Table 2 Input data of thermal properties

Input data		concrete	base rock	pipe steel
Adiabatic temprature	maximum temp. (K)	45.78	-	-
	reaction rate (α)	1.865	-	-
Thermal properties	conductivity(Kcal /m · hr · °C)	4.70	4.70	60.0
	specific heat(Kcal /kg · °C)	0.270	0.270	0.157
	heat convectivity(Kcal /m ² · hr)	9.0(5.0)	9.0(5.0)	328.0
	unit weight(kg /m ³)	2485.0	2485.0	7800.0
Concrete Properties	compressive strength(kg /cm ²)	240	-	-
	Young's modulus(kg /cm ²)	2.32×10 ⁵	2.32×10 ⁵	2.32×10 ⁶
	coefficient of expansion(/°C)	10.0×10 ⁻⁶	10.0×10 ⁻⁶	10.0×10 ⁻⁶
	Poisson's ratio	0.167	0.167	0.30

대상 구조물의 수화열에 의한 온도이력을 계산하기 위해 사용된 콘크리트, 암반 및 파이프재료의 열적특성 및 물성치등은 표 2와 같다. 여기서 기초부 구조에 철근의 사용량이 약 2~4% 정도되므로, 콘크리트의 열특성계수인 열전도계수, 비열 및 단위중량의 값을 철근의 추가로 인한 영향을 고려하여 조정하여 표 2와 같이 사용하였다. 그리고 외기대류가 이루어지는 조건은 타설 콘크리트 윗면의 외기대류계수는 9Kcal /m² · hr · °C로, 거푸집이 위치하고 있는 4개의 측면부의 외기대류계수는 5Kcal /m² · hr · °C로 가정하였다.

그리고, 타설되는 콘크리트의 초기온도는 외기온도와 동일한 32°C, 기타설 콘크리트의 초기온도는 상부에서 29°C, 하부에서 25°C로 선형분포하고 있는 것으로 하였다.

파이프 쿨링을 모델링하기 위해 필요한 파이프의 재료 및 유수대류에 관한 입력사항을 정리하면 표 3과 같다.

Table 3 Input data of pipe-cooling

Input terms	Value
Heat convectivity(Kcal /m ² · hr)	328
Unit weight(kg /m ²)	1000
Specific heat (Kcal /kg · °C)	1.0
Conductivity(Kcal /m · hr · °C)	0.554
Temperature(°C)	25
Volume(π^3 /hr)	1.08
Section area(m ²)	0.000798
Diameter of pipe(m)	0.0254

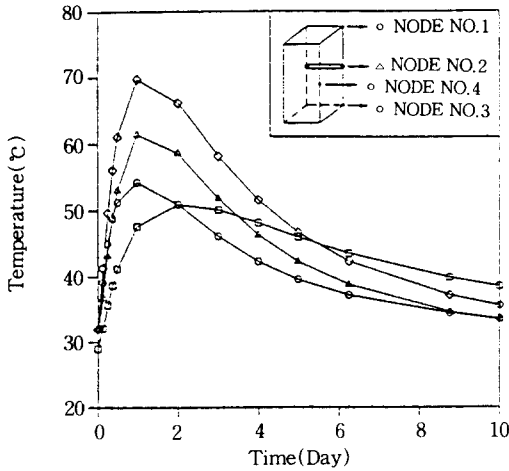
4.2 측정결과와 해석결과의 비교분석

이 연구에서 개발된 수화열해석 프로그램을 이

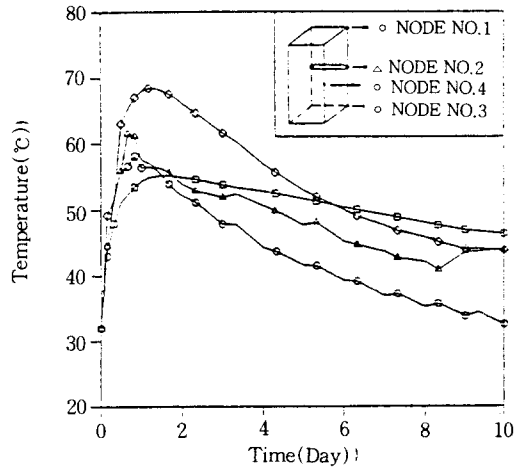
용하여 구한 Fig. 11의 section A(콘크리트 중앙부)의 온도이력 해석결과는 Fig. 12(a)와 같다. 그리고 해석에서 구한 동일한 위치에서의 실측결과는 Fig. 12(b)와 같다.

해석결과와 계측결과를 비교분석하면 다음과 같다. 절점 NO. 1의 계측결과를 보면, 실측치와 해석치의 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 최고 온도 발생시기는 타설 후 1일 경과한 시점과 10일 경과 후의 최종온도도 비슷한 결과를 보임을 알 수 있다. 파이프 주위의 온도를 실측한 절점 NO. 2의 해석치와 측정치를 비교하면, 최고온도 발생시기와 최고온도값은 비슷한 결과를 보임을 알 수 있다. 그러나 시간에 따른 온도하강율이 해석치의 경우 일정한 반면, 실측치의 결과는 다소 불안정한 경향을 보임을 알 수 있다. 이는 현장에서 파이프 쿨링시 유입온도의 관리가 일정하지 못했기 때문인 결과로 판단된다. 그리고 이 연구에서 고려한 파이프 쿨링시의 파이프 위치별 온도변화 예측을 위해 도입된 내부유동 이론의 신뢰성을 검증해 볼 수 있는 위치는 절점 NO. 2로서, 이 연구에서 적용된 내부유동의 이론이 온도예측을 수행함에 있어 합리적임을 알 수 있다.

기타설 콘크리트와 접하는 위치인 절점 NO. 3의 결과를 분석하면, 실측치의 최고온도가 해석치보다 약 3°C정도 크다. 그리고 최고점 이후의 온도 하강율도 실측치의 결과가 더 완만하게 떨어짐을 알 수 있다. 이는 하부암반층의 실제 온도분포가 해석시 가정한 온도분포와 일치하지 않기 때문인 것으로 사료된다. 절점 NO. 4의 결과를 비교하면, 최고온도의 발생시기는 비슷한 결과를 보이나 최고상승온도값은 해석치가 실측치보다 약 2°C정도



(a) Analytical results



(b) Measured results⁽⁵⁾

Fig. 12 Temperature of section A

크며, 최고온도값 이후 해석치의 온도하강율이 실측치보다 급하게 발생된다.

현장실측결과와 해석결과를 종합적으로 비교하여 보면, 각 지점의 최고온도 발생시기 및 최고온도값 등은 대체로 잘 맞지만, 온도하강 비율은 실측치가 완만하게 이루어짐을 알 수 있다. 이것을 개선하기 위해서는 첫째로, 콘크리트의 열전도계수 및 비열의 계수값을 정확히 알아야 할 것이며 둘째로, 기타설 콘크리트의 표면과 하부층의 초기 온도분포에 대한 정확한 가정이 필요하다. 마지막으로 수화열의 단열상승온도식을 나타내는 K 및 α 값의 정확한 실측값이 요구되며, 또한 타설온도의 변화에 따른 이들값의 변화를 정확히 예측할 수 있어야 해석상의 오차를 줄일 수 있을 것으로 본다.

그리고 개발된 수화열해석 프로그램을 이용하여 파이프쿨링이 실시되지 않았을 경우의 section A의 온도이력을 해석한 결과는 Fig. 13과 같다. 파이프 쿨링이 실시된 Fig. 12의 결과와 비교해 볼 때 최고상승온도가 클 뿐 아니라, 온도하강비율도 아주 완만함을 알 수 있다.

또한 파이프 쿨링이 실시될 때의 Fig. 9의 section B(콘크리트 가장자리) 온도이력 해석결과는 Fig. 14와 같다. 구조물 중앙부에 비하여 외기대류에 의한 열손실이 크므로, 온도의 증가값이 작음을 알 수 있다.

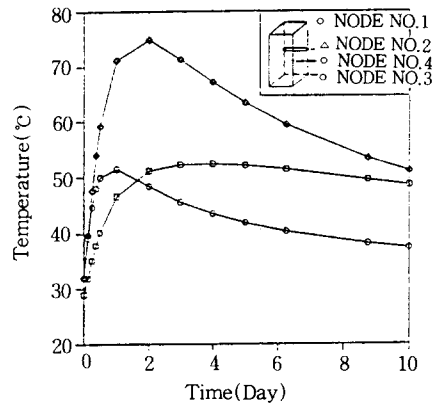


Fig. 13 Analytical results of section A without considering pipe-cooling

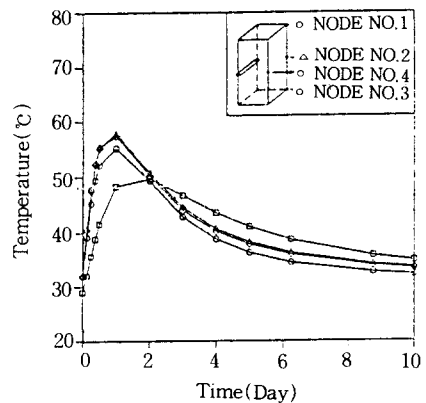


Fig. 14 Analytical results of section B

파이프 쿨링을 고려한 수화열 예측 프로그램 개발에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 파이프에 의한 유수대류 및 냉각효과를 고려하기 위해서 2절점 선요소(line element)를 이용하여 파이프를 모델링하였고, 이를 이용한 3차원 구조물에 대한 파이프 쿨링을 고려한 수화열 예측이 가능한 프로그램을 개발하였다

2) 개발된 프로그램은 파이프의 열적 특성값, 파이프의 형상 및 냉각유수의 유량과 유입온도의 변화가 수화열에 미치는 효과를 모사할 수 있다.

3) 이 프로그램은 냉각유수의 에너지 보존법칙(내부유동이론)을 이용하여 냉각유수의 온도변화를 해석할 수 있으며, 이에 대한 효과를 실측치와 해석치 결과를 비교해 본 결과 합리적인 경향을 보임을 알 수 있다.

4) 서해대교 교각 24의 온도 실측결과와 개발된 프로그램에 의한 해석결과를 비교해 볼 때, 최고 상승온도는 약 2°C 정도 차이를 보이고 해석결과치가 실측치보다 온도저하율이 큼을 알 수 있었다. 이와 같은 원인은 첫째로, 콘크리트 재료의 타설 온도에 따른 K , α 값의 변화 및 단열상승온도값의 정확한 실측이 이루어지지 않았고 둘째로, 기타설 콘크리트의 초기온도분포를 정확히 알 수 없었으며 셋째로, 콘크리트와 철근의 열특성계수를 정확히 알지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

1. 김진근, 이종대, "크리이프를 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력해석", 대한 토목학회논문집, 제14권 제4호, 1994. 7, pp. 771~781
2. 김진근, 김국한, "크리이프와 건조수축을 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력해석", 한국콘크리트학회 논문집, 제4권 제3호, 1992. 9, pp. 101~111
3. K. J. Bathe, Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982, pp. 407~418
4. W. Weaver & J. M. Gere, "Matrix Analysis of Framed Structures", Van Nostrand Reinhold Inc., New York, 1980, pp. 336~359
5. 최계식, 양주경, 최영돈, 최고일, "수화열 계측 및 파이프쿨링 시공 사례", 한국콘크리트학회 1994년도 가을 학술발표회 논문집(통권 제11집), 1994. 11, pp. 381~386
6. 社團法人 日本コンクリート工學協會, "마스콘크리트의 온도應力研究委員會報告書", 1985. 11, pp. 5~9
7. 小澤章三, "마스콘크리트의 初期ひび割れとその防止對策に關する研究(I)", 發電水力, No. 57, 1962. 3.
8. 塚山陸一, マツシフ 鐵筋コンクリートの溫度上昇ならひに溫度ひび割れに關する基礎研究", 東大學位論文, 昭和 49년 3월.
9. "마스콘크리트공학하트 프릭", 朝創書店, 1975.
10. L. C. Thomas, "Heat Transfer", Prentice-Hall International, Inc., New Jersey, 1992, pp. 463~502
11. 신희범, 김은겸, 김래현, 신치범, "FEM에 의한 Mass Concrete 구조물의 온도해석 소프트웨어 개발", 대한토목학회 1994년도 학술발표회 논문집(구조분과), 1994. 10, pp. 143~146

(접수일자 : 1995. 8. 21)