

# 매스콘크리트의 파이프 쿨링 효과

## A Study on the Effect of Pipe Cooling in Mass-Concrete

尹承權\*

金銀謙\*\*

金來鉉\*\*\*

愼治範\*\*\*\*

Seong Kwon Yoon, Eun Kyum Kim, Lae Hyun Kim, Chee Burm Shin

### ABSTRACT

The usual methods for the temperature control of mass-concrete structures include the use of low-heat cement, pre-cooling, or pipe-cooling. In order to control the heat of hydration of mass-concrete structures such as massive pier or anchor block, and mat foundation, the pipe cooling method is widely acceptable for practical use. In this paper, method of analysis using the Finite Element Method was applied to analyze the heat exchange on the field of three dimensional thermal conduction. The result of analysis well agreed with experimentally measurement data by "KUMATANI". The method of this analysis will be used widely to control the heat of hydration by the pipe cooling in mass-concrete.

### 1. 서론

최근, 토목·건축 구조물은 그 규모가 점차 방대해지고 있으며, 중요한 구조물이 콘크리트로 축조되는 기회가 증가하고 있다. 이들 구조물은 대부분이 매스콘크리트이며, 온도상승을 억제하여 온도 응력을 적극적으로 제어하는 방법으로서 파이프 쿨링이 사용되고 있다. 이와 같은 구조물은 대부분이 부배합의 콘크리트이며, 또 규모라든지 형상, 시공 환경 등이 근본적으로 댐과 다르기 때문에 적절한 쿨링 파이프의 지름, 배관망의 layout, 쿨링수의 수온이나 유속등을 합리적으로 선정할 필요가 있다.

파이프 쿨링의 냉각 효과를 평가하는 데 1940년대에 개발된 수법이 현재까지도 댐설계 및 시공에 거의 그대로 사용되고 있다. 그러나, 이 수법은 하나의 파이프가 가지고 있는 영역을 하나의 원주로 가정하고 있으며

파이프 내의 물을 고정온도 경계로서 취급하고 있고, 콘크리트 수화열의 발열과정을 고려하고 있지 않다는 등의 제약조건 때문에 실제의 냉각효과를 정확하게 평가한다고는 말할 수 없다.

본 연구에서는 이와 같은 배경을 바탕으로 매스콘크리트에서의 파이프 쿨링 효과를 3차원 熱傳導場에 있어서의 熱收支問題로 다루어 실제의 온도 분포를 합리적으로 추정할 수 있도록 하였다. 해석에 사용된 모델은 3次元 모델과 동등한 효과를 얻을 수 있는 擬似三次元 유한요소 모델을 제안하였다. 또한 본 해석 방법의 타당성을 입증하기 위하여 일본의 熊谷組의 파이프 쿨링 실험 결과를 이용하였다.

### 2. 溫度解析 모델

#### 2.1 온도해석 모델

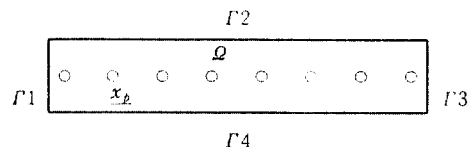


Fig. 1 Modeling of thermal analysis

\* 서울산업대학교 대학원 석사과정  
 \*\* 서울산업대학교 토목공학과 교수  
 \*\*\* 서울산업대학교 화학공학과 교수  
 \*\*\*\* 아주대학교 화학공학과 교수

지배방정식

$$PC_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) + \frac{dQ}{dt} + q_p$$

in  $\Omega$

.....(1)

경계조건

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial n} &= 0 \quad \text{on } \Gamma_1 \\ -k \frac{\partial T}{\partial n} &= h(T - T_{air}) \quad \text{on } \Gamma_2, \Gamma_3 \\ T &= T_g \quad \text{on } \Gamma_4 \end{aligned} \right\}$$

.....(2)

여기서  $q_p$ 는 냉각수에 의한 열 흡수율이며, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$q_p = A_p U_0 (T_w - T) \delta(x - x_p) \quad \dots\dots(3)$$

여기서,  $A_p$  : 쿨링파이프의 표면적

$T_w$  : 냉각수의 온도

$x_p$  : 파이프의 위치

$\delta(x)$  : Dirac delta function

냉각수의 열수지 방정식

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} + \bar{V} \frac{\partial T_w}{\partial L} = -\frac{4 D_0 U_0}{\rho_w C_w D_i^2} (T - t_w)$$

.....(4)

여기서,  $\bar{V}$  : 냉각수의 평균유속 ( $m/hr$ )

$\rho_w$  : 냉각수의 밀도 ( $kg/m^3$ )

$C_w$  : 냉각수의 열용량

( $kcal/kg \cdot k$ )

위 식에서 좌변의 제1항은 통상적인 파이프 쿨링 조건 하에서 제2항에 비하여 그 크기가 매우 작으므로 무시할 수 있다. 따라서 냉각수에 대한 열수지는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{V} \frac{dT_w}{dL} = -\frac{4 D_0 U_0}{\rho_w C_w D_i^2} (T - T_w) \quad \dots\dots(5)$$

## 2.2 의사 3차원 해석 모델

본 논문에서는 온도해석 모델로서 3차

원의 효과를 표현하면서 계산시간을 대폭적으로 단축시킬 수 있는 의사 3차원 모델을 제안하였다. Fig.2는 이 해석 모델을 보인 것이다. 이 그림으로 부터 쿨링파이프의 위치는 Slice면에서 하나의 점으로 표시되어 있으며, 이 점을 점점으로 하여 유한요소법에 의한 해석을 실시하였다.

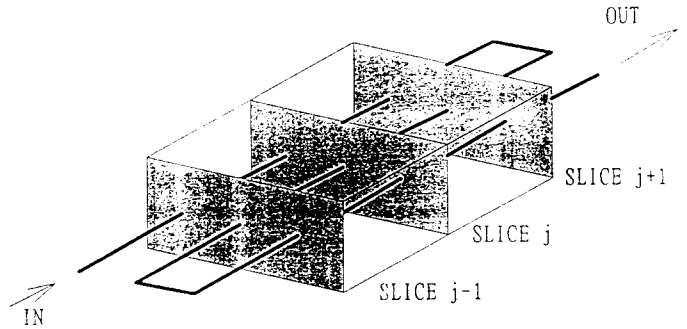


Fig. 2 Modeling of 3D thermal conduction field

식(5)에서 T의 변화가 크지 않다고 가정하여  $T = \bar{T}$ 라고 놓으면

$$\int_{T_{w,i}}^{T_{w,i+1}} \frac{dT_w}{T - T_w} = \int_0^{L_j} \frac{4 D_0 U_0}{V \rho_w C_w D_i^2} dL$$

이므로 다음 식이 성립된다.

$$T_{w,i+1} = T + (T_{w,i} - T) e^{-\beta L_j} \quad \dots\dots(6)$$

여기서,  $\beta = \frac{4 D_0 U_0}{V \rho_w C_w D_i^2}$  이며, T의 값은

$T_j$ 와  $T_{j-1}$ 의 산술 평균  $\frac{T_j + T_{j-1}}{2}$  를 사용하였다.

## 2.3 알고리즘

$T_{w,j}^i$  와  $T_j^i$ 를 각각 i번째 time-step

에서 j번째 slice의 냉각수와 콘크리트의 온도라 할 때,

$$T_{w,j+1}^{i+1} = A_1 T_{w,j}^i + A_2 T_j^i + A_3 T_{j+1}^i$$

$$A_1 = e^{-\beta L_j}$$

$$A_2 = A_3 = \frac{1}{2} (1 - e^{-\beta L_j})$$

의 방정식으로 (i+1)번째 time-step에서

각 slice의 냉각수 온도  $T_{w,i}^{i+1}$ 를 구하고, 이를 이용하여 각 slice 에서의 콘크리트 온도  $T_f^{i+1}$ 을 구한다.

### 3. 쿨링파이프 경계면에서의 열전달

쿨링 파이프의 열전도가 매우 좋다고 한다면 파이프 쿨링에 의한 냉각 효과는 콘크리트와 쿨링수와 사이의 열의 이동 현상이라고 생각할 수 있다. 즉, 파이프에 냉각수가 흐를 때 관벽면을 통하여 냉각수에 전달되는 열량  $q$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$q = \pi D_o \cdot L \cdot U_o \cdot \Delta T \dots \dots \dots (7)$$

여기서

$D_o$  : 쿨링 파이프의 외경 (m)

$L$  : 쿨링 파이프의 길이 (m)

$U_o$  : 총 열전달 계수 ( $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ )

$\Delta T$  : 쿨링파이프 내외부의 온도차 ( $^\circ\text{C}$ )

또한, 총 열전달 계수  $U_o$ 는 다음 식으로 구할 수 있다. 이 식은 냉각수의 대류 열전달 저항과 쿨링 파이프 벽면의 전도 열전달 저항이 모두 고려된 것이다.

$$U_o = \frac{1}{\frac{D_o}{D_i h} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k_w}} \dots \dots \dots (8)$$

여기서,

$D_i$  : 쿨링 파이프의 내경 (m)

$k_w$  : 쿨링 파이프 벽면의 열전도율

( $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ )

$h$  : 대류 열전달 계수 ( $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ )

따라서, 본 해석에 사용된 냉각수의 온도는  $10^\circ\text{C}$ 이고, 유속은  $15\text{l/min}$ 이므로, 직경 1inch 강관(Schedule No.40)을 통과할 때의 총 열전달 계수  $U_o$ 는 식(8)로부터 계산하면  $1,184 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ 의 값을 얻는다.

## 4. 해석 결과의 검증

### 4.1 검증용 시험체 모델

본 연구에서는 해석 결과의 검증용으로 서 日本 熊谷組 技術研究所에서 그들이 개발한 파이프 쿨링 해석 프로그램 검증용으로 계획하여 만든 실제 구조물인 RC슬래브 모델을 사용하였다.

Fig.3은 이들 슬래브 모델을 나타낸 것이다. 슬래브의 두께는 1m이며, 쿨링 파이프에 대한 배관 레이어아웃은 1m간격으로 하여 부재 두께의 중심 위치인 중앙 50cm에 배치하였다.

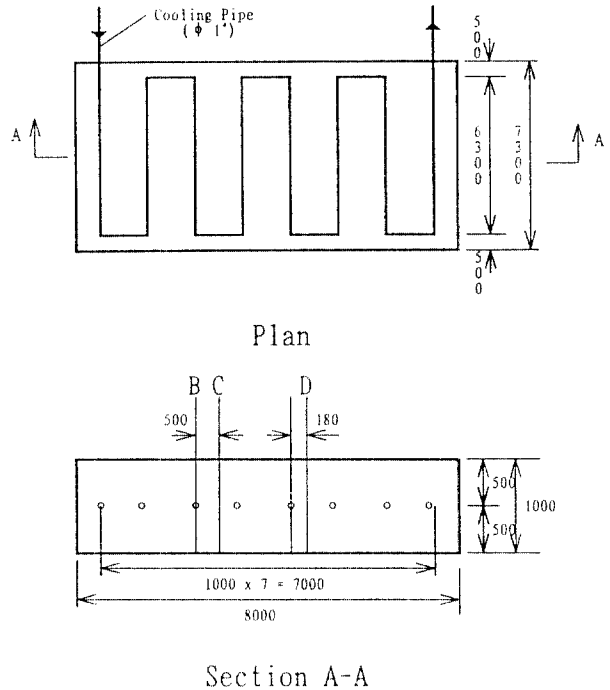


Fig. 3

쿨링수의 온도는 파이프의 입구와 출구에 연결된 에어 호스내에 설치한 열전대에 의하여 계측하였다. 쿨링 실시시간은 구조물 내의 중심 온도가 최고 온도에 도달때까지로 하였으며, 콘크리트의 타설면은 매트양생을 실시하였다.

콘크리트의 배합에는 단위시멘트량을  $266\text{kg/cm}^2$  을 사용하였으며, 타설시의 콘크리트 온도는  $30^\circ\text{C}$ 였다.

## 4.2 해석 조건

Table 1은 해석에 사용한 콘크리트의 열적 성질을 나타내고 있다. 또한, 해석에 사용한 열전달율은 현장의 사정을 고려하여

Table 1. Thermal Properties of Concrete.

Unit weight	2.321 ( $kg/m^3$ )
Specific Heat	0.235 ( $kcal/kg \cdot ^\circ C$ )
Thermal Conductivity	1.723 ( $kcal/m \cdot h \cdot ^\circ C$ )
Diffusivity of Heat	0.00316 ( $m^2/h$ )
Adiabatic Temperature Rise	$T = 33.16(1 - e^{-2.504 t})$

다음과 같이 정하였다.

$$0 \leq t < 24h : 11.60 (8.02) \text{ kcal}/m^2h^\circ C$$

$$24h \leq t < 42h : 4.80 (4.05) \text{ kcal}/m^2h^\circ C$$

$$42h \leq t : 4.80 (4.80) \text{ kcal}/m^2h^\circ C$$

여기서, ( )는 거푸집면의 열전달율을 표시한 것이다.

쿨링은 콘크리트 타설후 23시간 동안 실시하였다. 또한, 본 해석에 사용한 RC슬래브의 하면은 고정온도경계로 하였으며, 외기온에 대하여는 날씨의 변동을 고려하여 재령 5일까지 해석을 실시하였다.

## 4.3 실험치와 해석치의 비교

해석에 의한 파이프 쿨링의 유용성을 고찰하기 위하여 Fig. 3의 단면 B, C, D의 위치에 대하여 온도해석을 실시하였으며, 그 결과를 실험에 의한 계측치와 비교 검토하였다. Fig. 4는 슬래브 두께 중앙에 대한 콘크리트의 온도 이력치를 보인 것이다. 이 그림으로 부터 실측치와 해석치는 매우 잘 일치하고 있으며, 쿨링 파이프로부터의 수평 거리에 의한 온도 변화의 차이가 잘 표현되어 있음을 알 수 있다. 또한, 쿨링은 재령 23일에서 정지했지만 파이프로부터 180mm떨어진 위치에서의 온도는 주변으로 부터의 열의 유입에 의해 상승하고 있으며 12시간이 경과한 후 주변의 온도에 가까워 지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 쿨링 파이프로부터의 수평거리의 차이에 의한 재령별 콘크리트 연직단면 내부에 대한 온도 분포를 보인 것이다. 쿨링을 실시한 경우 콘크리트의 온도가 정상 상

대로 되었을 때 쿨링 파이프로부터 500mm 떨어진 위치에서의 본 해석에 의한 콘크리트 온도의 강하 효과는 약  $6^\circ C$  정도이며, 180mm 떨어진 곳의 온도강하는  $12^\circ C$  정도임을 알 수 있다. 또한, 이들의 해석 결과는 모든 단면에서 실험치를 잘 재현하고 있으

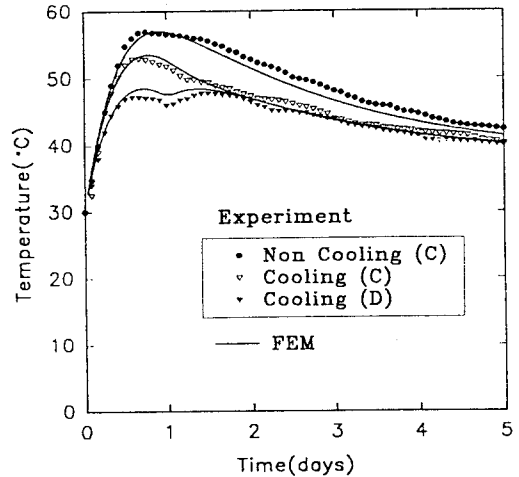


Fig. 4

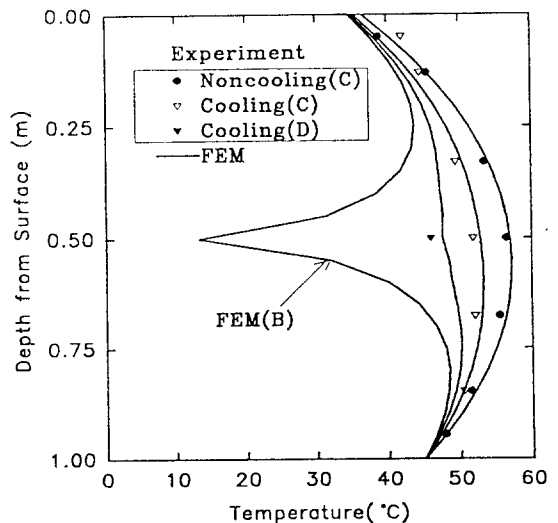


Fig. 5

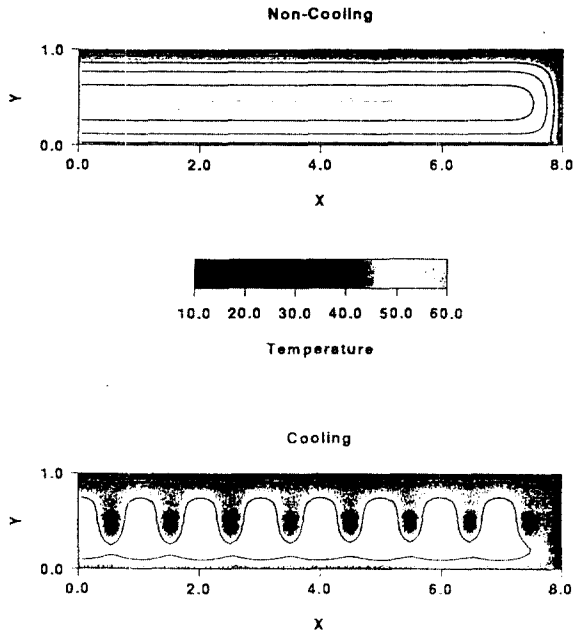


Fig. 6

며, 본 해석에 사용된 擬似 3次元 모델은 파이프 쿨링의 효과를 표현하는 데 매우 유효한 수단이 됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 파이프 쿨링을 실시하지 않은 경우와 파이프 쿨링을 실시한 경우에 대한 온도분포를 보인 것이다. 이 그림으로 부터 파이프 쿨링에 의한 수화열 저감 효과가 시각적으로 잘 표현되어 있음을 알 수 있으며, 이들의 결과는 앞에서 논의한 실험 결과를 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

매스콘크리트 구조물의 파이프 쿨링에 대한 효과를 해석적인 방법으로 표현하기 위하여 3차원 열전도장에 대한 열수지 문제를 擬似 3次元 해석수법을 도입하여 실제의 구조물로 부터 계측한 실험결과와 비교 검토 하므로써 다음과 같은 몇가지 결론을 얻었다.

1. 유한요소법에 의한 擬似 3次元 열전도장 문제를 해석하므로써 파이프 쿨링에 의한 매스콘크리트의 수화열 저감 효과를 표현할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

2. 파이프 쿨링에 의한 온도저감 효과는 실험치 및 해석치 모두 일치하는 결과를 얻었으며, 파이프와 파이프 중간지점의 온도는 파이프 쿨링을 실시하지 않은 경우에 비하여 대략 6°C 정도의 낮은 값을 보였다.
3. 파이프 쿨링을 실시하므로써 파이프에 가까운 콘크리트에는 큰 온도경사가 생기지만 쿨링을 정지한 후 12시간 정도 경과하면 거의 주변 온도에 가까운 값으로 회복하고 있음을 알 수 있다.

### <참고 문헌>

1. 日本土木學會, 매스콘크리트의 技術의 現狀과 動向, 콘크리트技術 시리즈 8, 1994. 10.
2. Proceeding of the International RILEM Symposium, "Thermal Cracking in Concrete at Early Ages", E & F N SPON, 1994. 10.
3. 佐藤英明, 佐谷靖郎, "매스콘크리트의 파이프 쿨링의 효과에 관한 연구", 日本土木學會論文集, 1986.8 pp111~120
4. B.S Petukhov, "Advances in Heat Transfer", (J.P. Hartnett and T.K. Irv inc, eds.), Academic Press, New York, pp504~564, 1970.