매스 콘크리트 구조물의 파이프 쿨링에 의한 냉각효과

The Cooling Effect of Pipe Cooling in Mass Concrete Structures

오병환* 신경준** 차수원***
Oh, Byung-Hwan Shin, Kyung-Joon Cha, Su-Won

ABSTRACT

Cracking of concrete is one of the main issues of structural design next to ensuring the load-bearing capacity. Thermal cracking is a recurring concern in the production of concrete structures in particular when large, massive structures are considered. Thremal stresses arise from the differential temperature distribution either within s sturcture or between newly cast sectons and adjoining older parts. There are many different methods of reducing thermal stresses. A method often used for reducing temperature within a structure, is to cool the inner core with embedded cooling pipes.

In this study, finite element method is employed for thermal analysis of concrete structures. To calculate water temperature variation in pipe, the conservation of thermal energy in internal flow was adopted. The cooling effect of pipe cooling is studied with several factors like convective coefficient, water temperature, concrete heat characteristics.

1. 서 론

최근 들어 대규모의 대규모 구조물들의 시공이 많아지고 있다. 이와 같은 대형 구조물을 건설하기 위해서는 매스 콘크리트의 시공이 필연적으로 따르게 된다. 매스 콘크리트 구조물은 내부에서 발생하는 수화열이 과도할 경우 심각한 열응력이 발생하여 균열을 유발할 수 있다. 이러한 수화열에 의한 영향을 감소시키는 방법중의 하나로써 파이프 쿨링이 있다.

본 연구에서는 파이프쿨링에 의한 냉각 효과를 고려할 수 있는 수화열 해석 프로그램을 이용하여, 파이프쿨링에 의한 수화열 감소효과에 대한 연구를 수행하였다.

2. 유한요소 정식화

2.1 콘크리트의 발열과정

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 서울대학교 토목공학과 대학원
*** 정회원, 서울대학교 토목공학과 대학원

콘크리트의 발열과정을 모델링 하기 위하여 식(1)과 같은 최대 온도 상승량와 반응속도에 따른 단열 온도 상승곡선을 사용하였다.

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

여기서, T : 시간 t 일에서의 단열온도 상승량(℃)

K : 최대상승온도(℃)

a : 반응속도 , t : 시간 (일)

2.2 파이프 요소의 모델링

파이프 쿨링을 시행하는 경우, 콘크리트 구조물 속에 파이프가 매설되고, 그 속으로 낮은 온도의 유체가 지나가면서 열 교환이 일어나서 수화열로 인한 온도상승을 감소시켜 주게 된다. 이때, 열교환이 일어나는 형태는 파이프 표면과 통과하는 유체사이의 대류에 인한 것이라고 할 수 있다. 따라서, 유체와 접하고 있는 파이프 안쪽면에서 대류로 인한 열전달 현상이 생기는 것으로 모델링을 한다. 파이프 속을 통과하는 유체는 수화열에 의하여 온도가 상승하게 된다. 따라서, 파이프 냉각을 모델링 하기 위해서는 파이프 속의 유체의 온도변화를 계산하는 식을 도입해야 한다.

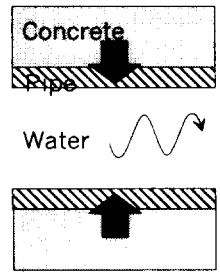

그림 1.
Thermal Equiliblium

파이프내의 유동과 같이 유체가 벽면에 의해 둘러싸여진 유동을 내부유동이라 하며, 에너지 평형을 적용함으로써 관의 위치에 따른 평균온도의 변화를 알수 있다. 그림.1과 같이 주어진 관에서 유체는 일정 유속 $\dot{m}$ 으로 이동하며, 내부 표면에서 대류 열전달이 일어난다. 전형적으로 축방향 전도에 의한 열전달과, 유체의 운동 및 포텐셜에너지는 무시될 수 있다. 따라서, 주된 영향은 열에너지 변화와 유동일에 관한 것 뿐이다. 압력 구배가 대단히 크지 않은 경우에 유동일은 유체를 운반하기 위하여 수행되며, 내부유동에서 유체와 관사이의 총 열전달량은 식(2)와 같다.

$$q_{conv} = \dot{m} c_p (T_{m,o} - T_{m,i}) \quad (2)$$

또한, 유체와 관사이의 대류에 의해서 전달되는 열량은 식(3)과 같다.

$$q_{conv} = h_p A_s (T_s - T_m) \quad (3)$$

여기서, h_p : Pipe의 대류계수 , A_s :관표면적 , T_s :관표면온도, T_m :유체온도

열전달량과 대류 전달량이 같으므로 방정식을 풀어서 전개하면 다음과 같다.

$$(\frac{h_p A_s}{2} - \dot{m} c_p)\, T_{m,i} + (\frac{h_p A_s}{2} + \dot{m} c_p) T_{m,o} - h_p A_s T_s = 0 \quad (4a)$$

$$(\frac{h_p A_s}{2} - \dot{m} c_p)\, T_{m,i} + (\frac{h_p A_s}{2} + \dot{m} c_p) T_{m,o} - \frac{h_p A_s}{2}(T_{s,i} + T_{s,o}) = 0 \quad (4b)$$

따라서, 파이프 열평형 방정식은 미지의 값인 콘크리트의 온도, 냉각유체의 온도에 의한 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$[A]\{T_c\} + [B]\{T_w\} = \{0\} \quad (5)$$

여기서, $\{T_w\}$: 유체의 온도,

$\{T_c\}$: 콘크리트의 온도

2.3 차분화

열전달 문제를 유한요소 해석을 이용하여 수행하기 위해서, 열전도 지배방정식에 Variational formulation을 적용한 후 전체 좌표계의 절점 온도에 대하여 각각의 요소를 Assemble하면 식(6)과 같다.

$$[C]\{\dot{T}\}+[K]\{T\}=\{R\} \tag{6}$$

$$[C] = [C]_{con}$$

$$[K] = [K]_{con}^{cond} + [K]_{con}^{conv} + [K]_{pipe}^{conv}$$

$$\{R\} = \{R_{heat}\} + \{R_{conc}^{conv}\} + \{R_{pipe}^{conv}\}$$

콘크리트의 모델링에는 8절점 3차원 SOLID요소를 사용하였고, 파이프의 모델링에는 1차원 2절점LINE요소를 사용하였다. 시간에 대한 일계 도함수의 근사값을 얻기 위한 방법으로 두 개의 연속적인 시간 단계에서 각 단계에서의 변수를 선형보간에 의해 가중평균해서 근사 시키는 방법을 보편적으로 사용한다.

$$[\hat{K}]\{T\}_{n+1} = \{\hat{R}\} \tag{7}$$

여기서,

$$[\hat{K}] = [C] + \alpha\Delta t_{n+1}[K]$$

$$[\hat{R}] = ([C] - (1-\alpha)\Delta t_{n+1}[K])\{T\}_n + \Delta t_{n+1}(\alpha\{R\}_{n+1}+(1-\alpha)\{R\}_n)$$

3. 파이프에 의한 냉각효과

외부 열출입을 제외한 파이프 냉각에 의한 온도 하강 효과를 알아보기 위하여, 그림(2)와 같은 열 출입이 없는 단열상태의 구조물에서 파이프쿨링을 시행 한 경우와 시행하지 않은 경우를 비교하였다.

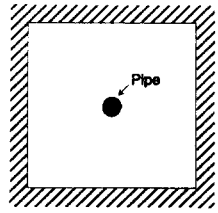

그림 2
Analysis Modeling

콘크리트와 냉각수와의 열교환에 관계된 식으로 식(8)(9)이 있다.

$$q = \dot{m} c_p (T_{wat,out} - T_{wat,in}) \tag{8}$$

$$q = A_s h (T_{con} - T_{wat}) \tag{9}$$

식(8)은 물의 온도가 상승하는 양에 관계가 있는 식이다. 비열은 정해져 있는 상수이므로, 냉각수의 온도 상승량은 질량이동속도에 반비례하게 된다. 또한, 미소길이의 파이프만을 고려하기 때문에, 물의 온도가 일정하다는 가정을 하고 해석을 수행하였다.

식(9)는 콘크리트의 온도가 하강하는 양에 관계된 식이다. 콘크리트의 냉각효과는 냉각유체와 파이프의 접촉면적, 대류계수, 그리고 콘크리트와 물의 온도차이의 곱에 비례한다. 따라서, 대류계수와 접촉면적에 따른 냉각효과에 대한 해석을 수행하였으며, 다음으로 콘크리트의 발열특성, 냉각수의 온도에 따른 냉각효과를 분석하였다.

3.1 대류계수, 접촉면적

냉각효과는 대류계수와 접촉면적의 곱에 비례하게 된다. 미소길이의 원형단면 파이프를 가정할 경우 냉각효과는 대류계수와 파이프지름의 곱에 비례하게 된다. 따라서, 특정 콘크리트, 냉각수에 대하여 대류계수와 파이프지름의 곱($h \cdot d$)의 값에 따라 최대 온도 상승량을 비교하였다.

h는 파이프 내에서의 대류계수로서 실험에 의해서 구하거나, 또는 일반적으로 알려져 있는 열전달 공식을 이용하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 열전달 공식을 사용하여 대류계수를 계산하였다.

ACI Practice 207.4R에 따르면 직경 25.4㎜, 관두께 1.5㎜의 강관을 이용하여 성공적으로 파이프냉각을 수행한 경우가 있으며, 냉각관의 물의 흐름이 냉각에 유리한 난류거동을 하도록 난류유속의 4배 정도의 유속을 권장하고 있다. 관내의 내부유동에서 레이놀즈수가 2300 이면 난류유속으로의 천이영역, 4000이상이면 난류유속이다. 또한, 레이놀즈수 4×2300, 4×4000인 경우에 대한 유속은 0.41m/sec, 0.71m/sec 이므로 Dittus-Boelter식(10)를 이용하여 대류 열전달 계수값을 구해보면 1680, 2617 Kcal/m^2 · hr · ℃ 의 값을 가진다.

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0.023\, Re_d^{0.8}\, \mathrm{Pr}^{0.4} \qquad (10)$$

여기서, 적용조건은 $0.7 \le \mathrm{Pr} \le 160$

$$Re = \frac{\rho v_m D}{\mu} \ge 10,000$$

$L/D \ge 10$ 인 경우.

일본 콘크리트 공학협회 보고서에 의하면, 콘크리트의 파이프 냉각시 유수와 콘크리트의 열전달을 나타내는 유수 대류계수는 냉각수의 속도에 따라 변하며, 유속이 20~60cm/sec인 경우 아래의 식(11)을 추천하고 있다. 이 경우 h_w의 값은 138~328 의 값을 보인다.

$$h_w = 4.75u + 43.0 \ (\ \mathrm{Kcal/m^2 \cdot hr \cdot ℃}\ ) \qquad (11)$$

여기서, u : 유속 cm/sec

기타 여러 논문을 살펴볼 경우 표.1과 같은 값들을 이용하여 해석을 수행한 것을 알수 있다.

표 1 Convective heat transfer coeff. and pipe diameter

h(Kcal/m²·hr·℃)	D(m)	h·D	비고
328	0.025	7.34	
275	0.025	6.88	
386	0.04	15.44	
32	0.1	3.2	Air Cooling

또한, 일반적으로 사용되는 유속은 아니지만, 레이놀즈수가 4000보다 작을 경우에(25㎜ 파이프의 경우 0.18m/sec 보다 유속이 작을 경우) 층류 흐름을 보이게 된다. 이 경우 83 Kcal/m^2 · hr · ℃ 의 대류 열전달 계수값을 가지게 된다.

따라서, 25㎜ 파이프의 경우 대류 열전달 계수 값은 유속에 따라서 130~2617 까지의 다양한 값을 가지며, 층류유속의 경우 83 정도의 값을 가진다. 그러므로, 냉각효과에 직접영향을 주는 상수인 $h \cdot D$ 값은 3.25에서 65.43 까지의 값을 가지며, 층류유속인 경우 1.85의 값을 가진다.

파이프 벽면의 열전도에 의한 영향을 고려하기 위하여 총합 열전도 계수를 사용한다. 외경 25.4㎜, 두께 1.5㎜ 파이프에 대해, 총합 열전달 계수값(식.12)을 대류열전달계수와 파이프열전도율에 따라 표.2에 나타내었다.

$$h_i = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{r_i}{k_{pipe}} \ln \frac{r_o}{r_i}} \qquad (12)$$

여기서, h : 냉각수의 대류열전달계수, r_i : 내경, r_o : 외경, k_{pipe} : 파이프의 열전도계수

표 2 Oveall heat transfer coefficient.

Convective coeff. (kcal/h·m²·℃)	Carbon Steel (k=41.5 kcal/h·m·℃)	Stainless Steel (k=14.0 kcal/h·m·℃)	PVC (k=0.33 kcal/h·m·℃)
100	96.7	90.9	19.0
300	272.3	230.5	21.7
1000	746.7	498.6	22.9
2000	1191.6	664.2	23.2

파이프의 벽면의 열전도에 의한 값까지 고려하면 h의 값은 전체적으로 감소하게 되며, PVC 파이프인 경우 h의 값은 18.0으로써, 이때의 $h \cdot D$값은 0.5 이다. 또한, h의 값이 1191.6인 경우 $h \cdot D$의 값은 29.79 이다. 따라서, $h \cdot D$값에 따른 파이프 쿨링의 냉각 효과를 알아보기 위하여 $h \cdot D$ = 0.5 , 2 , 3 , 8 , 80 에 대해서 해석을 수행해 보았다.

해석 수행은 단열상태의 2m × 2m 의 구조물의 중앙에 파이프가 지나가는 경우를 가정하였으며, 콘크리트 타설 온도 35℃ , 냉각수 온도 25℃ , 단열온도 상승식 K= 60 , α = 2.0 의 조건을 사용하였다. 그림.3 에 단면에서의 최대온도 분포를 나타내었다. 파이프 부근에서의 최대온도는 파이프 쿨링을 실시함으로써 약 25~47℃까지 내려갔다. 그림.3에서 볼 수 있듯이, $h \cdot D$의 값이 어느 정도 이상이면 냉각효과가 크게 차이가 나지 않았다. 파이프에 의한 대류 열류량이 어느 정도 이상이 되어도 콘크리트의 열전달 계수값이 작기 때문에 콘크리트에서 빠져나가는 열량이 더 이상 커지지 않음을 알 수 있다. 따라서, 동일한 파이프 단면과 냉각수 유속에 대하여 문헌에서 사용한 대류계수의 값과 열전달 공식에 의한 대류 계수값이 차이가 큰 경우라도, 두 경우의 실제 해석치는 거의 동일할 것이라 예상할 수 있다. 또한, 파이프재질을 열전도율이 작은 PVC를 쓸 경우 파이프가 지나가는 부분의 최대온도는 상승하지만, 파이프에서 떨어진 부근의 최대온도에는 많은 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 그리고, 냉각수를 이용한 파이프쿨링시 냉각효과를 높이기 위해서 25㎜보다 더 큰 직경의 파이프를 써도 냉각 효과는 차이가 없음을 알수 있다.

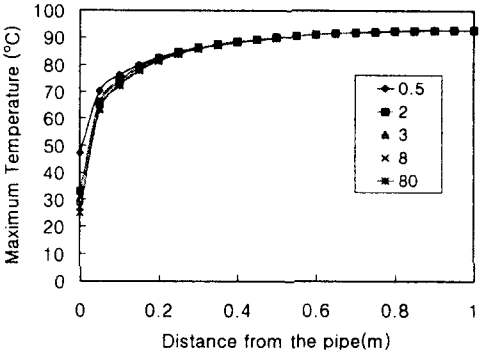

그림 3 Maximum Temperature for h · D

3.2 냉각수 온도의 변화

냉각수의 온도에 따른 냉각효과를 분석하기 위하여 타설온도 30℃, 단열온도 상승식 K= 60 , α = 2.0 일 때 냉각수의 온도가 20 , 30 ℃인 경우에 대하여 해석을 하면 그림.4와 같다. 파이프부근에서는 냉각수온도에 따른 콘크리트 최대온도의 차이가 생기지만 밖으로 벗어날수록 온도차가 감소함을 알수 있다.

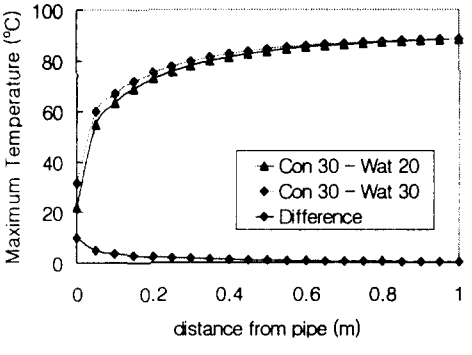

그림 4 Maximum Temperature for water temperature

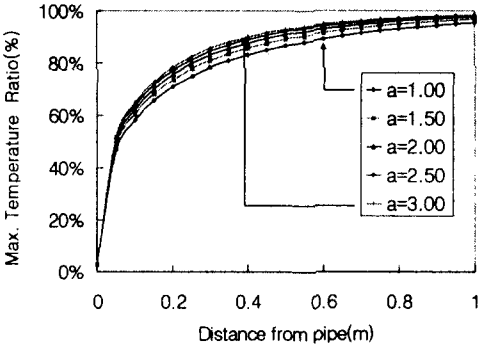

그림 5 Maximum Temperature ratio of concrete

3.3 발열특성과 냉각수온도

파이프쿨링에 의한 냉각효과를 수온에 대한 최대온도상승비의 비(식.13)로 나타내면 타설온도, 최대상승온도, 냉각수 온도의 값에 상관없이 비교적 일정한 값(±2%)을 가지게 된다. 그러나, 냉각수의 온도가 타설 온도보다 높은 경우 오차가 약간 커진다.

수온에 대한 최대온도상승비

$$= \frac{\text{냉각시 최대온도} - \text{냉각수 온도}}{\text{미냉각시 최대온도} - \text{냉각수 온도}} \qquad (13)$$

따라서, 반응속도와 $h \cdot D$ 의 두가지 값으로 파이프쿨링에 의한 콘크리트의 냉각효과를 나타낼 수 있다. $h \cdot D$ 의 값은 일반적으로 쓰여지는 값들에 대해 거의 동일한 냉각효과를 나타낸다. 그러므로, $h \cdot D$ 는 일정한 값을 사용하고, 반응속도에 대해서 해석을 수행하였다. 단열상태의 구조물에서, 파이프 한 개에 대해서 그림.5와 같은 온도하강효과가 있음을 알수 있다.

4. 결론

(1) 콘크리트의 모델링을 위하여 8절점 Solid 요소를 사용하였다. 또한, 파이프쿨링 요소는 2절점 Line요소를 사용하였으며, 냉각수의 온도변화를 계산하기 위하여 내부유동 유체의 에너지 평형을 사용하였다.

(2) 대류계수와 파이프지름의 곱(h · D)에 따라 냉각효과를 계산할 수 있었으며, 어느 정도 이상의 값에 대해서는 거의 동일한 냉각효과를 가진다. 이것은, 파이프에 의한 대류 열류량이 어느 정도 이상이 되어도 콘크리트의 열전달 계수값이 작기 때문에 콘크리트에서 빠져 나가는 열량이 더 이상 커지지 않기 때문이다.

(3) 파이프 쿨링시 직경 25㎜ 이상의 파이프를 사용하여도 냉각효과는 증가하지 않음을 알수있다.

(4) 열전도율이 낮은 PVC파이프를 사용한 경우 파이프부근의 온도는 상승하지만, 파이프에서 조금만 떨어져도 최대온도에는 거의 영향을 미치지 못함을 알수 있다.

5 참고문헌.

1. 김진근외, "파이프쿨링을 고려한 수화열 해석에 관한 연구", 최종보고서, 한국과학기술원, 1995
2. 이태식외, 열전달 , 희중당, 1992
3. ACI 207.4R-93, "Cooling and Insulation Systems for Mass Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, 1993
4. H.Hedlund, P.Groth and J.E. Jonasson, "Reduction of Thermal Stresses in Structures with Air-Cooling", Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, E&FN Spon, 1994, pp.433-440
5. J.N.Reddy, D.K.Gartling, The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics, CRC Press, 1994