

파이프 쿨링을 고려한 수화열 해석기법에 관한 연구

Thermal Stress Analysis of the Heat of Hydration Considering Pipe-Cooling

김진근* 김국한** 최계식*** 양주경*** 최고일****
Kim, Jin Keun Kim, Kook Han Choi, Kei Sik Yang, Joo Kyoung Choi, Ko Il

ABSTRACT

The heat of hydration of cement causes the internal temperature rise and volume change at early age, particular 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 has been widely used. One of these techniques is pipe-cooling which is considered in this study.

The objective of this paper is to develop finite element program which is capable of simulating the temperature history and the thermal stress considering pipe-cooling, creep and the modified elastic modulus due to maturity effect.

1. 서론

콘크리트는 경화과정에서 시멘트의 수화 발열에 의한 온도의 상승으로 인하여 강도의 발현을 비롯하여 콘크리트의 제성질에 영향을 미치게 되며 특히 내외부의 온도차에 의하여 콘크리트의 균열이 발생하게 된다. 이와같은 수화열에 의한 온도증가는 내부온도의 발산이 어려운 매스콘크리트 구조물의 경우 수화열에 발생온도가 증가할 뿐 아니라, 수화열에 의한 온도가 소산될 때 내외부 콘크리트의 온도차로 인하여 균열이 발생할 소지가 증대된다. 특히 최근의 콘크리트의 고강도화도 인하여 단위시멘트의 사용량이 많아지고 있고, 또한 건설 구조물의 대형화·특수화 추세로 인하여 수화열에 의한 균열피해가 현장시공의 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 얼음물이나 사용골재를 냉각시키는 Pre-cooling공법과 파이프관에 냉각수를 유입시키는 Pipe-cooling공법이 많이 사용되고 있다. 수화열에 의한 온도증가를 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 개선효과를 기대할 수 있을 것이다.

따라서 이 연구에서는 파이프 쿨링공법을 실시할 경우의 수화열 저감효과 및 균열예방 효과 등을 효율적으로 예측할 수 있기 위하여, 유한요소법을 이용하여 수화열에 의한 온도이력 및 온도응력 이력을 모사할 수 있는 프로그램을 개발하는 것이 주된 연구 목적이다.

* 한국과학기술원 토목공학과 교수

** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*** 대림산업(주)

**** 한국도로공사

2. 재료의 모델링

2.1 수화열에 대한 모델링

콘크리트는 사용된 골재 및 시멘트의 종류와 양, 그리고 단위수량에 따라 서로 상

이한 열적성질을 가지므로 수화열에 의한 온도상승을 추정하기 위해서는 열적특성계수를 실험에 의해 측정하여야 하지만, 일반적으로 콘크리트의 비열(C)은 0.27~0.31 Kcal/kg·°C, 열확산율(μ)은 3.02~3.71×10⁻³ m²/hr 및 열전도율(k)은 2.15~2.51 Kcal/m·hr·°C의 범위에 있다.

외기와의 경계면에서 열전달을 나타내는 외기대류계수(h_a)는 풍속에 따라 변화하며, 풍속이 2~3 m/sec인 경우 大森川댐의 실험에서는 12~13 Kcal/m²·hr·°C, 山川의 실험에서는 8~11 Kcal/m²·hr·°C라고 보고되고 있으며, 小澤은 이들의 결과를 분석하여 아래의 식(2.1)을 제안하고 있다.

$$h_a = 9.60 + 1.12v \quad (2.1)$$

여기서, v : 풍속 (m/sec)

일본콘크리트공학협회 보고서에 의하면, 콘크리트의 파이프 쿨링시 유수와 콘크리트의 열전달을 나타내는 유수대류계수 (h_w)는 냉각수의 속도에 따라 변화하며, 유속이 20~60 cm/sec일 경우 아래의 식(2.2)를 추천하고 있다.

$$h_w = 4.75 u + 43.0 \quad (2.2)$$

여기서, u : 유속 (cm/sec)

단열온도 상승식은 이론식으로는 유도하지 못하고 실험식으로 산정한다. 통상적으로 수화 휴지기를 고려하지 않는 식(2.3)과 같은 형태를 사용하고 있다.

$$T = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (2.3)$$

여기서, T는 단열온도 상승량(°C)이고, t는 재령(day)이다, 그리고 K는 최대 상승온도(°C), α는 반응속도들은 실험에 의하여 구하여 진다.

일반적으로, 식(2.3)의 단열온도 상승식의 K, α 값은 塚山の 실험식과 시멘트수화열에 관한 실험식을 이용하여 결정한다.

2.2 응력 해석에 관한 모델링

수화열에 의한 온도응력을 구하기 위해서 이 연구에서 고려한 조건은 다음과 같다.

첫째, 大崎의 모델식과 Bangash와 England의 모델식을 이용하여 콘크리트의 숙성도(maturity)개념을 도입하여, 콘크리트 양생온도에 따른 콘크리트 압축강도, 인장강도 및 탄성계수의 변화를 고려하였다.

둘째, ACI 모델식을 이용하여 콘크리트의 크리이프 영향을 고려하였으며, 크리이프의 수치해석시 중첩법에 의한 단계적 해석방법을 이용하였다.

3. 유한요소법에 의한 열전달 해석

3.1 열전도 구성 방정식

고체 매질내의 임의 시간 t에서의 온도 분포를 T(x,y,z,t)로 나타낼 때 온도의 변화율에 의해 열흐름이 일어나게 된다. 일반적으로 온도는 x, y, z 방향으로 모두 변하므로 각 방향으로 열유속이 존재하게 된다. Fourier법칙을 이용한 열전도 구성방정식은 식(3.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_i = -k_i \frac{\partial T}{\partial i} \quad q_{i+di} = q_i + \frac{\partial q_i}{\partial i} di \quad (i=x, y, z) \quad (3.1)$$

여기서, q_i: 단위시간·면적당 열흐름

k_i: x, y, z방향의 열전도계수

T: 온도(°C)

그리고, 물체 내부에서의 전도에 관한 열전도 평형방정식을 구성하면 식(3.2)와 같다.

$$\sum_i Q_i + Q^B = \sum_i Q_{i+di} \quad (3.2)$$

여기서, Q_i = q_i · dA_i Q_{i+di} = q_{i+di} · dA_i

$$Q^B = q^B \cdot dx dy dz$$

식(3.1)과 식(3.2)를 정리하면, 식(3.3)과 같은 열전도 평형방정식으로 재구성할 수 있다.

$$\sum_i \frac{\partial}{\partial i} (k_i \frac{\partial T}{\partial i}) + q^B = 0 \quad (3.3)$$

3.2 경계조건 및 초기조건

앞의 식(3.3)에 의한 열흐름 평형방정식은 열의 전도만을 포함하고 있으므로, 외기대류 및 파이프 유수에 의한 유수대류의 조건은 식(3.4), 식(3.5)를 이용하여 경계조건을 구성하여 열의 흐름을 표현하여야 한다

$$q^a = k_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{Sa}} = h_a (T_\infty - \theta^S) \quad (3.4)$$

여기서, q^a : 외기대류에 의한 열흐름

h_a : 외기 대류계수

θ^S : 대류경계절점의 온도(℃)

T_∞ : 외기의 온도

$$q^w = k_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{Sw}} = h_w (T_w - \theta^S) \quad (3.5)$$

여기서, q^w : 냉각대류에 의한 열흐름

h_w : 냉각유수의 대류계수

θ^S : 냉각대류 경계절점의 온도

T_w : 냉각수의 온도

위의 식(3.3)의 열전도 평형 방정식과 식(3.4), 식(3.5)의 경계조건 및 초기조건을 Gauss의 부분적분공식과 변분법(Variation formulation)을 이용하여 유한요소법으로 해석 가능한 행렬방정식 형태로 만들면 식(3.6)과 같다.

$$[C] \{ \dot{T} \} + [K] \{ T \} = \{ Q \} \quad (3.6)$$

$$[C] = [C^{SOL}] + [C^{PIPE}]$$

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

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

위의 식(3.6)을 구성하는 9개의 항목은 콘크리트와 파이프의 열용적, 열전도, 외기대류, 유수대류 및 콘크리트의 수화발열량에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 사용된 형상함수(shape function:N)와 변형도-절점행렬(strain-displacement matrix:B)의 좌표계의 차원에 따라 해석 가능한 차원이 결정된다. 이 연구에서는 콘크리트는 3차원 Solid Element, 파이프는 1차원 Line Element로

유한요소 프로그램을 작성하였다.

3.3 시간영역에서의 차별화

시간 영역에 대해 식(3.6)의 해를 구하기 위한 해법은, 시간 간격의 선택에 관계 없이 비교적 안정된 해를 가지는 Newmark- β 방법을 사용하였다.

3.4 내부유동(internal flow)의 정식화

파이프쿨링을 실시할 경우, 파이프수는 관내를 유동하면서 초기유입시의 온도보다 증가하게 된다. 이와같은 유수의 온도증가량은 콘크리트의 수화열 온도증가량, 파이프의 배근길이 등에 따라 달라지며, 또한 파이프의 위치마다 시간에 따라 각기 다른 온도를 보이게 된다. 이와같은 유수의 내부유동에 의한 온도변화는 파이프관으로 부터 공급되는 열량과 유수에 의해 냉각되는 열량은 동일하다는 에너지 보존법칙을 이용하여 해석할 수 있다.

즉 그림 3.1의 개념도를 이용하여 설명하면 다음과 같다. 유입구와 유출구의 거리가 L이며, 유입구 및 유출구의 파이프관의 온도는 $T_{s,i}$ $T_{s,o}$ 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.

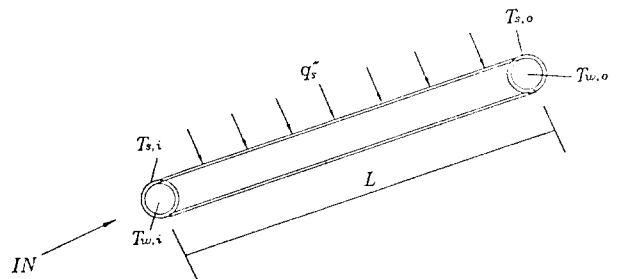


그림 3.1 내부유동의 개념도

즉 Newton의 냉각법칙에 의하여 파이프 관 주위로 공급되는 열량(q_s'')을 나타내면 식(3.7)과 같다.

$$q_s'' = h_w \cdot \left(\frac{T_{s,i} + T_{s,o}}{2} - \frac{T_{w,i} + T_{w,o}}{2} \right) \quad (3.7)$$

그리고 대류 열전달식에 의하여 유수에 의해 냉각되는 열량(q_{cov})을 나타내면 식(3.8)과 같다.

$$q_{cov} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{w,o} - T_{w,i}) \quad (3.8)$$

여기서, \dot{m} : 단위시간당 물의 유입량

c_p : 물의 비열

에너지 보존법칙에 의하여 식(3.7)과 식(3.8)은 동일함을 이용하면, 미지의 1개의 온도값을 계산할 수 있다.

4. 예제 해석 및 결과분석

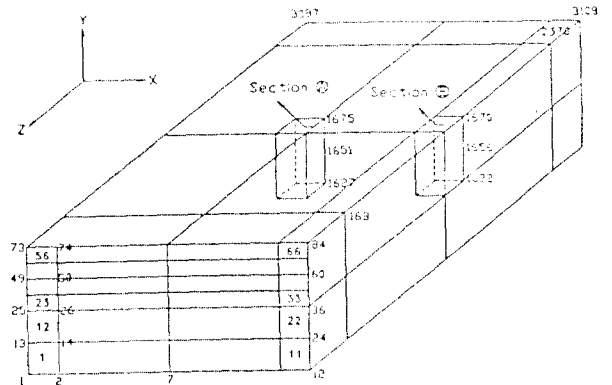
이 연구에서 개발된 해석 프로그램의 결과를 검증하기 위하여, 서해대교 기초부의 온도계측결과와 비교검토하였다. 서해대교 Pier 24번의 1회 타설 콘크리트 치수는 가로 11m, 세로 22m, 높이 2m이며, 높이의 중앙부에서 파이프 쿨링을 실시하였다. 해석시 하부층의 온도전달에 의한 효과를 모델링하기 위하여 콘크리트 타설위치 아래로 2m 깊이까지 기타설 콘크리트 구조로 가정하였다.

수화열 프로그램을 해석하기 위한 콘크리트의 Mesh 모델링은 그림 4.1(a)와 같이 구성하였으며, Solid Element의 요소수는 2376개이며, 파이프에 의한 유수대류 및 냉각효과를 이상화하기 위한 Line Element의 모델링은 그림 4.1(b)와 같이 구성하였다. Line Element의 번호부여는 Solid Element의 최종번호의 다음부터 실시하였으며, 또한 Line Element 번호부여 순서는 유수가 유입되는 방향으로 실시하였다. Line Element의 수는 214개이며, 따라서 총요소수는 2590개이다. 그리고 요소를 형성하는 절점의 수는 총 3108개이다.

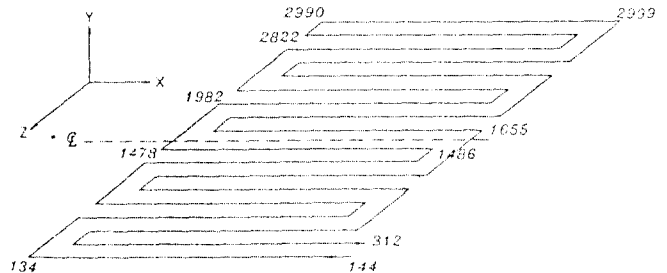
대상 구조물의 수화열에 의한 온도이력을 계산하기 위해 가정된 콘크리트, 압반 및

파이프재료의 열적특성 및 물성치등을 나타내면 표 4.1과 같다. 여기서 실험으로 실시한 콘크리트의 단열온도값인 최고상승온도는 47.2이고 반응속도는 1.243 이었다. 그러나 본 구조의 타설시 외기온도가 32℃이므로, 외기온도 보정치를 고려하면 K는 45.78이고 α 는 1.865이다.

그리고, 기초부 구조에 철근의 사용량이 약 2~4%정도 되므로, 콘크리트의 열특성 계수인 열전도계수, 비열 및 단위중량의 값을 철근의 추가로 인한 영향을 고려하여 표 4.1과 같은 값을 사용하였다.



(a) Solid Element 모델링



(b) Line Element 모델링

그림 4.1 해석 구조물의 Mesh 모델링

표 4.1 사용재료의 각종 열적특성 및 물성치

입력값		타설부 콘크리트	기초콘크리트	파이프 강재
단열온도값	최고상승온도(K)	45.78	-	-
	반응속도(α)	1.865	-	-
열적특성	열전도계수(Kcal/m·hr·°C)	4.70	4.70	60.0
	비열(Kcal/kg·°C)	0.270	0.270	0.157
	대류계수(Kcal/m ² ·hr)	9.0	9.0	328.0
	단위중량(kg/m ³)	2485.0	2485.0	7800.0
물성치	공칭압축강도(ton/m ²)	2400	-	-
	탄성계수(ton/m ²)	2.32×10^6	2.32×10^6	2.32×10^7
	열팽창계수(/°C)	10.0×10^{-6}	10.0×10^{-6}	10.0×10^{-6}
	포아송비	0.167	0.167	0.20

그리고, 타설되는 콘크리트의 초기온도는 외기온도와 동일한 32°C, 기타설 콘크리트의 초기온도는 상부에서 29°C, 하부에서 25°C로 선형분포하고 있는 것으로 가정하였으며, 이를 표 4.2에 나타내었다.

표 4.2 콘크리트 및 암반의 초기온도값

콘크리트 초기온도	32°C
암반 상부의 초기온도	29°C
암반 하부의 초기온도	25°C

그리고, 외기대류가 이루어지는 조건은 타설 콘크리트의 윗면과 4개의 측면부에서 이루어지는 것으로 모델링하였다. 파이프 쿨링을 모델링하기 위해 필요한 입력치를 정리하면 표 4.3과 같다.

표 4.3 파이프 쿨링 관련 입력값

항 목	입력값
냉각수의 유수대류계수(Kcal/m ² ·hr·°C)	328
유수의 단위중량(kg/m ³)	1000
유수의 비열(Kcal/kg·°C)	1.0
유수의 열전도계수(Kcal/m·hr·°C)	0.554
냉각수의 온도(°C)	25
유입 유량(m ³ /hr)	1.08
파이프관의 단면적(m ²)	0.0000798
파이프관의 직경(m)	0.0254

4.2 측정결과와 해석결과의 비교분석

이 연구에서 개발된 수화열해석 프로그램을 이용하여 구한 그림 4.1의 Section A(콘크리트 중앙부)의 온도이력 해석결과는 그

림 4.2와 같다. 그리고 해석에서 구한 동일한 위치에서의 실측결과는 그림 4.3과 같다.

해석결과와 계측결과를 분석하면 다음과 같다. Node NO.1의 계측결과를 보면, 실측치의 초기온도가 해석치보다 매우 높으나, 2일 이후의 온도이력은 해석치와 실측치가 비슷함을 알 수 있다. 초기의 급격한 온도증가는 태양의 일사조건 등과 같은 시공초기의 이상적인 기상변화로 생각된다. 파이프 주위의 온도를 실측한 Node NO.2의 해석치와 측정치를 비교분석하면, 최고온도발생시기는 비슷하지만, 해석치가 실측치보다 약 4°C정도 높고, 온도하강 비율도 해석치가 급한 것을 알 수 있다. 외기와 접하고 있는 기타설 콘크리트와 접하는 위치인 Node NO.3의 결과를 분석하면, 실측치의 최고온도가 약 3°C정도 크며 최고점 이후의 온도도 완만하게 떨어짐을 알 수 있다. Node NO.4의 결과를 비교하면, 최고온도의 발생시기는 비슷한 결과를 보이며, 최고상승온도값은 해석치가 실측치보다 약 2°C정도 크며, 최고온도값 이후 해석치의 온도하강율은 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,

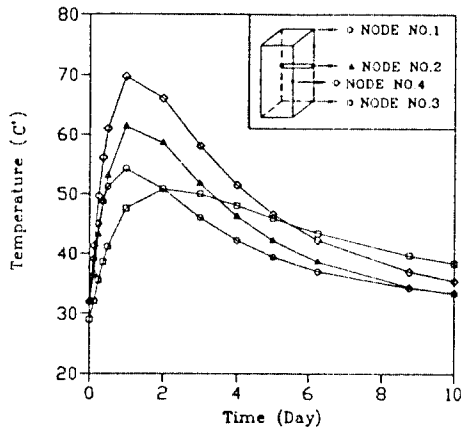


그림 4.2 온도이력 해석결과

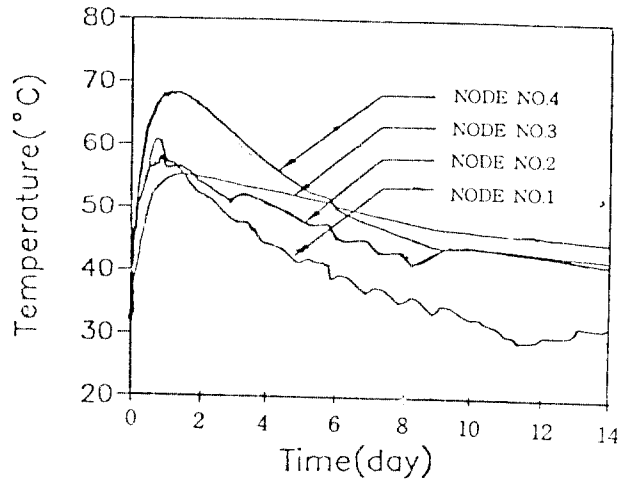


그림 5.3 서해대교 기초부 Pier 24번의 계측결과

기타설 콘크리트의 표면과 하부층의 초기 온도값의 실측이 필요하다. 마지막으로 수화열의 단열상승온도식을 나타내는 K 및 α 값의 정확한 실측값이 요구되며, 또한 타설 온도의 변화에 따른 이들값의 변화를 정확히 예측할 수 있어야 해석상의 오차를 줄일 수 있을 것이다.

그리고, 본 연구에서 고려한 파이프 쿨링 시의 파이프 위치별 온도변화 예측을 위해 도입된 내부유동의 이론은 Node NO.2의 실측과 해석결과를 비교해 볼 때 합리적인 경향을 보임을 알 수 있다.

5. 결론

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

1. 파이프에 의한 유수대류 및 냉각효과를 고려하기 위해서 2절점 Line Element를 이용하여 파이프를 모델링하였고, 이로 인해 3차원 구조물에 대한 파이프 쿨링을 고려한 수화열 예측이 가능한 프로그램을 개발하였다
2. 개발된 프로그램은 파이프의 열적특성값, 파이프의 형상 및 냉각유수의 유량과 유입온도의 변화가 수화열에 미치는 효과를 모사할 수 있다.

3. 이 프로그램은 냉각유수의 에너지 보존법칙을 이용하여 냉각유수의 온도변화를 해석할 수 있으며, 이에대한 효과를 실측치와 해석치를 비교해 본 결과 합리적인 경향을 보임을 알 수 있다.

4. 서해대교 Pier 24의 실측결과와 개발된 프로그램에 의한 해석결과를 비교해볼 때, 최고상승온도는 2~4°C 정도 차이를 보이며, 해석결과치가 실측치보다 온도저하율이 큼을 알 수 있다. 이와 같은 원인은 첫째로, 콘크리트 재료의 타설온도에 따른 K , α 값의 변화 및 단열상승온도값의 정확한 실측이 이루어지지 않았고 둘째로, 기타설 콘크리트의 초기온도분포를 정확히 알 수 없으며 셋째로, 콘크리트와 철근의 열특성계수를 정확히 알지 못하기 때문이다.

참고문헌

1. 김진근, 김국한, "크리이프와 건조수축을 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력해석", 한국콘크리트학회 논문집, 제4권, 제3호, 1992. 9, pp101-111
2. 김진근, 이종대, "크리이프를 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력해석", 대한 토목학회논문집, 제14권, 제4호, 1994. 7, pp 771-781