

초기재령 매스콘크리트의 온도수축 예측기술

Estimation Method of Thermal Stress at Early Age in Mass Concrete Structures



김진근*
Jin-Keun Kim



이 윤**
Yun Lee

1. 머리말

시멘트가 물과 반응하면 발열화학반응(exothermic chemical reaction)에 의해 반응열이 발생하여 내부 온도가 상승한다. 수화열에 의해 내부 온도가 상승하면, 한중콘크리트의 경우 공극 속에 존재하는 물이 동결하는 것을 방지하여 이로온 측면도 있지만, 대개의 경우는 각 위치에서 온도가 상승하거나 하강할 때에 온도차이로 인한 인장응력에 의해 균열이 일어나기도 한다.

우리나라 콘크리트표준시방서에 온도균열이 문제가 되는 콘크리트를 매스콘크리트로 다루고 있다. 매스콘크리트의 정의에 대하여 국내외의 각 학회는 수화열에 의해 상당한 온도상승이 일어날 큰 부피의 콘크리트, 또는 온도상승에 의한 균열을 고려해야 하는 콘크리트라고 정의하고 있다. 각 학회에서 규정하고 있는 콘크리트 구조물의 크기는 약간의 차이를 보이고 있으나, 대략 매스콘크리트의 적용범위를 다음과 같이 정의하고 있다.

「매스콘크리트로 다루어야 하는 구조물의 부재 치수는 일반적인 표준으로서 넓이가 넓은 평판 구조의 경우 부재 치수가 0.8m 이상인 경우이며, 하단이 구속되어 있는 벽체 구조물은 두께 0.5m 이상인 경우이다.」

그러나 이러한 정의는 일반적인 것으로서 보다 합리적인 정의는 철근콘크리트 구조물을 설계할 때 수화열을 고려하여야 하는 크기의 구조물로 보는 것이 타당하다. 이러한 매스콘크리트에 발생하는 균열은 일반적으로 폭이 크고 부재를 관통하는 경우가 많아 구조물의 내력, 내구성, 수밀성 및 미관 등의 소요 품질을 저하시키기 때문에, 시공 전에 콘크리트 구조물 내부의 온도 상승 및 하강량을 예측하고, 온도 상승량 및 하강량을 최소화시킬 수 있는 대책이 수립되어야 한다.

* 정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수
kimjinkeun@kaist.ac.kr

** 정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 대학원생

2. 온도수축 영향인자

2.1 콘크리트 재료 특성값

2.1.1 수화열

포틀랜드시멘트의 수화반응은 매우 복잡하고, 오랜 세월에 걸쳐 변화하기 때문에 단순한 화학반응식으로 표현하기는 불가능하다. 시멘트의 각 성분들이 물과 반응하게 되면 화학반응을 일으켜 새로운 수화물이 생성되면서 결국에는 콘크리트가 응결 및 경화과정을 거치게 되는데 이와 같은 화학반응 과정을 수화반응 또는 수화(hydration)라고 한다. 이와 같은 응결 및 경화과정 중에 시멘트 제조 과정에서 축적된 잠재열이 발생되는데 이것을 수화열(hydration heat)이라 한다.

수화 초기에 시멘트 화합물은 각각 단독으로 반응을 개시하지만 그 속도는 조금씩 다르다. 일반적으로 반응속도는 물시멘트비가 높은 만큼, 시멘트 입자가 작은 만큼, 온도가 높은 만큼 크게 된다. 또한 시멘트 화합물도 순수한 화합물로서 존재하지 않고, 약간의 다른 성분이 포함되어 이들의 수화반응은 매우 복잡하며, 따라서 수화속도도 상당한 영향을 받는다. 일반적으로 콘크리트의 수화 발열량은 단열온도상승시험으로 측정되며, 콘크리트 단열온도상승은 식(1)과 같은 지수 형태의 함수로 나타난다. 식(1)에서 최대 상승온도값(K)과 반응속도(α)는 콘크리트 고유의 수화발열 특성을 나타낸다.

$$T = K [1 - e^{(-\alpha t)}] \quad \text{식(1)}$$

여기서, T : 시간 t 에서의 단열온도상승값($^{\circ}\text{C}$)

K : 최대 상승온도값($^{\circ}\text{C}$)

α : 반응속도, t : 재령(일)

현재까지 연구된 결과에 따르면 콘크리트 수화열 상승에 미

치는 요인은 여러 가지를 들 수 있지만, 시멘트 종류, 단위시멘트량 및 타설온도의 세 가지 요인이 지배적이라 할 수 있다. 최근에는 세 가지 요인에 추가하여 혼화재료, 시멘트 분말도, 골재의 열특성, 단열온도 시험장치 등의 영향이 지적되고 있다.

2.1.2 열전도율

콘크리트의 열적 성질은 콘크리트를 구성하고 있는 재료의 열적 성질에 의해 지배되며, 각 재료의 열적 특성값을 중량 비율로 평균한 값으로 나타낼 수 있다. 따라서 콘크리트의 열적 특성값은 중량과 용적이 있어 콘크리트의 70~80%를 점유하는 골재의 종류와 단위량에 의해 크게 변화되며, 시멘트 종류, 물-시멘트비 또는 재령에 의한 변화는 비교적 작다.

한편 사용 골재의 성분이나 양에 관계없이 콘크리트의 함수량에 따라 콘크리트의 열전도율은 영향을 받으며, 콘크리트의 함수량이 증가할수록 열전도율이 증가하고 경량 콘크리트에 비해 일반 콘크리트 및 중량 콘크리트의 경우가 함수비의 영향을 크게 받는 것으로 보고되고 있다.

2.1.3 비열

콘크리트 비열이란 콘크리트 단위질량(kg)당 단위온도(°C)를 변화시키는데 필요한 열량(kcal)의 크기로, 열전도율과 달리 매질내의 온도 분포에 의해 결정되는 것이 아니고 매질의 평균 온도에 의해 결정된다.

콘크리트 열특성값의 하나인 비열은 식(2)와 같이 콘크리트 내에 점유하는 각 재료의 중량 비율과 각 재료의 비열값으로부터 계산할 수 있으며, 콘크리트에 가해진 열량과 온도 상승량으로부터 직접 측정하는 방법이 사용되기도 한다.

$$C_{CO} = \frac{C_C c + C_W w + C_S s + C_G g}{c + w + s + g} \quad \text{식(2)}$$

여기서, C_{CO} , C_C , C_W , C_S , C_G : 콘크리트, 시멘트, 배합수, 세골재, 조골재 비열
 c , w , s , g : 시멘트, 배합수, 세골재, 조골재의 단위질량

2.1.4 열팽창계수

콘크리트의 온도 수축량은 구조물 각 위치의 온도값과 열팽창계수로부터 결정된다. 따라서 열팽창계수는 앞에서 언급한 다른 열적 특성값과 달리 직접적으로 온도 수축량에 영향을 미친다. 콘크리트의 구성요소 중 시멘트 페이스트와 골재의 열팽창계수는 상당히 다르다. 따라서 콘크리트의 열팽창계수는 이

들 사이의 상대적 체적비에 좌우되는데, 골재의 체적비가 보통 70% 정도를 차지하기 때문에 골재 모암의 종류에 따라 영향을 많이 받는다. 또한 콘크리트 굵은골재의 실리카 성분이 많으면, 열팽창계수는 커지게 된다. 양생조건에 따라서도 열팽창계수가 달라지는데, 기건양생 콘크리트가 습윤양생 콘크리트보다 열팽창계수가 큰 반면, 콘크리트의 배합비는 열팽창계수에 큰 영향이 없는 것으로 보고되고 있다.

2.2 외부 조건

2.2.1 외기대류계수

마스콘크리트의 수화열에 의한 온도분포를 해석적으로 정확히 예측하기 위해서는 앞 절에서 언급한 재료적 특성값 외에 외기대류계수를 정확히 파악하여야 한다. 외기대류계수는 콘크리트 표면과 외기 사이의 열교환량을 결정하는 물성값으로써 콘크리트 표면 부근의 온도분포에 크게 영향을 준다.

마스콘크리트의 외기대류계수는 일사량, 수분 증발, 잠열, 바람, 양생수 살포, 콘크리트 표면의 거칠기, 보온재 유무 등과 같은 많은 인자에 영향을 받으며, 시시각각으로 변하기 때문에 그 값을 정확히 파악하기는 매우 어렵다. 외기대류계수에 대한 연구는 열전도율이나 비열 등과 같은 열특성값에 비해 모자라며, 다만 일부 연구자들에 의해 실시된 실험결과나 모델식이 제안되어 있다. Rastrup은 전형적인 외기대류계수의 범위를 $4.3 \sim 30 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ 라고 보고하고 있다. Mendes는 외기대류계수에 영향을 미치는 영향인자들을 실험방법에 따라 보정해주어야 한다고 제안했으며, 외기대류계수를 콘크리트 표면 거칠기와 풍속의 함수로 나타내었다. 또한 일본에서는 외기대류계수와 관련된 현장 실험을 통하여 외기대류계수에 대한 모델식을 제안하였는데, Ohbayashigawa 등의 실험에서는 풍속이 $2 \sim 3 \text{ m/s}$ 인 경우 외기대류계수를 $12 \sim 13 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ 로, Yamagawa의 실험에서는 $8 \sim 11 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ 로 제안하였다.

2.2.2 외부 구속도

콘크리트 구조물이 전혀 구속받지 않고 자유롭게 움직이고 콘크리트 내의 온도변화가 동시에 일어난다면 온도 변화로 인한 응력은 발생하지 않는다. 그러나 실제 구조물은 항상 외부적으로 구속되어 있고 내외부 온도차이가 있기 때문에 온도 변화로 인한 응력이 발생하게 된다. 외부구속의 영향을 가장 많이 받는 대표적인 구조물은 콘크리트 포장(연속철근 콘크리트 포장, 줄눈 콘크리트 포장), 지반 기초부 콘크리트 및 옹벽 구조물 등이며, 상대적으로 지반과 접촉면이 작은 교량의 상부구

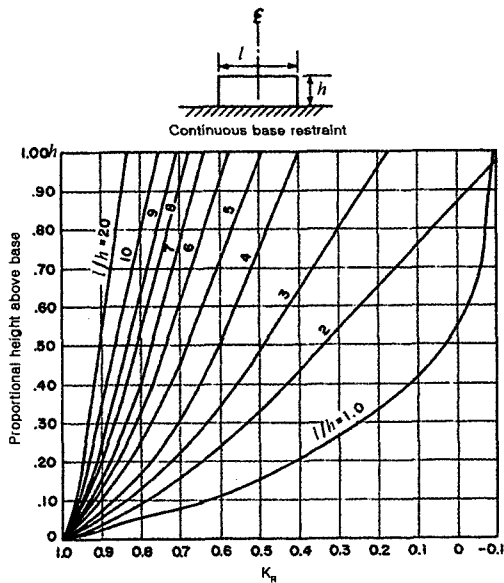


그림 1. 중앙 단면에서의 인장 구속 정도

조 및 원자력 발전소의 돔 구조물 등은 외부구속에 의한 영향이 작은 구조물이다. 외부구속조건의 주요 영향인자는 콘크리트 구조물과 구속이 이루어지는 지반재료와의 상대치수, 강도 및 탄성계수 등이다.

〈그림 1〉과 같이 치수가 $l \times h$ 인 콘크리트 구조물이 하부 기층과 구속 조건에 있을 경우, 길이-높이 비(l/h)와 하부 기층의 깊이에 따라 구속 정도(K_R)는 변하게 된다. 〈그림 1〉에 나타나듯이 l/h 비가 클수록, 기초면에 가까울수록 부재에 발생하는 외부 구속 정도는 커짐을 알 수 있다. 〈그림 1〉로부터 구한 K_R 값을 이용하여, 중앙 단면의 임의의 지점에서의 체적변화로 인해 발생된 인장응력을 계산하면 식(3)과 같다.

$$f_t = K_R \Delta_c E_c \quad \text{식(3)}$$

여기서, Δ_c : 구속이 없을 때의 수축량
 E_c : 콘크리트의 탄성계수

3. 온도수축 및 응력 예측 방법

3.1 온도수축량 예측 방법

콘크리트의 온도 예측 방법으로는 도표를 써서 계산하는 간이 해법과 Schmidt법, Carlson법과 같은 간이 수치해석법, 유한요소법, 유한차분법과 같은 수치해석법이 있다. 각각의 해석방법에는 장단점과 적용 한계가 있으므로 필요로 하는 해석의 정밀도와 해석 대상 구조물의 여러 조건을 고려하여 가장

적절한 방법을 선정하여야 한다.

근래에 들어 구조물이 커짐에 따라 매스콘크리트 구조물의 형태도 다양화되고 있으며 시공단계와 외기대류조건이 복잡해지면서, 매트기초나 벽체와 같은 단순한 형태의 구조물이 아니면 간이 해법이나 간이 수치해석법으로는 이러한 형태의 구조물들의 온도 수축량을 정확히 예측하기에는 다소 무리가 있다. 따라서 계산 능력이 현저히 발달한 근래에는 정확한 온도 예측을 위해 수치해석법을 주로 이용하고 있다.

대표적인 수치해석기법 중 하나인 유한요소법은 일반 구조물의 역학적인 해석뿐만 아니라 유체역학, 열역학, 전자장 분야 등에서도 복잡한 문제를 해결할 수 있는 필수적인 해석기법으로 자리하고 있다. 수화열에 의한 콘크리트의 시간에 따른 온도해석은 수치해석의 큰 분류 중에서 열전달에 속하며, 열전달의 해석기법은 유한차분법(finite difference method)과 유한요소법(finite element method)으로 구분할 수 있다. 유한차분법은 주어진 편미분방정식의 해를 구하는데 있어서 대류나 복사 등의 경계조건이 달라짐에 따라 차분식이 달라지므로 문제마다 새로운 차분식을 구성해야 한다. 이에 비해 유한요소법은 경계조건을 쉽게 다룰 수 있고, 프로그램이 문제의 경계조건과 무관하므로 다양한 형태의 문제를 고려해 줄 수 있어서 널리 사용되고 있다. 특히 구조해석용 프로그램과 혼용할 수 있어서 열응력해석과 같은 혼합형의 문제를 해결하는데 있어서 많은 장점을 지니고 있다. 이와 같은 이유로 최근에는 유한요소법에 의한 해석기법을 이용하여 열전달에 대한 문제를 해결하고 있다.

콘크리트 내부의 열전달 지배미분방정식인 Fourier 방정식은 식(4)와 같은 형태로 나타난다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial Q}{\partial t} \quad \text{식(4)}$$

여기서, T : 온도 ($^{\circ}\text{C}$)
 λ : 열전도율 ($\text{kcal}/(\text{mh}^{\circ}\text{C})$)
 C : 비열 ($\text{kcal}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$)
 ρ : 밀도 (kg/m^3)

$\frac{\partial Q}{\partial t}$: 단위시간, 단위체적당 공급되는 열량(발열률)
 ($\text{kcal}/(\text{m}^3 \text{h})$)

열전달에 관한 각각의 물리적 의미로 표현된 식(4)를 매트릭스 형태의 행렬방정식으로 표현하면 식(5)와 같다.

$$[C] \frac{\partial T}{\partial t} + [K]T = Q \quad \text{식(5)}$$

여기서, [C] = 열용적 행렬
 [K] = 열전도 및 대류 행렬
 Q = 열흐름 및 발열 벡터

따라서 시간에 따른 행렬방정식 식(5)의 해를 구함으로써 구조물 각 위치에서의 시간에 따른 온도값을 계산할 수 있다. 이렇게 시간에 따른 온도 변화량이 계산되면, 식(6)과 같이 콘크리트의 열팽창계수와 온도 변화량을 이용하여 온도 수축량을 계산할 수 있다.

$$\epsilon_T = \alpha \Delta T \quad \text{식(6)}$$

여기서, α : 열팽창계수 ($^{\circ}\text{C}$),
 ΔT : 온도 변화량

3.2 온도응력 예측 방법

온도응력 예측 방법으로는 온도응력을 구하고자 하는 위치(높이)에서의 구속도를 산정하여 식(3)과 같은 간편식에 의해 응력을 예측하는 간편법인 ACI법, 평면유지법칙을 가정으로 한 보 이론에 기초한 간이 해석법인 Compensation법, 컴퓨터를 이용한 수치적 계산 방법인 유한요소법을 들 수 있다. Compensation법은 1차원적인 구속도 한 개만을 고려하는 ACI법에 비해 매우 개선된 방법으로서, 일본콘크리트공학협회에서 제안한 온도응력 예측 방법이다. 이 방법은 평면유지법칙을 가정한 보 이론을 매스콘크리트에 적용한 것으로, 구속계수를 축방향과 횡의 2개로 분리해서 온도응력 계산 중에 휨 변형에 의한 응력을 고려한 것이다. 그러나 이러한 간편법들은 온도 예측 방법의 경우와 마찬가지로 근래의 다양화된 매스콘크리트 구조물에서의 온도응력을 정확히 예측하기에 다소 무리가 있으며, 따라서 정확한 온도응력의 예측을 위해서는 온도 예측과 마찬가지로 유한요소법을 사용하고 있다.

구조물의 시간에 따른 온도응력의 예측을 위해서는 구조물 각 위치에서의 온도값과 재령에 따라 변화하는 콘크리트의 재료 물성값과 크리프를 고려하여야 한다. 온도변화와 크리프를 고려한 경우 콘크리트의 응력은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = [D](\epsilon - \epsilon_c - \epsilon_T) \quad \text{식(7)}$$

여기서, ϵ_c : 콘크리트의 크리프 변형률
 ϵ_T : 온도수축 변형률


식(7)에서 ϵ_T 는 식(6)에 의해 계산된 온도수축 변화량으로서 시간에 따른 온도 변화량과 콘크리트의 열팽창계수의 곱으로 표현된다. 시간에 따른 온도 변화량은 앞에서 언급한 온도 예측 방법을 통해 얻을 수 있고, 콘크리트의 열팽창계수는 4.2절에서 언급한 여러 인자들을 고려하여 결정할 수 있다. 유한요소 정식화를 통해 전체 구조물의 행렬방정식을 유도하면 식(8)과 같다.

$$[K]d = F + F_c + F_T \quad \text{식(8)}$$

여기서, $[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV$: 강성 행렬
 $F_c = \int_V [B]^T [D] \epsilon_c dV$: 크리프 하중
 $F_T = \int_V [B]^T [D] \epsilon_T dV$: 온도 하중

온도응력의 경우에도 온도 예측과 마찬가지로 시간에 따른 행렬방정식 식(8)의 해를 구함으로써 구조물 각 위치에서의 시간에 따른 온도 응력값을 계산할 수 있다.

4. 맺음말

매스콘크리트 구조물에 발생하는 온도와 온도응력의 예측은 다른 일반 구조해석에 비해 고려하여야 할 사항이 많다. 콘크리트는 시간에 따라 재료물성이 변화하는 수경성 재료이므로, 다른 일반 구조해석에서 상수로 간주되는 여러 재료 특성값들이 타설 직후부터 고려 대상이 되는 온도와 온도응력을 예측할 때 재령에 따라 변화하는 변수가 된다. 따라서, 보다 정확한 온도와 온도응력의 예측을 위해서는 앞에서 기술한 여러 영향인자들을 고려하여 적절한 온도 예측 방법을 통해 온도를 계산하여야 하고, 계산된 온도값과 재령에 따른 물성값과 크리프 특성을 고려하여 온도응력을 예측하여야 한다. 

참고문헌

1. Rastrup, E., "Heat of Hydration in Concrete," Magazine of Concrete Research, Vol.6, No.17, 1954, pp.79~92.
2. Mendes, P. A., "Temperature Gradients for Concrete Bridges," MSc thesis, Technical University of Lisbon, 1989.
3. "콘크리트표준시방서 해설", 한국콘크리트학회, 2004.
4. ACI Committee 207 Report, "Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete," ACI Proc. Vol.70-45, July, 1973.