

# 고온조건에서 콘크리트 부재의 온도전이

## Heat Transfer Analysis of Concrete Members under High Temperature

이태규\*†  
Lee, TaeGyu

김혜옥\*\*  
Kim, HyeUk

---

### ABSTRACT

When water inside the concrete member evaporates by high temperature, the evaporation heat which absorbs surrounding temperature occurs. The rate of increment of the internal temperature in concrete is reduced due to the evaporation heat in spite of continuously increasing external temperature. In this paper, the prediction method of internal temperature of high strength concrete members considering the evaporation heat under the high temperature is presented. Finite element method is employed to facilitate thermal analysis for any position of member. And the thermal characteristics models of high strength concrete affected by high temperature are proposed. To demonstrate the validity of this numerical procedure, the prediction by the proposed algorithm is compared with the test results of other researchers. The proposed algorithm shows a good agreement with the experimental results including the phenomenon that temperature is lost by the evaporation heat.

---

### 1. 서론

지금까지는 교량, 교각, 터널 등 철도 구조물의 구조 재료로서 약 30~40 MPa 정도의 보통강도 콘크리트(NSC)가 주로 사용되어 왔다. 보통강도 콘크리트는 내화성능이 우수한 재료로 평가되어 고온에서의 구조 안전성에 심각한 피해를 주지 않기 때문에 이에 대한 검토는 그다지 중요하게 생각하지 않았었다. 그러나 앞으로 고강도 콘크리트(HSC)가 점차적으로 상용화될 것으로 기대되고 있으며, 고강도 콘크리트의 경우에는 많은 연구자들에 의한 실험결과 보통강도 콘크리트와는 고온 하에서의 거동이 완전히 다른 것으로 평가되고 있다. 특히 화재와 같이 급작스러운 고온으로의 온도 상승시 폭발(explosive spalling)의 위험성이 매우 큰 것으로 나타나고 있다.

고강도 콘크리트의 경우 단위수량의 감소로 인하여 추가적인 혼화재료를 첨가하여 소요의 작업성(workability)을 확보시키고 있다. 그러나 이러한 낮은 물-시멘트비의 사용으로 인하여 고강도 콘크리트는 공극률(porosity)이 작게 되고, 투수성(permeability)이 낮아지며, 치밀성(density)이 증가하게 된다. 이 경우 화재와 같은 고온이 발생되면 내부 수분의 증발로 증기압이 형성되며 되며, 이 증기압으로 인하여 콘크리트의 저항력이 감소하게 되어 결국에는 폭발현상을 유발시킨다. 폭발은 급작스러운 온도 상승으로 인하여 콘크리트 부재 표면이 심한 폭음과 함께 폭발적으로 파열(박리 및 탈락)되는 현상으로, 구조물에 치명적인 내력저하를 초래하여 결국에는 구조물의 붕괴로까지 이어지는 대형사고의 원인이 되기도 한다. 그러므로 폭발현상을 정확히 파악하기 위해서는 고온에서의 시간에 따른 콘크리트 부재 내부로의 온도전이과정에 대한 정확한 해석적 기술과 기화열로 인한 열손실을 파악해야 하지만 아직까지 이에 대한 해석적 접근은 미미한 상태에 있다.

---

† 교신저자 : 정회원, 우송대학교 철도건설환경공학과 교수  
E-mail : tglee@wsu.ac.kr  
TEL : (042)629-6714 FAX : (042)636-2672  
\* 우송대학교 철도기술연구소 연구원

## 2. 고온에서의 비정상상태 열전달

### 2.1 열전도 평형방정식

고체 매질 내에서 위치에 따라 온도차가 발생하면 열전도에 의한 열전달이 발생하고, 독립된 온도  $T(x, y, z, t)$  는  $x, y, z$  방향으로 서로 다르게 변하므로 각 방향으로 열유속이 존재하게 되며, 각 방향의 열유속을  $q_x, q_y, q_z$  라고 할 때 Fourier 법칙을 이용한 열전도 구성방정식 성분은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} q_x &= -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} & q_{x+dx} &= q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \\ q_y &= -\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} & q_{y+dy} &= q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \\ q_z &= -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} & q_{z+dz} &= q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $q_x, q_y, q_z$  는 단위시간에 단면면적당 전달되는 열흐름(heat flux)(kcal/hr·m<sup>2</sup>),  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  는  $x, y, z$  방향의 열전도율(thermal conductivity) (kcal/hr·m·°C),  $T$  는 콘크리트 내부온도(°C)를 의미한다.

콘크리트와 같은 경우에는 각 방향으로의 열전달 차이가 매우 작은 관계로 등방향의 열전달이라고 가정하면 각 방향의 열전도율은 모두  $\lambda$ 로 정의된다. 등방성 재료에서 시간에 따라 열량 변화가 발생하는 열전도 해석을 위해서는 비정상상태(transient)로 평가하여야 하며, 초기재령의 경우 수화반응에 의하여 단위시간당 및 단위체적당 축적되는 열량은 단위체적당의  $\rho_c c_c \Delta T$ 와 같아야 하므로 콘크리트 내부에서의 열전도 평형방정식을 구성하면 식(2)와 같다.

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q^B = \rho_c c_c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

여기서,  $\lambda$ 는 각 방향의 열전도율(kcal/hr·m·°C),  $q^B$ 는 단위시간당 및 단위체적당 발생하는 내부 발열량(rate of heat generation) (kcal/m<sup>3</sup>·hr),  $c_c$ 는 콘크리트의 비열(specific heat)(kcal/kgf·°C),  $\rho_c$ 는 콘크리트의 단위중량(kgf/m<sup>3</sup>)이다.

### 2.2 경계조건을 고려한 정식화

외기대류에 관한 항은 초기온도나 기온도의 표현 방법과 달리 외기대류에 의한 열량의 형태로 나타내며, 외기와 대상 구조물이 접하는 면적( $\Gamma_{Sa}$ )에 관계된다. 대류에 의한 열량 발생은 외기와 외기가 접하는 대상 구조물간의 온도차에 의해 발생되므로, 식(3)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$q_a(t) = k_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{Sa}} = h_a(t) [T_{\text{ext}}(t) - T_S] \quad (3)$$

여기서,  $q_a(t)$ 는 외기와 대류면( $\Gamma_{Sa}$ )에 작용하는 열흐름(kcal/hr·m<sup>2</sup>),  $h_a(t)$ 는 외기대류계수(kcal/hr·m<sup>2</sup>·°C),  $T_{\text{ext}}(t)$ 는 시간에 따른 외기의 온도(°C),  $T_S$ 는 외기대류가 발생하는 지점의 절점온도(°C)이다.

기온도에 대한 경계조건을 나타내면 다음과 같이 임의의 시간( $t$ )에서 임의의 위치( $x_i$ )에서의 구조물의 온도는  $T_A$ 라고 표현할 수 있다.

$$T_i = T_A(x_i, t) \quad x_i \in \Gamma_A \quad (4)$$

이상에서와 같은 열전도 평형방정식과 열손실 및 경계조건을 Gauss의 부분적분공식과 변분법 (variational formulation)을 이용하여 유한요소법으로 해석 가능한 행렬방정식 형태로 구성하면 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} & \int_V c_c \rho_c \dot{T} dV + \int_V \lambda \nabla^2 T dV \\ & + \int_{\Gamma_{sa}} h_a(t) T_s dS \\ & = \int_{\Gamma_{sa}} h_a(t) T_{ext} dS - \int_V \rho_c c_u \frac{dT}{dt} dV \end{aligned} \quad (5)$$

위 식을 시간에 따라 온도가 변하는 비정상상태 열해석(transient heat analysis)에 대한 평가를 위하여 식(6)과 같은 시간에 따른 형상함수(shape function)를 사용하여 최종적으로 정리하면 식(7)과 같이 시간영역에서 매트릭스 형태의 행렬방정식으로 표현할 수 있는 식으로 전개된다.

$$\begin{aligned} T(x, y, z, t) &= N(\xi, \eta, \zeta) |J| T(t) \\ \dot{T}(x, y, z, t) &= N(\xi, \eta, \zeta) |J| \dot{T}(t) \\ \partial T(x, y, z, t) &= B(\xi, \eta, \zeta) |J| T(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \int \int \int (c_c \rho_c) N^T N |J| d\xi d\eta d\zeta \dot{T} \\ & + \left[ \int \int \int \lambda B^T B |J| d\xi d\eta d\zeta \right. \\ & + \left. \int \int h_a(t) N^T N |J| d\xi d\eta \right] T \\ & = \int \int h_a(t) T_{ext} N^T |J| d\xi d\eta \\ & - \int \int \int \left( \rho_c c_u \frac{dT}{dt} \right) N^T |J| d\xi d\eta d\zeta \end{aligned} \quad (7)$$

이와 같은 행렬방정식으로부터 구조물에 적용할 수 있는 해석 프로그램을 개발하였으며, 해석 프로그램의 개발과정은 일반적인 구조해석 방식으로 기존에 많이 알려져 있기 때문에 구체적인 언급은 생략하기로 한다. 다만 기존의 해석 프로그램들의 경우에는 온도와 습도(혹은 수분확산)를 독립적인 관계로 취급하여 각기 별도의 해석을 수행하고 그 결과를 합산(summation)하는 방식을 취하고 있으나 본 논문에서와 같이 기화조건을 판정하고 기화열을 고려하기 위해서는 온도와 수분확산을 병행하여 동시에 평가하는 방식을 적용하여야 한다.

### 3. 재료의 열전달 특성

#### 3.1 열전도율

콘크리트의 열전도율은 일반적으로 기준온도 20℃일 때 약 2.2~2.4 kcal/hr·m·℃ 정도로 평가되고 있으며, 구성성분 부피비, 잔골재율, 내부 함수율(상대습도)에 비례하고, 물-바인더비, 혼화제 치환율과 온도에 반비례하는 것으로 알려져 있다.

초기재령에서는 시간 경과에 따라 열전도율은 감소되는 현상을 보이고 있으며, 이는 수화반응의 진

행에 따라 내부의 수분이 감소되면서 콘크리트 내 상대습도의 변화가 생겨 열전도율에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 기준온도에서의 열전도율을 배합비 및 각 재료의 열적 특성 값인 구성 재료의 열전도율과 이의 부피비를 이용한 평균화의 개념으로 식(8)과 같은 추정식을 도출하였으며 이를 다시 재령 및 내부 함수율의 함수인 식(9)로 표현하였다. 이를 그림으로 나타내면 그림 1과 같이 타설초기에는 각 구성성분들의 평균화된 열전도율을 가지다가 시간이 경과하여 수화반응이 진행됨에 따라 열전도율이 급격히 감소하고 있으며, 이후 수화반응이 거의 완료되면 일정한 열전도율의 값을 가지는 것을 볼 수 있다.

$$\lambda_{com} = \frac{\sum \lambda_i \cdot v_i}{v} \quad (8)$$

$$\lambda_{20} = \lambda_{com} [1 - k (w_{ini} - w(t))] \quad (9)$$

여기서,  $\lambda_{20}$ 은 기준온도(20°C)에서의 열전도율,  $\lambda_i, v_i$ 는 각 콘크리트 구성성분의 열전도율과 체적,  $v$ 는 콘크리트의 전체체적,  $k$ 는 콘크리트 강도에 따른 함수,  $w_{ini}$ 는 배합초기의 함수율,  $w(t)$ 는 수화의 진행에 따라 변화하는 함수율이다.

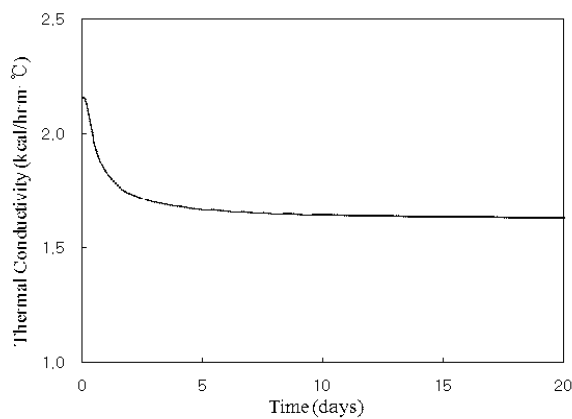


그림 1. 초기재령에서 열전도율의 변화

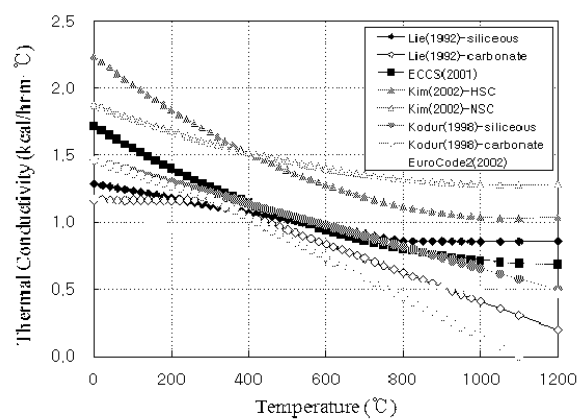


그림 2. 고온에서 열전도율의 변화

한편 고온에서 콘크리트의 열전도율( $\lambda_T$ )은 온도 증가에 따라 약간씩 감소하는 경향을 나타내게 된다. 지금까지의 여러 연구자들에 의하여 연구된 내용은 그림 2에서 보는 바와 같이 크게 두가지 형태로 구분되는데, 첫째는 Lie(1982) 및 Kodur(1998) 등에 의한 제안 방식으로 각 골재의 종류를 탄산암, 석회암과 같은 방식으로 분류하여 콘크리트의 열전도율을 나타내는 것이고, 둘째는 Euro Code 2(2002) 등과 같이 하나의 값 또는 일정 범위의 값으로 나타내는 것이다. 본 논문에서는 이중에서 두 번째 방식인 식(10)과 같은 Euro Code 4의 하한선의 값으로 적용하였다.

$$\lambda_T = 1.17 - 0.117 \left( \frac{T}{100} \right) + 0.0049 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \quad (10)$$

따라서 최종적으로 각 골재의 종류 및 특성에 대한 영향을 고려하면서 고온에서도 적용할 수 있는 열전도율의 식은 식(9) 및 식(10)을 조합하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \lambda_{20} \frac{\lambda_T}{1.147} \quad (11)$$

### 3.2 비열

콘크리트에서 비열이란 콘크리트 단위무게(kgf)당 단위온도(°C)를 변화시키는데 필요한 열량(kcal)의 크기로, 열전도율과는 달리 매질 내의 온도분포에 의해 결정되는 것이 아니고 매질의 평균온도에 의해 결정된다. 콘크리트 열적 특성값의 하나인 비열은 식(12)와 같이 콘크리트 내에 점유하는 각 재료의 중량 비율과 각 재료의 비열로부터 계산하거나 또는 콘크리트에 가해진 열량과 온도 상승량으로부터 직접 측정하는 방법이 현재 보편적으로 사용되고 있다.

$$c = \frac{c_C C + c_W W + c_S S + c_G G}{C + W + S + G} \quad (12)$$

여기서,  $c, c_C, c_W, c_S, c_G$ 는 각기 콘크리트, 시멘트, 배합수, 잔골재, 굵은골재의 비열,  $C, W, S, G$ 는 각기 시멘트, 배합수, 잔골재, 굵은골재의 단위중량이다.

그러나 열전도율과 마찬가지로 비열도 초기재령에서의 시간 경과에 따라 감소하게 되는데, 이는 상대적으로 비열이 큰 배합수가 수화반응이 진전됨에 따라 시멘트 페이스트의 화학적 결합수가 되면서 비열이 작은 물질로 변화되기 때문이다. 따라서 기준온도에서 정확한 비열을 산정하기 위해서는 수화반응에 따른 과정이 포함되어야 하며, 본 논문에서는 위의 식을 기초로 하여 수화도의 함수가 포함된 식(13)의 형태로 표현하였다. 이를 그림으로 나타내면 그림 3과 같으며, 열전도율의 변화양상과 마찬가지로 초기재령에서 수화반응이 진행됨에 따라 급격히 감소하다가 이후 거의 일정한 값을 가지는 것을 볼 수 있다.

$$c_{20} = \frac{1}{\rho} \left[ \left( 1 - \frac{r(t)}{3} \right) (c_c w_c + c_f w_f + c_w w_w) + c_s w_s + c_g w_g \right] \quad (13)$$

여기서,  $c_{20}$ 은 기준온도(20°C)에서의 비열,  $c_i, w_i$ 는 각 콘크리트 구성성분의 비열과 중량비,  $\rho$ 는 콘크리트의 단위중량,  $r(t)$ 는 수화도이다.

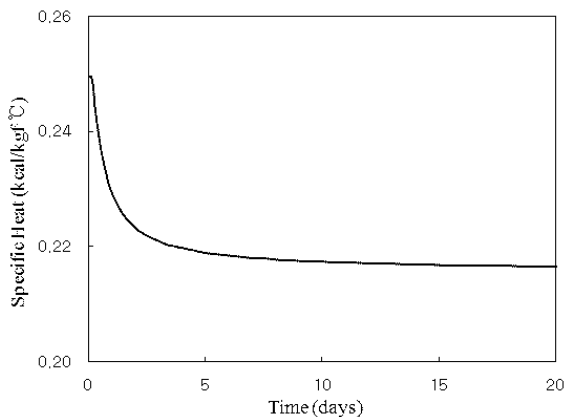


그림 3. 초기재령에서 비열의 변화

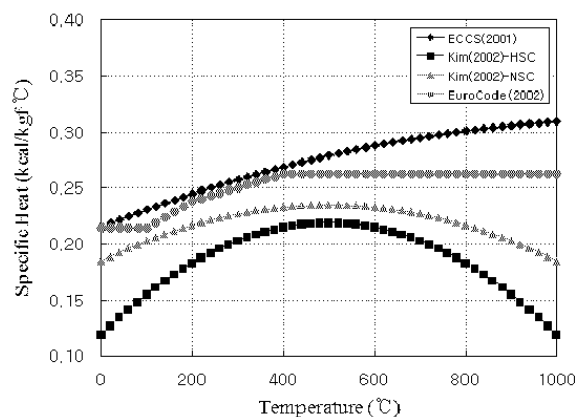


그림 4. 고온에서 비열의 변화

한편 고온에서의 콘크리트 비열( $c_T$ )은 그림 4와 같이 약 400~500°C를 기점으로 양상이 변화되는 것으로 알려져 있다. Lie(1992) 및 Schneider(1985)에 따르면 400~500°C 이전에서 결정질의 물은 증

발 및 기타 전이에 의한 손실이 적게 되는데, 이는 시멘트풀 구성인자를 흡착시키기 위하여 반데어발스 힘(van der Waal's force)이 물분자를 잡아당겨서 수증기로의 증발 및 기타 다른 공간으로의 전이를 어느 정도 억제하기 때문이다. 그러나 400~500°C 이후에서는 결정질 물은 화학적 성상의 변화와 물의 이동 및 수증기 증발을 억제하는 반발력이 제거되기 때문에 변화하거나 소실되는 것으로 평가되고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 각 온도 구간별로 모델링을 실시한 식(14)와 같은 Euro Code 2(2002)의 제안식을 적용하였다.

$$c_T = \begin{cases} 0.215 & 0 \leq T \leq 100^\circ\text{C} \\ 0.191 + 2.39 \times 10^{-4} T & 100 < T \leq 200^\circ\text{C} \\ 0.215 + 1.19 \times 10^{-4} T & 200 < T \leq 400^\circ\text{C} \\ 0.263 & T > 400^\circ\text{C} \end{cases} \quad (14)$$

따라서 최종적으로 각 골재의 종류 및 특성에 대한 영향을 고려하면서 고온에서도 적용할 수 있는 비열의 식은 식(13) 및 식(14)를 조합하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c = c_{20} \frac{c_T}{0.215} \quad (15)$$

#### 4. 결 론

본 논문에서는 고온 조건에서 고강도 콘크리트 내부의 수분이 증발하면서 발생하는 기화열에 의한 열 손실을 고려한 콘크리트 내부의 온도전이과정에 대한 해석루틴을 개발하였다. 또한 이를 위하여 사용되는 재료의 열적 특성치인 열전도율, 비열 등에 대하여 각 골재의 종류 및 특성과 같은 각기의 재료적 배합특성을 고려하면서 고온에서도 적용할 수 있는 모델식들을 제안하였다.

향후 본 연구결과를 활용하여 고강도 콘크리트의 수분해석, 비정상상태 크리프 해석 및 폭렬상태 해석 등을 수행하면 최종적인 고강도 콘크리트의 내화특성에 대한 평가가 이루어질 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07 차세대고속철도 A01)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 강석원, "고온에 노출된 철근콘크리트 보 및 기둥의 수치해석", 박사학위논문, 서울대학교, 2001.
2. 김홍열, "고온영역에서 고강도 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구", 박사학위논문, 건국대학교, 2002.
3. American Society for Testing and Materials, "Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials", ASTM E119-88, Philadelphia, PA, USA, 1990.
4. British Standard Institution, "Euro Code 2 : Design of Concrete Structures", England, 2002.
5. Lie, T.T., "Structural Fire Protection", ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 78, American Society of Civil Engineering, New York, USA, 1992.