

# 고온에 노출된 고강도 콘크리트 기둥의 수치해석

## Numerical analysis of high-strength concrete exposed elevated temperature

서연주\*                      홍성걸\*\*  
Seo, Yeon Joo              Hong, Sung Gul

---

### ABSTRACT

A computational analysis of hygro-thermal and mechanical behaviour of concrete column at high temperature is presented. The objective of this study is to develop a finite difference model that simulates coupled heat and transport phenomena in reinforced concrete structures exposed to rapid heating conditions such as fires. The theoretical basis for the integrated finite difference method is presented to describe a powerful numerical technique for solving of fluid flow in porous media.

The numerical results predict the phenomena of 'moisture clog' and the explosive spalling of concrete under fire. The investigations show that high-strength concrete(HSC) and normal-strength concrete(NSC) exposed to high temperature have different pore pressure buildup dependent on porosity, permeability and moisture contents. HSC has more possibility than NSC on spalling.

---

### 1. 서론

현대사회에서 건물이 고층화되면서 기둥에 고강도 콘크리트를 많이 사용하고 있지만, 아직도 화재에 노출되었을 때 일반강도에 비해 고강도 콘크리트가 위험하다는 인식이 많이 부족하고 내화규준에서도 고강도 콘크리트에 대한 규준이 따로 없고 일반강도에 준하여 내화설계를 한다. 고강도 콘크리트는 고밀도로 침투성이 낮으므로(low permeability) 고온에 노출되었을 때, 수분이 외부로 증발하지 못하고 수증기로 상태변화하여 내부공극의 압력(pore pressure)이 높아진다. 내부 공극압이 인장강도에 도달하면 콘크리트 표면의 피복이 갑자기 떨어져나가는 폭열(spalling)이 일어나 철근이 노출된다. 철근은 고온에 노출되면 기둥의 강도도 저하하여 구조물의 붕괴를 일으킬 수 있다.

폭열의 원인은 다양하고 불확실하여 예측하기 어렵고 고온에서 콘크리트 단면의 손실률을 측정하기도 어렵다. 대체적으로 연구자들은 온도-공극압 관계만 구하고 고온에서 콘크리트의 공극압이 어떻게

---

\* 정희원, 서울대학교 건축학과 박사과정

\*\* 정희원, 서울대학교 건축학과 부교수

폭열을 일으키는지 연관짓지 못하고 있다. 공극압만 구하고 실제로 기동이 어떻게 폭열이 일어나는지 보여주지 않는다. 또한 고온에 노출된 콘크리트는 열팽창에 의해 균열이 발생한다. 균열은 수증기가 증발할 수 있으므로 침투성이 커진다. 따라서 균열이 발생한 단면에서의 공극압은 좀 더 작아질 것이고 폭열이 발생할 확률도 작아진다. 본 논문은 고온에 노출된 콘크리트 내부 수분의 상태변화와 이동 경로를 수식화하여 공극압을 예측하고 균열이 없는 단면과 있는 단면을 비교하여 폭열의 확률을 예측한다.

## 2. 지배 방정식

콘크리트는 투과성 매개체(porous medium)의 고체물질과 액체(수분)와 기체 상태가 공존하는 다상(multi-phase)의 연속체(continuum)이다(그림 1). 콘크리트 외부에 열을 가하면 수분과 기체는 내부의 낮은 온도 방향으로 이동하고 수분은 수증기로 상태변화한다.

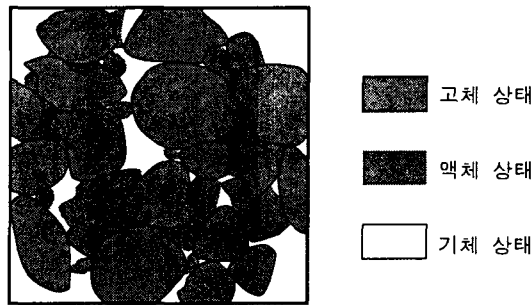


그림 1 다상의 연속체로 구성된 콘크리트

단일 물질의 연속체(그림 2) 내부와 주변과의 물질 이동의 균형 방정식은, 검사체적  $U$ 의 표면에서 수직 벡터  $n$ 이 외부로 향할 때, 식 (1)과 같다. 검사체적 내부의 미시적 물질  $\psi$ 은 단위질량으로 정의한다.

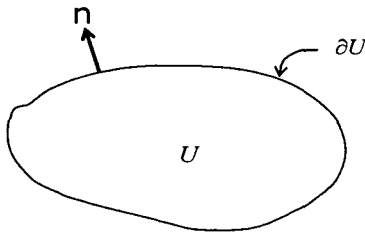


그림 2 표면적  $\partial U$ 로 둘러싸인 검사체적  $U$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{검사체적 } U \text{ 내부의} \\ \text{물질 } \psi \text{의 변화량} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{표면적 } \partial U \text{를 통과하는} \\ \text{물질 } \psi \text{의 유속} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{검사체적 } U \text{ 내부로} \\ \text{유입된 } \psi \text{의 변화량} \end{array} \right\} = 0 \quad (1)$$

식 (1)의 물리량에 수식을 대입하면,  $U$  내부의  $\psi$ 의 균형방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \psi d\Omega - \int_{\partial V} i n dS - \int_V \rho \hat{g} d\Omega = 0 \quad (2)$$

넓이의 적분을 공간 체적의 적분으로 변환하는 가우스 정리와, 검사체적내 질량의 시간 변화율은 검사 표면을 지나는 유출입량과 같다는 Reynold 수송정리를 대입하면 다음과 같다. 단일 연속체 ( $\psi^\pi = 1$ )이고, 질량이 보존된다고 가정하면,  $i^\pi = 0$ ,  $\hat{g}^\pi = 0$  이고 식 (4)와 같다. 콘크리트 구체내부에는 다윈의 물질이 존재하는데,  $\eta^\pi$ 는 각 물질의 평균 체적비이고,  $\pi$ 는 물질 상태(수분, 기체)이다.  $\eta^\pi \rho^\pi e^\pi$ 는 유체(fluid phase) 사이의 질량변화량이다.

$$\frac{\partial(\rho\psi)}{\partial t} + v \nabla(\rho\psi) + \rho\psi \nabla v - \nabla \cdot \tau - \rho \hat{g} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial^\pi(\eta^\pi \rho^\pi)}{\partial t} + \eta^\pi \rho^\pi \nabla v^\pi = \pm \eta^\pi \rho^\pi e^\pi \quad (4)$$

### 3. 수치해석

다상(multi-phase) 연속체인 콘크리트의 열과 물질 전달 현상을 거시적 관점에서 수치적 모델을 발전시킨다. IFDM(integrated finite differential method)를 이용하여 식 (2)의 부분미분방정식을 간편하게 풀 수 있다.

$$\text{div } K \text{ grad } \phi + g = c \partial \phi / \partial t \quad (5)$$

식 (5)에서  $K$ 와 상수  $c$ 는  $\phi$ 에 독립적이고 식 (5)는 선형 방정식이다. 가우스 정리를 적용하면 식 (6)이 되는데, 왼쪽 항의 면적분은 면적  $S$ 에 대한 유속(flux)합이다. 이것을 차분법으로 표현하면 식 (7)이 되고 미소 값  $\Delta t$ 에 대해 외연적 형태의 식 (9)로 다시 쓸 수 있다.

$$\int_V (\text{div } K \text{ grad } \phi + g) dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_V c \phi dV \quad (6)$$

$$\int_S K \text{ grad } \phi \cdot n dS + gV = cV \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (7)$$

$$g_m V_m + \sum_n \bar{K}_{m,n} \frac{\phi_n - \phi_m}{D_{m,n}} A_{m,n} = c_m V_m \frac{\Delta \phi_m}{\Delta t} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta t}{c_m V_m} \left[ g_m V_m + \sum_n U_{m,n} (\phi_n^0 - \phi_m^0) \right] = \Delta \phi_m \quad (9)$$

### 4. 방법 및 고찰

콘크리트 내부 함수율과 침투성, 기공률(porosity)은 고강도 콘크리트(HSC)와 일반강도 콘크리트

표 1 수치해석에 적용한 콘크리트의 물성치

재료 특성	콘크리트 I	콘크리트 II
기공률	13.3%	8.2%
전도율(습성)	2.9 W/m-C	2.6 W/m-C
전도율(건성)	1.7 W/m-C	2.0 W/m-C
팽창률	6.5E-6 1/C	8.5E-6 1/C
비열	921 J/kg-C	921 J/kg-C
침투성	2.24E-17 m <sup>2</sup>	634E-19 m <sup>2</sup>
28일 강도	60 Mpa	90 Mpa

(NSC)일 때 달라진다. 이들을 변수로 하여 고온에 노출되었을 때 온도변화, 함수량 변화, 공급압이 어떻게 변하는지 알아본다. 실험 자료는 참고문헌 8의 물성치(표 1)와 실험결과를 사용하여, 실험결과와 수치해석 결과를 비교, 검토한다.

## 5. 결론

고온에 노출된 고강도 콘크리트는 낮은 침투성과 조밀한 기공률로 인해 수증기와 수분의 이동이 원활하지 못해 가열 후 폭열이 10-25분 후에 일어날 확률이 크다. 본 연구에서는 실험에서 측정하기 힘든 고온에 노출된 콘크리트 내부의 공급압을 평가할 수 있는 수치해석을 수행하여 HSC가 NSC보다 폭열의 위험도가 더 크다는 것을 보여주었다.

실온에서 크립이나 건조수축에 의해 콘크리트 표면에 크랙이 발생한다. 고온에 노출되었을 때 콘크리트 물성치 변화와 열팽창에 의해 크랙의 폭과 크기는 더 커지고, 침투율도 커지므로 공급압이 줄어든다. 크랙이 있는 단면과 없는 단면은 분명 폭열이 일어날 가능성이 달라질 것이다. 이제까지 고온에 노출된 콘크리트의 폭열을 수분과 공급압의 영향에만 한정지어 연구했지만, 앞으로는 크랙의 영향을 고려할 필요가 있다고 생각된다.

## 참고 문헌

1. Castillo C. and Durrani, A. J., "Effect of Transient High Temperature on High-Strength Concrete", *ACI Material Journal*, January-February, 1990, pp.47~53
2. Chan Y. N., Peng G. F., Anson M., "Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperature", *Cement and concrete Composites*, 21, 1999, pp.23~27
3. Khoury G. A., "Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment", *Magazine of Concrete Research*, Dec, 1992, pp.291~309
4. Sarahar R. and Khoury G. A., "Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures", *Magazine of Concrete Research*, Mar, 1993, pp.51~61
5. 조재열, "고온에 노출된 콘크리트의 잔류압축강도 특성에 관한 연구", 공학석사학위논문, 서울대학교대학원, 1995
6. Harmathy T. Z., "Fire Safety Design and Concrete", Longman Scientific & Technical, 1993
7. A.M. Neville, "Properties of Concrete", John Wiley & Sons, Inc. 1997
8. Chung J.H, "Numerical Simulation of Hydro-thermal-mechanical Behavior of Concrete Structures Exposed to Elevated Temperatures' Doctoral dissertation, Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida, 2003