

화재시 내부증발을 고려한 콘크리트의 수분이동 Prediction of Moisture Migration of Concrete Including Internal Vaporization in Fire

이태규

Tae-Gyu Lee

우송대학교

(2009. 8. 25. 접수/2009. 10. 9. 채택)

요 약

콘크리트가 화재에 노출되면 콘크리트 표면에서의 수분뿐만 아니라 콘크리트 내부에서의 수분도 수분의 평형 및 전달조건에 의하여 증발이 발생된다. 수분의 평형조건은 재료의 자기이력거동으로 표현되는 물의 증발에 대한 수착등온선 관계로 설명된다. 본 논문은 화재시 콘크리트 부재 내부의 수분변화를 예측하고자 하는 것으로 부재 내부의 임의의 위치에서의 상대습도를 산정하기 위하여 유한요소방식을 적용하였다. 또한 고온에서 콘크리트의 수분확산 특성치에 대해서도 모델식을 제시하였다. 이러한 해석기법의 정확성을 검증하기 위하여 실험데이터와 비교하였으며, 그 결과 수분증발로 인하여 수분이 감소되는 효과를 포함한 전반적인 부재 내부의 수분이동현상이 실제 실험데이터와 거의 유사하게 나타나는 것으로 확인되었다.

ABSTRACT

Moisture evaporates, when concrete is exposed to fire, not only at concrete surface but also at inside the concrete to adjust the equilibrium and transfer properties of moisture. The equilibrium properties of moisture are described by means of water vapor sorption isotherms, which illustrate the hysteretical behavior of materials. In this paper, the prediction method of the moisture distribution inside the concrete members at fire is presented. Finite element method is employed to facilitate the moisture diffusion analysis for any position of member. And the moisture diffusivity model of high strength concrete by high temperature is proposed. To demonstrate the validity of this numerical procedure, the prediction by the proposed algorithm is compared with the test result of other researcher. The proposed algorithm shows a good agreement with the experimental results including the vaporization effect inside the concrete.

Key words : Moisture diffusion, Vaporization, Emission, Concrete

1. 서 론

콘크리트는 일반 토목 구조물뿐만 아니라 건축 구조물 등 모든 사회기반 구조물에 폭넓게 적용되어 사용되고 있다. 특히 최근에 들어 각종 구조물의 대형화 추세에 따라 장대교량, 특수교량, 고층 건축물 등이 다양하게 건설되고 있으며 이에 따라 고강도 및 고성능 콘크리트의 사용이 필수적으로 되어가고 있는 추세에 있다.

다른 구조물들과 마찬가지로 콘크리트 구조물 역시 일반적으로 사용성(serviceability)과 안전성(safety)을 만

족시키는 조건에서 설계를 하게 된다. 특히 콘크리트가 고강도화 할수록 화재 발생과 같은 고온 조건에서 인명피해와 재산손실에 직접적인 영향을 미치기 때문에 일정한 수준 이상의 내화성능을 확보할 필요성이 절실히 제기되고 있으며 이에 따라 고온 하에서의 안전성(fire safety)도 중요한 설계조건으로 급부상되고 있는 상황이다.

화재와 같은 고온 하에서의 안전성은 결국 구조물의 내화성능(fire resistance)으로 평가되며, 내화성능은 고온 하에서의 구조부재의 하중저항성능으로 정의된다. 지금까지의 연구결과에 따르면 구조물의 내화성능은 콘크리트 압축강도, 내부 습도, 치밀성, 구조물의 크기

와 형상, 사용재료, 하중조건, 화재발생조건 등에 따라 매우 큰 차이를 보이는 것으로 알려져 있다.^{1,2)}

콘크리트의 강도가 높아질수록 단위수량의 감소로 인하여 투수성(permeability)이 낮아지며 치밀성(density)이 증가하게 된다. 이때 화재와 같은 고온이 발생되면 내부 수분의 증발로 인하여 증기압이 형성되며, 이 증기압이 콘크리트의 저항력보다 커질 경우 폭렬(explosive spalling)이 발생된다.³⁾ 폭렬은 급작스러운 온도 상승으로 인하여 콘크리트 부재 표면이 심한 폭음과 함께 폭발적으로 파열(박리 및 탈락)되는 현상으로, 구조물에 치명적인 내력저하를 초래하는 요인으로 작용한다. 그러므로 폭렬현상을 평가하기 위해서는 그 근간이 되는 콘크리트 내부의 수분이동현상에 대한 명확한 규명이 우선적으로 필요하다.

콘크리트의 수분은 함수율의 구배에 의한 확산(diffusion)과 외부 환경과의 상대습도 차이를 통한 발산(emission)에 의해 액체 및 기체상의 이동만을 지금까지는 고려하여 왔다. 하지만 고온에서는 콘크리트 내부에서 수분이 바로 증발(internal vaporization)하게 됨에 따라 내부 함수량의 변화가 추가적으로 발생되고 있다. 또한 콘크리트 내부에도 매우 다양한 크기의 공극이 존재하고, 각 재령에 따라 공극의 크기가 변화하기 때문에 콘크리트의 수분이동은 다른 다공질 재료에 비하여 매우 복잡한 양상을 보이고 있다.

따라서 본 논문에서는 콘크리트 부재에 화재가 발생하였을 경우 증기압에 따른 폭렬발생여부의 파악을 위한 선결과제로서, 콘크리트 내부의 수분증발에 따른 영향을 포함한 비정상상태 수분확산방정식을 전개하고, 고온에서의 재료의 수분이동 특성에 관한 해석적 모델링을 수행하며, 이로부터 콘크리트 부재 내부에서의 시간에 따른 상대함수율의 변화과정에 대한 해석적 루틴을 개발하고자 한다.

2. 고온에서의 수분이동

2.1 수분확산

콘크리트 내부의 함수율의 차이에 의한 확산에 따른 수분의 이동과정은 Fick의 확산법칙으로 알려져 있는 수분량 평형방정식으로 나타내게 된다. 수분의 확산유속(moisture flux, J)은 수분경사(moisture gradient)에 비례하므로 다음과 같이 콘크리트 내부 상대함수율(relative moisture ratio)의 형태로 표현할 수 있다.

$$J = -D_{x, y, z} \text{ grad}w \quad (1)$$

여기서, w 는 콘크리트 내부 상대함수율, $D_{x, y, z}$ 는 각

방향으로의 수분확산계수(moisture diffusion coefficient)이다.

지금까지는 일반적으로 수분확산이론(moisture diffusion theory)의 적용에 있어서 콘크리트 내부 상대함수율과 상대습도를 동일하게 취급하여, 수분의 확산유속을 콘크리트 내부의 상대함수율 대신에 공극의 상대습도로 나타내는 방법을 사용하여 왔다. 하지만 상대함수율과 상대습도는 엄밀히 말해 동일한 값이 아니라 수축등온선의 관계로 변환시켜주어야 하기 때문에 본 논문에서는 보다 정밀한 해석을 수행하기 위하여 상대습도로 변경하지 않고 상대함수율 그대로 수식을 전개하였다.

식(1)로부터 수분질량 평형방정식(mass balance equation)은 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며, 콘크리트에서 수분의 확산이 등방성이라고 가정하면 각 방향의 수분확산계수는 모두로 정의된다. 또한 내부에서 함수량이 변화하지 않는 일반적인 경우에서의 정상상태 수분확산 평형방정식(steady-state moisture diffusion equation)을 유도하면 식(3)과 같이 나타난다.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\text{div } J = \text{div } (D \text{ grad } w) \quad (2)$$

$$D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (3)$$

2.2 발산

콘크리트 표면에서 외부 환경으로의 기체상의 이동인 발산에 대하여 평가하기 위해서는 콘크리트 표면의 상대습도와 외기의 상대습도 사이의 관계를 설정하여야 하며, 본 논문에서는 다음과 같이 발산에 대한 경계조건을 설정하였다.

Bazant와 Najjar의 연구결과에 의하면 콘크리트 표면에서의 수분 발산은 식(4)와 같은 Gibb's free energy의 차이에 비례한다고 알려져 있으며, Gibb's free energy의 차는 식(5)와 같다.⁴⁾

$$u = \left(\frac{R}{M} \right) T \ln H + u_{\text{sat}}(T) \quad (4)$$

$$\Delta u = u(H_{\text{ext}}) - u(H) \quad (5)$$

여기서, R 은 기체 상수, M 은 분자량, T 는 온도, H 는 콘크리트 표면의 상대습도, u_{sat} 는 포화시 Gibb's free energy, H_{ext} 은 외기의 상대습도이다.

콘크리트 표면의 온도와 외부의 온도는 비례한다고 가정하면 Gibb's free energy의 차는 $\ln(H_{\text{ext}}/H)$ 에 비례

하며, 표면에서의 수분 발산에 의한 이동은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$n \cdot J = B(\ln H_{ext} - \ln H) \quad (6)$$

여기서, B는 표면의 수분 발산률, n은 외측으로의 단위수직벡터이다.

위의 식을 식(1)에 대입하여 콘크리트 표면에서의 수분 발산에 대한 경계조건으로 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_w = -D_n \frac{\partial w}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{sa}} = f(H_{ext} - H) \quad (7)$$

여기서, q_w 는 외기와외의 접촉면에서 작용하는 발산량, D_n 은 표면의 발산계수, Γ_{sa} 는 외기와 접하는 면적, f 는 표면계수(surface factor)이다.

2.3 내부증발

콘크리트 표면에서의 발산이 아닌 화재와 같은 고온 조건에서 발생하는 콘크리트 내부에서의 수분증발은 시간에 따른 함수율의 변화를 고려한 비정상상태 수분 확산 평형방정식(transient moisture diffusion equation)을 적용하여 구할 수 있다. 화재에 의한 수분증발은 기화열의 형태로 고려할 수 있으며, 주변온도가 100°C 이상이고 콘크리트 내부에 수분이 존재하는 경우인 기화조건을 성립하는 경우에만 적용된다.

기화열의 영향을 고려할 수 있는 온도해석 프로그램⁵⁾을 이용하여 이로부터 손실되는 열량을 산정하고, 이를 부피의 단위로 환산하게 되면 증발에 의하여 소실되는 함수량을 산정할 수 있으며, 이를 식(3)과 같은 형태의 평형방정식으로 전개하면 다음과 같다.

$$D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = - \frac{c_L}{\rho c_u} \frac{\partial w}{\partial t} \quad (8)$$

여기서, c_L 는 단위체적당 손실되는 열량, ρ 는 콘크리트의 단위중량, c_u 는 물의 기화열이다.

2.4 변분법에 의한 정식화

이상에서와 같은 수분 확산 평형방정식에 발산과 내부증발에 대한 경계조건을 포함시켜 Gauss의 부분적분 공식과 변분법(variational formulation)을 이용하여 유한요소법으로 해석 가능한 행렬방정식 형태로 구성하면 식(9)와 같이 유도된다.

식(9)를 시간에 따라 함수율이 변화하는 비정상상태 수분확산해석에 대한 평가를 위하여 식(10)과 같은 시간에 따른 형상함수(shape function)를 사용하여 최종적

으로 정리하면 식(11)과 같이 시간영역에서 매트릭스 형태의 행렬방정식으로 표현할 수 있는 식으로 전개된다. 이를 시간의존성 해석기법인 Crank-Nicolson 방법⁶⁾을 적용하여 각 시간에 따른 콘크리트의 내부 상대함수율을 산정하게 된다.

$$\int_V w dV + \int_V D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) dV \quad (9)$$

$$+ \int_{\Gamma_{sa}} f w dS = \int_{\Gamma_{sa}} f w_{ext} dS - \int_V \frac{c_L}{\rho c_u} \frac{\partial w}{\partial t} dV$$

$$w(x, y, z, t) = N(\xi, \eta, \zeta) | w(t) \quad (10)$$

$$\dot{w}(x, y, z, t) = N(\xi, \eta, \zeta) | \dot{w}(t)$$

$$\partial w(x, y, z, t) = B(\xi, \eta, \zeta) | w(t)$$

$$\iiint N^T N | d\xi d\eta d\zeta \dot{w} \quad (11)$$

$$+ [\iiint DB^T B | d\xi d\eta d\zeta + \iiint N^T N | d\xi d\eta] w$$

$$= \iiint f w_{ext} N^T | d\xi d\eta - \iiint \left(\frac{c_L}{\rho c_u} \frac{\partial w}{\partial t} \right) N^T | d\xi d\eta d\zeta$$

2.5 수착등온선

식(11)과 같은 수분확산해석을 수행하면 각 시간에 따른 콘크리트 내부의 임의의 위치에서의 상대함수율이 계산되며 이를 상대습도로 환산하려면 수착등온선 관계를 도입하여야 한다.

콘크리트 내부에서 상대함수율의 변화는 주변의 상대습도에 의해 좌우된다. 온도가 일정할 때 콘크리트 내부에 존재하는 수분의 양은 주변의 상대습도와 평형을 이루게 되는데 이때의 상대함수율과 상대습도의 관계를 수착등온선(sorption isotherm)이라 한다. 이러한 평형상태가 상대함수율이 증가하면서 도달했을 경우에는 흡착등온선(adsorption isotherm)이라 하고, 반면에

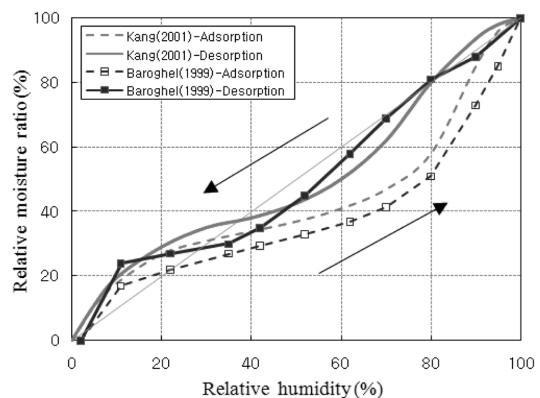


Figure 1. Relationship of sorption isotherm.

상대함수율이 감소하면서 평형상태에 도달했을 경우에는 탈착등온선(desorption isotherm)이라 한다.

Figure 1은 다른 연구자들^{7,8)}에 의한 수착등온선의 사례로서 상대습도의 전 범위에 걸쳐서 상대습도와 상대함수율과의 관계를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트의 흡착등온선과

탈착등온선은 차이를 보이고 있는데 이는 콘크리트가 건조이력의 성질을 갖고 있음을 나타내는 것으로, 최초의 건조상태를 이미 겪은 콘크리트에서는 그 차이가 상당히 줄어드는 성질이 있다. 실제 콘크리트에서는 건조수축 또는 화재발생 등과 같이 거의 모든 경우에 있어서 함수량이 감소하는 경우가 대부분이므로 탈착등온선이 주된 연구대상으로 다루어진다.

콘크리트의 수착등온선은 물-시멘트비, 시멘트 종류, 양생기간, 양생방법, 온도, 혼화재료, 골재 함유량 등에 따라 차이를 보이는 것으로 알려져 있지만 아직까지 그 관계식이 명확하게 규명되지 못한 상황이다. Bazant는 콘크리트에서의 수착등온선 연구를 통하여 상대습도가 25~98%의 범위 내에서 다음과 같이 단순화된 모델을 제시하였으며 그 형태는 Figure 2와 같다.⁹⁾

$$w = 100 - 75 \left[1 - \left(\frac{H}{98} \right)^3 \right] \quad (12)$$

그러나 위의 식은 전반적으로 상대습도에 따른 상대함수율을 적게 평가하고 있는 경향이 있으며, 또한 화재와 같은 완전 건조상태를 고려하지 않아서 상대함수율이 25% 이상일 경우만 적용시킬 수 있는 제약조건을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 식(12)의 단점을 보완하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$H \leq 15\% \text{ 일 경우, } w = 6.91\sqrt{H} \quad (13)$$

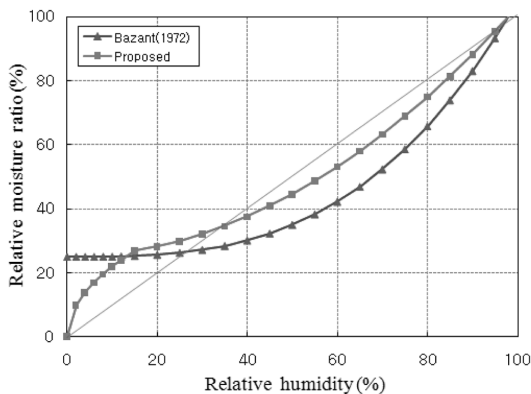


Figure 2. Proposed desorption isotherm.

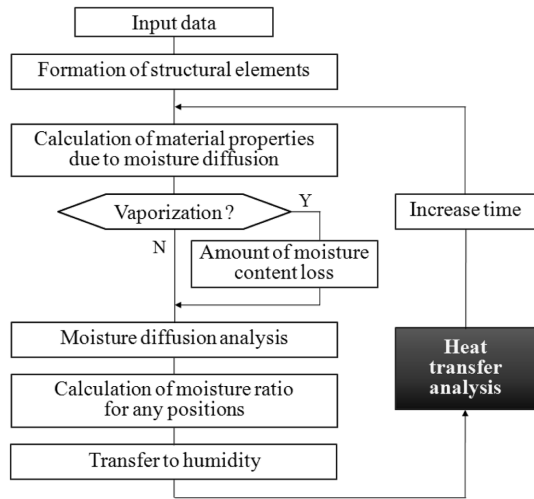


Figure 3. Overall layout of analytical procedure.

$$H > 15\% \text{ 일 경우, } w = 100 - 75 \left[1 - \left(\frac{H}{98} \right)^2 \right]$$

이상에서와 같이 콘크리트 부재에 대하여 적용할 수 있는 식(11)과 같은 행렬방정식으로부터 상대함수율을 구하고 이를 다시 상대습도로 변환시키는 Figure 3과 같은 루틴을 가지는 해석 프로그램을 개발하였으며, 해석 프로그램의 개발과정은 일반적인 구조해석 방식으로 기존에 많이 알려져 있기 때문에 구체적인 언급은 생략하기로 한다. 다만 기존의 해석 프로그램들의 경우에는 수분이동과 온도를 독립적인 관계로 취급하여 각기 별도의 해석을 수행하고 그 최종적인 결과들만을 단순히 합산(summation)하는 방식을 취하고 있으나 본 논문에서와 같이 증발조건을 판정하고 증발에 따른 함수율 변화를 고려하기 위해서는 수분이동과 온도를 병행하여 동시에 평가하는 방식을 적용하여야 하며, 이 중 본 논문에서는 수분이동해석에 관한 내용만으로 구성하였다.

3. 재료의 수분이동 특성치

3.1 수분확산계수

수분확산계수는 당초 습도만의 함수로 여겨져 왔으나 많은 연구자들의 연구에 따라 최근에는 온도와 습도의 복합함수로 취급되고 있다. 습도와 수분확산계수의 관계는 동일한 온도 하에서 습도가 90% 이상이거나 40% 이하일 때는 수분확산계수의 변화가 거의 없지만 그 사이인 40~90%에서는 급격히 변화되는 것으로 알려져 있다. 또한 온도와 수분확산계수와의 관계

는 동일한 습도 하에서 온도를 100°C 이상 상승시키면 수분이 증기화하여 투수성이 급격히 증가하기 때문에 수분확산계수도 급격히 증가하며, 온도가 40~60°C 이하일 경우에는 거의 변화가 없는 것으로 알려져 있다.

현재 일반적으로 많이 사용되고 있는 수분확산계수의 모델들로는 CEB-FIP, Bazant와 Najjar, Sakata 등의 모델식들이 있는데^{4,10,11)} 이 식들은 수분확산계수를 습도만의 함수로 취급하여 온도변화에 따른 영향을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 Bazant와 Najjar의 모델을 근간으로 하여 여기에 온도의 영향을 추가한 다음과 같은 Mihashi와 Numao의 모델을 적용하였다.¹²⁾

$$D = D_1 \cdot f_1(H) \cdot f_2(T) \cdot f_3(T) \tag{14}$$

$$\text{여기서, } f_1(H) = \alpha + \frac{1 - \alpha}{1 + \left(\frac{1 - H}{1 - H_c}\right)^n}$$

$$f_2(T) = \left(\frac{T}{T_0}\right)^n \exp\left\{\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right\}$$

$$f_3(T) = \exp\left\{\left(\frac{T - 273}{90}\right)^{N_2}\right\}$$

D_1 은 기준온도(T_0)와 포화상태($H = 1.0$)에서의 수분확산계수, α 는 수분확산계수의 최대값과 최소값의 비율, H_c 는 평균 수분확산계수일 때의 상대습도, T_0 는 기준온도(293K), U 는 활성화 에너지, R 은 기체 상수, n , N_1 , N_2 는 콘크리트 배합과 양생조건에 따라 변화하는 재료 정수이다.

3.2 표면의 수분발산

콘크리트 표면에서 수분의 발산에 관한 문제를 해결하기 위하여 경계조건을 설정해 주어야 하며, 이 경우 일반적으로 표면계수를 적용시키고 있다.

Sakata는 보통강도 콘크리트에서의 표면계수를 식(15)와 같이 모델링하였으나¹¹⁾ 단순화된 직선식으로 구현되어 0.45~0.5 이하의 낮은 물-결합재비를 가지는 고강도 콘크리트에서는 적용할 수 없는 단점을 가지고 있으며, 고강도 콘크리트에 대하여서는 아직까지 실용화된 모델식이 없는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 Sakata의 식을 낮은 물-결합재비를 가지는 고강도 콘크리트에도 적용이 가능하도록 고차항의 식으로 변경하여, 물-결합재비가 약 0.2~0.3 정도일 때 표면계수가 $(1\sim 2) \times 10^{-5}$ 을 보이는 연구결과¹³⁾와 수분이 없을 경우에는 표면계수가 존재하지 않으므로 원점을 통과하는

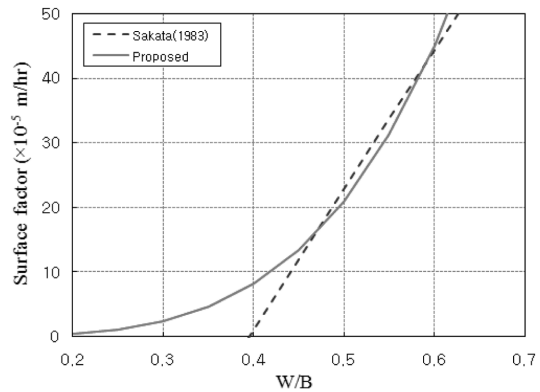


Figure 4. Surface factor by W/B ratio.

경계조건을 추가하여 식(16)과 같은 변형된 모델식을 제안하였다. 물-결합재비에 따른 표면계수를 비교하면 Figure 4와 같다.

$$f = (217W/B - 85.6) \times 10^{-5} \tag{15}$$

$$f = [385(V/B)^{4.2}] \times 10^{-5} \tag{16}$$

여기서, W/B 는 물-결합재비이다.

4. 실험치와의 비교

高正遠 등은 고강도 콘크리트에 대한 화재시 온도 및 습도의 변화를 파악하기 위하여 Figure 5와 같이 벽체에 대한 실험을 수행하였다.¹⁴⁾ 벽체는 두께 120mm에 500×500 mm 크기로 제작하였으며, 철근은 D10을 사용하고 피복두께는 40mm로 배치하였다. 상대습도를 변화시키기 위한 센서는 함수율측정용 전극¹⁵⁾을 Figure 6과 같이 표면으로부터 각각 30, 70, 90mm의 위치에 매설하였으며, 건조개시재령을 두 가지 형태로 구분하여 각각 실험을 수행하였다. 화재는 비재하 조

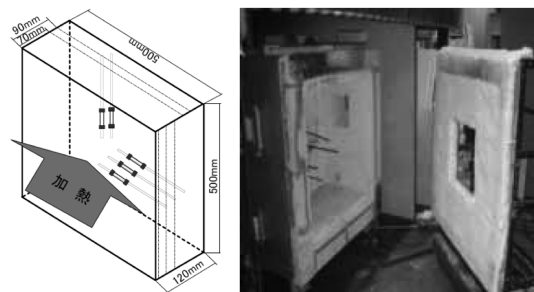


Figure 5. Shape of specimens.

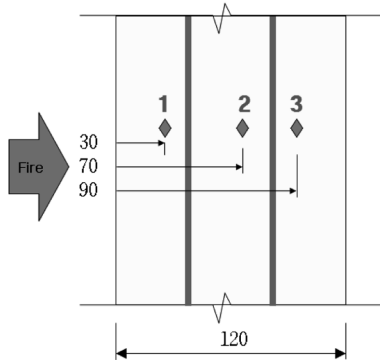


Figure 6. Sensor position of specimens.

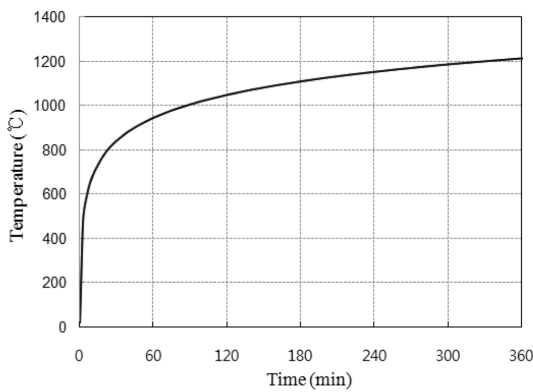


Figure 7. ISO standard heat condition.

Table 1. Mixing Condition of Specimens

Type	f_{ck} (MPa)	W/B (%)	W	C	S	G	Ad. (C × %)
PC-25	80	25	165	660	818	742	0.75
PC-55	40	55	165	300	828	1035	0.40

건으로 Figure 7과 같은 ISO 표준가열곡선¹⁶⁾을 적용하여 한 면에서만 화재가 발생하는 것으로 하였으며, 시험시간은 2시간으로 설정하였다.

사용된 콘크리트의 배합은 Table 1과 같으며, 타설 1일 후 27일간 수중양생한 후 다시 기건상태로 28일 경과된 시험체를 대상으로 하여 해석결과와의 비교를 수행하였다. 해석시작시간에서의 초기 상대습률은 실험결과에 의거하여 PC-25는 78%, PC-55는 90%로 각각 설정하였다.

高正遠 등에 의한 실험치를 본 논문에서의 해석결과와 비교하여 보면 Figure 8 및 Figure 9와 같다. Figure

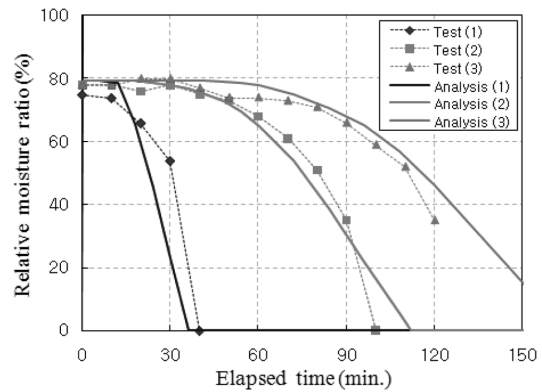


Figure 8. Humidity of specimen PC-25.

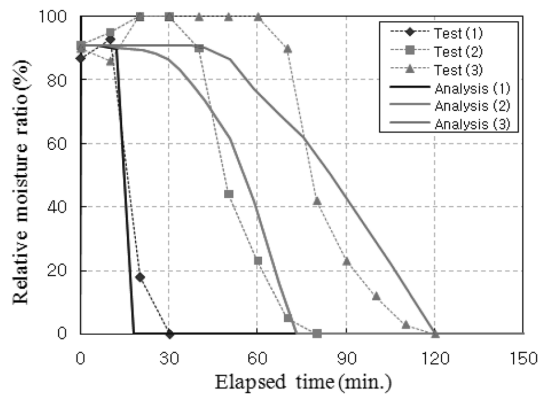


Figure 9. Humidity of specimen PC-55.

8은 콘크리트 압축강도 80MPa의 고강도 콘크리트에 대한 결과(PC-25)로서 실험에 의한 상대습률을 해석결과와 비교해 보면 1, 2, 3번의 모든 계측위치에서 실험치와 해석결과 모두 시간에 따른 수분의 감소현상이 거의 비슷하게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 화재에 따라 콘크리트 내부가 완전 건조상태가 되어 내부수분이 0에 도달하는 상태에 이르기까지 잘 예측되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 활용하여 추후 수분의 증발에 따른 영향을 증기압(pore pressure)으로 모델링 시키면 콘크리트 부재에서의 폭발현상에 대한 해석적 예측이 가능할 것으로 판단된다.

콘크리트 압축강도 40MPa인 보통강도 콘크리트에 대한 결과(PC-55)는 Figure 9와 같다. 보통강도 콘크리트에서도 해석결과는 화재에 따른 콘크리트 내부 수분의 감소를 잘 예측하고 있는 것으로 판단된다. 다만 실험치를 보면 2, 3번 위치에서 상대습률이 100%까지 증가되는 것을 볼 수 있는데 급격한 온도상승에 따른

콘크리트 표면부의 증기압이 커짐에 따라 압력차가 구동력이 되어 높은 에너지를 가지고 있는 수분이 내부 방향으로 이동하였기 때문인 것으로 알려지고 있다.¹⁷⁾ 하지만 고강도 콘크리트인 PC-25의 경우에는 표면부의 급격한 온도상승에도 불구하고 재료 자체의 치밀성으로 인하여 내부수분의 이동현상은 거의 나타나지 않고 있다. 본 논문에서는 아직까지 이와 같은 압력차에 의한 내부수분의 이동현상까지는 고려하지 못하고 있어 해석결과에서는 이러한 경향이 나타나지 않고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 고온 하에서 콘크리트의 수분확산, 발산, 내부증발의 수분이동과정, 수축등온선에 의한 정식화, 재료의 수분이동 특성치 개발을 모두 고려한 콘크리트 내부의 수분이동과정을 평가할 수 있는 해석적 루틴을 개발하였다. 화재와 같은 고온 조건에서는 온도와 수분이동이 상호 밀접한 연관관계를 가지기 때문에 보다 정밀한 해석을 수행하기 위하여서는 증발조건을 판단하고 이에 따라 온도해석과 수분이동해석을 동시에 병행하는 기법의 적용이 필요하였으며, 이 중 본 논문에서는 수분이동해석에 관한 내용만으로 구성하였다. 또한 사용되는 재료의 수분확산 특성치인 수분확산계수 및 표면계수에 대하여서도 분석하였다.

이러한 해석적 결과를 다른 연구자에 의한 실험치와 비교하였으며, 실험치와의 비교결과 시간에 따른 콘크리트 내부에서의 수분이동과정에 대하여 본 해석결과는 실제와 거의 유사하게 예측되고 있는 것으로 평가되었다. 또한 고온에서 콘크리트 내부의 수분증발에 따라 내부 수분이 감소하는 효과도 거의 유사하게 예측하고 있는 것으로 평가되었다.

향후 본 연구결과를 활용하여 증기압 산정 및 비정상상태 크리프 해석 등을 수행하면 콘크리트 부재에서의 폭발현상에 대한 해석적 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. 김형준, 한상훈, 최승관, “화재시 콘크리트 요소 폭렬 영향성 고찰”, 한국화재소방학회 논문지, 제21권, 제2호, pp.54-63(2007).
 4. Z.P. Bazant and L.J. Najjar, “Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete”, Materials and Construction, Vol.5, pp.3-20(1972).
 5. 이태규, “고온 하에서 기화열을 고려한 철근콘크리트 부재의 온도해석”, 대한토목학회 논문집, 제29권, 제4A호, pp.355-363(2009).
 6. I.M. Smith and D.V. Griffiths, “Programming the Finite Element Method”, 3rd Edition, John Wiley & Sons(1998).
 7. V. Baroghel-Bouny, “Water Vapour Sorption Experiments on Hardened Cementitious Materials”, Cement and Concrete Research, Vol.37, pp.414-437(2007).
 8. 강석화, “수화반응 모델과 미세구조의 상관관계 연구”, 연구보고서, 과학기술부 국책연구개발사업, 동양메이저(2001).
 9. Z.P. Bazant, “Thermodynamics of Hindered Adsorption and Its Implications for Hardened Cement Paste and Concrete”, Cement and Concrete Research, Vol.2, No.1, pp.1-16(1972).
 10. CEB-FIP, “CEB-FIP Model Code 1990”, Thomas Telford, London, England(1990).
 11. K. Sakata, “A Study on Moisture Diffusion in Drying and Drying Shrinkage of Concrete”, Cement and Concrete Research, Vol.13, pp.216-224(1983).
 12. H. Mihashi and T. Numao, “Diffusion Process and Shrinkage of Concrete at Evaluated Temperatures”, Journal of JCI, Vol.10, pp.139-146(1988).
 13. J.K. Kim and C.S. Lee, “Moisture Diffusion of Concrete Considering Self-Desiccation at Early Ages - An Experimental Investigation”, Cement and Concrete Research, Vol.29, No.12, pp.1921-1927(1999).
 14. 高正遠, 田村政道, 兼松學, 野口貴文, “火災加熱條件下にあはるコシクリートの細孔構造の變化と熱・水分移動に關する實驗的研究”, 日本建築學會 大會學術講演概要集, pp.55-56(2005).
 15. 고정원, 박상준, 오보환, “화재 가열 환경 하에 있는 콘크리트 중의 열 수분 이동 측정 시스템”, 한국콘크리트학회지 기술기사, 제16권, 제9호, pp.58-62(2007).
 16. ISO Technical Committee 92, “Properties of Materials at High Temperatures”, RILEM Committee 44 (1985).
 17. Z.P. Bazant, “Pore Pressure in Heated Concrete Walls: Theoretical Prediction”, Magazine of Concrete Research, Vol.31, No.107, pp.67-76(1979).