고온조건에서 콘크리트 부재의 수분이동

Moisture Migration of Concrete Members under High Temperature

이태규*† 김혜욱**

Lee, TaeGyu Kim, HyeUk

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 high strength concrete members under the high temperature 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.

1. 서 론

고강도 콘크리트의 경우에는 단위시멘트량이 증가하고 단위수량은 감소되기 때문에 초기재령에서의 자체 건조로 인한 수분손실량은 매우 크다. 이로 인하여 콘크리트 내부의 수분확산 및 수분분포는 보통강도 콘크리트와는 달라지게 된다. 콘크리트 내부에는 매우 다양한 크기의 공극이 존재하고, 각 재령에 따라 공극의 크기가 변화하기 때문에 콘크리트의 수분이동현상은 다른 다공질 재료에 비하여 매우 복잡하다. 따라서 콘크리트, 모르터 또는 시멘트풀의 수분이동에 관한 정확하고 이론적인 모델은 아직까지 확립되지 못한 상태이며, 몇몇 연구자들이 콘크리트 내부의 수분이동에 대하여 수분확산이론(moisture diffusion theory)에 근거한 모델을 부분적으로 제시하고 있는 상황이다.

수분확산이론에서 사용되는 재료적 특성치들은 온도와 습도의 영향을 주로 받지만, 물시멘트비, 골재의 양과 질 등 콘크리트의 품질에도 영향을 받기 때문에 고차의 비선형성을 갖는다. 이러한 특성치들은 콘크리트 내부의 수분분포를 예측하는데 있어 매우 중요한 변수로 사용되고 있기 때문에 보다 정밀한 모델식의 개발이 중요한 실정이다.

한편 콘크리트의 수분은 함수비의 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(vaporization)하게 됨에 따라 추가적인 내부 함수량의 변화가 발생하게 되는데 아직까지 이에 대한 연구는 전무한 실정이다.

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

따라서 본 연구에서는 콘크리트 내부의 수분 증발에 따른 영향까지를 포함하여 고강도 콘크리트의 고온에서의 비정상상태 수분확산 방정식을 전개하고, 고온에서의 재료의 수분이동 특성에 관한 해석적 모델링을 수행하며, 이로부터 콘크리트 부재 내부에서의 시간에 따른 상대습도의 변화과정에 대한 해석적 루틴을 개발하고자 한다.

2. 고온에서의 비정상상태 수분확산

2.1 수분확산

콘크리트 내부의 함수량의 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 함수량(water content)의 형태로 표현할 수 있다.

$$J = -D_{x,y,z}\,\mathrm{grad}\,w \tag{1}$$

여기서, w는 콘크리트 내부의 함수량, $D_{x,y,z}$는 각 방향으로의 수분확산계수(moisture diffusion coefficient) (m2/hr)이다.

지금까지 기존 연구자들에 의한 수분확산이론의 적용에 있어서는 콘크리트 내부 함수량(w)과 상대습도(H)를 동일하게 취급하여, 수분의 확산유속을 콘크리트 내부의 함수량 대신에 공극의 상대습도로 나타내는 방법을 일반적으로 사용하여 왔다. 하지만 함수량과 상대습도는 엄밀히 말해 동일한 값이 아니기 때문에 본 논문에서는 보다 더 정밀한 해석을 수행하기 위하여 상대습도로 변경하지 않고 함수량 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 모두 D로 정의된다. 또한 화재발생에 의하여 내부 함수량이 시간에 따라 변화하게 되므로, 시간에 따른 함수비 변화를 고려한 비정상상태(transient)에서의 수분확산 평형방정식(moisture diffusion equation)을 유도하면 식(3)과 같이 나타난다.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\,\mathrm{div}\,J = \mathrm{div}\,(D\,\mathrm{grad}\,w) \tag{2}$$

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

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 Najjar(1972)의 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.

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

$$\Delta u = u(H_{\mathrm{ext}}) - u(H) \tag{5}$$

여기서, R은 기체 상수, M은 분자량, u_{sat}는 포화시 Gibb's free energy, H_{ext}은 외기의 상대습도이

다.

콘크리트 표면의 온도와 외부의 온도는 동일하다고 가정하면 Gibb's free energy의 차는 $\ln(H_{\text{ext}}/H)$에 비례하며, 따라서 표면에서의 수분 발산에 의한 이동은 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

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.

$$q_w(t) = D_n \frac{\partial w}{\partial n}\Big|_{\Gamma_{Sa}} = f(H_{\text{ext}} - H_s) \tag{7}$$

여기서, $q_w(t)$는 시간에 따라 외기와의 접촉면에 작용하는 발산량(m2/hr), f는 표면계수(surface factor) (m/hr), H_s는 콘크리트 표면에서 함수율로부터 산정된 상대습도(%)이다.

2.3 변분법에 의한 정식화

이상에서와 같은 수분확산 평형방정식에 발산과 증발에 대한 경계조건을 포함시켜 Gauss의 부분적분 공식과 변분법(variational formulation)을 이용하여 유한요소법으로 해석 가능한 행렬방정식 형태로 구성하면 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} &\int_V \dot{w}\, dV + \int_V D\,\partial^2 w\, dV \\ &+ \int_{\Gamma_{Sa}} f\, w_s\, dS \\ &= \int_{\Gamma_{Sa}} f\, w_{\text{ext}}\, dS - \int_V \frac{c_L(t)}{\rho_c\, c_u} \frac{dw}{dt}\, dV \end{aligned} \tag{8}$$

위 식을 시간에 따라 함수량이 변화하는 비정상상태 확산해석(transient diffusion analysis)에 대한 평가를 위하여 식(9)와 같은 시간에 따른 형상함수(shape function)를 사용하여 최종적으로 정리하면 식(10)과 같이 시간영역에서 매트릭스 형태의 행렬방정식으로 표현할 수 있는 식으로 전개된다.

$$\begin{aligned} w(x,y,z,t) &= N(\xi,\eta,\zeta)\,|J|\,w(t) \\ \dot{w}(x,y,z,t) &= N(\xi,\eta,\zeta)\,|J|\,\dot{w}(t) \\ \partial w(x,y,z,t) &= B(\xi,\eta,\zeta)\,|J|\,w(t) \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} &\int\int\int N^T N\,|J|\,d\xi d\eta d\zeta \dot{w} \\ &+ \Big[\int\int\int D\,B^T B\,|J|\,d\xi d\eta d\zeta \\ &+ \int\int f\, N^T N\,|J|\,d\xi d\eta\Big] w \\ &= \int\int f\, w_{\text{ext}}\, N^T\,|J|\,d\xi d\eta \\ &- \int\int\int \left(\frac{c_L(t)}{\rho_c\, c_u}\frac{dw}{dt}\right) N^T\,|J|\,d\xi d\eta d\zeta \end{aligned} \tag{10}$$

이상에서와 같이 콘크리트 부재에 대하여 적용할 수 있는 식(10)과 같은 행렬방정식으로부터 함수량을 구하고 이를 다시 상대습도로 변환시키는 해석 프로그램을 개발하였으며, 해석 프로그램의 개발과정은 일반적

인 구조해석 방식으로 기존에 많이 알려져 있기 때문에 구체적인 언급은 생략하기로 한다. 다만 기존의 해석 프로그램들의 경우에는 수분확산과 온도를 독립적인 관계로 취급하여 각기 별도의 해석을 수행하고 그 결과를 합산(summation)하는 방식을 취하고 있으나 본 논문에서와 같이 증발조건을 판정하고 증발에 따른 함수량 변화를 고려하기 위해서는 수분확산과 온도를 병행하여 동시에 평가하는 방식을 적용하여야 한다.

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

현재 일반적으로 많이 사용되고 있는 수분확산계수의 모델들로는 CEB-FIP(1990), Bazant와 Najjar(1972), Sakata(1983)의 모델식 등이 있는데 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 Numao(1988)의 모델을 적용하였다.

$$D = D_1 \cdot f_1(H) \cdot f_2(T) \cdot f_3(T) \tag{11}$$

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

$$f_2(T) = \left(\frac{T}{T_o}\right)^{N_1} \exp\left\{\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T}\right)\right\}$$

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

D_1은 기준온도(T_o)와 포화상태($H = 1.0$)에서의 수분확산계수, α는 수분확산계수의 최대값과 최소값의 비율, H_c는 평균 수분확산계수일 때의 상대습도, T는 절대온도(°K), T_o는 기준온도(293°K), U는 활성화 에너지, R은 기체 상수, n, N_1, N_2는 콘크리트 배합과 양생조건에 따라 변화하는 재료 정수이다.

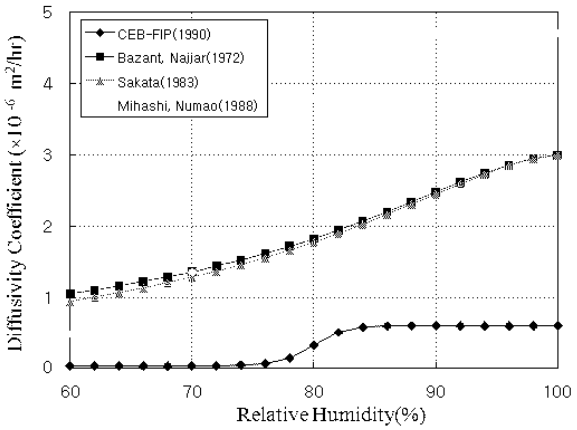

그림 1. 수분확산계수 비교

3.2 표면의 수분이동

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

보통강도 콘크리트에서의 표면계수는 Sakata(1983)에 의하여 식(12)와 같이 모델화되었으나 단순화된 직선식으로 구현되어 0.45~0.5 이하의 낮은 물-바인더비를 가지는 고강도 콘크리트에서는 적용할 수 없는 단점을 가지고 있으며, 고강도 콘크리트에 대하여서는 아직까지 실용화된 모델식이 없는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 Sakata의 식을 낮은 물-바인더비를 가지는 고강도 콘크리트에도 적용이 가능하도록 고차항의 식으로 변경하여, 물-바인더비가 약 0.2~0.3 정도일 때 표면계수가 1~2×10-5을 보이는 Kim과 Lee(1999)의 연구결과와 수분량이 없을 경우($W/B = 0$)에는 표면계수가 존재하지 않으므로($f = 0$) 원점을 통과하는 경계조건을 추가한 식(13)과 같은 변형된 모델식을 제안하였다. 물-바인더비에 따른 표면계수를 비교하면 그림 2와 같다.

$$f = (217\ W/B - 85.6) \times 10^{-5} \tag{12}$$

$$f = [385\,(W/B)^{4.2}] \times 10^{-5} \tag{13}$$

여기서, W/B는 물-바인더비이다.

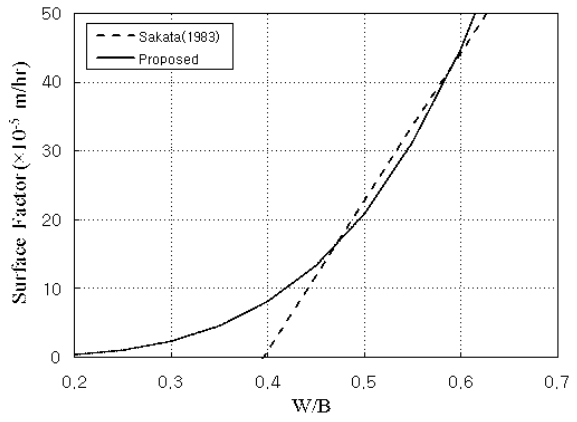

그림 2. 물-바인더비에 따른 표면계수

4. 결 론

본 논문에서는 고온 조건에서 고강도 콘크리트의 내부 수분의 확산, 발산 및 증발을 모두 고려한 콘크리트 내부의 수분이동과정에 대한 해석루틴을 개발하였다. 또한 이를 위하여 사용되는 재료의 수분확산 특성치인 수분확산계수 및 대류계수에 대하여서도 분석하였다.

향후 본 연구결과를 활용하여 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. 강석화, "수화반응 모델과 미세구조의 상관관계 연구", 연구보고서, 과학기술부 국책연구개발사업, 동양메이저(주), 2001.
3. 김흥열, "고온영역에서 고강도 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구", 박사학위논문, 건국대학교, 2002.
4. Baroghel-Bouny, V., "Water Vapour Sorption Experiments on Hardened Cementitious Materials", Cement and Concrete Research, Vol. 37, pp.414~437, 2007.
5. Baroghel-Bouny, V., Mainguy, M., Lassabatere, T., and Coussy, O., "Characterization and Identification of Equilbrium and Transfer Moisture Properties for Ordinary and High-Performance Cementitious Materials", Cement and Concrete Research, Vol. 29,pp.1225~1238, 1999.
6. Bazant, Z.P., "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.
7. Bazant, Z.P., and Najjar, L.J., "Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete", Materials and Construction, Vol. 5, pp.3~20, 1972.
8. CEB-FIP, "CEB-FIP Model Code 1990", Thomas Telford, London, England, 1990.
9. Cook, R.D., Malkus, D.S., and Plesha, M.E., "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", John Wiley & Sons, 630pp, 1989.
10. Kim, J.K., Lee, C.S., "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.
11. Mihashi, H., and Numao, T., "Diffusion Process and Shrinkage of Concrete at Evaluated Temperatures", Journal of JCI, Vol. 10, pp.139~146, 1988.
12. Sakata, K., "A Study on Moisture Diffusion in Drying and Drying Shrinkage of Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 13, pp.216~224, 1983.