

콘크리트 내부의 수분분포 예측에 관한 연구

The Prediction of Moisture Distribution in Concrete

김진근* 이철성**

Kim, Jin-Keun Lee, Chil-Sung

Abstract

Water in concrete has an effect on properties of concrete very much, such as shrinkage, creep, fire resistance, durability, freezing and thawing resistance. Therefore predicting the moisture distribution in concrete is very important. And since the diffusion process of water in concrete is strongly dependent on the temperature and pore humidity, the process is highly nonlinear phenomena. In this study, a finite element program which was capable of simulating the moisture distribution in concrete was developed, and differential drying shrinkage due to the water diffusion process was measured at the different positions of concrete. This F.E.M. program is shown that the analytical results of this study are in good agreement with experimental data. Shrinkage strain caused by moisture distribution was increased with the decrease of pore relative humidity.

1. 서 론

콘크리트 내부에 존재하는 수분은 콘크리트의 여러 성질에 많은 영향을 준다. 따라서 콘크리트가 외기에 노출되어 건조하는 동안 내부의 수분분포를 정확하게 예측하는 것은 실제적으로 매우 중요하다. 특히 콘크리트 내부의 수분분포는 역학적인 성질에 영향을 줄 뿐만 아니라, 크리이프나 건조수축과 같은 장기거동 특성, 내화성, 내구성, 동결융해 저항성 등을 정확하게 해석하는데 필요하다. 그 중에서 건조수축이나 크리이프 등은 콘크리트

내부의 수분분포에 따라 큰 영향을 받고, 탄성계수나 압축강도 등도 수분상태에 따라 많이 달라진다. 그러나 콘크리트 내부에는 매우 다양한 크기의 공극이 존재하고, 각 재령에 따라 공극의 크기가 변화하기 때문에 콘크리트의 수분이동 현상은 다른 다공질 재료에 비하여 더욱 복잡하다. 그래서 콘크리트, 모르타르 또는 시멘트풀의 수분이동에 대한 정확하고 이론적인 모델은 아직 확립되지 못한 상태이다.

Bazant⁽¹⁾ 등은 콘크리트 내부의 수분이동에 대하여 수분확산이론에 근거한 모델을 제시하였다. 수분확산이론은 확산방정식에 근거하고 있으며, 확산방정식에 사용되는 확산계수는 습도와 온도의 영향을 주로 받는다. 이러한 모델은 콘크리트 내부의 수분분포를 예측하는

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

데 사용되어 왔으며, 수분분포 해석결과를 이용하여 구조물에 적용하는 시도도 이루어지고 있다^{(2)~(4)}. 따라서 정확한 수분분포 예측 프로그램의 개발은 매우 중요하다. 특히 부재의 두께가 큰 콘크리트 구조물에서 내부의 수분분포는 각 위치에 따라 큰 차이를 보이므로 이에 대한 고려가 필요하다.

이 연구에서는 수분확산이론을 근거로 하여 콘크리트 내부의 수분분포를 합리적으로 예측할 수 있는 해석 프로그램을 개발하였다. 또한 부등 수분분포의 영향을 알아보기 위하여 콘크리트 내부의 각 위치에서 내부 변형률을 측정하였다. 따라서 이 연구에서 개발된 프로그램을 사용하여 콘크리트 내부의 부등 수분분포를 고려한 구조물의 해석이 가능할 것으로 사료된다.

2. 수분확산 모델링

2.1 수분확산 방정식

수분의 확산유속(moisture flux, J)은 식 (1)과 같이 공극의 상대습도로 나타낼 수 있으며, 수분질량 평형 방정식(mass balance equation)은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$J = -k \text{ grad } h \quad (1)$$

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

여기서, h : 공극의 상대습도

(pore relative humidity)

w : 비함수량(specific water content)

k : 투수계수 (permeability)

흡착등온선(sorption isotherm)에서 함수량은 공극의 상대습도의 함수이므로 시간에 따른 습도의 분포를 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{\frac{\partial w}{\partial h}} \frac{\partial w}{\partial t} = c \frac{\partial w}{\partial t} \quad (3)$$

여기서 $\partial w / \partial h$ 는 수분용량(moisture capacity)이라 하며, 평형상태에서 흡착등온선(sorption isotherm)의 기울기를 나타낸다.

식 (2)와 식 (3)에서 w 와 J 를 소거하면 식 (4)와 같은 수분확산방정식(moisture diffusion equation)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = c \text{ div}(k \text{ grad } h) = \text{div}(D \text{ grad } h) \quad (4)$$

여기서 D 를 확산계수(diffusion coefficient)라 하며 그 값은 $c \cdot k$ 이다.

2.2 수분확산계수

수분확산계수(moisture diffusion coefficient, D)는 온도와 습도 등의 함수이며, 따라서 이들의 변화로 인해 상당한 영향을 받는다. 그림 1은 상대습도와 수분확산계수와와의 관계를 나타내고 있는데, 같은 온도에서 함유습도가 90%에서 60%로 변화할 때 확산계수는 약 0.05배로 급격히 감소한다. 그러나 함유습도가 90% 이상일 때는 거의 일정하게 유지하고, 40% 이하일 경우에도 거의 변화가 없다. 함유습도가 70%에서 80%사이에서 확산계수가 급격히 변화하는 것을 알 수 있다. 그림 2는 온도와 수분확산계수와와의 관계를 나타내고 있다. 동일한 상대습도에서 온도를 100℃ 이상 상승시키면 투수성이 급격히 증가한다. 이것은 수분이 증기화하여 투수성이 급격히 증가하기 때문이다. 따라서 콘크리트의 온도가 80℃ 이상 고온일 경우에는 온도가 확산계수에 영향을 고려해야 한다. 그러나 온도가 80℃ 이하일 때에는 확산계수에 미치는 영향은 작으며, 특히 온도가 40℃ 이하일 경우에는 거의 영향을 미치지 못한다.

CEB-FIP(1990)에서는 등온조건(isothermal condition)인 경우에 수분확산계수를 상대습도의

함수로 표현하고 있다⁽⁵⁾. 식 (5)는 CEB-FIP (1990)에서 제시한 수분확산계수이다.

$$D(h) = D_1 \left(\alpha + \frac{1-\alpha}{1 + [(1-h)/(1-h_c)]^n} \right) \quad (5)$$

여기서, D_1 : $h=1.0$ 인 경우에 해당하는 수분 확산계수(최대 수분확산계수), m^2/hr
 D_0 : $h=0.0$ 인 경우에 해당하는 수분 확산계수(최소 수분확산계수), m^2/hr
 α : D_0/D_1
 h_c : $D(h)=0.5D_1$ 에서 공극의 상대습도
 n : 지수
 h : 공극의 상대습도

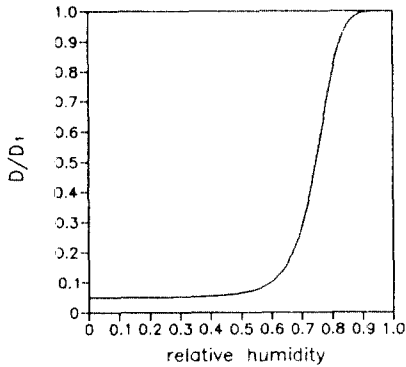


그림 1. 상대습도와 수분확산계수의 관계

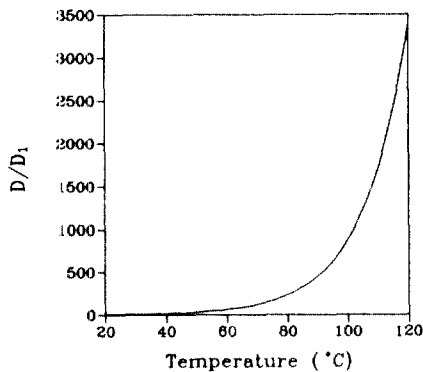


그림 2. 온도와 수분확산계수의 관계

2.3 경계조건

콘크리트 구조물의 표면에서 수분에 관한

경계조건을 설명하기 위해서는 콘크리트 표면의 습도와 외기의 습도사이에 관계를 맺어 주어야 한다. 즉 경계조건은 식 (6)과 같다.

$$D \left(\frac{\partial h}{\partial n} \right)_s = f (h_{en} - h_s) \quad (6)$$

여기서, f : 표면계수(surface factor), m/hr
 h_{en} : 외기의 습도
 h_s : 표면의 습도

3. 유한요소법에 의한 수분확산 해석

3.1 유한요소 정식화

고체 매질 내의 임의의 시간 t 에서의 함유습도를 $H(x,y,z,t)$ 라 할 때, 수분확산 방정식을 3차원 미소체적에 대해 유도하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) \right\} \quad (7)$$

수분확산과정이 등방성이라면 식 (7)은 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} &= D \left\{ \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right\} \\ &= D \nabla^2 H \end{aligned} \quad (8)$$

공간영역에서 유한요소 정식화를 위해, 절점에서의 함유습도와 요소 내의 함유습도를 결합시켜 주는 형상함수와 시간에 따른 요소의 절점에서의 함유습도를 나타내는 함수 $h(t)$ 의 곱으로 요소의 습도분포를 식 (9)와 같이 표현하고 식 (7)을 정리하면 식 (10)과 같다.

$$H(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \{h(t)\} \quad (9)$$

$$\int_{V^e} [N]^T \left\{ D \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial H}{\partial t} \right\} dV = 0 \quad (10)$$

이 때 Gauss의 부분적분공식과 Galerkin법을 이용하고, 경계면 S에서 식 (6)을 적용하면 식 (11)과 같은 수분확산에 관한 요소 내의 유한요소식을 유도할 수 있다.

$$[c] \left\{ \frac{\partial h(t)}{\partial t} \right\} + [k] \{h(t)\} = \{q\} \quad (11)$$

[k]는 전도 매트릭스(conductivity matrix)이며, [c]는 용량 매트릭스(capacity matrix)를 나타낸다.

3.2 시간 영역에서의 차분화

시간 영역에 대해 식 (11)의 해를 구하기 위하여, 시간 간격의 선택에 관계없이 비교적 안정된 해를 가지는 Newmark-β 방법을 사용하였다.

4. 콘크리트 내부의 변형률 측정 실험

이 연구에서는 부등 수분분포의 영향을 알아보기 위하여 콘크리트 내부에 매립형 물드게이지를 매립하여 변형률을 측정하였다. 그림 3에 나타나 있는 바와 같이 실험에 사용한 시편의 크기는 30×30×15cm이며, 4개의 위치에 매립형 물드게이지를 매립하였다. 매립형 물드게이지는 콘크리트 내부의 수분의 변화에 따른 변형률을 측정하는데 사용되었다. 매립형 물드게이지의 위치는 콘크리트의 노출 표면에서 2, 5, 8, 12 cm 깊이에 설치하였다.

실험은 항온항습실에서 실시하였으며, 항온항습실의 조건은 온도 20±2℃, 상대습도 70±2%이다. 시편 제작후 밀폐상태로 1주일 정도 보관하였다가 실험을 실시하였으며, 발산조건을 건조 시에 1차원 흐름으로 만들기 위하여 상부 타설면을 제외한 모든 면을 이중의 비닐로 밀폐하여 수분의 증발을 방지하였다.

실험에 사용한 시멘트는 1종 포틀랜드 시멘트(type I)이고, 잔골재는 금강유역의 강모래이며, 굵은골재는 최대치수 19mm인 화강암 부순자갈을 사용하였다. 그리고 물시멘비는

0.5이다.

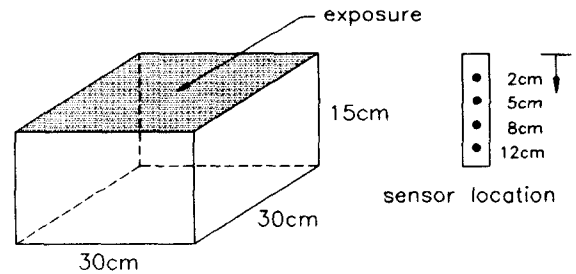


그림 3. 시편의 형상과 크기

5. 예제해석 및 결과분석

이 연구에서 개발된 해석 프로그램을 사용하여 그림 3에 대하여 각 위치에서의 수분분포 해석을 하였다. 기하학적 형상과 외기조건은 3절의 내용과 같다.

그림 4에서 이 연구의 해석결과와 Parrott⁽⁶⁾이 제안한 콘크리트 내부의 수분분포 예측식을 비교하였다. Parrott은 콘크리트 내부의 수분분포에 대하여 실험을 실시하고 실험결과를 이용하여 예측식을 제안하였다. Parrott은 콘크리트 내부의 상대습도를 외기습도, 노출 표면으로부터의 거리, 그리고 노출시간의 함수로 나타내었으며, 식 (12)와 같다.

$$RH = RHA + (100 - RHA) \times f(t) \quad (12)$$

여기서, RH는 콘크리트 내부의 상대습도(%)이고, RHA는 외기습도(%)이다. 그리고 f(t)는 노출시간과 노출 표면으로부터의 거리의 함수이다.

Parrott이 제안한 예측식과 이 연구의 해석 결과는 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

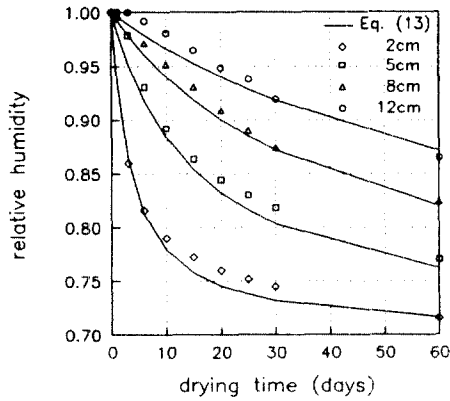


그림 4. Parrott의 예측식과 해석결과의 비교

또한 그림 5는 콘크리트 내부의 변형을 측정결과를 나타내고 있다. 콘크리트 내부의 위치에 따라 건조수축량이 큰 차이를 보이고 있다. 노출 초기에는 건조수축량이 빠른 속도로 변화하지만, 시간이 지남에 따라 변형량의 증가량이 줄어드는 것을 알 수 있다. 콘크리트 표면 근처에서는 노출이 시작된 후 수분이 빠른 속도로 외기로 발산하기 때문에 건조수축량이 크고 건조수축량의 증가 속도도 큰 반면, 콘크리트 내부에서는 수분이 많이 분포하므로 건조수축량과 건조수축량 증가 속도도 작은 값을 나타내고 있다. 즉 수분량의 차이에 따라 각 위치에서의 건조수축량이 현저하게 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 재형에 따른 각 위치에서의 건조수축량은 ACI모델식과 비교하였다. 평균적인 개념의 건조수축량과 부등건조수축량은 상당한 차이를 나타냈으며 따라서 이를 해석에서 고려해 주어야 한다.

그림 6은 콘크리트 내부의 수분해석 결과와 변형을 측정 실험결과를 나타내고 있다. 콘크리트 내부의 상대습도가 감소함에 따라 각 위치에서의 수축 변형률도 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 콘크리트 내부에서 부등수분분포로 인하여 각 위치에서 변형률의 차이가 생기며 이로 인하여 콘크리트에서는 부등응력이 일어난다.

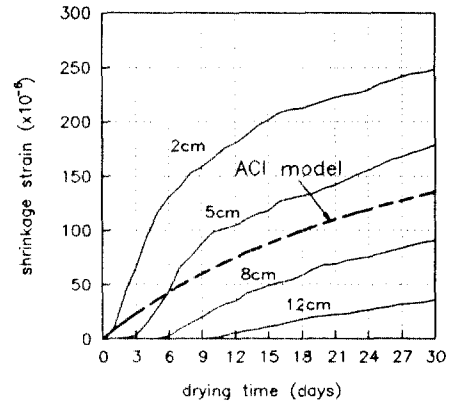


그림 5. 콘크리트 내부의 변형을 측정 실험결과

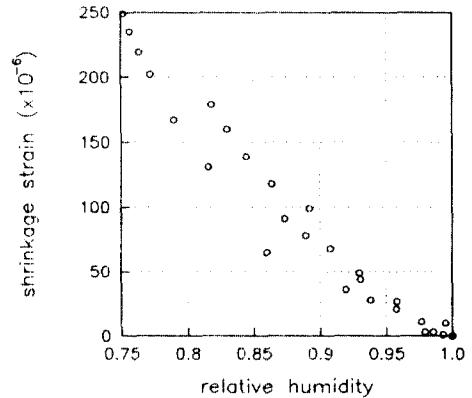


그림 6. 콘크리트 내부의 상대습도와 변형률의 관계

5. 결론

이 연구에서는 수분확산이론에 의하여 콘크리트 내부의 수분분포 해석 프로그램을 개발하였으며, 콘크리트 내부의 변형을 측정 실험을 하였다. 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 수분확산이론에 의하여 콘크리트 내부의 수분분포를 합리적으로 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다.
- (2) 개발된 수분분포 해석프로그램은 콘크리

트 내부의 수분분포를 비교적 정확히 예측하였다.

- (3) 콘크리트 내부의 수분분포가 달라짐에 따라 각 위치에서 발생하는 수축량은 상당히 차이가 있으며, 이로 인하여 부등응력이 발생한다.
- (4) 이 연구에서 개발된 프로그램을 통하여 콘크리트 내부의 부등 수분분포를 고려한 구조물의 해석이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기초전력공학공동연구소의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Bazant, Z. P., and Najjar, L. J., "Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete," *Materials and Structures*, Vol. 5, No. 25, Jan.-Feb., 1972, pp. 3-20.
2. Illston, J. M., and Tajirian, A., "Computer Experiments on Environmentally Induced Stresses in Unreinforced Concrete Pavement Slabs," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 29, No. 101, 1977, pp. 175-190.
3. Bazant, Z. P. and Thonguthai, W., "Pore Pressure and Drying of Concrete at High Temperature," *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 104, No. EM5, Oct., 1978, pp. 1059-1079.
4. Sakata, K., "A Study on Moisture Diffusion in Drying and Drying Shrinkage of Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, No. 2, March. 1983, pp. 216-224.
5. Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP Model Code 1990 Final Draft, *Bulletin d'Information*, 1991, pp. 68-69.
6. Parrot, L. J., "Factors Influencing Relative Humidity in Concrete," *Magazine of*