

공극률 변화를 고려한 콘크리트의 수분확산계수 모델

Modeling of Moisture Diffusion Coefficient with Porosity in Concrete

강 수 태^{*} 전 상 은^{**} 김 진 근^{***} 김 성 옥^{****}
Kang, Su-Tae Jeon, Sang-Eun Kim, Jin-Keun Kim, Sung-Wook

ABSTRACT

The nonlinear humidity distribution occurs due to the moisture diffusion when a concrete is exposed to an ambient air. These nonlinear humidity distribution induces shrinkage cracks on surfaces of the concrete. Because shrinkage cracks largely affect the durability and serviceability of concrete structures, the moisture diffusion in concrete must be investigated.

The purpose of this paper is to propose a model of the moisture diffusion coefficient that governs moisture diffusion within concrete structures. To propose the model, numerical analysis were performed based on several experiments. Because the moisture diffusion coefficient is changed with aging, especially at early ages, the proposed model includes aging effect by terms of the porosity as well as the humidity of concrete.

1. 서 론

콘크리트는 시간이 지남에 따라 내부의 함수량과 수분분포가 변화하며, 이러한 변화는 콘크리트의 건조수축이나 크리프와 같은 장기거동 특성뿐만 아니라 압축강도와 탄성계수 등의 역학적 특성에도 큰 영향을 미친다.

일반적으로 콘크리트 구조물이 외기에 노출되면 수분확산 현상에 의해서 수분이 이동하고, 콘크리트 내부의 함수량은 위치에 따라서 다르게 나타난다. 이러한 콘크리트내의 부등수분분포는 부등건조수축을 발생시키고, 결국 콘크리트 표면에 수축균열을 일으켜 온도균열과 함께 초기재령 콘크리트의 성능저하를 일으킨다. 따라서 이러한 수축균열을 제어하기 위해서는 콘크리트의 수축 현상에 대한 기본적인 메커니즘을 이해하고, 이를 예측할 수 있는 기법을 개발하여야 한다.

콘크리트는 재령이 지남에 따라 수화반응에 의해 내부 미세구조가 차츰 치밀하게 된다. 따라서 이러한 내부 미세구조의 변화는 재령과 밀접한 연관성을 가지고 있다. 일반적으로 콘크리트의 미세구조 변

* 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

** 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정

*** 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

**** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원

화는 콘크리트의 공극률 변화와 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 기준온도에 대한 실내 실험을 통하여 콘크리트의 수분확산을 결정하는 수분확산계수에 대한 모델식을 제안하고자 한다. 제안된 모델식은 기존의 모델에서 고려한 공극내의 상대습도뿐만 아니라 재령에 따라서 변하는 공극률을 고려하도록 하였다.

2. 콘크리트의 수분확산 및 수분확산계수

2.1 수분확산 방정식

콘크리트의 수분확산에 의한 수분의 확산유속은 콘크리트 내부의 수분경사에 비례하고, 공극의 상대습도나 함수량 등으로 표현된다. 수분의 확산유속(J)을 공극의 상대습도(h)로 나타내면 식 (1)과 같으며, 식 (1)은 콘크리트 내부의 수분분포 해석에 널리 사용되고 있다.

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

여기서, k 는 투수계수이다.

식 (1)에 수분질량 평형 방정식(mass balance equation)과 콘크리트의 Sorption Isotherm 곡선을 이용하면, 다음 식(2)와 같은 비선형 수분확산 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = c \text{ div } (k \text{ grad } h) = \text{div } (D \text{ grad } h) \quad (2)$$

여기서, c 는 Sorption Isotherm 곡선의 기울기의 역수, D 는 수분확산계수이다.

식 (2)에 의하면 콘크리트의 수분확산은 수분확산계수와 밀접한 관계를 갖는 것을 알 수 있다.

2.2 수분확산계수

수분확산계수는 온도와 상대습도의 함수로 알려져 있으며, 이들의 변화에 따라 크게 영향을 받는다. CEB-FIP(1990) model에서는 등온조건에 대한 수분확산계수를 공극의 상대습도의 함수로 표현하였다. 또한 Bazant는 공극의 상대습도뿐만 아니라 온도의 영향을 고려한 식을 제안하였으며, 일반적인 온도와 습도범위를 가지는 외기 환경에 대해 투과율 a 에 대한 식은 다음과 같다.

$$a = a_0 f_1(h) f_2(T) \quad T \leq 95^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$f_1(h) = a + (1-a) \left[1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c} \right)^4 \right]^{-1} \quad (4)$$

$$f_2(T) = \exp \left[\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T+293} \right) \right] \quad (5)$$

여기서, h_c 는 과도 습도(≈ 0.75)이고 a 는 다음 식 (6)을 사용하였다. 그리고 T 는 섭씨온도, Q 는 물 이동에 위한 활성화에너지, R 은 가스상수로 Bazant와 Najjar[1]에 의하면, Q/R 은 2700 K이다.

$$1/a = 1 + 19(95 - T)/70 \quad (6)$$

위의 식에서 투과율을 수분확산의 경우로 생각하면 투과율은 확산계수를 나타낸다. 그리고 위에서 기준투과율(a_0)은 25℃를 기준으로 하였으나, 본 연구에서는 기준투과율을 20℃와 포화상태($h=1.0$)의 확산계수로 하였다. 따라서 Bazant의 식은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$D(T, h) = D_1 \cdot f_1(h) \cdot f_2(T) \quad (7)$$

여기서, $f_1(h)$ 와 $f_2(T)$ 는 위에서 나타낸 식과 동일하다.

3. 수분확산계수 모델식 개발

3.1 수분확산 프로그램

본 연구에서는 수분확산 방정식과 표면계수를 사용한 경계조건을 1차원 유한차분법에 의해 정식화하여 수분확산과정을 해석하였다. 정식화 과정에서 해석 수행시간과 해석 결과의 수렴성을 고려하여 Crank-Nicolson method를 사용하였다.

1차원 유한차분법에 의한 해석흐름도는 그림 1과 같다. 먼저 주어진 시간단계에서 모든 위치의 상대습도를 그림 1의 흐름도에 따라 결정하고, 순차적으로 모든 시간단계에 대한 결과를 얻었다.

3.2 재령에 따른 공극률 변화에 대한 고려

본 연구에서는 기존 모델식에 비해 다음의 두 가지 사항을 고려하였다. Bazant가 제안한 모델은 100℃이하에서의 수분이동이 모세관수의 흐름이 아닌 흡착수 층을 따른 물 분자의 이동에 의해 결정된다는 가정하여 미세구조의 흡착수 층을 통한 수분이동만을 반영하였다. 그러나 초기재령에서 수분확산은 공극률에 의해 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 미세구조의 변화를 나타내는 공극률을 변수로 하여 그 영향을 표현하고자 하였다.

단위부피의 콘크리트 공극률은 다음과 같이 단위시멘트량, 수화도, 물/시멘트비의 함수로 나타내어진다.[3]

$$\phi = \frac{C}{\rho_w} (w/c - 0.172 a_c) \quad (8)$$

여기서, C 가 단위시멘트량(kg/m^3), ρ_w 는 물의 밀도($=1000 \text{ kg}/\text{m}^3$)이고, w/c 는 물/시멘트비를 나타내며, a_c 는 수화도를 나타낸다.

수화도는 ACI에서 제안한 1종 시멘트에 대한 강도발현식에 근거하였다. 즉, 강도발현과 수화도가 선형적인 비례관계를 가진다고 가정하여 다음과 같이 수화도를 재령 t (일)의 함수로 가정하였다.

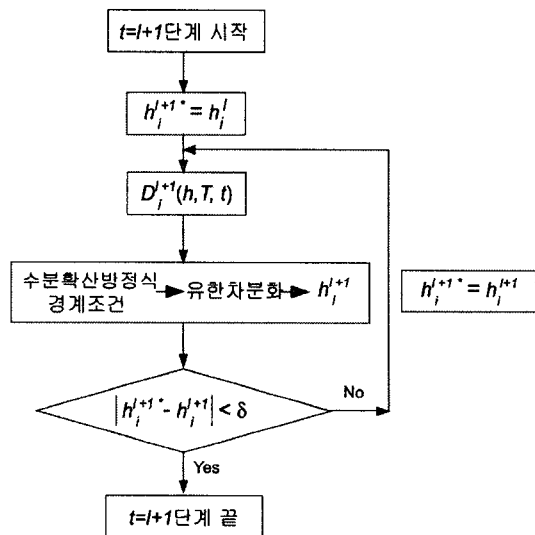


그림 1 유한차분법에 의한 해석흐름도

$$\alpha_c = \frac{0.85t}{4 + 0.85t} \quad (9)$$

3.3 공극률을 고려한 수분확산계수 모델식

식 (7)에서 D_1 , $f_1(h)$, $f_2(T)$ 는 모두 콘크리트의 미세구조의 형성과정에 따라 영향을 받으므로 각각 미세구조의 형성 정도를 나타내는 재령에 따른 공극률, ϕ 를 포함하는 함수로 나타내어야 한다. 따라서 수분확산계수는 다음과 같은 공극률의 함수로 수정할 수 있다.

$$D(h, T, \phi) = D_1(\phi) f_1(h, \phi) f_2(T, \phi) \quad (10)$$

그러나 식 (10)에서 각각의 함수에 대한 ϕ 의 영향을 정량화하는 것은 매우 어려우므로, 본 연구에서는 수분확산계수에 대한 공극률의 영향을 다음과 같이 고려하였다.

$$D(T, h, \phi) = D_1 \cdot f_1(h) \cdot f_2(T) \cdot f_3(\phi) \quad (11)$$

이 때, D_1 과 $f_3(\phi)$ 는 기존의 실험결과[4]를 근거로 수분확산 해석 수행하여 구하였다. 수분확산 해석에서 a 는 앞서 언급한 식 (6)에 의해 약 0.05를 사용하였으며, h_c 는 0.78을 사용하였다. 여기에 사용된 실험결과는 각각 물/시멘트비 28%, 40%, 68%의 배합으로 기준온도 20°C 외기조건에 노출개시 재령이 각각 3일과 28일에 대해 수행된 결과이다.

공극률의 함수 $f_3(\phi)$ 는 재령의 영향을 나타내는 함수로 초기의 기준 수분확산계수에서 시간이 지남에 따라 확산계수가 줄어드는 것을 나타낸다. 따라서 $f_3(\phi)$ 를 다음과 같이 재령 28일의 공극률에 대한 임의 재령 t 에서의 공극률 비의 함수로 가정하였다.

$$f_3(\phi_t) = \left(\frac{\phi_t}{\phi_{28}} \right)^m \quad (10)$$

여기서, ϕ_{28} 는 등가재령이 28일에서의 공극률을 나타내고, ϕ_t 는 임의재령 t 에서의 공극률을 나타낸다.

D_1 값과 $f_3(\phi)$ 의 지수 m 을 변수로 하여 실험결과와 비교분석한 결과, m 의 값은 3일 때 잘 일치하였으며, 각각의 물/시멘트비에 대한 D_1 값은 표 1과 같이 결정하였다.

표 1 물/시멘트비에 따른 D_1 값의 결과

물/시멘트비(w/c)	D_1 값 ($\times 10^{-10}$ m ² /h)
0.28	2.02
0.40	2.10
0.50	2.26
0.68	2.87

표 1의 결과를 통해 CEB-FIP(1990) model과 같은 형태로 D_1 값을 설계기준 압축강도의 함수로 나타내었고, 그 결과는 식(11)과 같다.

$$D_1 = \frac{5.75 \times 10^{-6}}{f_{ck}^{0.25}} \quad (11)$$

여기서, f_{ck} 는 콘크리트의 설계기준강도이며, 콘크리트의 평균 압축강도(f_{cm})로부터 구할 수 있으며, $f_{ck} = f_{cm} - 8$ MPa이다.

노출표면 근처에서의 상대습도 변화는 수분확산계수 뿐만 아니라 해석프로그램에서 경계조건을 나타내는데 사용한 표면계수와 상당히 밀접한 관계를 가진다. 따라서 표면부 근처 깊이에서의 상대습도 변화를 정확히 나타내기 위해서는 표면계수에 대한 정확한 정의가 필요한데, 기존에 사용된 Sakata[2]의 제안식은 적용가능한 물/시멘트비의 적용범위가 대략 0.4에서 0.7사이의 값에서 사용되며, 외기에 노출되기 시작하는 시점에 대한 고려가 되어 있지 않아 본 논문에서 고려하고자 하는 초기재령에서 변화하는 공극률을 고려한 수분확산계수와 관련하여 물/시멘트비 20%까지 적용할 수 있는 물/시멘트비와 노출개시 재령의 함수로서 표현하여 그 영향을 나타내었다.

표면계수는 다음의 식(12)를 사용하였다.

$$C_f = 2.59 \times 10^{-5} (w/c - 0.2)^{0.48} \left(\frac{28}{t_0} \right)^{0.16} \quad (12)$$

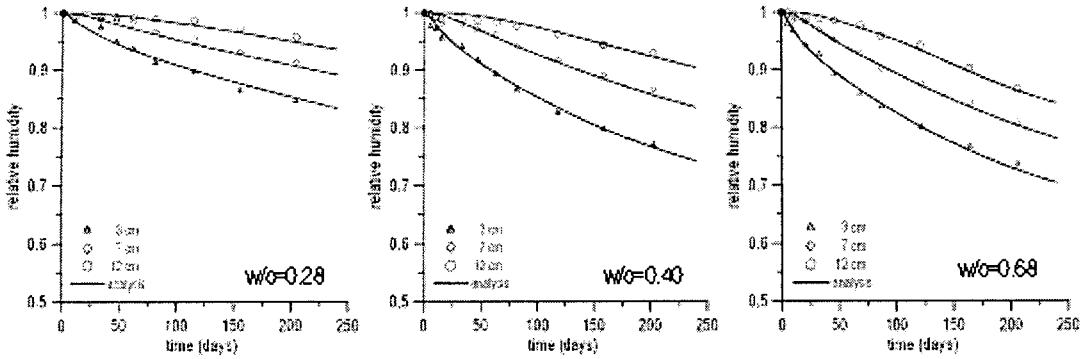
여기서, t_0 는 노출개시 재령을 의미한다.

그림 2는 물/시멘트비 28%, 40%, 68%의 배합으로 기준온도 20℃ 외기조건에 노출개시 재령이 각각 3일과 28일에 대해 수행된 실험결과와 위에서 제안한 수분확산계수와 표면계수를 통해 해석한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 3, 7, 12 cm는 이전실험의 일면노출 시험체에 대해 상대습도를 측정할 노출면으로부터의 각각의 깊이를 나타낸다.

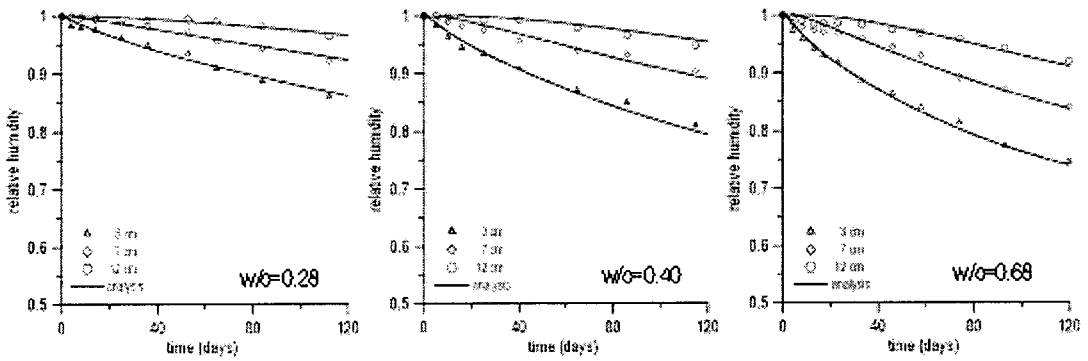
4. 결 론

본 연구에서는 초기재령 콘크리트에 대해 공극률의 변화를 고려한 수분확산계수의 모델식을 제안하고자 하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 기존의 수분확산계수 모델식들은 경화된 콘크리트에 대해 일정한 미세구조를 가진다는 가정에 근거하여 제안되었으나, 본 연구에서는 초기재령 콘크리트의 수분확산에 미세구조가 형성되는 과정이 미치는 영향을 고려한 수분확산모델을 제안하였다.
2. 해석결과 실험체의 노출면 부근의 습도변화의 양상은 수분확산계수와 표면계수에 의해 복합적인 영향을 받고, 내부로 갈수록 수분확산계수의 영향에 의해 지배되는 것을 알 수 있었다. 따라서 실험결과에 근거하여 표면계수를 물시멘트비와 노출재령의 함수로 수정하였다.
3. 본 연구에서 제안한 식은 동일 시간에 대해 모든 깊이에서 모세공극 구조가 동일하다는 가정을 하고 있다. 그러나 실제로는 초기에 수분확산의 영향에 놓이는 부분과 그렇지 않은 부분의 미세구조의 형성은 다르기 때문에, 해석대상의 실험결과는 노출 초기부터 수분확산이 일어나는 위치에 대해서는 다소 과소평가될 수 있을 것으로 판단되며, 추후 이에 대한 고려도 이루어져야 할 것이다.



(a) 노출재령 3일



(b) 노출재령 28일

그림 2 실험결과 및 해석결과 비교

참고문헌

1. Bazant, Z. P., Najjar, L. J., "Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete", Material and Structures, Vol. 5, No. 25, 1972, pp.3~20.
2. Sakata, K., Kuramoto, O., "A Study on Moisture Diffusion in Drying Shrinkage of Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 3, No. 2, 1983, pp.216~224.
3. Neville, A. M., "Properties of Concrete", 4th Ed., Wiley, pp.26~34.
4. Kim, J. K., Lee, C. S., "Moisture Diffusion of Concrete Self Dessionication at Eearly Ages", Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 12, 1999, pp.1921~1927.