

초기재령 콘크리트의 시간 의존적인 수분확산계수 예측에 관한 연구

Prediction of Time-dependent Moisture
Diffusion Coefficient in Early-age Concrete

강 수 태*
Kang, Su-Tae

김 진 근**
Kim, Jin-Keun

Abstract

The nonlinear humidity distribution occurs due to the moisture diffusion when a concrete is exposed to an ambient air. This 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 was performed with 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.

요 지

콘크리트가 외기에 노출되면 수분확산으로 인해 콘크리트 내에는 비선형 수분분포를 가진다. 이러한 비선형 수분분포는 부등 건조수축을 야기시키고 콘크리트 표면에 수축균열을 일으키게 된다. 수축균열의 발생은 콘크리트 구조물의 내구성과 사용성에 영향을 미치게 되므로 근본적으로 수분확산에 대한 연구가 반드시 요구된다. 본 연구의 목적은 콘크리트 구조물의 수분확산을 지배하는 수분확산계수의 수정 모델식을 제안하는 것으로서 이를 위해 여러 가지 실험결과를 근거로 하여 수치해석을 수행하였다. 콘크리트의 수분확산계수는 재령에 따라 변화하며 특히, 초기재령에서 변화가 크게 나타난다. 본 연구에서 제안한 수분확산계수 모델식은 콘크리트의 습도뿐만 아니라 공극률의 함수로써 재령의 영향을 고려하였다.

Keywords : moisture diffusion, moisture diffusion coefficient, early age, porosity

핵심 용어 : 수분확산, 수분확산계수, 초기재령, 공극률

* 정희원, 한국건설기술연구원 연구원

** 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

E-mail: alphard@kict.re.kr, 031-910-0714

• 본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2006년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트는 재령에 따라 내부의 함수량과 수분분포가 변화하는데 이러한 변화가 콘크리트의 성질변화에 큰 영향을 미친다. Nilsson⁽¹⁾과 Parrott⁽²⁾의 연구결과는 콘크리트 내의 수분(moisture)과 상대습도가 콘크리트의 성질과 내구성에 얼마나 많은 영향을 미치는지에 대해 잘 설명하고 있다.

콘크리트는 시간이 경과함에 따라 여러 가지 원인에 의해 수분손실이 일어나게 된다. 콘크리트의 수분손실은 직접적으로 건조수축이나 크리프와 같은 장기 거동 특성과 압축강도와 탄성계수 등의 역학적 특성에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 콘크리트 구조물이 외기에 노출되면 수분확산 현상에 의해서 수분이 이동하고, 콘크리트 내부의 함수량은 위치에 따라서 다르게 나타난다. 이러한 수분확산으로 인해 발생하는 콘크리트 내의 함수량의 차이는 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.

콘크리트의 수분확산과정에 대한 연구는 수십 년에 걸쳐 연구되어 왔고, 그 연구결과에 있어 상당한 성과를 거두었다.^{(3),(4),(5),(6),(7)} 하지만 대부분의 연구가 일정기간의 양생기간을 거친 굳은 콘크리트에 대해 국한되어 있고 초기재령에서의 수분확산 특성에 대한 연구는 아직까지 부족한 상황이다. 콘크리트가 그 조직을 구성해 가는 과정에 있는 초기재령에서 콘크리트는 성능저하에 대한 저항성이 매우 약하다. 따라서 콘크리트의 초기균열 발생 메커니즘과 같은 콘크리트의 시간 의존적인 재료적 특성을 파악하는데 있어서는 초기재령 콘크리트의 수분확산과정에 대한 연구가 반드시 필요하다.

콘크리트는 재령이 지남에 따라 수화반응에 의해 내부 미세구조가 차츰 치밀하게 된다. 따라서 이러한 내부 미세구조의 변화는 재령과 밀접한 연관성을 가지고 있다. 일반적으로 콘크리트의 미세구조 변화는 콘크리트의 공극률 변화와 관련이 있는 것으로 알려져

있다. 본 연구에서는 기준온도에 대한 실내 실험을 근거로 하여 콘크리트의 수분확산을 결정하는 수분확산계수에 대한 모델식을 제안하고자 한다. 제안된 모델식은 기존의 모델에서 고려한 공극 내의 상대습도뿐만 아니라 재령에 따라서 변하는 공극률을 고려하도록 하였다.

2. 콘크리트의 수분확산 및 수분확산계수

2.1 확산

확산은 일반적으로 농도 구배(concentration gradient)에 의한 물질의 이동으로 정의된다. 따라서 침투과정은 체적흐름(bulk flow)과 관계가 있지만, 확산과정은 개개의 분자나 이온의 운동과 관계된다. 확산과정을 나타내기 위해서 개발된 Fick의 제 1, 2 법칙은 경험적인 관찰을 통해 얻어졌다.

$$J = -D \text{ grad } c \quad (1)$$

위의 식은 Fick의 제 1법칙을 나타낸 것이며, 여기서, D 는 확산계수(m^2/s)를 나타내고 c 는 용액 속 입자의 농도를 의미한다.

Fick의 제 2법칙은 다음 식 (2)와 같다.

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

초기조건과 경계조건을 알고 있을 때, 식 (2)는 일반적으로 Laplace 변환과 Fourier 변환 기법을 사용하여 해를 구할 수 있다.

2.2 수분확산 방정식

콘크리트의 수분확산에 의한 수분의 확산유속(moisture flux, J)은 콘크리트 내부의 수분경사에 비례하고, 공극의 상대습도나 함수량 등으로 표현된다. 수분의 확산유속(J)을 공극의 상대습도(h)로 나타내면 식 (3)과 같으며, 식 (3)은 콘크리트 내부의 수분분포 해석에 널리 사용되고 있다.

$$J = -k \text{ grad } h \quad (3)$$

여기서, h 는 공극의 상대습도를 나타내고, k 는 투수계수를 의미한다.

또한 수분의 질량 평형방정식(mass balance equation)은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = - \text{div } J = \text{div} (k \text{ grad } h) \quad (4)$$

여기서, w 는 함수율, t 는 시간을 나타낸다.

식 (4)에서 콘크리트의 sorption isotherm 곡선을 이용하면, 다음 식 (5)와 같은 비선형 수분확산 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = c \text{ div} (k \text{ grad } h) = \text{div} (D \text{ grad } h) \quad (5)$$

여기서, c 는 sorption isotherm 곡선의 기울기의 역수, D 는 수분확산계수(moisture diffusion coefficient)를 나타내며 그 값은 ck 이다.

식 (5)에 의하면 콘크리트의 수분확산은 수분확산계수와 밀접한 관계를 갖는 것을 알 수 있다.

2.3 수분확산계수

수분확산계수는 온도와 상대습도의 함수로 알려져 있으며, 이들의 변화에 따라 크게 영향을 받는다. CEB-FIP(1990)⁽⁹⁾에서는 등온조건에 대한 수분확산계수를 공극의 상대습도의 함수로 표현하고 있다. 식 (6)은 CEB-FIP(1990)에서 제시한 수분확산계수이다.

$$D(h) = D_1 \left(\alpha + \frac{1-\alpha}{1 + [(1-h)/(1-h_c)]^n} \right) \quad (6)$$

여기서, D_1 는 $h=1.0$ 인 경우의 수분확산계수(최대 수분확산계수) (m^2/h), D_0 는 $h=0$ 인 경우의 수분확산계수(최소수분확산계수)(m^2/h), α 는 D_0/D_1 , h_c 는 $D(h)=0.5D_1$ 에서 공극의 상대습도, n 은 구성재료특

성에 따라 결정되는 지수, h 는 공극의 상대습도이다.

CEB-FIP(1990)에서는 근사적으로 $\alpha=0.05$, $h_c=0.80$, $n=15$ 를 제시하고 있다. 그리고 최대 수분확산계수 D_1 은 식 (7)과 같이 압축강도의 함수로 나타냈다.

$$D_1 = \frac{D_{1,0}}{f_{ck}/f_{ck0}} \quad (7)$$

여기서, $D_{1,0}=3.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$ 이고, $f_{ck0}=10 \text{ MPa}$ 이다. 그리고 f_{ck} 는 콘크리트의 평균 압축강도(f_{cm})로부터 구할 수 있으며, $f_{ck}=f_{cm}-8 \text{ MPa}$ 이다.

또한 Bazant는 공극의 상대습도뿐만 아니라 온도의 영향을 고려한 식을 제안하였으며, 일반적인 온도와 습도범위를 가지는 외기 환경에 대해 투과율 α 를 다음과 같은 식으로 제안하였다.

$$\alpha = \alpha_0 f_1(h) f_2(T) \quad T \leq 95^\circ\text{C} \quad (8)$$

$$f_1(h) = \alpha + (1-\alpha) \left[1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c} \right)^4 \right]^{-1} \quad (9)$$

$$f_2(T) = \exp \left[\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T+293} \right) \right] \quad (10)$$

여기서, h_c 는 과도 습도(≈ 0.75)이고 α_0 는 다음 식 (11)을 사용하였다. 그리고 T 는 섭씨온도, Q 는 수분이동을 위한 활성화에너지, R 은 가스상수로 Bazant와 Najjar⁽³⁾에 의하면, Q/R 은 2700 K이다.

$$1/\alpha = 1 + 19(95 - T)/70 \quad (11)$$

본 연구에서는 Bazant가 제안한 식 (8)을 기준 모델식으로 고려하였으며, 위의 식에서 투과율을 수분확산의 경우로 생각하면 투과율은 확산계수를 나타낸다. 그리고 식 (8)에서 기준투과율(α_0)은 25°C를 기준으로 하였으나, 본 연구에서는 기준투과율을 20°C와 포화상태($h=1.0$)의 확산계수로 하였다. 따라서 Bazant의 식은 다음과 같은 식으로 바꿔 표현할 수 있다.

$$D(T, h) = D_1 \cdot f_1(h) \cdot f_2(T) \quad (12)$$

여기서, D_1 은 20℃와 포화상태($h=1.0$)의 확산계수를 의미하고 $f_1(h)$ 와 $f_2(T)$ 는 앞에서 나타낸 식 (9), 식 (10)과 동일하다.

2.4 수분확산의 경계조건

콘크리트 표면에서의 상대습도는 외기의 습도조건에 의해 영향을 받는다. 따라서 습도의 경계조건을 통해 콘크리트 표면의 상대습도와 외기습도와의 관계를 나타낼 필요가 있다. 노출면 S에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$D \left(\frac{\partial h}{\partial n} \right)_s = f(h_{en} - h_s) \quad (13)$$

여기서, f 는 표면인자(m/h)를 나타내고, h_{en} 은 외기의 상대습도를 나타내며, 그리고 h_s 는 노출면에서의 상대습도이다.

표면인자는 Sakata⁽⁶⁾에 의해 물/시멘트비의 함수로 표현되었는데, 계산결과를 실험결과들과 비교하여, 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$f = 2.17 \times 10^{-3} \left(\frac{w}{c} \right) - 8.56 \times 10^{-4} \quad (14)$$

3. 수분확산계수 모델식 개발

3.1 수분확산 프로그램

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

수분확산의 기본방정식은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = D \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad (15)$$

위 식을 Crank-Nicolson method를 사용하여 유한차분화하면 좌변과 우변은 각각 다음과 같이 나타내어진다.

$$D \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \approx \frac{1}{2} \left[D_i^l \frac{h_{i+1}^l - 2h_i^l + h_{i-1}^l}{\Delta x^2} + D_i^{l+1} \frac{h_{i+1}^{l+1} - 2h_i^{l+1} + h_{i-1}^{l+1}}{\Delta x^2} \right] \quad (16)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} \approx \frac{h_i^{l+1} - h_i^l}{\Delta t} \quad (17)$$

경계조건에 대한 기본방정식은 다음과 같다.

$$D \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_s = f(h_{en} - h_s) \quad (18)$$

식 (18)을 유한차분화하여 나타내면 아래와 같다.

$$\frac{D_i^{l+1}}{\Delta x} (h_i^{l+1} - h_{i-1}^{l+1}) = f(h_{en}^{l+1} - h_{en}) \quad (19)$$

위의 경계조건식은 $i=2$ 와 $n-1$ 에 대한 항에 대해 적용되며 h_{en} 은 외기습도를 의미한다.

1차원 유한차분법에 의한 해석흐름도는 Fig. 1과 같다. 먼저 주어진 시간단계에서 모든 위치의 상대습도를 Fig. 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. 첫째는 초기재령에서는 수분확산계수가 재령에 따라 변한다는 것이고, 둘째는 기준수분확산계수가 물/시멘트비와 함께 콘크리트가 외기에 노출되는 시기에 따라 변한다는 것이다. Bazant가 제안한 모델은 100℃이하에서의 수분이동이 모세관수의

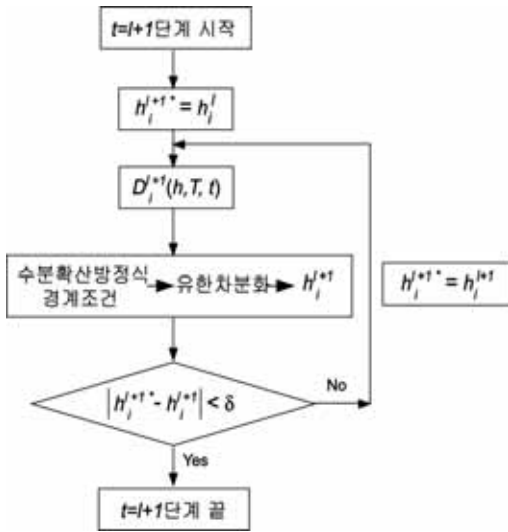


Fig. 1 유한차분법에 의한 해석흐름도

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.⁽¹⁰⁾

$$\phi = \frac{C}{\rho_w} (w/c - 0.172 a_c) \quad (20)$$

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.

Fig. 2는 물/시멘트비 0.50인 콘크리트에 대한 재령에 따른 공극률 변화를 나타낸 것이다.

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

$$a_c = \frac{0.85t}{4 + 0.85t} \quad (21)$$

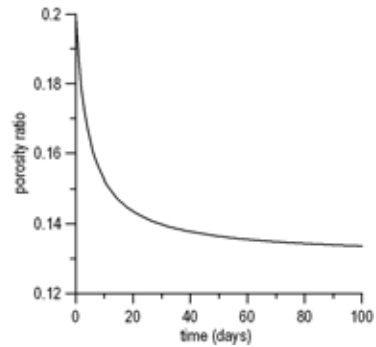


Fig. 2 재령에 따른 공극률의 변화

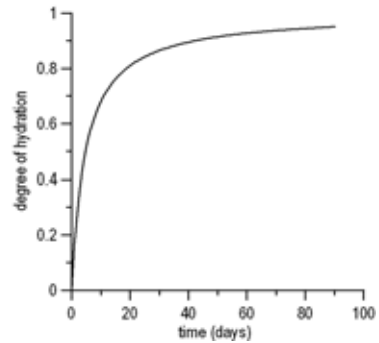


Fig. 3 시간에 따른 수화도의 변화

Fig. 3은 기준온도 20°C 에 대한 시간에 따른 수화도를 나타낸 그래프이다.

3.3 공극률을 고려한 수분확산계수 모델식

식 (12)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.

$$D(h, T, \phi) = D_1(\phi) f_1(h, \phi) f_2(T, \phi) \quad (22)$$

그러나 식 (22)에서 각각의 함수에 대한 ϕ 의 영향을 정량화하는 것은 매우 어려우므로, 본 연구에서는 수분확산계수에 대한 공극률의 영향을 다음과 같이 고려하였다.

$$D(T, h, \phi_t) = D_1 f_1(h) f_2(T) f_3(\phi_t) \quad (23)$$

이 때, D_1 과 $f_3(\phi_t)$ 는 기존의 실험결과⁽¹¹⁾를 근거로 수분확산 해석을 수행하여 구하였다. 수분확산 해석에서 ϕ_t 는 앞서 언급한 식 (11)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 노출채형이 재령이 각각 3일과 28일에 대해 수행된 결과이다.

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

$$f_3(\phi_t) = \left(\frac{\phi_t}{\phi_{28}} \right)^m \quad (24)$$

Table 1 물/시멘트비에 따른 D_1 값의 결과

물/시멘트비(w/c)	D_1 값 ($\times 10^{-6}$ m ² /h)
0.28	2.02
0.40	2.10
0.68	2.87

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

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

Table 1의 결과를 통해 CEB-FIP(1990)⁽⁹⁾와 같은 형태로 D_1 값을 설계기준 압축강도의 함수로 나타내었고, 그 결과는 식 (25)와 같다.

$$D_1 = \frac{5.75 \times 10^{-6}}{f_{ck}^{\phi, 25}} \quad (25)$$

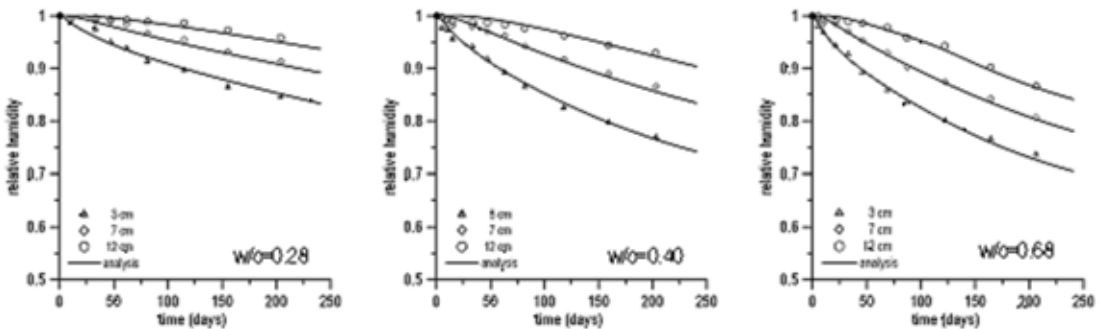


Fig. 4 노출재령이 3일인 경우에 대한 실험결과와 해석결과의 비교

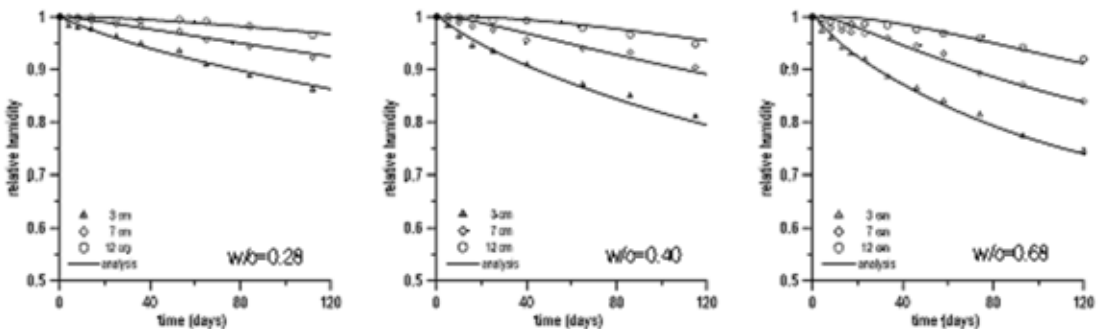


Fig. 5 노출재령이 28일인 경우에 대한 실험결과와 해석결과의 비교

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

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⁽⁶⁾의 제안식은 적용 가능한 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 0.2까지 적용할 수 있는 물/시멘트비와 노출개시 재령의 함수로서 표현하여 그 영향을 나타내었다.

표면계수는 다음의 식 (26)을 사용하였다.

$$C_f = 2.59 \times 10^{-5} (w/c - 0.2)^{0.48} \left(\frac{28}{t_0} \right)^{0.16} \quad (26)$$

여기서, t_0 는 노출개시 재령을 의미한다.

Fig. 4와 Fig. 5는 물/시멘트비 28%, 40%, 68%의 배합으로 기준온도 20℃ 외기조건에 노출개시 재령이 각각 3일과 28일에 대해 수행된 실험결과⁽¹¹⁾와 위에서 제안한 수분확산계수와 표면계수를 통해 해석한 결과를 비교하여 나타낸 것으로 공극률 변화를 고려한 경우 재령의 변화에 따른 깊이별 상대습도의 해석결과와 실험결과가 매우 잘 일치하고 노출재령의 변화에도 결과가 잘 일치하고 있음을 보여준다. 그림에서 나타낸 30, 70, 120 mm는 일방향 수분확산실험에서 상대습도를 측정할 콘크리트 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 물/시멘트비와 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.

참고문헌

1. Nilsson, L. O., "Hygroscopic Moisture in Concrete-Drying, Measurements and Related Material Properties", Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1980, report TVBM 1003.
2. Parrott, L. J., "Moisture Profiles in Drying Concrete", Adv. Cem. Res., 1, No. 3, 1988, pp. 164-170.
3. Bazant, Z. P., Najjar, L. J., "Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete", Material and Structures, Vol. 5, No. 25, 1972, pp 3-20.
4. Pickett, G., "Shrinkage Stresses in Concrete", Journal of ACI, Proc., Vol. 42, 1946, pp. 165-204 and pp. 361-398.
5. Lowe, I.R.G., B.P. Hughes, J. Walker, Cement and Concrete Research, Vol. 1, 1971, pp. 547-551.
6. 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.
7. Matano, J., Japanese Journal of Physics, Vol. 8, 1932, pp. 109-113.

-
8. Mihashi, H., Numao, T., "Influence of Curing Condition on Diffusion Process of Concrete at Elevated Temperatures", Proceeding of the Concrete Institute, Vol. 11, No. 1, 1989, pp. 229-234.
 9. Comité Euro-International du Béton, "CEB-FIP Model Code 1990", 1993, pp. 68-69.
 10. Neville, A. M., Properties of Concrete, 4th Ed., Wiley, pp. 26-34.
 11. Kim, J. K., Lee, C. S., "Moisture Diffusion of Concrete Self Densification at Early Ages", Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 12, 1999, pp. 1921-1927.

(접수일자 : 2004년 11월 23일)