



# 경화하는 콘크리트의 수분확산도 모형

## A Moisture Diffusivity Model of Hardening Concrete

정진훈\*  
Jeong, Jin-Hoon

### Abstract

Concrete has higher vapor pressure than its surrounding ambient air immediately after placement. Moisture at concrete surface evaporates to the ambient air to adjust equilibrium of the vapor pressure between them. The moisture inside the concrete moves to the surface because the evaporation at the surface causes gradient of vapor pressure inside the concrete. Plastic cracking, degree of hydration, strength development, and others caused by velocity of the moisture movement significantly influences quality of concrete. In this paper, the moisture diffusivity of early-age concrete was back-calculated using governing equation of the moisture diffusion, and temperature and relative humidity of concrete measured in a laboratory. The moisture diffusivity of the concrete was modeled using the back-calculated moisture diffusivity. The relative humidity of the concrete calculated by finite element method (FEM) using the modeled moisture diffusivity as input data coincided with the measured relative humidity well.

*Keywords : concrete, moisture diffusivity, evaporation, temperature, humidity*

### 요 지

콘크리트의 타설 직후, 상대적으로 콘크리트는 높은 증기압을 갖게 되며, 주위의 대기는 낮은 증기압을 갖게 된다. 콘크리트와 대기 간의 증기압의 평형을 유지하려는 작용 때문에 콘크리트의 표면에서 대기로 수분이 이동하는 증발이 발생한다. 표면에서 일어나는 증발로 인하여 콘크리트의 내부에서도 증기압의 차이가 발생하며, 이로 인하여 콘크리트 내부의 수분이 서서히 표면으로 이동하는 수분확산이 일어난다. 이 수분확산의 속도는 콘크리트의 소성 균열, 수화도, 강도와 같은 요인으로 작용하여 콘크리트의 품질에 크게 영향을 미친다. 본 논문에서는 콘크리트 수분확산의 지배방정식과 실내에서 측정된 콘크리트의 온도와 상대습도를 이용하여 초기재령의 콘크리트의 수분확산도를 역계산하였다. 역계산된 콘크리트의 수분확산도를 이용하여 콘크리트의 수분확산도 모형을 개발하였으며, 이를 입력값으로 사용하여 유한요소법에 의해 콘크리트의 상대습도를 계산하였다. 그 결과로서 계산된 상대습도는 측정된 상대습도와 대체로 일치하였다.

**핵심용어 : 콘크리트, 수분확산도, 증발, 온도, 습도**

\* 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원 · 공학박사



## 1. 서론

콘크리트의 수분은 시멘트풀의 수화물 내에서 구조적 또는 화학적으로 결합한 수분과 공극 구조 내에 존재하는 수분의 두 가지 형태로 나눌 수 있다. 콘크리트에 존재하는 수분은 건조수축이나 크리프를 유발하여 초기 재령의 콘크리트 포장에 변형과 균열, 그리고 콘크리트 덧씌우기 포장에 박층균열(delamination)을 일으키기도 한다. 수분과 관련한 콘크리트의 재료특성, 즉, 투수성, 확산도, 등온수분도(moisture isotherm)의 경사 등은 다양한 양생조건 하에서의 시간에 따른 콘크리트 내 수분의 변화를 예측하는 수학적 모형에 사용되어 궁극적으로 건조수축과 크리프 때문에 발생하는 응력과 변형률을 계산하는데 중요한 역할을 한다.

콘크리트는 타설 후 시간이 흐름에 따라 시멘트 풀에 존재하는 수분이 대기 중으로 이동 및 확산하면서 건조가 진행되는 특성을 갖고 있다. 이 특성은 시멘트 풀의 공극 내 함수량과 밀접한 관계가 있는 재료특성인 수분확산도( $D$ )와 관련이 있으며, 그 값은 콘크리트의 함수량과 상대습도에 따라 크게 변화하는 것으로 알려졌다(Pihlajavaara 1964; Kasi and Pihlajavaara 1969; Bazant 1970; Bazant and Najjar 1972; Parrott 1988). 콘크리트의 함수량이 일정한 경우, 경화된 콘크리트의 수분확산도는 거의 변화하지 않지만 타설 직후 24시간 동안의 수분확산도는 매우 큰 변화를 하게 된다. 식 (1)은 현재까지 가장 많이 사용되어 오고 있는 수분확산도 모형으로 타설 7일 이후부터 측정된 자료를 이용하여 개발되었다(Bazant and Najjar 1972).

$$D = D_1 \left[ a_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left( \frac{1 - H}{1 + H_c} \right)^n} \right] \quad (1)$$

여기서,

$D_1$  = 습도가 1.0일 때 콘크리트의 수분확산도  
 $\alpha_0, H_c, n$  = 콘크리트의 재료변수

타설 직후의 콘크리트와 경화된 콘크리트의 수분확산도의 값에 큰 차이가 있기 때문에 초기 콘크리트 습도의 예측에 식 (1)을 사용하는 것은 적절하지 않은 것으로 보여진다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 타설 직후부터 약 3일 동안 측정된 자료를 이용하여 수분의 이동 및 확산의 정도를 나타내는 수분확산도의 모형을 개발하고, 이를 통하여 초기 콘크리트의 습도를 보다 정확하게 예측하고자 한다.

## 2. 실내실험

시간에 따른 콘크리트 상대습도의 변화를 관찰하고 수분확산도를 역계산하기 위하여 실내실험이 수행되었다. 그림 1과 같이 콘크리트가 20.3cm의 내부 직경과 30.5cm의 높이를 갖는 실린더 형태의 PVC 공시체 안에 타설되었으며, 그 배합비는 표 1과 같다. 타설 직전, 콘크리트의 온도와 상대습도를 측정하기 위한 센서가 대기에 노출된 콘크리트 상부 표면으로부터 25, 76, 그리고 127mm의 깊이에 실린더 공시체 외부로부터 삽입되어 설치되었으며, 양생실의 온도와 습도는 각각 32℃와 50%였다. 콘크리트의 온도와 상대습도가 약 3일간에 걸쳐 측정되었으며, 그 결과는 그림 2 및 그림 3과 같다.

여러 번에 걸친 실내실험과 현장실험 결과에 근거

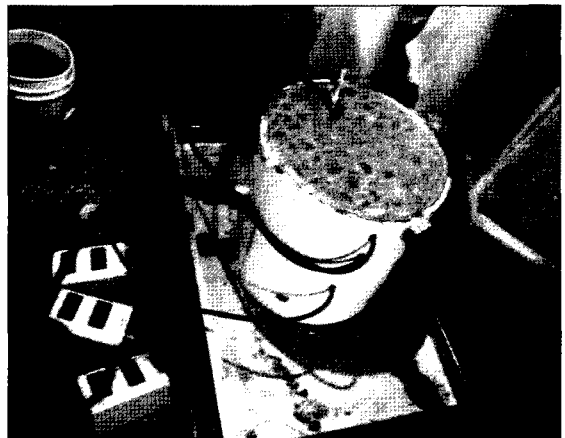


그림 1. 온도 및 상대습도 센서가 설치된 실린더형 콘크리트 시편



표 1. 수분확산도 모형개발에 사용된 1m³의 부피를 갖는 콘크리트의 배합비

재 료	중 량
굵은 골재(GH Servtex 석회질)	1068kg
가는 골재(GH Jones 모래)	704kg
시멘트 (1종 보통)	337kg
물	137kg
물-시멘트 비	0.41
AE제	0.2 liters
감수제	1.1 liters
콘크리트 단위중량	2247kg/m³

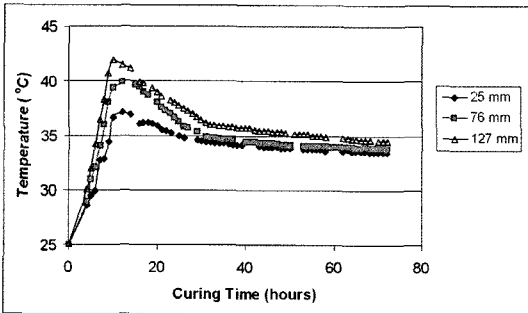


그림 2. 실내에서 측정된 깊이별 온도의 시간에 따른 변화

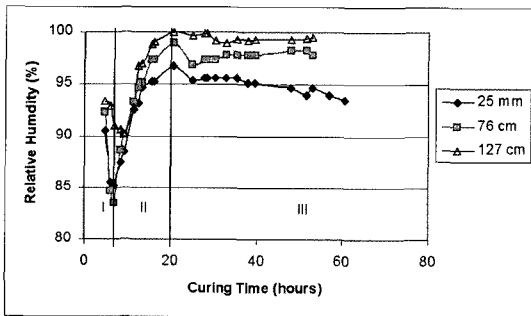


그림 3. 실내에서 측정된 깊이별 상대습도의 시간에 따른 변화 (Jeong and Zollinger 2003)

할 때 콘크리트의 상대습도 변화 추이는 그림 3에서 보듯이 3개의 단계로 구분할 수 있다(Jeong and Zollinger 2003). 첫 번째 단계는 콘크리트 타설 단계로서 매우 높은 수분확산도 때문에 100%에 가까웠던 콘크리트의 상대습도가 급격하게 낮아지는 단

계이다. 콘크리트 타설 직후, 콘크리트 내부와 대기의 증기압이 평형을 이루지 못하여 콘크리트의 표면으로부터 대기로 증발이 발생하면서 나타나는 현상으로 판단된다. 두 번째 단계는 블리딩 단계로서 콘크리트 내부와 대기의 증기압이 평형을 이루어 가면서 초기에 상당히 높았던 수분확산도가 감소하여 콘크리트의 상대습도가 점차 증가하여 최고점에 이르게 된다. 하지만 아직까지도 수분확산도는 상대적으로 높아 콘크리트 내부의 수분이 표면으로 빠르게 이동하면서 높은 증발률을 나타내게 된다. 세 번째 단계는 블리딩 후의 단계로서 콘크리트의 수분확산도가 충분히 감소하여 콘크리트의 상대습도가 대기의 상대습도와 평형을 이루어 가는 과정이다. 위의 세 단계는 콘크리트의 양생조건과 배합 내의 함수량과 깊은 관계가 있는 것으로 보인다.

### 3. 수분확산의 지배방정식

콘크리트 내에서 수분이 흘러가는 속도( $J$ )는 콘크리트 내에 존재하는 증발 가능한 물이 이동 방향에 수직인 단위 면적을 단위 시간당 통과하는 질량으로 정의한다. Darcy의 법칙에 의한 흐름의 속도는 에너지구배에 관한 원리로부터 유도되었다(Bazant and Najjar 1972).

$$J = -C \cdot \text{grad} \mu \quad (2)$$

여기서,  $\mu$  는 증발 가능한 물의 단위 질량당 Gibb의 자유 에너지이며, 계수  $C$ 는 콘크리트 내 공극의 투수성이다. 식 (2)는 작은 에너지구배와 층류의 조건을 갖는 경우에만 국한되며, 콘크리트에 적절히 사용될 수 있다. 수증기가 이상적인 기체로 작용하는 것으로 가정하면 Gibb의 자유 에너지는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu = \left( \frac{RT}{MV_w} \right) \cdot \ln H + \mu_{sat}(T) \quad (3)$$



여기서,

$R =$  일반 기체 상수 ( $=8.3143 \text{ J/mol}^\circ\text{K}$ )

$T =$  절대 온도 ( $^\circ\text{K}$ )

$M =$  물의 분자량 ( $18,015 \text{ g/mol}$ )

$V_w =$  물의 비체적 ( $1\text{cm}^3/\text{g}$ )

$H =$  콘크리트의 습도 ( $= \frac{RH(\%)}{100}$ )

$\mu_{sat} =$  포화상태에서의 Gibb의 자유에너지

식 (2)는 온도와 습도의 항을 사용하여 식 (4)와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$J = -c \cdot \text{grad}H \quad (4)$$

여기서, 계수  $c$ 는 콘크리트의 온도와 습도의 함수인 투수성으로 식 (5)와 같다.

$$c = \left( \frac{RT}{MV_w} \right) \times \left( \frac{C}{H} \right) \quad (5)$$

일정한 온도와 수화도(degree of hydration)에서의 콘크리트의 습도와 수분 함유량의 관계는 등온흡수선(sorption isotherm)과 등온탈수선(desorption isotherm)에 의해 설명할 수 있다(Bazant 1970). 측정된 콘크리트의 수분과 습도의 관계는 콘크리트의 재령에 따라 변화하며, 시멘트 풀 내부 공극률의 함수로서 경험에 의하여 그림 4에 보인 것과 같이 등온흡수선과 등온탈수선의 형태로 나타낼 수 있다. 여기서 중요한 사실은 물이 흡수될 때의 등온흡수선과 물이 빠져 나갈 때의 등온탈수선이 다르다는 점인데 이는 공극수의 평형 상태가 온도에 따라 매우 다양하기 때문인 것으로 보여진다. Parrott(1988)은 콘크리트 내 등온흡수선과 등온탈수선의 위치에 관하여 공극률의 중요성을 강조하였는데, 그는 수분의 손실이 가장 많이 일어나는 대기에 노출된 콘크리트의 표면 근처에서 공극률이 가장 큰 것으로 보고하였다. 그의 관찰 결과는 그림 5에 보인 콘크리트의 무게 감소와 상대습도의 관계로부터 증명되었다. 그러므로, 대기에 노출된 콘크리트의 표면 근처로 갈수록 점점 더 많은 조립의 공극이 존재하며, 그 결과로 콘크리트

트의 무게 감소와 상대습도의 관계는 표면으로부터의 거리에 따라 변화할 것이다. 이 점에서, 콘크리트 포장의 거동과 공용성이 상부 표면 근처의 공극률 분포에 영향을 받을 수 있을 것으로 판단된다.

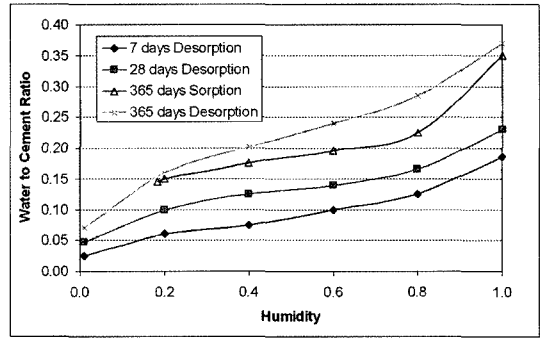


그림 4. 등온흡수선과 등온탈수선(Bazant 1970)

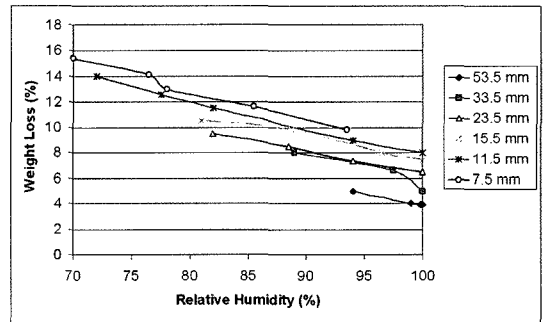


그림 5. 콘크리트 표면으로부터의 위치별 무게 감소에 따른 습도의 변화(Parrott 1988)

앞서 설명하였듯이, 경화하는 콘크리트가 수화 작용을 하는 동안의 등온탈수선은 수화도 뿐 아니라 공극률의 함수로 해석되어야 한다. 주어진 공극률에서 등온탈수선은 식 (6)의 미분 방정식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$dH = kdw \quad (6)$$

$$k = \left( \frac{\partial H}{\partial w} \right)_w \quad (7)$$

여기서, 변수  $k$ 는 등온 수분선의 경사를 나타내며, 물의 질량  $w$ 는 습도  $H$ 의 함수로 표현된다. 불포화된 다공성 물질에서의 수분의 이동은 물질 내 온도 분포



에 영향을 받는다(Huang 1979 ; Suh et al. 1988 ; Somasundaram et al. 1989). 따라서 수화하는 콘크리트의 습도의 계산에는 다양한 온도조건 하에서의 추가적인 항이 요구되어 그 결과는 식 (8)로 나타난다.

$$dH = kdw + KdT + dH_s \quad (8)$$

여기서,

$K$  = 습윤(hygrothermic) 계수

$dH_s$  = 일정한 함수량에서 수화에 의한 습도의 변화

습윤 계수는 일정한 함수량과 주어진 수화도에서 온도의 변화에 따른 습도의 변화를 나타낸다.

콘크리트의 단위 부피 내에서 수분의 이동률은 식 (9)와 같이 표현할 수 있다(Bazant and Najjar 1972).

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -divJ \quad (9)$$

식 (4)를 식 (9)에 대입한 후 식 (9)를 식 (8)에 대입하면 식 (10)을 통해 식(11)로 유도된다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = k \cdot div(c \cdot gradH) + \frac{\partial H_s}{\partial t} + K \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = kc \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k \frac{\partial c}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H_s}{\partial t} + K \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

콘크리트 표면으로부터의 깊이( $x$ )에 따른 투수성( $c$ )의 변화가 작다고 가정하면 식 (11)의 오른쪽 두 번째 항은 무시할 수 있으며, 결국 식 (12)의 다양한 온도조건 하의 건조하는 콘크리트 내의 수분확산 지배방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = D \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial H_s}{\partial t} + K \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

여기서,  $D(=kc)$ 는 수분확산도이다.

#### 4. 콘크리트 수분확산도 모형의 개발

만일 식 (12)에서 온도  $T$ 가 일정하다면 식의 오른쪽 세 번째 항은 영이 되어 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = D \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial H_s}{\partial t} \quad (13)$$

본 연구에서는 상대습도의 계산에 일반적으로 널리 사용되고 있는 아래의 식 (14)를 실내실험 중 측정된 콘크리트의 최고 온도인 41.9℃를 모든 자료에 적용하여 온도 변화의 영향이 배제된 새로운 상대습도를 위치별, 시간별로 계산하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다. 여기서,  $T_{dp}$ 와  $T$ 는 이슬점 온도와 건조 온도로서 단위는 모두 ℃이다.

$$RH(\%) = \exp \left[ \left( \frac{17,502T_{dp}}{240.97 + T_{dp}} \right) - \left( \frac{17,502T}{240.97 + T} \right) \right] \times 100 \quad (14)$$

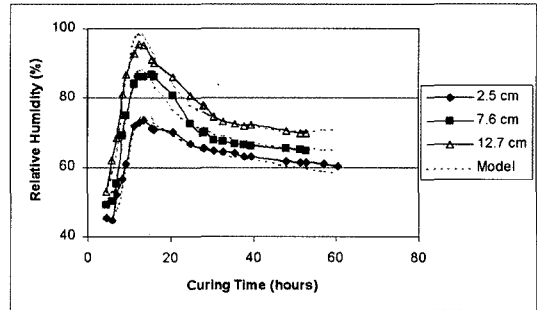


그림 6. 일정한 온도를 이용하여 계산된 새 상대습도

새롭게 계산된 상대습도(그림 6)는 온도의 영향이 배제되어 있으므로 다중 회귀분석을 통하여 양생시간과 상부표면으로부터 깊이만의 함수인 식 (15) 등의 모형으로 표현할 수 있으며, 그 결과를 콘크리트의 습도예측 프로그램 등에 쉽게 사용할 수 있다.

$$RH(\%) = \frac{a + b \ln t + c(\ln t)^2 + d(\ln t)^3 + ex}{1 + f \ln t + g(\ln t)^2 + h(\ln t)^3 + ix} \quad (15)$$

여기서,  $a$ 에서  $i$ 까지는 계수이며, 그 값은 표 1의 배합비를 갖는 콘크리트에만 유효하다. 식 (15)의 상대습도 모형을 이용하여 계산된 상대습도는 일정



한 온도를 사용하여 새롭게 계산된 측정 상대습도와 거의 일치함을 그림 6에서 볼 수 있다.

만일 자기건조에 의한 습도의 변화가 매우 작다고 가정한다면, 식 (13)은 식 (16)과 같이 단순화할 수 있다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = D \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \quad (16)$$

이어서, 식 (16)은 식 (17)로 변형되어 수분확산도를 역계산하는 형태로 나타낼 수 있다.

$$D = \frac{\frac{\partial H}{\partial t}}{\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}} \quad (17)$$

그림 7은 식 (15)에 의해 새로 상대습도를 계산한 후 그 결과를 식 (17)에 대입하여 역계산한 콘크리트 내 수분확산도의 수화도에 따른 깊이별 분포이다. 타설 초기에 상당히 큰 수분확산도가 빠른 속도로 감소하여 경화 초기 단계동안 수분확산도의 변화가 상당히 큰 것을 볼 수 있다.

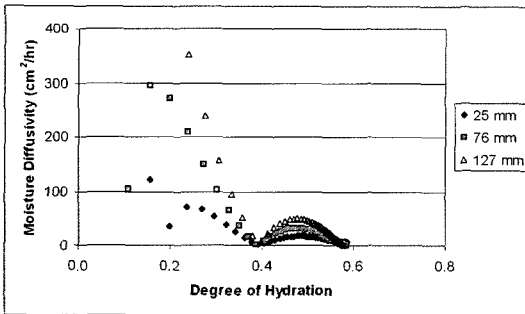


그림 7. 역계산된 수분확산도(Jeong and Zollinger 2003)

수분확산도가 콘크리트의 습도, 재령, 시멘트 풀의 공극률 등의 함수임이 기존의 연구 결과(Bazant and Najjar 1972; Parrott 1991; Xi et al. 1994)로 알려졌다. 콘크리트의 재령과 시멘트 풀의 공극률이 수화도에 영향을 크게 미치는 것을 고려하여 본 연구에서는 습도  $H$ 와 수화도  $\alpha$ 의 함수로 수분확산도를 식 (18)과 같이 모형화하였다(Jeong and Zollinger 2003).

$$D = a + \frac{b}{a} + cH \quad (18)$$

여기서,  $a$ ,  $b$ , 그리고  $c$ 는 계수이며, 계수의 값은 양생조건과 배합비에 따라 달라진다. 상관계수 0.928을 갖는 식 (18)의 수분확산도는 콘크리트의 습도에 비례하며, 수화도에 반비례하는 합리적인 경향을 보여 본 연구에서 개발된 수분확산도의 모형은 타당성이 있는 것으로 판단된다.

## 5. 수분확산도 모형의 검증

개발된 수분확산성 모형이 콘크리트의 습도 예측에 적절히 사용될 수 있는지의 여부를 검증하기 위한 목적으로 이차원 유한요소 프로그램을 제작하였다(Jeong et al. 2001). 수치해석에 쉽게 사용하기 위하여 수분확산의 지배방정식인 식 (12)를 등가 weak form으로 변형하여 각 요소에 적용하였으며, 해를 얻기 위하여 Crank Nikolson 방법을 사용하였다. 이차원 유한요소망을 구성하고 초기조건과 경계조건을 고려한 후 직접 반복법을 사용하여 모든 절점에서 시간에 따른 상대습도를 계산하였다.

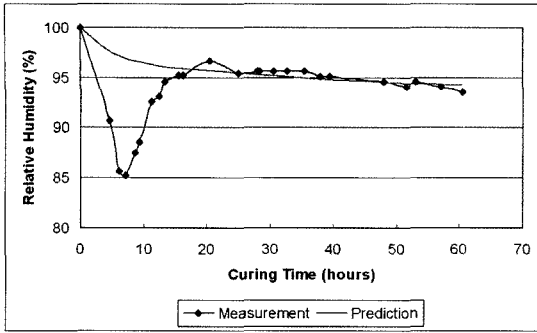
타설 직후의 콘크리트가 완전히 젖어 있다는 가정하에 본 연구의 유한요소 해석에는 식 (19)의 초기조건을 사용하였다.

$$H = 1.0 \quad (19)$$

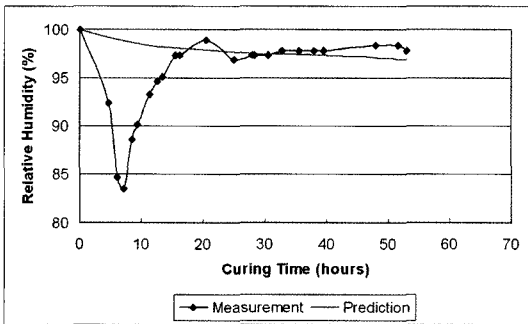
또한 콘크리트 표면에서의 습도  $H_s$ 가 대기습도  $H_a$ 와 동일하다는 가정(Parrott 1988) 하에 식 (20)의 경계조건을 사용하였다.

$$H_s = H_a \quad (20)$$

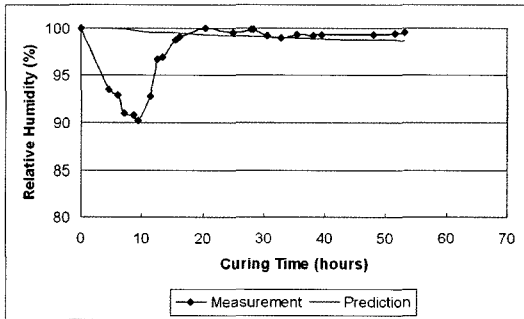
이상의 절차와 조건에 의하여 제작된 유한요소 프로그램을 이용하여 본 연구에서 사용한 실린더형 콘크리트 공시체의 상대습도를 계산하였으며, 그 결과를 그림 8과 같이 측정된 값과 비교하였다. 최고점에 도달



(a) 상부 표면으로부터 25mm



(b) 상부 표면으로부터 76mm



(c) 상부 표면으로부터 178mm

그림 8. 콘크리트 상대습도의 측정치와 예측치의 깊이별 비교

하기 이전의 상대습도의 급격한 변화를 유한요소 프로그램으로 구현할 수는 없었으나 실제로 측정된 상대습도와 예측된 상대습도의 시간에 따른 변화가 깊이별로 대체로 일치함을 볼 수 있었다. 따라서 본 연구에서 개발된 수분확산도 모형이 실제 콘크리트 내의 수분의 이동을 적절히 모사하고 있음을 짐작할 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 초기 재령의 콘크리트 내 수분의 확산과 이로 인한 습도의 분포를 정확히 예측하기 위하여 콘크리트 수분확산의 지배방정식과 실내실험의 결과를 이용하여 콘크리트의 수분확산도 모형을 개발하였다. 실내실험에서 측정된 상대습도로부터 온도의 영향을 배제한 새로운 상대습도를 계산하였으며, 이를 수분확산의 지배방정식으로부터 유도된 식에 대입하여 수분확산도를 역계산하였다. 역계산된 콘크리트의 수분확산도를 이용하여 콘크리트의 수화도와 습도를 변수로 하는 콘크리트의 수분확산도 모형을 개발하였다. 개발된 모형의 검증을 위하여 모형에 의하여 계산된 수분확산도를 입력값으로 사용하는 유한요소 프로그램으로 콘크리트의 상대습도를 계산하였으며, 그 결과는 측정된 상대습도와 대체로 일치하는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. Pihlajavaara, S. E. (1964). *Introductory Bibliography for Research on Drying of Concrete*. The State Institute for Technical Research, Helsinki, Finland.
2. Kasi, S. S. H. and Pihlajavaara, S. E. (1969). "An Approximate Solution of a Quasi-Linear Diffusion." Publication No. 153, The Station Institute for Technical Research, Helsinki, Finland.
3. Bazant, Z. P. (1970). "Constitutive Equation for Concrete Creep and Shrinkage Based on Thermodynamics of Multiphase Systems." *Materials and Structures, RILEM*, 3(13), 3-36.
4. Bazant, Z. P. and Najjar, L. J. (1972). "Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete." *Materials and Structures, RILEM*, 5(25), 3-20.



5. Jeong, J. H. and Zollinger, D. G. (2003). "Development of Test Methodology and Model for Evaluation of Curing Effectiveness in Concrete Pavement Construction." Transportation Research Record 1861, National Research Council, 17-25.
6. Parrott, L. J. (1988). "Moisture Profiles in Drying Concrete." *Advances in Cement Res.*, 1(3), 164-170.
7. Huang, C. L. D. (1979). "Multi-Phase Moisture Transfer in Porous Media Subjected to Temperature Gradient." *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 22(9), 1295-1307.
8. Suh, Y. B., Anand, N. K., Aung, W., and Somasundaram, S. (1988). "Steady-State Moisture Profiles in an Unsaturated Porous Medium with Impermeable Boundaries." *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 11(12), 2587-2589.
9. Somasundaram, S., Anand, N. K., Suh, Y. B., and Aung, W. (1989). "Analysis of Moisture Migration in Two-Dimensional Unsaturated Porous Media with Impermeable Boundaries." *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 32(9), 1733-1739.
10. Parrott, L. J. (1991). "Factors Influencing Relative Humidity in Concrete." *Mag. Conc. Res.*, 43(154), 45-52.
11. Xi, Y., Bazant, Z. P., Molina, L., and Jennings, H. M. (1994). "Moisture Diffusion in Cementitious Materials (Moisture Capacity and Diffusivity)." *Advanced Cement Based Materials*, 1, 258-266.
12. Jeong, J. H., Wang, L., and Zollinger, D. G. (2001). "A Temperature and Moisture Module for Hydrating Portland Cement Concrete Pavements." *Proc., 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Concrete Pavements*, Vol. 1, Orlando, FL, 9-22.

〈접수 : 2004. 10. 18〉