

# 콘크리트의 부등건조수축에 관한 연구

## Prediction of Differential Drying Shrinkage in Concrete



김진근\*

Kim, Jin-Keun



이철성\*\*

Lee, Chil-Sung

### 요 약

콘크리트가 외기에 노출되면 수분확산 현상으로 수분의 이동이 일어나고, 콘크리트 내부는 부등수분분포 상태가 된다. 이러한 부등수분분포에 의하여 콘크리트 구조물에는 부등건조수축이 발생하며, 부등건조수축은 콘크리트 표면에 인장응력을 발생시키고, 표면균열의 원인이 되기도 한다. 또한 부등건조수축으로 인한 잔류응력은 현저한 크리이프의 영향을 받고, 이 때 각 위치에서 수분의 차이로 인하여 부등크리이프가 발생한다. 따라서 이 연구에서는 수분확산이론을 근거로 하여 콘크리트 내부의 수분분포를 합리적으로 예측할 수 있는 해석프로그램을 개발하였다. 그리고 콘크리트 내부의 각 위치에서 부등크리이프의 영향을 고려한 부등건조수축 해석방법을 제시하였다. 또한 콘크리트 내부의 각 위치에서의 부등건조수축 측정실험을 실시하여, 부등건조수축 해석방법의 타당성을 검증하였다.

### Abstract

In the concrete structures exposed to the environmental condition, the water movement is occurred by the moisture diffusion, and the moisture distribution in concrete is non-uniform. Such a non-uniform moisture distribution causes the differential drying shrinkage in concrete structures. From this type of differential drying shrinkage tensile stress is

\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수  
\*\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 1997년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

occurred in exposure surface of concrete structures, and may result in crack formation. This residual stress is significantly affected by the creep of concrete, and the differential creep is also occurred at the cross section of concrete structures due to moisture difference at each locations. In this study, based on the moisture diffusion theory, a finite element program which is capable of simulating the moisture distribution in concrete was developed. And the analysis method for the differential drying shrinkage was suggested, in which the differential creep was considered. The differential drying shrinkage strain was also measured at various positions of concrete. Finally the validity of analysis method was proved by comparing test results with analytical results.

**Keywords :** differential drying shrinkage, differential creep, moisture distribution

## 1. 서 론

콘크리트 내부에 존재하는 수분은 콘크리트의 여러 성질에 많은 영향을 준다. 즉 건조수축이나 크리프 등은 콘크리트 내부의 수분분포에 따라 큰 영향을 받으며, 압축강도나 탄성계수 등도 수분상태에 따라 많이 달라진다. 또한 콘크리트 내부의 수분분포는 내화성, 내구성, 동결융해 저항성 등에도 많은 영향을 준다. 따라서 콘크리트가 외기에 노출되어 건조하는 동안 내부의 수분분포를 정확하게 예측하는 것은 실제적으로 매우 중요하다. 특히 대형 콘크리트 구조물에서 내부의 수분분포는 각 위치에 따라 큰 차이를 보이므로 이에 대한 고려가 필요하다. 그러나 콘크리트 내부에는 매우 다양한 크기의 공극이 존재하고, 각 재령에 따라 공극의 크기가 변화하기 때문에 콘크리트의 수분이동 현상은 다른 다공질 재료에 비하여 매우 복잡하다.

콘크리트를 외기에 노출시키면 수분확산으로 인하여 수분의 이동이 일어나고, 콘크리트 내부는 부등수분분포를 이룬다. 각 위치에서의 수분 차이로 인하여 콘크리트에서 부등건조수축(differential drying shrinkage)이 발생한다. 부등건조수축은 콘크리트 표면에 인장응력을 발생시키며, 이 때 발생된 인장응력에 의해 콘크리트에서는 표면균열이 발생하는 경우가 빈번하다. 그리고 콘크리트의 표면 균열은 외부하중에 의하여 더 크게 진전하여 사용성을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 장기적으로 구조물의 강도를 떨어뜨리고 콘크리트의 내구성 등에 문제를 야기

시킨다. 또한 이러한 콘크리트 내부의 부등수분분포로 인하여 각 위치에서 부등크리프(differential creep) 현상이 발생한다. 따라서 부등건조수축을 해석할 때 이러한 부등크리프의 영향이 또한 고려되어야 한다.

이와 같이 부등건조수축 예측을 위한 방법들이 필요하지만 수분분포의 복잡성으로 인하여 콘크리트, 모르타르 또는 시멘트풀의 수분이동에 대한 정확하고 이론적인 모델은 아직 확립되지 못한 상태이다. 그러나 Bazant<sup>(1)</sup>는 콘크리트 내부의 수분이동에 대하여 수분확산이론에 근거한 모델을 제시하였다. 이러한 모델은 콘크리트 내부의 수분분포를 예측하는데 사용되어 왔으며, 수분분포 해석결과를 이용하여 구조물에 적용하는 시도도 이루어지고 있다<sup>(2, 4)</sup>. 이 연구에서도 수분확산이론을 근거로 콘크리트 내부의 수분분포를 합리적으로 예측할 수 있는 해석 프로그램을 개발하였으며, 콘크리트 내부의 각 위치에서 부등크리프의 영향을 고려한 부등건조수축 해석방법을 제시하였다. 또한 콘크리트 내부의 각 위치에서의 부등건조수축 측정실험을 실시하여, 부등건조수축 해석방법의 타당성을 검증하였다.

## 2. 콘크리트 내부의 수분분포 해석

### 2.1 수분확산 모델링

#### 2.1.1 수분확산 방정식

수분의 확산유속(moisture flux,  $J$ )은 식 (1)과

같이 공극의 상대습도로 나타낼 수 있으며, 수분질량 평형방정식(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. 따라서  $c$ 는 흡착등온선의 기울기의 역수이다.

식 (2)와 식 (3)에서  $w$ 와  $J$ 를 소거하면 식 (4)와 같은 비선형 수분확산방정식(nonlinear 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 수분확산계수(moisture diffusion coefficient)라고 하며, 그 값은  $c \cdot k$ 이다.

수분확산계수는 온도와 습도 등의 함수이며, 따라서 이들의 변화로 인해 상당한 영향을 받는다. CEB-FIP('90)에서는 등온조건(isothermal condition)인 경우에 수분확산계수를 공극의 상대습도의 함수로 표현하고 있으며<sup>5)</sup>, 다음 식 (5)는 CEB-FIP('90)에서 제시한 수분확산계수이다.

$$D(h) = D_0 \left( \alpha + \frac{1 - \alpha}{1 + [(1 - h) / (1 - h_1)]^n} \right) \quad (5)$$

여기서,  $D_1$  :  $h=1.0$ 인 경우의 수분확산계수

$D_0$  :  $h=0.0$ 인 경우의 수분확산계수

$\alpha$  :  $D_0/D_1$

$hc$  :  $D(h)=0.5D_1$ 에서 공극의 상대습도

$n$  : 지수

$h$  : 공극의 상대습도

CEB-FIP('90)에서는 근사적으로  $\alpha=0.05$ ,  $hc=0.80$ ,  $n=15$ 를 제시하고 있다. 그리고 최대수분확산계수는 압축강도의 함수이며, 식 (6)과 같다.

$$D_1 = \frac{D_{1,0}}{f_{ck} / f_{ck0}} \quad (6)$$

여기서,  $D_{1,0}=3.6 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{hr}$ 이고,  $f_{ck0}=10 \text{ MPa}$ 이다. 그리고 설계기준 압축강도  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 평균 압축강도  $f_{cm}$ 으로부터 구할 수 있으며,  $f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa}$ 이다.

### 2.1.2 경계조건

콘크리트 구조물의 표면에서 수분에 관한 경계조건을 설명하기 위해서는 콘크리트 표면의 습도와 외기의 습도사이에 관계를 맺어 주어야 한다. 따라서 경계조건은 식 (7)과 같다.

$$D \left( \frac{\partial h}{\partial n} \right) = f(h_m - h_s) \quad (7)$$

여기서,  $f$  : 표면계수(surface factor)

$h_m$  : 외기의 습도

$h_s$  : 콘크리트 표면의 습도

Bazant<sup>1)</sup>는 콘크리트의 노출표면에 등가표면두께(equivalent surface thickness)를 제안하였다. 콘크리트 내부의 수분이 등가표면두께를 통하여 외기로 발산되며, 등가표면두께는 구조물의 형태, 습도, 온도, 풍속의 함수인 것으로 알려져 있다. Bazant는 실험 데이터와 해석결과를 비교하여 그 두께를 0.75mm로 제안하였다.

## 2.2 유한요소법에 의한 수분확산 해석

### 2.2.1 유한요소 정식화

고체 매질 내의 임의의 시간  $t$ 에서의 함유습도를  $H(x,y,z,t)$ 라 할 때, 수분확산 방정식을 3차원 미소체적

에 대해 유도하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) \right\} \quad (8)$$

수분확산과정이 등방성이라면 식 (8)은 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} &= D \left\{ \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right\} \\ &= DV^2 H \end{aligned} \quad (9)$$

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 (10)과 같이 표현하고 식 (8)을 정리하면 식 (11)과 같다.

$$H(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \{h(t)\} \quad (10)$$

$$\int_V [N]^T \left\{ D \left( \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial H}{\partial t} \right\} dV = 0 \quad (11)$$

이때 Gauss의 부분적분공식과 Galerkin법을 이용하고, 경계면  $S$ 에서 식 (7)을 적용하면 식 (12)와 같은 수분확산에 관한 요소 내의 유한요소식을 유도할 수 있다.

$$[c] \left\{ \frac{\partial h(t)}{\partial t} \right\} + [k] \{h(t)\} = \{q\} \quad (12)$$

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

### 2.2.2 시간 영역에서의 차분화

시간 영역에 대해 식 (12)의 해를 구하기 위하여, 시간 간격의 선택에 관계없이 비교적 안정된 해를 가지는 Newmark- $\beta$  방법<sup>6)</sup>을 사용하였다. Newmark- $\beta$  방법은 속도와 변위를 식 (13)과 같이 가

정하는 것에 바탕을 두고 있으며, 여기서는  $\beta$ 와  $\delta$ 를 각각 1/4과 1/2로 하여 해석을 수행하였다.

$$\begin{aligned} \dot{H}^{t+\Delta t} &= \dot{H}^t + [(1-\delta)\ddot{H} + \delta\ddot{H}^{t+\Delta t}]\Delta t \\ \ddot{H}^{t+\Delta t} &= \ddot{H}^t + \ddot{H}^t \Delta t + \left[ \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{H}^t + \beta \ddot{H}^{t+\Delta t} \right] (\Delta t)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

## 3. 콘크리트의 부등건조수축 해석

Fig. 1은 한방향 수분확산이 일어나는 슬래브이며, 수분확산으로 인하여 콘크리트 내부는 부등수분분포 상태를 이루게 된다. 이때 콘크리트 단면의 각 위치에서의 함유량은 서로 다르므로 이로 인하여 콘크리트의 탄성계수, 크리프 계수, 자유수축량이 각 위치마다 다르다. 따라서 콘크리트 단면은 내부 수축을 받게 되어, 콘크리트 표면에는 인장응력이 발생하고 내부에는 압축응력이 발생하게 된다. 또한 콘크리트 표면에 발생한 인장응력이 콘크리트의 인장강도보다 클 경우에는 표면균열이 발생하기도 한다.

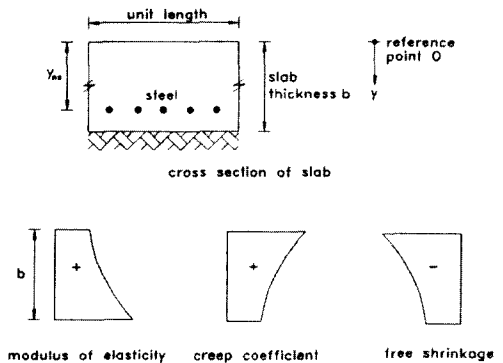


Fig. 1 Variation of material properties of the cross section of slab

이 연구에서는 콘크리트 단면의 부등수분분포로 인하여 발생하는 부등건조수축을 해석할 수 있도록 하였으며, 또한 부등크리프의 영향을 고려하도록 하였다. 해석시에는 콘크리트 단면에서 평균조건과 적합조건을 만족하도록 하였으며, 각 위치에서 자유수축량을 가정하고 해석을 통하여 실제로 각 위치에

서 나타나는 부등건조수축량을 구하였다.

### 3.1 콘크리트의 자유수축량(free shrinkage of concrete)

콘크리트 내부의 각 위치에서 상대습도에 따른 건조수축을 예측하는 것은 부등건조수축을 정량적으로 평가하는데 큰 영향을 준다. 따라서 상대습도와 건조수축과의 관계를 나타내는 것은 매우 중요하다. 이 연구에서는 상대습도와 건조수축의 관계를 식 (14)와 같이 나타냈다.

$$\Delta \varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh\infty} f_s(h) \quad (14)$$

여기서  $\varepsilon_{sh\infty}$ 는 콘크리트가 완전히 건조되었을 때의 최종 건조수축량이다. 그리고  $f_s(h)$ 는 상대습도에 따른 함수이며, 식 (15)와 같다.<sup>(7)</sup>

$$f_s(h) = 1 - h^3 \quad (15)$$

### 3.2 콘크리트의 크리이프(creep of concrete)

수분확산으로 인하여 콘크리트 내부에는 부등수분분포를 이루게 되고, 이로 인하여 부등건조수축 현상이 일어난다. 부등건조수축은 콘크리트에 응력을 유발하며, 이러한 잔류응력은 장시간 계속되기 때문에 현저한 크리이프의 영향을 받는다. 크리이프는 내부의 잔류응력을 이완시키고 재분배한다. 따라서 부등건조수축을 해석할 때에는 크리이프의 영향을 고려해야 한다.

크리이프는 콘크리트가 건조하게 되며 건조크리이프(drying creep)가 발생한다. 그런데 각 위치에서 건조에 의해 함수량이 다르기 때문에 건조크리이프도 각 위치에서 다르게 나타난다. 즉 콘크리트 내부의 부등수분분포로 인하여 각 위치에서 부등크리이프 현상이 발생하게 된다. 따라서 건조로 인하여 콘크리트 내부의 응력을 정량적으로 해석할 경우에는 부등건조수축과 부등크리이프를 동시에 고려할 수 있어야 한다.

이 연구에서는 부등크리이프를 고려하기 위하여 B3 모델에서 제시된 크리이프 모델식을 사용하였다. B3 모델에서는 크리이프 함수  $J(t, t')$ 를 식 (16)과 같이 나타냈다<sup>(8)</sup>.

$$J(t, t') = q_1 + C_0(t, t') + C_d(t, t', t_0) \quad (16)$$

여기서,  $q_1$ : 단위 응력으로 인한 순간변형률 (instantaneous strain due to unit stress)

$C_0(t, t')$ : 기본 크리이프(basic creep)

$C_d(t, t', t_0)$ : 건조에 의해 추가된 크리이프 (drying creep)

건조로 인하여 추가된 크리이프  $C_d(t, t', t_0)$ 는 다음과 같다.

$$C_d(t, t', t_0) = q_2 \sqrt{\exp\{-8H(t)\} - \exp\{-8H(t')\}} \quad (17)$$

여기서,  $H(t)$ 는 콘크리트 단면 내에서 공극의 평균 상대습도이다.

B3 모델에서는 건조로 인한 크리이프  $C_d(t, t', t_0)$ 를 단면 내에서 동일하게 평균적인 개념으로 나타냈다. 그러나 콘크리트 단면 내의 각 위치에서의 부등크리이프 고려하기 위해서는 콘크리트 내부의 각 위치에서의 함수량을 고려해야 한다. 즉 식 (17)에서  $H(t)$ 는 콘크리트 단면의 평균적인 상대습도를 나타내는데, 이 연구에서는  $H(t)$ 대신에 각 위치에서 수분확산 해석 결과를 이용하여 얻은  $H(x, y, z, t)$ 를 사용하였다.

한편 시간  $t$ 에서  $t'$ 까지 응력증분이  $\Delta \sigma_c(t, t')$ 이면 순간적인 탄성변형률과 크리이프에 의한 변형률은 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_c(t, t_0) &= \frac{\Delta \sigma_c(t, t_0)}{E_c(t_0)} [1 + x\phi(t, t_0)] \\ &= \frac{\Delta \sigma_c(t, t_0)}{\bar{E}_c(t_0)} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서,  $x$ 는 재령계수(aging coefficient)라고 하며, 응력증분이 점차적으로 발생하는 효과를 고려하기 위하여 사용된다. 그리고  $x$ 는 0.6에서 0.9사이의 값이며, 일반적으로 0.8 정도이다.

### 3.3 부등건조수축 해석

시간  $t_0$  에서 콘크리트 단면에 작용하는 축력( $N$ )과 휨모멘트( $M$ )는 기준 위치에서의 축력( $N_{equivalent}$ )과 휨모멘트( $M_{equivalent}$ )로 나타낼 수 있다. 이때 기준 위치에서의 변형률 ( $\epsilon_o(t_o)$ )과 곡률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_c(t_o) \\ \Psi(t_o) \end{Bmatrix} = \frac{1}{E_c(t_o)(AI - B^2)} \begin{bmatrix} I & -B \\ -B & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \text{equivalent} \quad (19)$$

여기서,  $A, B, I$ 는 기준 위치에서 환산단면(transformed section)의 면적, 일차 모멘트, 이차 모멘트를 각각 나타낸다. 그리고  $E_c(t_o)$ 는 시간  $t_0$  에서 콘크리트의 탄성계수이다.

이때 콘크리트 단면의 각 위치에서의 변형률과 작용하는 응력은 다음 식과 같다.

$$\epsilon_c(t_o) = \epsilon_o(t_o) + \Psi(t_o)y \quad (20)$$

$$\sigma_c(t_o) = E_c(t_o)[\epsilon_o(t_o) + \Psi(t_o)y] \quad (21)$$

그리고 철근의 탄성계수가  $E_{ms}$  일 때, 철근에 작용하는 응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{ms}(t_o) = E_{ms}[\epsilon_o(t_o) + \Psi(t_o)y_{ms}] \quad (22)$$

시간  $t$ 에서 콘크리트 단면은 부등수분분포 상태에 있으므로 각 위치에서는 구속응력( $\Delta\sigma_{restraint}$ )이 발생한다. 그리고 각 위치에서 구속응력( $\Delta\sigma_{restraint}$ )으로 인한 변형률과 크리이프, 자유수축변형률의 합은 0이 되어야 한다. 즉 식 (23)의 조건을 만족해야 한다.

$$\phi(t, t_o)\epsilon_c(t_o) + \epsilon_{shc}f_s(h) + \frac{\Delta\sigma_{restraint}(t, t_o)}{E_c(t_c)}(1 + x\phi(t, t_o)) = 0 \quad (23)$$

식 (23)에서 콘크리트 단면의 각 위치에서 구속응력( $\Delta\sigma_{restraint}$ )을 구하면 식 (24)와 같다.

$$\Delta\sigma_{restraint}(t, t_o) = -\bar{E}_c(t, t_o)[\phi(t, t_o)\epsilon_c(t_o) + \epsilon_{shc}f_s(h)] \quad (24)$$

이때 부등건조수축과 부등크리이프에 의한 각 위치에서의 변형률은 구속응력( $\Delta\sigma_{restraint}$ )에 의하여 구속을 받게 되고, 구속응력은 기준위치에서 축력( $\Delta N$ )과 휨모멘트( $\Delta M$ )를 발생시킨다. 기준위치에서의 축력( $\Delta N$ )과 휨모멘트( $\Delta M$ )는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta N &= \int_0^b \Delta\sigma_{restraint}(t, t_o)dA \\ &= -\epsilon_o(t_o) \int_0^b \bar{E}_c(t, t_o)\phi(t, t_o)dy - \int_0^b \bar{E}_c(t, t_o)\epsilon_{shc}f_s(h)dy \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \Delta M &= \int_0^b \Delta\sigma_{restraint}(t, t_o)y dA \\ &= -\epsilon_o(t_o) \int_0^b \bar{E}_c(t, t_o)\phi(t, t_o)y dy - \int_0^b \bar{E}_c(t, t_o)\epsilon_{shc}f_s(h)y dy \end{aligned} \quad (26)$$

따라서 콘크리트 단면에  $-\Delta N, -\Delta M$ 을 작용시키면 시간  $t$ 에서 기준위치에서의 변형률( $\Delta\epsilon_o$ )과 곡률( $\Delta\Psi$ )을 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_o(t, t_o) \\ \Delta\Psi(t, t_o) \end{Bmatrix} = \frac{1}{\bar{E}_c(t, t_o)(AI - B^2)} \begin{bmatrix} I & -B \\ -B & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\Delta N \\ -\Delta M \end{Bmatrix} \quad (27)$$

여기서,  $A, B, I$ 는 기준 위치에서 보정 환산 단면(age-adjusted transformed section)의 면적, 일차 모멘트, 이차 모멘트를 각각 나타낸다.

시간  $t$ 에서 콘크리트 단면의 각 위치에서의 변형률은 식 (28)과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_c(t, t_o) = \epsilon_c(t_o) + (\Delta\epsilon_o(t, t_o) + \Delta\Psi(t, t_o)y) \quad (28)$$

그리고 콘크리트 단면의 각 위치에서 작용하는 응력은 식 (29)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_c(t, t_o) &= \Delta\sigma_{restraint}(t, t_o) + \bar{E}_c(t, t_o)[\Delta\epsilon_o(t, t_o) + \Delta\Psi(t, t_o)y] \\ \sigma_c(t, t_o) &= \sigma_c(t_o) + \Delta\sigma_c(t, t_o) \end{aligned} \quad (29)$$

또한 철근에 작용하는 응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{ms}(t, t_o) = \sigma_{ms}(t_o) + E_{ms}(\Delta\epsilon_o(t, t_o) + \Delta\Psi(t, t_o)y_{ms}) \quad (30)$$

## 4. 콘크리트 내부의 수축변형률 측정 실험

이 연구에서는 콘크리트 내부의 각 위치에서 부등수분분포로 인한 부등건조수축량을 측정하였다. 부

등건조수축을 측정하기 위하여 콘크리트 내부에 매립형 게이지(embedment strain gauge)를 매립하여 각 위치에서의 수축변형률을 측정하였다. 매립형 게이지는 콘크리트 내부의 변형률을 측정하는데 사용되고 있으며, 신뢰성 있는 실험결과를 주는 것으로 알려져있다<sup>(9)</sup>. Fig. 2에 나타나 있는 바와 같이 실험에 사용한 실험체의 크기는 30×30×15cm이므로 실제적으로 두께가 30cm이고 위와 아래로 양방향 발산하는 슬래브로 볼 수 있다. 그리고 매립형 게이지는 콘크리트의 노출 표면에서 2, 5, 8, 12cm 깊이 에 설치하였다.

실험은 항온항습실에서 실시하였으며, 항온항습실의 조건은 온도 20±1℃, 상대습도 68±2%이다. 실험체를 제작하고 1주일 동안 수증양생을 실시한 후, 외기에 노출시켜 실험을 실시하였으며, 발산조건을 건조시에 1차원 흐름으로 만들기 위하여 상부 타살면을 제외한 모든 면을 파라핀으로 밀폐시켜 수분의 증발을 방지하였다.

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

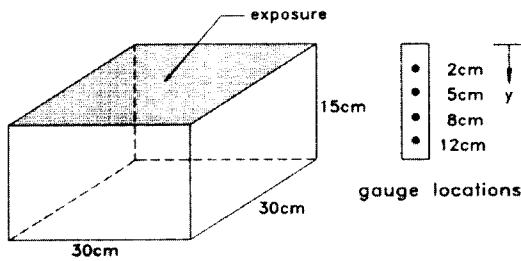


Fig. 2 Geometry and size of specimen

Table 1 Mix proportions of concrete

Specimen	W/C (%)	S/A (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				Admixture (C×%)	f' (MPa)
			W	C	S	G		
Mix I	65	42	202	310	740	1020	—	27.9
Mix II	40	38	172	430	661	1079	1.0	44.1

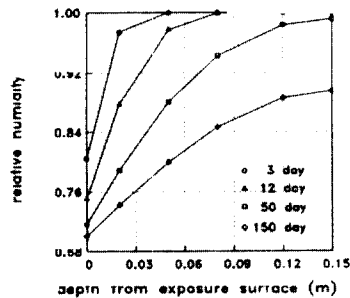
## 5. 부등건조수축 실험결과 및 해석결과

이 연구에서 개발된 해석 프로그램을 사용하여 Fig. 2에 대하여 각 위치에서의 수분분포 해석을 하였다. 해석에 사용된 수분확산계수에 대한 입력데이터는 Table 2와 같다. 그리고 기하학적 형상, 배합조건, 외기조건은 4절과 같다.

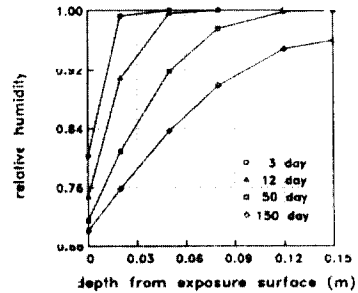
Table 2 Input data of moisture diffusion coefficient

Specimen	D, (m <sup>2</sup> /hr)	$\alpha$	h <sub>c</sub>	n
Mix I	1.81×10 <sup>-6</sup>	0.05	0.80	15
Mix II	1.00×10 <sup>-6</sup>	0.05	0.80	15

Fig 3은 콘크리트 내부의 수분분포 해석결과를 나타내고 있다. 콘크리트의 중앙부에서 습도가 가장 높고 표면으로 갈수록 점차로 낮아지고 있음을 알 수 있다. 이러한 콘크리트 내부의 습도는 일정시간이 지난 후에 외기의 상대습도와 점차로 평형상태에 도달하게 된다. 또한 노출표면에 가까울수록 수분이 빠르게 이동하고, 내부로 갈수록 느리게 수분의 이동이 일어난다.



(a) Mix I (W/C=0.65)



(b) Mix II (W/C=0.40)

Fig 3 Analysis results of moisture distribution in concrete

Fig 4는 콘크리트 내부의 수축변형률 측정결과를 나타내고 있다. 콘크리트 내부의 위치에 따라 수축변형률이 큰 차이를 보이고 있다. 콘크리트 표면 근처에서는 노출이 시작된 후 수분이 빠른 속도로 외기로 발산하기 때문에 수축변형률이 크고, 증가 속도도 빠르다. 그러나 콘크리트 내부에서는 수분이 많이 분포하므로 수축변형률이 작고, 증가 속도도 느리다. 그러나 콘크리트 내부에서는 수분이 많이 분포하므로 수축변형률이 작고, 증가 속도도 느린 것을 알 수 있다. 즉 수분량의 차이에 따라 각 위치에서의 수축변형률이 현저하게 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 재령에 따른 각 위치에서의 수축변형률을 CEB-FIP('90) 모델식과 비교하였다. 평균적인 개념의 건조수축량과 부등건조수축량은 위치에 따라 상당한 차이를 나타냈으며, 따라서 이를 해석에서 고려해 주어야 함을 알 수 있다.

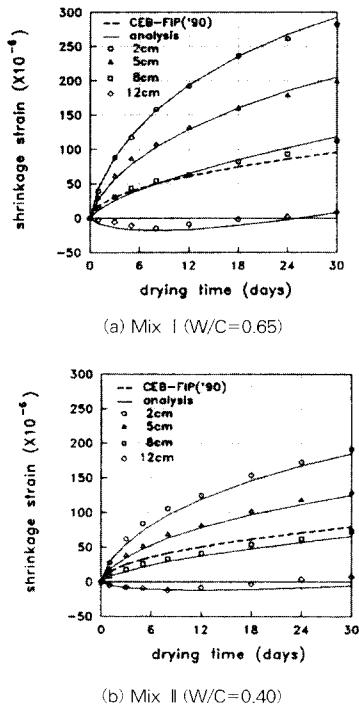


Fig 4 Comparison of test results with analysis of internal drying shrinkage

또한 이 연구에서 제시된 해석방법을 사용하여 콘크리트의 부등건조수축 해석을 실시하였으며, Fig 4에 실험결과와 해석결과를 비교하였다. 각 위치에서

실험결과와 해석결과는 거의 일치하고 있음을 알 수 있으며, 제시된 해석방법은 콘크리트의 부등건조수축을 예측하는데 적합한 것으로 판단된다.

한편 콘크리트 내부의 수축변형률은 볼츠만 변수 변환  $\lambda = y/\sqrt{t}$  를 통하여 나타낼 수 있으며, Fig. 5와 같다.  $y$ 는 콘크리트의 노출면에서의 깊이(m)이고,  $t$ 는 건조시간(hr)이다.

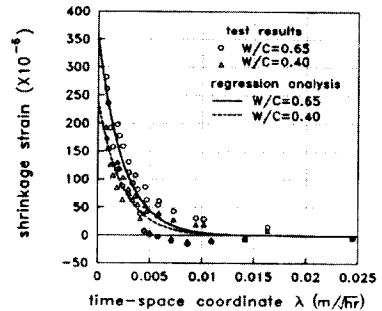


Fig 5 Shrinkage strain distribution in time and space

볼츠만 변수변환을 통하여 콘크리트 내부의 수축변형률은 한개의 변수로 표현할 수 있으며, 이 연구에서는 식 (31)과 같이 나타냈다. 그리고 회귀분석을 통하여 얻은 상수  $a, b$ 는 Table 3과 같다.

$$\epsilon_{sh}(y, t) = ae^{b\lambda} \quad (31)$$

Table 3. Regression coefficient of Eq. (31)

Specimen	a	b	r*
Mix I	$353 \times 10^{-6}$	-415.4	0.95
Mix II	$238 \times 10^{-6}$	-426.1	0.95

r\* : coefficient of correlation

## 6. 결론

이 연구에서는 콘크리트 내부의 부등수분분포로 인하여 발생하는 부등건조수축에 대한 해석방법을 제시하고, 부등건조수축 측정실험을 실시하였다. 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 수분확산이론에 의하여 콘크리트 내부의 수분



분포를 합리적으로 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

- (2) 수분량의 차이에 따라 콘크리트 내부의 각 위치에서의 건조수축량이 현저하게 다르게 나타났으며, 이로 인하여 부등응력이 발생한다. 따라서 부등건조수축은 콘크리트 구조물의 해석에서 고려되어야 한다.
- (3) 매립형 게이지를 사용하여 콘크리트 내부의 부등건조수축량을 측정하였으며, 이 실험방법은 신뢰성 있는 실험결과를 주는 것으로 판단된다.
- (4) 콘크리트 내부의 각 위치에서의 부등크리이프의 영향을 고려한 부등건조수축 해석방법을 제시하였다. 그리고 제시된 해석방법에 의한 해석결과와 실험결과는 거의 일치하는 것으로 나타나, 콘크리트의 부등건조수축을 예측하는데 적합한 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 연구는 한국학술진흥재단의 1993년도 자유공무과제 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Bazant, Z. P., and Najjar, L. J., "Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete," *Materials and Structures*, Vol. 5, No. 25, 1972, pp. 3-20.
2. Illston, J. M, and Tadjrian, 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, 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, 1983, pp. 216-224.
5. Comit  Euro-International du Beton, "CEB-EIP Model Coed 1990," 1993, pp. 69-69.
6. Bathe, K. J., "Finite Element Procedures in Engineering Analysis," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982, pp. 511-514.
7. Bazant, Z. P. and Raftshol, W. J., "Effect of Cracking in Drying and Shrinkage Specimens," *Cement and Concrete Research*, Vol. 12, No. 2, 1982, pp. 209-226.
8. Bazant, Z. P. and Baweje, S., "Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures-Model B3," *Materials and Structures*, Vol. 28, No. 180, 1995, pp. 357-365.
9. Scott, R. H. and Gill, P.A.T. "Measurement of Internal Concrete Strains Using Embedment Strain Gauges," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 39, No.139, 1987, pp. 109-112. 

(접수일자 : 1997. 1. 11)