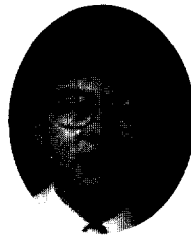


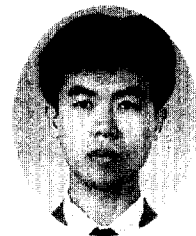
# 자체건조를 고려한 초기재령 콘크리트의 수분확산

Moisture Diffusion of Concrete at Early Ages Considering Self-desiccation



김진근\*

Kim, Jin-Keun



이철성\*\*

Lee, Chil-Sung

## ABSTRACT

In the concrete structures exposed to the ambient air at early ages, water movement occurs by moisture diffusion and self-desiccation of concrete due to hydration. And the internal relative humidity is changed due to such a moisture diffusion and self-desiccation. Especially, for high-strength concrete using the high unit cement content, the non-uniform relative humidity distribution is considerably affected by self-desiccation at early ages.

In this study, the internal relative humidity in concrete was measured at early ages, and the relative humidity due to self-desiccation for sealed specimen was also measured. The effect of moisture diffusion and self-desiccation on relative humidity at each location of concrete was discussed. And the validation of moisture diffusion theory was verified by comparing test results with analytical results.

The moisture distribution in low-strength concrete was mostly influenced by moisture diffusion, however, the effect of self-desiccation was negligible. But in high-strength concrete self-desiccation had a considerable influence on moisture distribution of cross-section. And the analytical results obtained by moisture diffusion theory were in good agreement with test results.

Keywords : moisture diffusion, self-desiccation, relative humidity, drying

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

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 1999년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서론

콘크리트는 재령에 의존하는 재료로서 시간에 따라 그 성질이 변한다. 즉 경화과정에서 수화열이 발생하고, 시간에 따라 콘크리트 내부의 함수량이 달라져 재료적 성질이 서서히 변한다. 따라서 대형 콘크리트 구조물의 경우에는 콘크리트의 재료적 특성이 전 부재에 걸쳐 균질하지 않으며, 이러한 콘크리트 부재의 비균질성은 초기재령에서 더욱 뚜렷이 나타난다.

건조수축이나 크리프 등은 콘크리트 내부의 수분분포에 따라 큰 영향을 받으며, 압축강도나 탄성계수 등도 콘크리트 내부의 함수량에 따라 크게 달라진다. 또한 콘크리트 내부의 수분분포는 내화성, 내구성, 동결융해 저항성 등에도 큰 영향을 준다. 따라서 콘크리트 내부에 존재하는 수분은 이러한 콘크리트의 여러 성질에 영향을 주기 때문에 초기재령에서 콘크리트 내부의 수분분포를 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하다.

한편 초기재령에서 콘크리트를 외기에 노출시키면 건조작용으로 인하여 수분확산이 일어나고, 콘크리트 표면을 통하여 외기로 수분손실이 발생한다. 또한 콘크리트 내부에서 자체건조로 인하여 전체 증발 가능 수량의 일부가 화학적 결합수로 변한다. 특히 최근에 많이 사용되고 있는 고강도 콘크리트의 경우에는 단위 시멘트량이 증가하기 때문에 초기재령에서 자체건조로 인한 수분손실량은 매우 크다. 따라서 이로 인하여 초기재령에서 콘크리트 내부의 수분확산 및 수분분포는 상당히 영향을 받는다. 그러나 기존의 콘크리트의 수분확산 실험에서 자체건조로 인한 수분손실을 무시하거나 고려하지 않았다<sup>(1,2)</sup>.

외기에 노출된 콘크리트의 단면은 수분확산(moisture diffusion)으로 인하여 부등수분분포를 이루고, 이러한 수분 차이로 인하여 부등건조수축(differential drying shrinkage)이 발생한다<sup>(3,4)</sup>. 부등건조수축은 콘크리트 표면에 인장응력을 발생시키며, 이 때 발생된 인장응력에 의해 콘크리트 표면에 균열이 발생하는 경우가 빈번하다. 또한 초기재령에서 시멘트의 수화반응으로 인한 자체건조(self-desiccation)로 인하여 자기수축(autogenous shrinkage)이 발생하고, 초기재

령에서 발생하는 균열의 주요 원인이 되기도 한다<sup>(5)</sup>. 이와 같이 콘크리트 내부의 수분분포에 대한 연구는 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 초기재령에서 자체건조로 인한 수분손실을 고려하여 콘크리트의 수분확산 실험을 수행하였다. 또한 콘크리트 내부의 각 위치에서 자체건조가 전체 상대습도분포에 미치는 영향에 대하여 검토하였으며, 초기재령에서 자체건조의 영향을 제외하고 수분확산만에 의한 상대습도의 변화에 대하여 검토하였다. 또한 수분확산 이론에 의한 해석결과와 실험결과를 비교하여 초기재령에서 수분확산 이론의 타당성을 검증하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험개요

초기재령에서 콘크리트를 외기에 노출시키면 수분확산이 발생하여 단면의 수분분포가 일정하지 않다. 이 때 콘크리트 내부의 상대습도는 수분확산에 의한 변화량뿐만 아니라 자체건조에 의한 상대습도의 변화량을 또한 포함하고 있으며, 특히 고강도 콘크리트의 경우에 이러한 현상이 뚜렷이 나타난다. 즉 양생초기에 콘크리트가 외기에 노출되었을 때 자체건조와 수분확산에 의하여 내부의 상대습도가 변한다. 따라서 전체 상대습도에서 자체건조에 의한 상대습도의 변화량을 제외해야 수분확산만에 의한 상대습도의 변화를 알 수 있다.

Fig. 1은 양생초기에 콘크리트가 외기에 노출되었을 때 내부의 각 위치에서의 상대습도 변화를 나타내고 있다. 콘크리트는 양생기간 중에 자체건조로 인하여 노출이 시작하는 시간( $t_0$ )에서 상대습도의 감소가 발생한다<sup>(6)</sup>. 콘크리트가 외기에 노출된 이후에 수분확산에 의한 상대습도의 변화뿐만 아니라 자체건조에 의한 상대습도의 변화가 발생한다. 여기서 건조용 실험체에서 자체건조에 의한 상대습도의 변화와 밀폐된 실험체에서 자체건조에 의한 상대습도가 같다고 가정하면, 콘크리트 내부의 전체 상대습도 변화량은 식 (1)과 같이 자체건조와 수분확산에 의한 상대습도의 변화량으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta h = \Delta h_d + \Delta h_s \quad (1)$$

여기서,  $\Delta h$ 는 자체건조와 수분확산으로 인한 콘크리트 내부 상대습도의 변화량이다. 그리고  $\Delta h_d$ 는 수분확산에 의한 콘크리트 내부의 각 위치에서 상대습도의 변화량이고,  $\Delta h_s$ 는 자체건조로 인한 상대습도의 변화량이다.

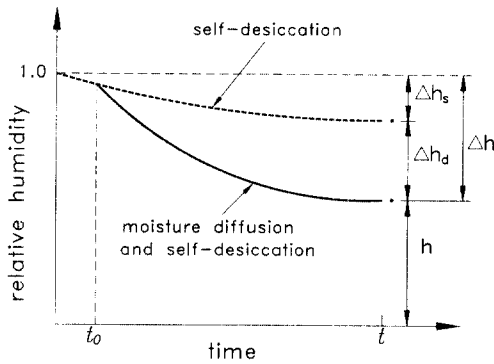


Fig. 1 Variation of relative humidity in concrete at early ages

따라서 본 연구에서는 초기재령에서 자체건조의 영향을 고려하여 콘크리트 내부의 수분확산에 대한 실험을 실시하였다. 이를 위하여 초기재령에서 콘크리트 내부의 자체건조로 인한 함수량의 변화와 수분확산으로 인한 콘크리트 내부의 각 위치에서의 수분분포에 대한 실험을 수행하였다. 또한 수분확산으로 인한 콘크리트의 수분손실량에 대한 실험을 실시하였다. 본 연구에서 실시한 실험은 Table 1의 내용과 같고, 각 경우에 2개의 동일한 실험체를 제작하였다.

Table 1 Type and size of specimen

Objective	Type of specimen	Size of specimen
Measurement of relative humidity in concrete	Drying specimen	10×10×20cm
	Sealed specimen	10×10×10cm
Measurement of moisture loss	Drying specimen	10×10×20cm

실험은 온도  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ , 상대습도  $50 \pm 2\%$ 로 한 항온항습실에서 실시하였다. 실험체를 제작한 후 24시간이 지난 후에 거꾸집을 제거하고, 2일 동안 수증양생을 실시하여 실험체 내부의 각 위치에서의 상대습도를 일정하게 하였다. 그 이후에 건조용 실험체는 외기에 노출시키고 자체건조용 실험체는 밀폐시켜 실험을 수행하였다.

실험에 사용한 시멘트는 1종 포틀랜드 시멘트이고, 잔골재는 금강유역의 강모래이며, 굵은골재로는 최대치수가 19mm인 화강암 부순자갈을 사용하였다. 또한 콘크리트 강도에 따른 자체건조 차이가 콘크리트 내부의 수분분포에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Table 2와 같이 고강도, 중간강도, 저강도 배합을 선정하였다.

Table 2 Mix proportions of concrete

Mix	W/C (%)	S/A (%)	Unit weight ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				S.P. (%)	$f_c'$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
			W	C	S	G		
H	28	38	151	541	647	1055	2.0	780
M	40	42	169	423	736	1016	0.5	540
L	68	45	210	310	782	955	-	220

## 2.2 콘크리트 내부의 상대습도 측정실험

콘크리트 내부 공극의 상대습도는 콘크리트의 함수량을 나타내기 위하여 가장 널리 사용되고 있다<sup>(1)</sup>. 콘크리트 노출표면으로부터 각 위치에 드릴을 이용하여 구멍(hole)을 설치한 후에, 상대습도 측정장치를 이용하여 상대습도를 측정할 때 외기의 공기유입으로 인한 측정오차가 발생하지 않도록 유의하면서 각 위치에서의 상대습도를 측정하였다.

본 연구에서는 상대습도를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 Vaisala HMP44 습도센서와 HMI41 계측장치를 사용하였다<sup>(7,8)</sup>. 먼저 실험체의 각 위치에 구멍을 만든 후에 플라스틱 슬리브(plastic sleeve)를 설치하였다. 이 때 고무 플러그(rubber plug)를 사용하여 플라스틱 슬리브를 완전히 밀폐시켜서 외기와 플라스틱 슬리브 내의 수분이동이 없도록 하였다. 그리고 콘크리트

내부의 상대습도를 측정하기 전에 플라스틱 슬리브 내에 HMP44 습도센서를 설치하였다. 그 이후에 기공의 상대습도가 점차적으로 콘크리트 내부의 상대습도와 평형상태가 되었을 때 HMP44 습도센서를 HMI41 계측장치에 연결하고 콘크리트 내부의 상대습도를 측정하였다.

건조용 실험체의 크기는 Fig. 3과 같이 10×10×20cm이며, 노출면적은 10×10cm이다. 콘크리트 내부의 각 위치에서의 상대습도를 측정하기 위하여 콘크리트의 노출표면에서 3, 7, 12cm 깊이에 플라스틱 슬리브를 설치하였다. 그리고 건조시에 수분확산이 일차원으로 일어나게 하기 위하여 한 면을 제외한 모든 면을 파라핀으로 밀폐시켜 수분의 증발을 방지하였다.

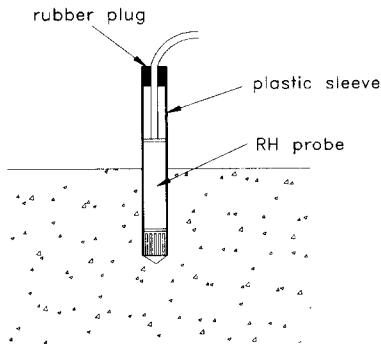


Fig. 2 Measuring method for relative humidity in concrete

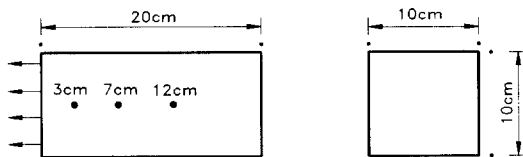


Fig. 3 Geometry and size of drying specimen

또한 자체건조로 인한 수분손실량을 측정하기 위하여 10×10×10cm의 실험체를 제작하였다. 이러한 실험체는 모든 면을 파라핀으로 밀폐시켜 외기로의 수분손실을 차단하고 실험체 내부에 플라스틱 슬리브를 설치하여 각 재령에서 자체건조로 인한 콘크리트 내부의 상대습도의 변화를 측

정하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

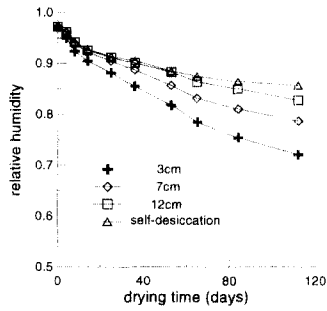
#### 3.1 콘크리트 내부의 상대습도 분포

초기재령에서 콘크리트를 외기에 노출시킨 건조용 실험체 내부의 각 위치에서의 상대습도는 Fig. 4와 같다. 또한 Fig. 4는 자체건조로 인한 상대습도를 나타내는 밀폐시킨 실험체의 상대습도 변화도 나타내고 있다. 저장도 콘크리트의 경우 자체건조로 인한 상대습도의 변화가 매우 작아서 콘크리트 내부의 수분분포에 거의 영향이 없지만, 수분확산으로 인하여 각 위치에서의 상대습도의 차이는 매우 현저하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그렇지만 고강도 콘크리트의 경우는 저장도 콘크리트에 비하여 자체건조의 영향이 상당히 작으며 수분확산에 의한 각 위치에서의 상대습도의 변화는 작음을 알 수 있다. 또한 고강도 콘크리트 내부의 각 위치에서 상대습도의 변화는 수분확산에 의한 상대습도의 변화뿐만 아니라 자체건조로 인한 상대습도의 감소도 상당한 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 이는 고강도 콘크리트는 공극조직이 저장도 콘크리트보다 치밀하기 때문에 수분확산이 느리게 일어나지만, 단위 시멘트량이 많기 때문에 수화반응에 의한 자체건조는 크게 일어나기 때문이다. 이러한 콘크리트 내부의 각 위치에서 상대습도의 변화는 식 (2)와 같이 수분확산과 자체건조에 의한 상대습도 변화로 나타낼 수 있다.

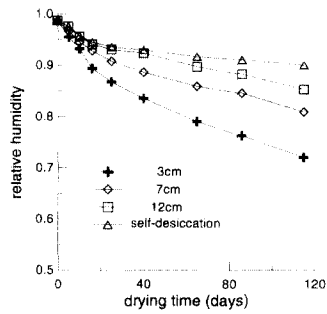
$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial h_d}{\partial t} + \frac{\partial h_s}{\partial t} \quad (2)$$

저장도 콘크리트의 경우에 식 (2)의 우측 첫번째 항에 의하여 주로 콘크리트 내부의 각 위치에서 상대습도의 변화가 일어나고, 두번째 항은 거의 무시할 수 있다. 그러나 고강도 콘크리트는 식 (2)의 첫번째 항의 영향뿐만 아니라 두번째 항의 영향도 무시할 수 없을 정도로 크다. 따라서 초기재령에서 수분확산에 대한 실험을 하고자 할 때, 자체건조로 인한 상대습도의 변화를 고려해야 함

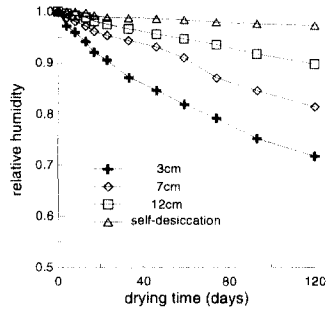
을 알 수 있다.



(a) H(W/C=0.28)



(b) M(W/C=0.40)



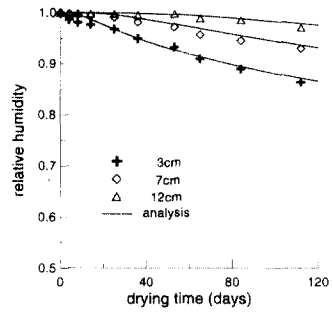
(c) L(W/C=0.68)

Fig. 4 Relative humidity distribution in concrete due to moisture diffusion and self-desiccation

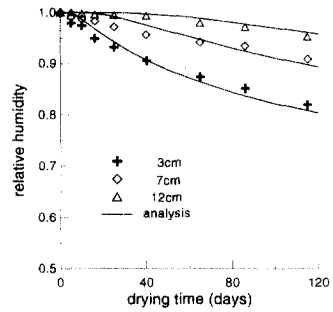
### 3.2 수분확산에 의한 상대습도의 결과분석

Fig. 1에서 자체건조로 인한 상대습도의 변화를 제외한 수분확산만에 의한 콘크리트 내부의

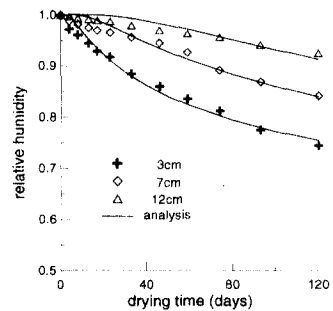
상대습도( $h_d$ )는 실제 상대습도  $h$ 에  $\Delta h_s$ 를 합한 것과 같다. 따라서 콘크리트 내부의 상대습도 실험결과로부터 수분확산에 의한 콘크리트 내부의 각 위치에서 상대습도는 Fig. 5와 같다.



(a) H(W/C=0.28)



(b) M(W/C=0.40)



(c) L(W/C=0.68)

Fig. 5 Relative humidity distribution in concrete due to moisture diffusion

또한 콘크리트 내부의 수분확산은 식 (3)과 같은 비선형 수분확산 방정식에 의하여 나타낼 수

있다<sup>(4)</sup>

$$\frac{\partial h_d}{\partial t} = \text{div}(D \text{ grad } h_d) \quad (3)$$

여기서,  $D$ 는 수분확산계수(moisture diffusion coefficient)이고, CEB-FIP('90)에서 제시한 식을 사용하였다<sup>(9)</sup>

이러한 비선형 수분확산 방정식을 통하여 콘크리트 내부의 각 위치에서의 상대습도에 대한 해석결과와 실험결과를 Fig. 5에서 나타냈다. 이때 사용한 해석방법은 참고문헌 (4)에서 개발한 프로그램을 사용하였다.

Fig. 5에 의하면 초기재령의 경우에도 수분확산 방정식을 통한 해석결과는 실험결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한 고강도 콘크리트보다 저강도 콘크리트에서 수분확산이 훨씬 빠르게 진행되고, 따라서 콘크리트 내부의 각 위치에서 상대습도의 차이도 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 콘크리트의 중앙부에서 상대습도가 가장 높고 표면으로 갈수록 점차로 낮아지고 있음을 알 수 있다. 이러한 콘크리트 내부의 습도는 일정시간이 지난 후에 외기의 상대습도와 점차로 평형상태에 도달하게 된다. 이와 같이 노출표면에 가까울수록 수분이 빠르게 이동하고, 내부로 갈수록 느리게 수분의 이동이 일어난다.

Fig. 6은 콘크리트의 노출표면으로부터 3cm 깊이에서 수분확산에 의한 상대습도의 변화량( $\Delta h_d$ )과 자체건조에 의한 상대습도의 변화량( $\Delta h_s$ )을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 기울기는 자체건조에 대한 수분확산의 상대습도 변화량을 나타내며, 저강도 콘크리트에서 기울기가 매우 급하게, 그리고 고강도 콘크리트에서 매우 완만하게 변함을 알 수 있다.

### 3.3 콘크리트의 수분손실량

콘크리트에서 발생하는 무게의 손실은 자체건조와는 상관이 없으며, 따라서 외부로의 수분손실량, 즉 중량손실은 수분확산 속도와 밀접한 관련이 있다. Fig. 7은 시간에 따른 콘크리트의 수분손실량을 나타낸 것이다. 여기서 콘크리트의 수분

손실량은 단위 노출면적당 수분손실중량( $\text{kg/m}^2$ )으로 나타냈다. 물시멘트비가 증가하고, 또한 단위수량이 증가함에 따라 수분손실량은 현저하게 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 경향은 콘크리트 강도가 수분확산 속도에 미치는 영향과 유사하며, 콘크리트의 수분손실량이 수분확산 속도와 밀접한 관계가 있는 것을 알 수 있다.

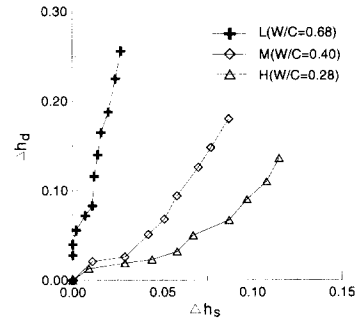


Fig. 6 Relationship between  $\Delta h_d$  at 3cm from exposed surface and  $\Delta h_s$  from  $t_0$  to  $t$

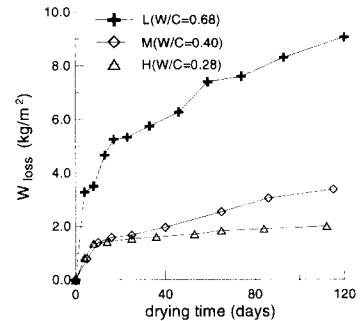


Fig. 7 Moisture loss of concrete

## 4. 결론

초기재령에서 콘크리트 내부의 상대습도의 변화에 대한 실험과 해석을 실시하였다. 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 초기재령에서 수분확산과 자체건조가 발생하는 경우에 저강도 콘크리트에서 수분확산이 콘크리트 내부의 수분분포에 대하여 현저하게 영향을 주고 있지만, 고강도 콘크리트는 수분확산 뿐만 아니라 자체건조에 의해서도 무시할 수 없을 정도로 상당한 영향을 받았다.

(2) 고강도 콘크리트보다 저강도 콘크리트에서 수분확산이 훨씬 빠르게 진행되고, 따라서 콘크리트 내부의 각 위치에서 상대습도 차이도 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

(3) 초기재령의 경우에도 수분확산 방정식을 통한 해석결과는 실험결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

(4) 물시멘트비가 증가하고, 단위수량이 증가함에 따라 수분손실량은 현저하게 증가하는 경향을 나타냈다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단(ERC-STRESS)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고 문헌

1. Parrott, L. J., "Factors Influencing Relative Humidity in Concrete." Magazine of Concrete Research, Vol. 43, No. 154, 1991, pp.45-52.
2. Selih, J., and Bremner T. W., "Drying of Saturated Lightweight Concrete : an Experimental Investigation." Materials and Structures, Vol. 29, No. 191, 1996, pp.401-405.
3. Bazant, Z. P., and Najjar, L. J., "Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete." Materials and Structures, Vol. 5, No. 25, 1972, pp.3-20.
4. 김진근, 이철성, "콘크리트의 부동건조수축에 관한 연구," 콘크리트학회지, Vol. 9, No. 2, 1997, pp.153-161.
5. Persson, B., "Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology." Materials and Structures, Vol. 30, No. 199, 1997, pp.293-305.
6. Persson, B., "Moisture in Concrete Subjected to Different Kinds of Curing." Materials and Structures, Vol. 30, No. 203, 1997, pp.533-544.
7. Terrill, J. M., Richardson, M. and Selby, A. R., "Non-linear Moisture Profiles and Shrinkage in Concrete Members." Magazine of Concrete Research, Vol. 38, No. 137, 1986, pp.220-225.
8. Merikallio, T., Mannonen, R. and Penttala, V., "Drying of Lightweight Concrete Produced from Crushed Expanded Clay Aggregates." Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 9, 1996, pp.1423-1433.
9. Comite Euro-International du Beton, "CEB-FIP Model Code 1990," 1993, pp.68-69.

### 요 약

콘크리트 구조물이 초기재령에서 외기에 노출될 때, 수분확산으로 인하여 수분의 이동이 일어나고, 또한 자체건조도 발생한다. 이러한 콘크리트 내부의 수분확산과 자체건조에 의하여 콘크리트의 위치에 따라 상대습도가 변화한다. 특히 고강도 콘크리트의 경우에 단위 시멘트량을 많이 사용하기 때문에, 초기재령에서 콘크리트 단면의 수분분포는 자체건조에 의하여 큰 영향을 받는다.

본 연구에서는 초기재령에서 외기에 노출된 콘크리트 내부의 여러 위치에서 상대습도를 측정하였다. 또한 자체건조로 인한 콘크리트의 상대습도 변화를 측정하여 초기재령에서 수분확산과 자체건조가 콘크리트 내부의 각 위치에서 상대습도에 미치는 영향을 검토하였다. 그리고 수분확산 이론에 의하여 해석결과와 실험결과를 비교하여 초기재령에서 수분확산 이론의 타당성을 검증하였다.

저강도 콘크리트 단면의 수분분포는 주로 수분확산에 의하여 영향을 받았으며, 자체건조의 영향은 매우 작게 나타났다. 그렇지만 고강도 콘크리트는 수분확산 뿐만 아니라 자체건조에 의하여도 영향을 받았다. 또한 수분확산 이론에 의한 해석결과는 실험결과를 잘 예측하였다.

(접수일자 : 1998.5.29)