

# 양생초기 콘크리트내의 수분확산에 관한 연구

## A Study on Moisture Diffusion in Young Concrete

한 만 엽\*  
Han, Man Yop

### 요 약

양생 초기에 있어서 콘크리트의 투수계수는 콘크리트의 건조수축에 영향을 미치는 요인으로서 콘크리트내의 물의 이동과 관련된 중요한 변수이다. 콘크리트의 투수성에 관한 연구는 주로 콘크리트의 건조수축이나, 동결융해에 대한 내구성 등과 연관되어 있다. 이들 대부분의 측정결과와는 염소 이온등을 이용한 간접 측정 방법이거나 충분히 양생된 안정한 콘크리트를 대상으로 하는것이 대부분이므로 양생초기의 콘크리트의 투수계수에 관한 연구는 거의 없다고 할 수 있다. 본 연구에서는 싸이크로미터라는 수리엔에너지를 측정하는 센서를 이용하여 콘크리트의 투수계수의 측정을 시도하였다. 콘크리트의 투수계수와 확산계수를 측정하기 위한 세가지의 방법을 제시하였으며, 이를 적용하는 실험도 실시하였다. 또한 투수계수와 확산계수간의 변환을 위한 등온 흡수선을 개발, 적용하였다.

### Abstract

Moisture movement which is controlled by water potential and permeability of concrete is a very important phenomenon which affects the drying shrinkage of concrete. The study for permeability of concrete is mostly related to drying shrinkage and freeze-thaw durability problems. Most of the permeability test results are from indirect measuring method with chloride ion or measurement of old concrete. Thermocouple psychrometers are used to measure the water potentials in concrete. Based on the measured water potentials, three methods have been proposed to calculate hydraulic conductivity and diffusivity. And also the hysteresis of sorption isotherm due to drying and wetting cycle has been drawn and proved its validity.

**Keywords :** moisture movement, water potential, psychrometer, hydraulic conductivity, hydraulic diffusivity, sorption isotherm, concrete slab, young concrete

\* 정회원, 아주대학교 토목공학과 조교수

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 1994년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

# 1. 서 론

본 연구에서는 콘크리트가 아직 화학 변화를 많이 일으키는 양생 초기의 투수계수 측정에 관한 연구로서 투수계수와 확산계수의 측정에 관한 새로운 방법들을 제시하였다. 양생 초기 콘크리트의 건조현상은 콘크리트내의 수분의 이동과 시멘트의 수화반응과 직접적인 연관이 있는데, 수화반응에 의한 수분의 감소를 제외한 수분의 손실은 증발에 의하여 발생한다. 이때 수분 이동은 전이 불포화 흐름(transient unsaturated flow)인데다, 수화 반응으로 인하여 콘크리트의 공극구조가 계속적으로 변하고 수분의 일부는 화학 반응으로 시멘트와 결합되기 때문에, 지금까지는 그 측정이 불가능하였다<sup>(1)</sup>. 아울러 이는 투수 계수가 함수량과 시간이라는 두개 변수의 함수임을 의미하기도 한다.

다공성 물질, 특히 콘크리트를 통한 수분의 이동에 관한 연구는 상당히 많은 진척을 보여왔다. 초기의 연구는 기체상태의 확산이론에 근거를 두었으나, 차츰 모세관이론이나 기화와 응축 이론등으로 발전해 왔다<sup>(2,3,4)</sup>. 또한 수분이동은 항상 열에너지와 동반 이동을 함으로써 다공성 매질을 통한 물질과 열량의 이동을 동시에 고려하는 이론이 또한 수분이동 해석에 적용 시도되었다<sup>(5,6)</sup>. 그러나 이런 이론들을 적용하는데 있어서 가장 큰 문제점 중의 하나는 이들을 적용하는데 필요한 실측된 확산계수가 콘크리트의 경우는 거의 전무하다는데 있다. 지금까지의 투수계수 측정은 염소이온 등의 확산계수를 측정하는 간접적인 방법이나

(7,8,9) 공기의 투과성을 측정하는 방법<sup>(10)</sup> 또는 물을 가압하여 투수계수를 직접 측정하는 방법<sup>(11)</sup>들이 많이 이용되어 왔는데, 이들 대부분은 충분히 양생된 콘크리트의 실험 결과들이다.

내부공극의 크기 분포와 그중 모세관의 비중이 콘크리트의 투수성에 영향을 미치는 중요한 변수임은 잘 알려져 있다. 그러나, 이들외에도 공극의 형상이나 공극들끼리의 연결된 정도에 따라 투수성이 크게 달라질 수 있다. 따라서 콘크리트의 사용재료나 첨가재가 콘크리트의 투수계수나 건조수축 특성등에 미치는 영향을 연구하는 방법으로

공극율이나 공극분포 시험을 통한 간접적인 연구보다는 투수성을 직접 측정하는 것이 콘크리트의 투수성을 연구하는 가장 정확하고 타당한 방법이라 할 수 있다.

본 연구의 목적은 콘크리트의 투수계수에 영향을 미치는 여러 변수들의 영향을 평가하기 위한 것이 아니고, 지금까지 추정만 해왔던 콘크리트의 양생초기의 투수계수 및 확산계수를 측정할 수 있는 새로운 방법을 제시, 검증하는데 있다.

## 2. 투수계수 측정

콘크리트에서 건조 수축의 직접적인 원인이 되는 수분의 이동은 수화 작용에 의하여 공극 구조가 변하는 물체 내에서 일어나는 전이 불포화 확산 현상이다. 1차원 전이 불포화 확산현상의 경우, Philip이 함수량과 확산 계수 사이의 관계를 가정하고, Boltzmann 변환을 통하여 문제 해결의 방향을 제시하였다<sup>(2)</sup>. 본 논문에서는 이 변환식을 이용할 수 있도록 수리에너지의 분포를 나타내는 모델식을 제안하여 확산계수의 산정을 시도하였다. 먼저 Boltzmann 변환을 하는 과정을 간단히 소개하면 다음과 같다.

다공성 물질에서 수분의 불포화 1차원 확산 현상은 연속 방정식과 Darcy의 법칙에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} K(\theta) \left[ \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] \quad (1)$$

여기서 J는 이동량이고,  $\varphi$ 는 수리에너지,  $\theta$ 는 함수량, K( $\theta$ )는 투수계수이며, t는 시간, z는 거리이다. 이식을 수리에너지만의 식으로 다시 쓰면 아래와 같은 식이 된다.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \quad (2)$$

여기서

$$D = K(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \quad (3)$$

여기서 새로운 변수 m을 도입하여 Boltzmann 변환을 하면, 아래와 같은 좀더 유용한 형태의 식으

로 변형시킬 수 있다<sup>(2)</sup>.

$$\frac{m}{2} \frac{\partial \varphi}{\partial m} + D \frac{\partial^2 \varphi}{\partial m^2} = 0 \quad (4)$$

여기서  $m$ 은  $m = z / t^{0.5}$ 이며,  $z$ 는 슬래브 바닥으로부터 센서까지의 거리이며,  $t$ 는 시간이다.

### 2.1 모델식 이용법

슬래브 바닥에서  $z$ 만큼 떨어진 지점에 설치한 센서의 각 측정 데이터들로 부터 콘크리트 투수계수 측정에 식(4)를 이용하기 위한 다음과 같은 모델을 제안하였다.

$$\varphi = e^{(ax+b)} \quad (5)$$

상수 'a'와 'b'은 몇 개의 다른 시간 대에서 측정된 센서의 자료를 자연대수 변환하여 선형 회귀 분석을 하면 결정할 수 있다. 굳기 전 콘크리트의 확산 계수는 시간에 따라 계속적으로 변해감으로, 일정한 시간의 단면에 따른 수리 에너지의 분포식을 고려 함으로써 투수계수를 계산하는 것이 바람직하다 할 수 있다.  $m$ 의 제곱인 새로운 변수  $x$ 를 이용하면 이 모델로 부터 아래와 같은 확산 계수  $D$ 를 구할 수 있다.

$$D = \frac{-x}{2(2ax+1)} = \frac{-1}{2(2a+t/z^2)} \quad (6)$$

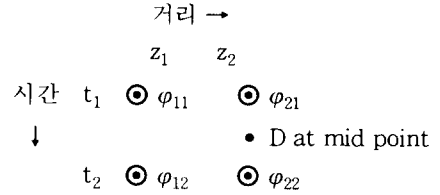
이 식에서 확산계수는 분포 함수의 상수 'a'에 반비례하고 시간 't'에도 역시 반비례 함을 알 수 있다.

### 2.2 수리에너지 분포법

이 방법은 위에서 이용한 모델식을 이용하기 어려울때 이용할 수 있는 방법으로 식(2)에서 시작하여 확산 계수를 계산하는 식을 유도 할 수 있다. 여기서  $D$ 가  $z$ 방향으로 상수가 아니므로 이 식을 재배치한 뒤 양변을 적분하면 아래와 같은 식을 유도할 수 있다.

$$D = \frac{\int_{z_1}^{z_2} \partial \varphi / \partial t \cdot \partial z}{\partial \varphi / \partial z} \quad (7)$$

$D$ 를 결정하기 위한 최소 4개의 측정점이 아래와 같다면



아래와 같은 수치적분식을 얻을 수 있다.

$$D = \frac{(-\varphi_{11} + \varphi_{12} - \varphi_{21} + \varphi_{22})}{(-\varphi_{11} - \varphi_{12} + \varphi_{21} + \varphi_{22})} \cdot \frac{(z_2 - z_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (8)$$

이 식은 앞의 방법보다 정밀도는 떨어지지만 분산된 몇개 지점의 측정에 이용될 수 있다.

### 2.3 직접 측정법

이 방법은 습윤 시험중 습윤 침투면(Wetting front)의 이동 속도를 측정하여 이로부터 직접적으로 투수계수를 측정하는 방법으로 다음과 같은 Darcy의 식으로 부터 구할 수 있다.

$$v = k \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (9)$$

본 실험에서 사용된 센서는 습윤 침투면의 이동 속도( $v$ )를 직접적으로 측정할 수 있으므로,  $\partial \varphi / \partial z$ 를 계산하면 투수계수( $k$ )를 바로 계산할 수 있다.

## 3. 실험 개요

싸이크로미터(Psychrometer)는 물의 수리 에너지, 즉 Gibb's 자유에너지를 측정하는 센서로서 60bar 까지 측정이 가능한 열전쌍 센서이다<sup>(12)</sup>. 이 수리 에너지는 거시적 관점에서는 물의 위치에너지와 같은 종류의 것으로서 물흐름의 양과 방향을 결정하고, 콘크리트의 투수성이 어떻게 변화하는가에 직접적으로 연관되어 있다. Lytton, R.L.과 Brown, R.W.은 이 센서를 이용하여 처음으로 콘

크리트내의 수리에너지의 분포를 측정할 수 있을  
을 보여 주었다.<sup>(13)</sup> 수리에너지를 측정할수 있는  
방법은 여러가지가 있으나 그중 가장 측정범위가  
넓고 콘크리트내에 설치가 가능한 센서로 싸이크  
로미터를 선택한 것이다. 본 센서는 실험에 앞서  
NaCl 용액에서 보정이 필요하며, 보정결과는 참  
고문헌(14)에 나와 있다.

그림 1에 나타나 있는것 같은 33x33x15cm 크기의  
슬라브를 제작하여 4개의 측정 센서를 표면에서  
1.3cm, 2.5cm, 5cm, 10cm 깊이에 분산 설치하  
였다.

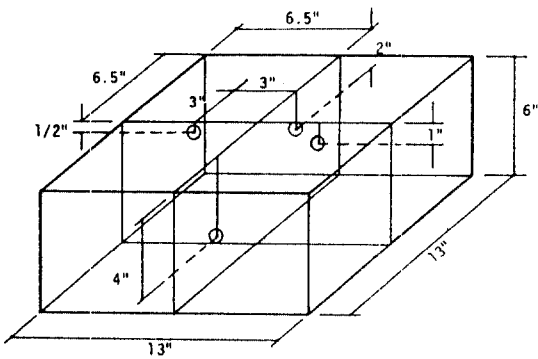


Fig. 1 Psychrometer positions in concrete slab

측정은 25°C에 상대습도 50%의 항온항습실에서  
실시되었다. 시편 제작후 탈형전에는 밀폐상태  
에 보관되었다가 건조 실험시에는 1차원 흐름을  
만들기 위하여, 상부 타설면을 제외한 모든 면을 2  
층의 비닐로 밀폐하여 수분의 증발을 막았다. 실험  
은 2주간의 건조기와 2주간의 습윤기를 거쳐,  
다시 3주간의 건조기동안 진행되었다. 습윤기 동  
안에는 지속적인 수분의 공급을 위하여 슬라브를  
습윤실로 옮겨 젖은 마대를 덮어서 표면에서 계속  
물이 공급될 수 있도록 하였다.

본 실험에서는 콘크리트가 건조실에서 어느 정  
도 안정된 상태에 도달했을때 습윤실에서 시료를  
양생함으로써 콘크리트내로 물이 침투해 들어가는  
과정을 시각적으로 보여 주었으며, 또한 그 속  
도를 측정할 수 있었으며, 또 그 측정자료로부터  
습윤 침투계수를 측정할 수 있었다. 콘크리트가  
습윤실에서 안정된 상태에 도달한뒤 다시 건조시

김으로 해서 두번째 건조 투수성을 측정할 수 있  
고, 이 자료들로 부터 건조와 습윤의 반복에 의한  
이력 곡선의 특성도 확인해볼 수 있었다.

사용된 콘크리트의 배합설계와 배합직후의 측  
정결과는 아래의 표1 과 같다.

Table 1 Mix design and properties of fresh concrete

slump (cm)	air (%)	W/C (%)	S/A (%)	Unit Weight(kg/cm <sup>3</sup> )			
				water	cemen:	sand	gravel
8	2.5	53	35	156	292	781	1456

#### 4. 결과 및 분석

전체적인 측정 결과가 그림 2에 나와 있다. 전체  
실험 기간인 50일 동안의 시간에 따른 각각의 깊  
이에서의 수리에너지의 변화를 보여주며, 건조기  
와 습윤기의 경계들이 명확히 구분되어 있음을 알  
수 있다. 제 1 건조기간 동안에는 표면에서 가까운  
순서대로 수리에너지가 빠르게 증가함을 알 수 있  
고, 깊은 곳일수록 습한 상태로 오랜 기간 동안 남  
아 있음을 알 수 있다. 본 실험에서 사용한 센서는  
-60bar 이상의 건조한 상태에서는 측정을 할 수  
없으므로 표층에서 센서의 측정값이 갑자기 떨어  
지는 것은 측정 범위를 넘어갔음을 의미한다. 건  
조후 습윤 양생 기간 동안의 변화를 살펴보면 깊  
이 5cm 까지의 표층은 1일 이내에 수분이 침투해  
들어감을 보여주며, 깊이 10cm에 도달하는 데는  
약 3일 정도의 시간이 걸림을 알 수 있다. 제 2 건

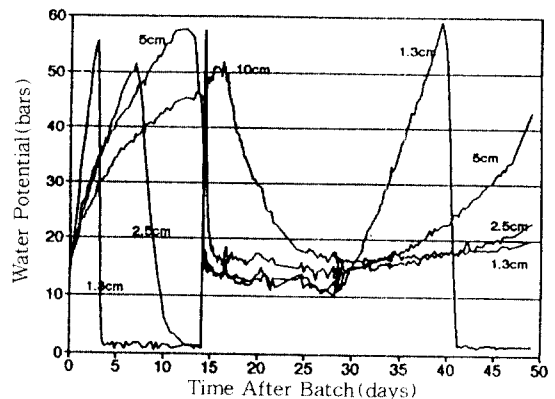


Fig. 2 Water potential changes throughout the testing period

조기간 동안의 변화는 제 1 건조기간 동안의 변화에 비하여 상당히 수리 에너지의 증가가 완만함을 알 수 있다.

#### 4.1 확산 계수 산정

이들의 측정값들로부터 투수계수들을 구하기 위하여 깊이에 따른 수리 에너지의 분포를 살펴 보았다. 그림 3, 4, 5는 각각 제 1 건조기와 습윤기 그리고 제 2 건조기 동안의 깊이에 따른 수리 에너지의 종단분포를 보여주는 것이다. 그림 3에서 콘크리트 배합뒤 2시간후의 분포인 첫번째의 곡선을 보면 표층의 수리 에너지가 바닥층에 비하여 약간 높은것을 관찰할 수 있는데 이는 타설 직후의 블리딩현상 때문에 표면에 모인 수분으로 인하여 발생한 수리 에너지의 차이가 나타난것으로서 본 실험의 정확도를 간접적으로 암시해준다. 그림 4는 습윤기 동안의 측정값으로서 첫번째 커브인 6시간 후의 분포를 보면 이미 2.5cm 깊이에 있는 두번째 센서까지는 수분이 침투해 들어갔고, 깊이 5cm에서는 6시간에서 24시간 사이에 수분의 침투가 이루어짐을 알 수 있다. 그림 5는 제 2 건조기 동안의 변화를 보여주는 것으로서 그림 3의 경우와는 대조적으로 10일동안 깊이 2.5cm 내에서만 수분의 손실이 일어남을 보여준다. 그 이상의 깊이에서는 수분의 손실이 대단히 완만함을 보여준다. 이러한 완만한 변화는 확산계수가 제 1 건조기에 비하여 상당히 작아졌음을 의미한다.

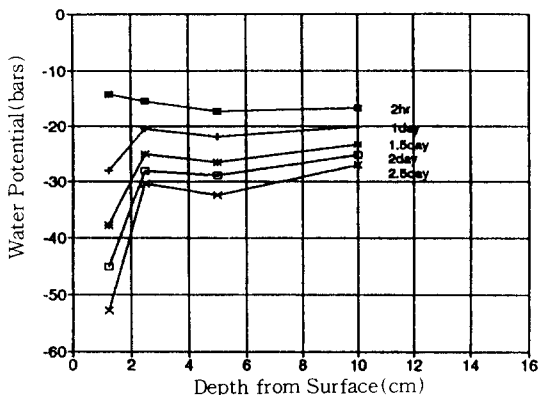


Fig. 3 Cross sectional distribution of water potential for the first drying period

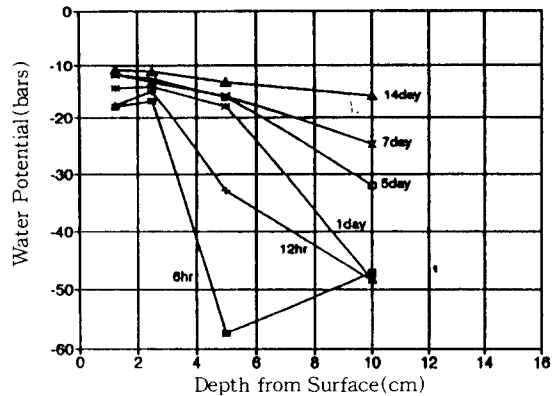


Fig. 4 Cross sectional distribution of water potential for the wetting period

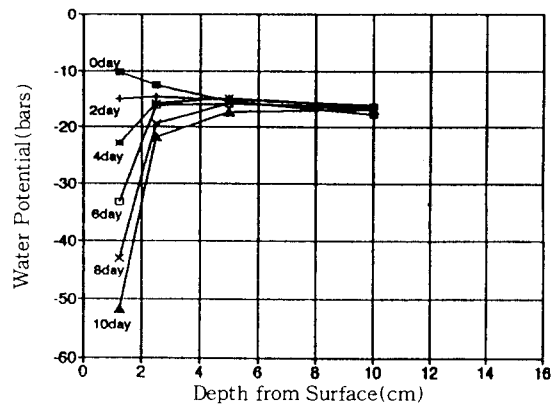


Fig. 5 Cross sectional distribution of water potential for the second drying period

이들의 분포도로 부터 대수변환을 통하여 앞에서 제안한 모델식을 이용하여 확산계수를 구한것이 그림 6, 7, 8에 나와 있다. 그림 6 과 8은 제 1, 제 2 건조기 동안의 확산계수를 모델식 이용법을 통하여 구한것이고, 그림 7은 습윤기 동안의 확산계수를 수리 에너지 분포법을 이용하여 구한것이다. 측정된 확산계수들은 제 1 건조기 동안에는  $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{min}$  에서 닷세후에는  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{min}$  정도의 값을 갖게 되고, 제 2 건조기 동안에는  $8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{min}$  에서 8일후에는  $5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{min}$  정도의 값을 갖게 됨을 알 수 있다. 확산계수를 살펴보면 이들 둘 사이에는 아주 큰 차이가 있지는 않음을 알 수 있다. 아울러 습윤 침투시의 확산계수는

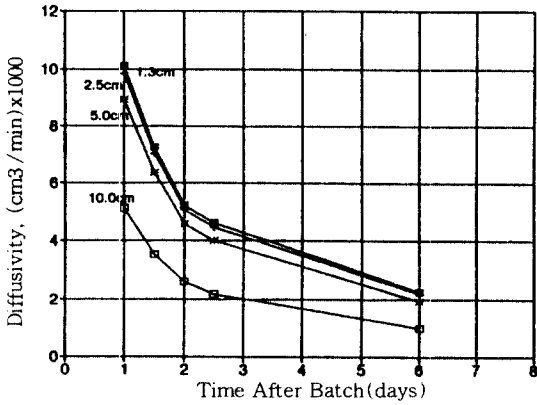


Fig. 6 Calculated diffusivities for the first drying period

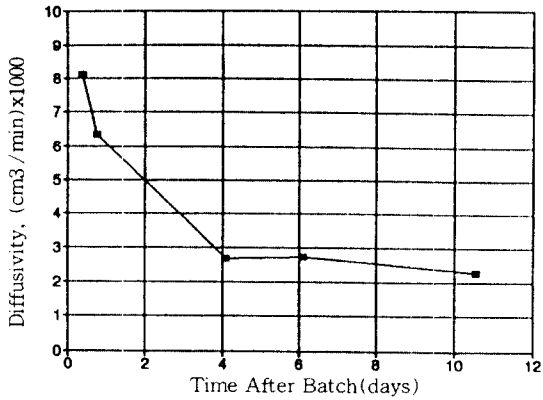


Fig. 7 Calculated diffusivities for the wetting period

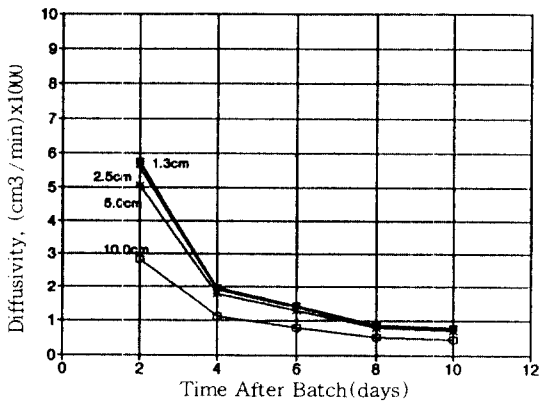


Fig. 8 Calculated diffusivities for the second drying period

처음 하루동안의 침투가 매우 빠르기 때문에 상당히 높은 초기 확산계수를 보여주는 것 이외에는 건조기의 측정값들과 그리 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

#### 4.2 투수 계수 산정

그림 9는 수리에너지 30bar를 기준으로 습윤 침투면의 이동 위치를 결정하여 시간의 함수로 나타낸 것으로서 접선속도와 할선속도의 두가지 침투속도를 측정할 수 있음을 보여준다. 그림에 제공된 수식은 측정점들을 대표하는 대수 변환된 회귀 분석식이며, 측정점이 네개인 점도 있으나  $R^2=0.99$ 에 달할 정도로 상당히 측정값과 잘 일치함을 알 수 있다.

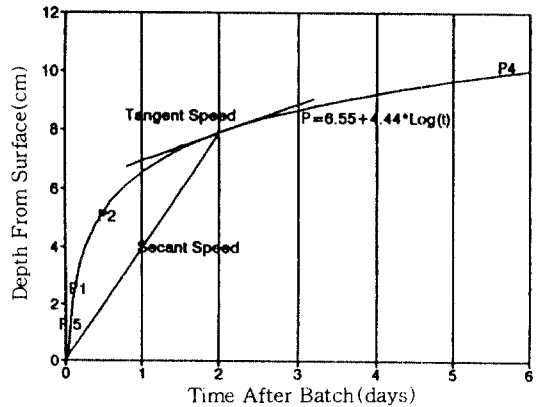


Fig. 9 Wetting front movement calculated for 30 bars

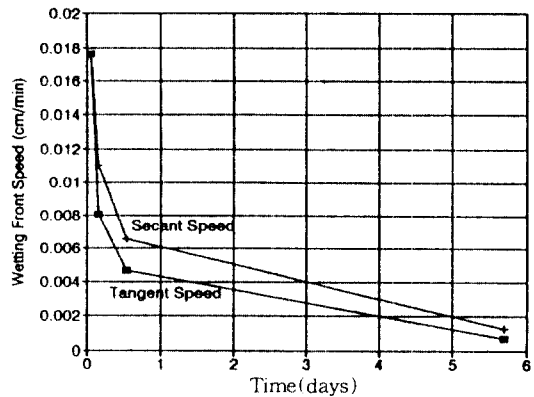


Fig. 10 Calculated wetting front movement speed

그림 10은 앞의 그림에서 계산된 속도를 표시한 것으로, 할선속도가 접선속도보다 항상 큰 값을 갖고 있음을 보여준다. 할선속도는 표면에서 측정점까지의 평균 침투 속도이며, 접선속도는 측정지점에서 수분이 실제 이동하는 순간 속도이다. 여기서 접선속도가 더 작은것은 측정 순간의 수분의 실제 이동속도가 평균속도보다 느리다는 것을 의미한다. 상대적인 비교를 목적으로 하는 연구에서는 어느쪽을 택하거나 차이가 없으나, 전체적인 이동량을 계산하고 싶을때는 할선속도를 이용해야 한다.

그림 9의 회귀 분석식은 위치를 나타내므로 이를 미분하면 다음과 같은 수분의 이동 속도를 나타내는 모델식을 찾아낼 수 있다. 단 여기서 계산

된 속도는 접선속도이다.

$$p = a \log(t) + b \rightarrow$$

$$v = dp/dt = a/t \log(e) = a \log(e) / t$$

이 식으로 부터 이동속도는 시간의 역수에 해당함을 알 수 있다. 따라서 역수변환후 선형화된 모델식과 측정값을 비교한 것이 그림 11에 나와 있다. 이론적으로 예고된 것은 직선적인 관계이나 실측값은 약간의 곡선을 이루고 있음을 알 수 있다. 이러한 곡선적인 경향으로 인하여  $R^2=0.91$ 로서 약간 낮은 상관관계를 보여준다.

그림 11로 부터 계산된 이동 속도를 Darcy식에 대입하여 투수계수를 역산한 것이 그림 12에 나타나 있다. 이들 투수계수를 구하기 위하여 사용된 계산값들이 표2에 정리되어 있다.

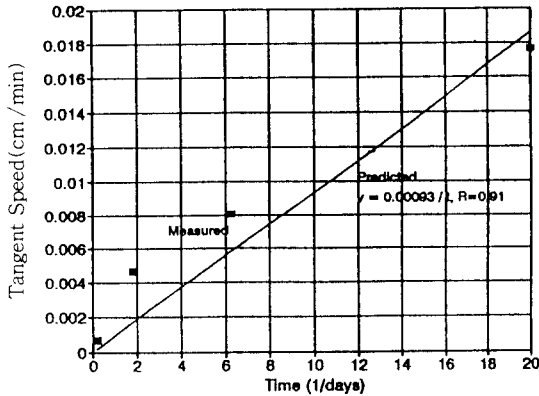


Fig. 11 The relationship between tangent speed and time

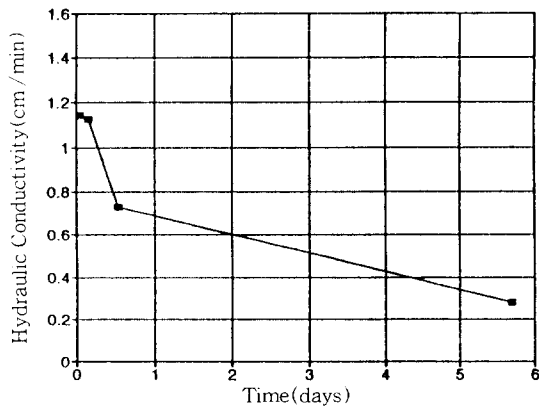


Fig. 12 Hydraulic conductivity calculated from wetting front method

Table 2 Hydraulic conductivities by Wetting Front Method

Time(days)	Depth(cm)	Speed	$d\phi/dx$	$k(10^{-6}cm/min)$
0.05	1.27	0.0176	15429	1.143
0.16	2.54	0.0080	7144	1.122
0.54	5.08	0.0046	6366	0.729
5.7	10.16	0.0007	2440	0.280

### 4.3 확산계수와 투수계수의 관계

확산계수를 투수계수로 변환하기 위해서는 등온 흡수선(Sorption Isotherm)이 필요하다. 이 관계 곡선을 함수량 측정과 Gardner의 식을 이용하여 구하였고 이 관계는 그림 13에 나와있다. 그림 13에 몇몇 기간 동안의 함수량 평형 곡선을 찾아낸뒤, 건습시 이들이 순차적으로 작용할때 함수량의 이력곡선을 구한것이다. 이 식을 구하기 위하여 시멘트의 수화율에 대한 가정과 Gardner의 식

Table 3 Assumed values and the numbers used for Sorption Isotherm.

Curing Time	Degree of Hydration	Hydrated Water	Porosity Reduction	M.C. We / Cement	M.C. We / Paste
Fresh	0.0	0.0	0.0	53.	53.
2 week	0.50	56.4	28.46	35.1	31.4
4 week	0.75	84.6	35.56	27.6	23.4
7 week	0.85	95.9	37.76	24.8	20.6
1 year	1.00	112.8	40.66	20.5	16.6

에 적절한 상수를 찾아내어 유도한 것으로 가정된 상수들은 표3에 요약되어 있다.

여기서  $We$  는 증발 가능 함수량이다. 각 측정 시기의 수화율은 강도 발현 비율을 참고로 가정하였으며, 시멘트의 공극율 감소 정도도 수화율에 비례한다고 가정하였다. 이러한 가정은 함수량과 수분손실 측정으로 검증하였으며, Gardner의 식에 사용된 계수들은 그림 13에 요약되어 있다. 제 1 건조기의 등온 탈수선은 원점에서 시작하여 2주 후의 등온 탈수선까지 변해가고, 습윤 실험시에는 4주후의 등온 흡수선에 도달하며, 제 2 건조기 동안에는 그 시기에 맞는 등온 탈수선으로 변해간다.

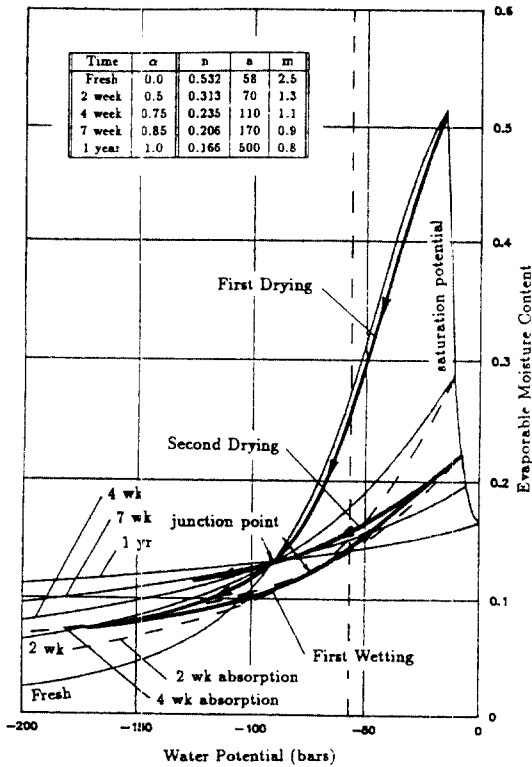


Fig. 13 Hysteresis of sorption isotherm of young concrete

Table 4 Comparison between diffusivity and conductivity

	time	$D(\text{cm}^2/\text{min})$	$k(\text{cm}/\text{min})$	$k(\text{m}/\text{s})$	value from measurements
First Dry	2	$0.53 \times 10^{-2}$	$0.32 \times 10^{-7}$	$5.3 \times 10^{-12}$	$\partial\phi/\partial\theta = 0.61 \times 10^{-6}$
Wetting	19		$0.23 \times 10^{-7}$	$3.8 \times 10^{-12}$	$\partial\phi/\partial\theta = 0.24 \times 10^{-6}$ , $v = 0.7 \times 10^{-3}$
Second Dry	30	$0.58 \times 10^{-2}$	$0.16 \times 10^{-8}$	$1.74 \times 10^{-13}$	$\partial\phi/\partial\theta = 0.18 \times 10^{-6}$
Powers	14		$0.60 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-11}$	

적절한 시간에 대하여 그림 13 에서 측정된  $\partial\phi/\partial\theta$ 을 그림 6, 7, 8 에서 측정된 확산계수들과 곱해주면 투수계수를 계산할 수 있으며 이들을 서로 비교함으로써 등온 습윤선의 정확성을 판별할 수 있다. 이를 판별하기 위하여 몇개의 시점에서의 값들을 정리한것이 표 4이다.

이들의 값은 산술적으로 보면 10배의 차이를 보이는 값이지만 전체적인 투수계수의 범위를 생각하면 근사한 값이라 할 수 있고, Powers가 제시한 값<sup>(15)</sup>과도 같은 차원의 값을 갖음으로 해서 확산계수와 투수계수와의 관계가 적절하며, 본 논문에서 제안된 등온 흡수선도 적정한 값을 제공함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 양생 초기 콘크리트의 투수계수를 직접적으로 측정하는 방법을 제안하여 이를 이용한 투수계수의 측정이 시행되었다.
- 2) 싸이크로미터라는 센서를 이용하여 수리에너지의 분포를 구하고 이를 토대로 하여 확산계수와 투수계수를 측정할 수 있음을 보여주었다.
- 3) 실험중에 콘크리트내로의 수분의 입출입을 시각적으로 보여줌과 동시에 침투속도와 투수계수를 계산할 수 있음을 보여주었다.
- 4) 아직은 충분한 측정자료가 축적되어 있지 못하기 때문에 이들 실험의 정밀도를 논하기가 어렵지만 블리딩에 의한 수분의 표층 집중을 구분할 수 있는 정도의 분별력을 갖고 있음을 보여주었기 때문에 콘크리트의 투수성과 관련된 정밀 실험에 응용될 수 있는 가능성을 보여주었다.



- 5) 본 논문에서는 확산계수와 투수계수 사이의 관계를 보다 명확히 밝혀내고 이를 이용하여 콘크리트의 건조이력에 따른 등온 흡수선을 제시하였다.
- 6) 계측된 투수계수와 확산계수를 기존의 측정값과 비교 분석함으로써 양생 초기 콘크리트의 투수계수 측정에 효율적으로 이용될 수 있음을 보여주었다.

## 6. 참고 문헌

1. Vos, B.H., "Moisture Migration in Concrete," in First Internal Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Paper H2/5 Berlin, Germany, 1971
2. Kirkham, D. and Powers, W.L., "Advanced Soil Physics", Wiley-Interscience, 1972
3. Powers, T.C., Copeland, L.E., and Mann, M., "Capillary Continuity or Discontinuity in Cement Pastes," Journal of Portland Cement Association, vol.1, No.2, 1958
4. Nilsson, L.O., "Hygroscopic Moisture in Concrete - Drying Measurements and Related Material Properties," Research Report, The Institute of Technology of Lund, Division of Building Material Report, TVBM-1003, 1980
5. Siang, H.H., "Simultaneous Heat and Mass Transfer in a porous Medium," in Ph. D Dissertation, The Kansas State University, Manhattan, Kansas, 1981
6. Mikhailov, M.D. and Shishedjiec, B.K., "Temperature and Moisture Distributions During Constant Drying of Moist Porous Sheet" Int'l J. of Heat and Mass Transfer : 18, 1975
7. Marusin, S.L., "Chloride Ion Penetration in Conventional Concrete and Concrete Containing Condensed Silica Fume," ACI Publication SP-91, Vol. 2, 1986, pp1119-1133
8. Perraton, D. et al, "Permeability of Silica Fume Concrete," Permeability of Concrete, ACI Publication, SP-108, 1988, pp63-84
9. Whiting, D., "In situ Measurements of the Permeability of Concrete to Chloride Ions", ACI Publication SP-82, 1982, pp501-524
10. Bisailon, A, Malhotra, V.M., "Permeability of Concrete Using Uniaxial Water-Flow Method", ACI Publication SP-108, 1988, pp175-193
11. Janssen, D.J., "Laboratory Permeability Measurement", ACI Publication SP-108, 1988, pp145-158
12. Brown, R.W., Measurement of Water Potential with Thermocouple Psychrometers : Construction and Applications. USDA Forest Service Research Paper : INT-80, 1970
13. Lytton, R.L. and Brown, K.W., "Unsaturated Permeability of Concrete," Incomplete Paper : Texas A&M University, 1971
14. 한 만엽, "콘크리트 건조수축의 이론적 예측에 관한 연구", 콘크리트 학회지, 제5권 1호, 1993, pp157-164
15. Powers, T.C., et al, "Permeability of Portland cement Paste," ACI journal, Vol. 51, 1955, pp285-298

(접수일자 : 1993. 5. 25)