

양생 초기 투수 계수 측정에 관한 연구

(A Study on Permeability Measuring Technique for Young Concrete)

한 만 업
Han, Man Yop

Abstract

Moisture movement which is controlled by water potential and permeability of concrete is a very important phenomenon which affects the shrinkage of concrete. Thermocouple psychrometer were used to measure the moisture potentials in concrete. Based on the measured moisture 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.

1. 서론

본 연구에서는 콘크리트가 아직 화학 변화를 많이 일으키는 양생 초기의 투수계수 측정에 관한 연구로서 투수계수와 확산계수의 측정에 관한 새로운 방법을 제시 하였다. 양생 초기 콘크리트의 건조현상은 콘크리트내의 수분의 이동과 직접적인 연관이 있는데, 이 수분 이동은 transient unsaturated flow 인데다, 수화 반응으로 인하여 콘크리트의 공극구조가 계속적으로 변하고 수분의 일부는 화학 반응으로 시멘트와 결합되기 때문에, 지금까지는 그 측정이 불가능 하였다. 아울러 이는 투수 계수가 함수량과 시간의 함수임을 의미하기도 한다.

본 연구에서는 콘크리트내의 수리포텐셜 분포를 2주간의 건조 기간과, 2주간의 습윤양생 기간, 그리고 다시 3주간의 건조 기간 동안 측정하여 각 기간 동안의 투수계수를 산정하고 Hysteresis를 나타내는 Sorption Isotherm을 제시하였으며, 이들 자료를 바탕으로한 투수계수 및 확산계수를 구하는 방법을 제시하였다.

2. 콘크리트의 투수성

다공성 물질, 특히 콘크리트를 통한 수분의 이동에 관한 연구는 상당히 많은 진척을 보여왔다. 초기의 연구는 기체상태의 확산이론에 근거를 두었으나, 차츰 모세관이론이나 기화와응축 이론등으로 발전해 왔다. 또한 수분이동은 항상 열에너지와 동반 이동을 함으로써 다공성 매질을 통한 물질과 열량의 이동을 동시에 고려하는 이론이 또한 수분이동 해석에 적용 시도되었다.

그러나 이런 이론들을 적용하는데 있어서 가장 큰 문제점 중의 하나는 이들을 적용하는데 필요한 실측된 확산계수가 콘크리트의 경우는 거의 전무하다는데 있다. 지금까지의 투수계수 측정은 염소이온등의 확산계수를 측정하는 간접적인 방법들이 많이 이용되어 왔다.

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

3. 투수계수 측정

콘크리트에서 건조 수축의 직접적인 원인이 되는 수분의 이동은 수화 작용에 의하여 공극구조가 변하는 물체 내에서 일어나는 전이 불포화 확산 현상(transient unsaturated diffusion process)이다. 1차원 전이 불포화 확산현상의 경우, Philip이 함수량과 확산 계수 사이의 관계를 가정하고, Boltzmann transform을 사용하여 문제 해결의 방향을 제시하였다. 본 논문에서는 수리에너지의 분포를 나타내는 모델을 제안하여 확산계수의 산정을 시도하였다. 아울러 Sorption Isotherm에 관한 Gardner의 식을 이용하여 확산계수와 투수계수간의 관계도 밝혀내었다.

정희원, 공학박사, 아주대학교 조교수

3.1. Psychrometer 를 이용한 측정

Psychrometer는 물의 수리에너지, 즉 Gibb's Free Energy 를 측정하는 센서이다. 이 수리에너지의 변화는 물의 흐름과 콘크리트의 투수성이 어떻게 변화하는가에 직접적으로 연관되어 있다. Lytton, R.L. 과 Brown, R.W.은 이 센서를 이용하여 처음으로 콘크리트내의 수리에너지의 분포를 측정할 수 있음을 보여 주었다.

본 실험에서는 콘크리트가 건조실에서 어느정도 안정된 상태에 도달했을때 습윤실에서 시료를 양생함으로써 콘크리트내로 물이 침투해 들어가는 과정을 시각적으로 보여주었고 또한 그 속도를 측정할 수 있었고, 또 그 측정자료로부터 습윤 침투계수를 측정 할 수 있었다. 콘크리트가 습윤실에서 안정된 상태에 도달한뒤 다시 건조시킴으로써 해서 두번째 건조 투수성을 측정할 수 있고, 이 자료들로 부터 건조와 습윤의 반복에 의한 hysteresis의 특성도 확인해 볼수가 있었다.

3-2. 물의 확산 이론

다공성 물질에서 수분의 1차원 확산 현상은 연속 방정식과 Darcy's Law에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

- J : Flux of Water
- ϕ : Water Potential
- θ : Volumetric Water Content
- K(θ): Hydraulic Conductivity
- t : Time
- z : Distant

여기서 적절한 식의 변환과 새로운 변수 m을 도입하여 Boltzmann Transformation을 하면, 아래와 같은 좀더 유용한 형태의 식으로 변형시킬 수 있다.

$$\frac{m}{2} \frac{\partial \phi}{\partial m} + D \frac{\partial^2 \phi}{\partial m^2} = 0 \quad \text{-- (2)}$$

여기서 m은 $m = z/t^{0.5}$ 이며, z는 슬래브 바닥으로부터 Psychrometer 까지의 거리이며, t는 시간이다.

3.3. 투수계수의 산정

슬래브 바닥에서 z 만큼 떨어진 지점에 설치한 Psychrometer의 각 측정 데이터들로 부터 콘크리트 투수 계수 측정에 (2) 식을 이용하기 위한 다음과 같은 모델을 제안하였다.

$$\phi = e^{(ax + b)} \quad \text{--- (3)}$$

- n: Constant of Reciprocal Function
- b: Constant

상수 'a'와 'b'은 몇 개의 다른 시간 대에서 측정된 Psychrometer의 자료를 log 변환하여 선형 회귀 분석을 하면 결정할 수 있다. 분기 전 콘크리트의 확산 계수는 시간에 따라 계속적으로 변해감으로, 일정한 시간의 단면에 따른 수리 에너지의 분포식을 고려 함으로써 계산해 낼 수 있다.

m 의 제곱인 새로운 변수 x를 이용하면 이 모델로부터 아래와 같은 확산 계수 D를 구할 수 있다.

$$D = \frac{-x}{2(2ax + 1)} = \frac{-1}{2(2a + t/z^2)} \quad \text{--- (4)}$$

이 식에서 확산계수는 분포 함수의 상수 'a'에 반비례하고 시간 't'에도 역시 반비례 함을 알 수 있다. 여기서 구한 확산계수 D로 부터 투수계수 K값을 구하기 위해서 다음과 같은 Gardner의 식을 도입하면

$$D = \frac{n}{1 + (\phi/c)^k} \quad \text{--- (5)}$$

아래의 관계식을 구할수 있다.

$$K = D \frac{kn}{c} \frac{(\phi/c)^{k-1}}{(1+(\phi/c)^k)^2} \quad \text{--- (6)}$$

이 식의 앞 부분의 계수는 투수 계수의 크기를 결정하고 나중 부분은 확산 계수와 투수 계수 관계의 형태를 결정 짓는다.

3-4. Instant Profile 법

이 방법은 위에서 이용한 모델식을 이용하기 어려울때 이용할수 있는 방법으로 식 (1)에서 시작하여 확산 계수를 계산하는 식을 유도 할 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad \text{--- (1)}$$

여기서 D 가 z 방향으로 상수가 아니므로 이 식을 재배치한 뒤 양변을 적분하면 아래와 같은 식을 유도할수 있다.

$$D = \frac{\int_{z_2}^{z_1} (\partial \phi / \partial t) dz}{\partial \phi / \partial z} \quad \text{--- (7)}$$

D를 결정하기 위한 최소 4개의 측정점이 아래와 같다면

$$\begin{array}{ccc} \text{거리} \rightarrow & & \\ z_1 & & z_2 \\ \text{시간 } t_1 \text{ } \odot \phi_{11} & \odot \phi_{21} & \\ \downarrow & \odot D \text{ at mid point} & \\ t_2 \text{ } \odot \phi_{12} & \odot \phi_{22} & \end{array}$$

아래와 같은 수치적분식을 얻을수 있다.

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

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

3-5. 직접 측정법

이 방법은 습윤 시험중 Wetting front의 이동 속도를 측정하여 이로 부터 직접적으로 투수계수를 측정하는 방법으로 다음과 같은 Darcy의 식으로 부터 구할 수 있다.

$$v = k \cdot \partial h / \partial x \quad \text{--- (9)}$$

본 실험에서 사용된 Psychrometer는 Wetting front의 이동 속도 (v)를 직접적으로 측정할수 있으므로, $\partial h / \partial x$ 를 계산하면 투수계수 (k)를 바로 계산할 수 있다.

4. 실험 개요

Psychrometer는 수리에너지를 약 -60bar 까지 측정할수 있는 열전쌍 센서이다. 실험에 앞서 NaCl 용액에서 센서의 보정을 실시한다.

그림 1에 나타나 있는것 같은 33x33x15cm 크기의 슬라브를 제작하여 4개의 측정 센서를 서로의 간섭현상을 피하기 위하여 표면에서 1.3cm (1/2inch), 2.5cm (1 inch), 5cm (2inch), 10cm

(4inch) 깊이로 분산 설치하였다.

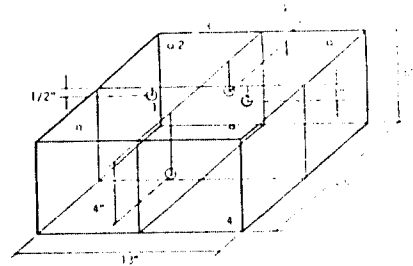


그림 1. 콘크리트 슬라브내에서의 센서의 배치

측정은 25C에 상대습도 50%의 항온항습실에서 실시되었다. 시편 제작후 탈형전에는 밀폐상태에 보관되었다가 건조실험시에는 1차원 흐름을 만들기 위하여 상부 표면을 제외한 모든 면을 2층의 비닐로 밀폐하였다. 실험은 2주간의 건조기와 2주간의 습윤기를 거쳐, 다시 3주간의 건조기동안 진행되었다.

콘크리트의 배합 설계와 배합 직후의 측정 결과는 아래의 표1 과 같다.

표 1. 배합 설계표 및 측정치

무게	시멘트	물	조골재	세골재	합계
kg/m ³	282	150	1404	754	2590

* AE제 : 4 oz/sk
 슬럼프 : 8 cm
 단위 중량 : 2.56 t/m³
 공기량 : 2.5 %

5. 결과 및 분석

전체적인 측정 결과가 그림 2에 나와 있다. 여기서는 시간에 따른 각각의 깊이에서의 수리에너지의 변화를 보여준다. 건조기와 습윤기의 경계들이 명확히 구분되어 있다.

처음 건조기간 동안의 자세한 변화가 그림 3에 나타나 있다. 표면에서 가까운 순서대로 수리에너지가 빠르게 증가함을 알 수 있고, 깊은 곳일수록 습한 상태로 오랜 기간 동안 남아 있음을 알 수 있다. 본 실험에서 사용한 센서는 -60bar 이상의 건조한 상태에서는 측정을 할 수 없으므로 표층에서 센서의 측정값이 갑자기 떨어지는 것은 측정 범위를 넘어갔음을 의미한다.

그림 4는 건조후 습윤 양생 기간 동안의 변화를 보여주는 것으로서 깊이 5cm 까지의 표층은 1일 이내에 수분이 침투해 들어감을 보여주고 깊이 10cm에 도달하는 데는 약 3일 정도의 시간이 걸림을 알 수 있다. 그림 5는 2번째 건조기간 동안의 변화로서 첫번째 건조 기간 동안의 변화에 비하여 상당히 수리 에너지의 증가가 완만함을 알 수 있다. 실제로는 수리 에너지는 흡수값이므로 증가가 아닌 감소이다.

이들의 측정값들로부터 좀더 유익한 정보를 얻기 위하여 깊이에 따른 수리 에너지의 분포를 살펴 보았다. 그림 6, 7, 8이 각각 제 1 건조기와 습윤기 그리고 제 2 건조기의 깊이에 따른 분포를 보여주는 것이다. 그림 6에서 콘크리트 배합된 2시간후의 분포를 보면 표층의 수리 에너지가 약간 높음을 알 수 있는데 이는 타설직후의 블리딩현상 때문에 표면에 모인 수분으로 인하여 발생한 수리 에너지의 차이를 감지해낸 것으로서 본 실험의 정확도를 간접적으로 암시해 준다.

그림 7은 습윤기 동안의 분포로서 6시간 후에는 이미 두번째 센서까지는 수분의 공급이 이루어져 있고 깊이 5cm에서는 6시간에서 24시간 사이에 수분의 침투가 이루어짐을 보여 준다.

그림 8은 제 2 건조기 동안의 변화를 보여주는 것으로서 그림 6의 경우와는 대조적으로 10일동안 깊이 2.5cm 내에서만 수분의 손실이 일어남을 보여준다. 그 이상의 깊이에서는 수분의 손실이 없음을 보여준다.

이들의 분포로부터 앞에서 제안한 모델식을 이용하여 확산계수를 구한것이 그림 9, 10, 11에 나와 있다.

측정된 확산계수들은 10^{-2} cm²/min 에서 10^{-4} cm²/min 정도의 분포를 갖고 있음을 알 수 있다. 아울러 습윤 침투시에는 처음 하루동안의 침투가 매우 빠르기 때문에 대단히 높은 초기 확산계수를 보여준다.

그림 12는 Wetting Front의 이동 속도를 접선 속도와 할선속도의 두가지 침투 속도로 계산하여 표시하였다. 이 그림에서는 이 두가지의 속도를 시간의 함수로 나타낸것으로서 이들 두값들 사이에 그리 큰 차이가 없으며 서로 평행한 관계에 있음을 보여준다. 따라서 상대적인 비교를 목적으로 하는 연구에서는 어느쪽을 택하거나 차이가 없다. 여기서 접선속도가 더 작은 것은 측정 순간의 수분의 실제 이동속도가 평균 속도보다 작다는 것을 의미한다. 또한 전체적인 이동량을 계산하고 싶을때는 할선속도를 이용해야 할것이다.

그림 12에 나와 있는 이동 속도를 이용하여 이로부터 Darcy식을 이용하여 투수계수를 역산

할 수 있다. 이 방법에 의하면 확산계수가 약 0.8×10^{-2} cm²/min 이고 수리 에너지의 기울기가 약 0.3×10^{-4} 이므로 이들로부터 투수계수를 구하면 0.27×10^{-7} cm/min (4×10^{-12} m/s) 이다.

그림 13는 Gardener의 식과 측정된 함수량으로 부터 몇단계의 과정을 거쳐 계산된 Sorption Isotherm의 건조, 습윤의 반복에 따른 이력을 보여준다. 이 그래프의 작성에 이용된 수치들이 그래프내의 표에 요약되어 있다. 이 그림에서 $\partial \phi / \partial \theta$ 을 측정하여 앞의 그림들에서 계산된 확산계수들을 곱해주면 투수계수를 계산할 수 있다. 예를 들어 콘크리트 배합후 3일후의 확산계수를 보면 0.7×10^{-2} cm²/min이고, Sorption Isotherm의 $\partial \phi / \partial \theta$ 은 0.6×10^6 cm²/min 이다. 이들로부터 투수계수를 계산해보면 0.12×10^{-7} cm/min (2×10^{-12} m/s) 이다.

이 두개의 값은 산술적으로 보면 2배의 차이를 보이는 값이지만 전체적인 투수계수의 범위를 생각하면 근사한 값이라 할수있고, Powers가 제시한 값 (0.6×10^{-7} cm/min) 과도 같은 차원의 값을 나타낸다.

6. 결론

본 연구에서는 양생 초기 콘크리트의 투수계수를 직접적으로 측정하는 방법을 제안하여 이를 이용한 투수계수의 측정이 시행되었다. Psychrometer라는 센서를 이용하여 수리 에너지의 분포를 구하고 이를 토대로 하여 확산계수와 투수계수를 측정할수 있음을 보여주었다. 이러한 실험과정 중에 콘크리트 내로의 수분의 입출입을 시각적으로 보여줌과 동시에 투수계수를 측정하여 기존의 측정값들과 비교 분석하였다. 아직은 충분한 측정자료가 축적되어 있지 못하기 때문에 이들 실험의 정밀도를 논하기가 어렵지만 블리딩에 의한 수분의 표층 집중을 구분할수 있는 정도의 분별력을 갖고 있음을 보여주었기 때문에 콘크리트의 투수성과 관련된 정밀 실험에 응용될수 있는 가능성을 보여주었다. 아울러 본 논문에서는 확산계수와 투수계수 사이의 관계를 보다 명확히 밝혀내고 이를 이용하여 콘크리트의 견습이력에 따른 Sorption Isotherm을 제시하였다.

7. 참고 문헌

1. Kirkham & Powers, "Advanced Soil Physics", Wiley-Interscience, 1972
2. S. Mindness and J.F. Young, "Concrete", Prantice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1981

3. Luikov, A.V., "Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies" Oxford: Pergamon Press, 1966

4. Mikhailov, M.D. and Shishedjiec, B.K., "Temperature and Moisture Distributions During Constant Drying of Moist Porous Sheet" International Journal of Heat and Mass Transfer: 18, 1975

5. Vos, B.H., "Moisture Migration in Concrete," in First Internal Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Paper H2/5 Berlin, Germany, 1971

6. Siang, H.H., "Simultaneous Heat and Mass Transfer in a porous Medium," in Ph.D Dissertation, The Kansas State University, Manhattan, Kansas, 1981

7. Luikov, A.V., "Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Body," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 18, No.1, 1975

8. Powers, T.C., Copeland, L.E., and Mann, H.M., "Capillary Continuity or Discontinuity in Cement Pastes," Journal of Portland Cement Association, vol.1, No.2, 1958

9. 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

10. Lytton, R.L. and Brown, K.W., "Unsaturated Permeability of Concrete," Incomplete Paper: Texas A&M University, 1971

11. Brown, R.W., Measurement of Water Potential with Thermocouple Psychrometers: Construction and Applications, USDA Forest Service Research Paper: INT-80, 1970

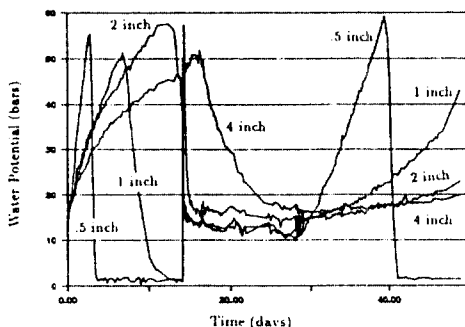


그림 2. 실험기간 동안의 수리에너지의 측정값

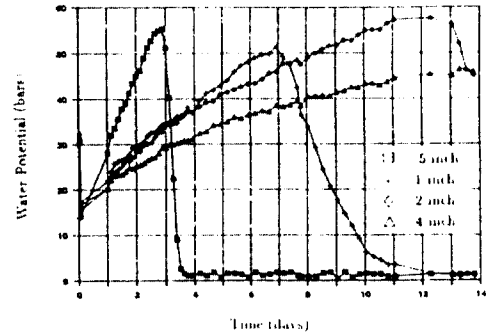


그림 3. 제 1 건조기 동안의 수리에너지 변화

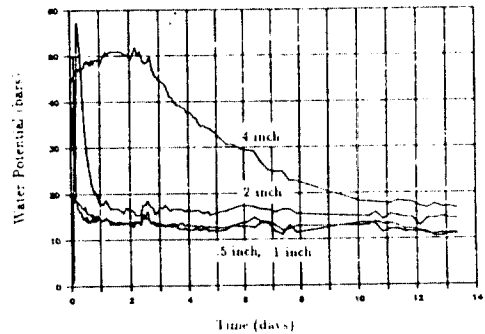


그림 4. 흡윤기간 동안의 수리에너지의 변화

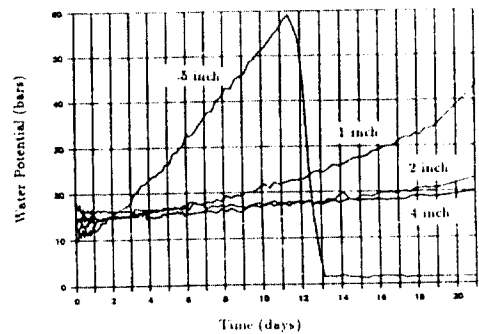


그림 5. 제2건조기 동안의 수리에너지의 변화

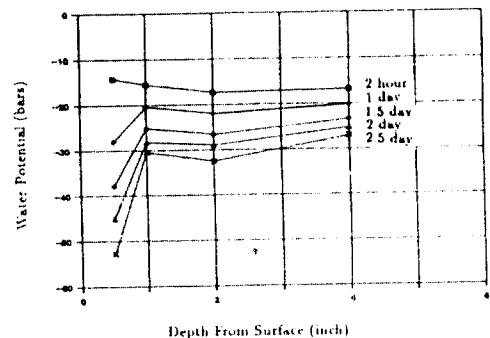


그림 6. 제1건조기 동안의 수리에너지의 분포

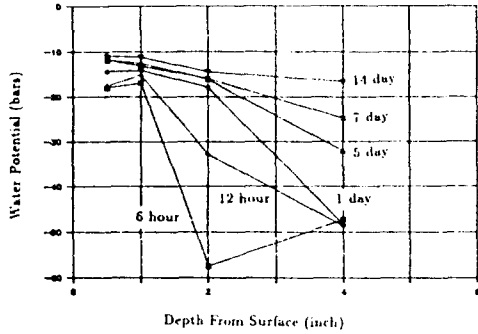


그림 7. 습윤기간 동안의 수리에너지의 분포

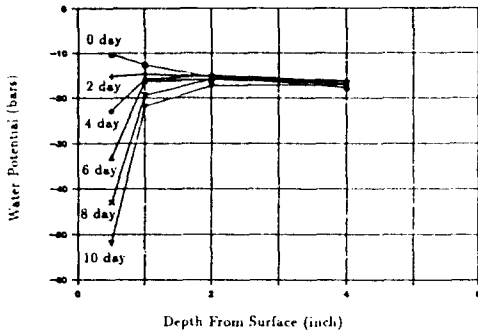


그림 8. 제2건조기 동안의 수리에너지의 분포

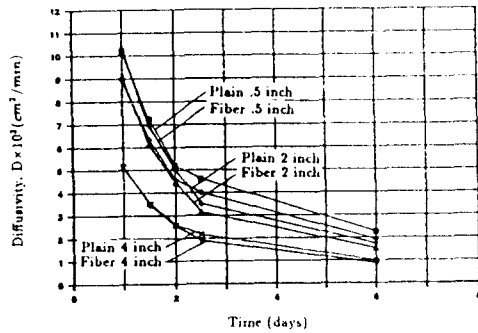


그림 9. 제 1 건조기 동안의 확산계수

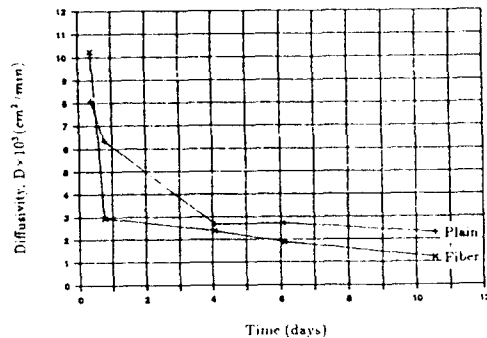


그림 10. 습윤기간 동안의 확산계수

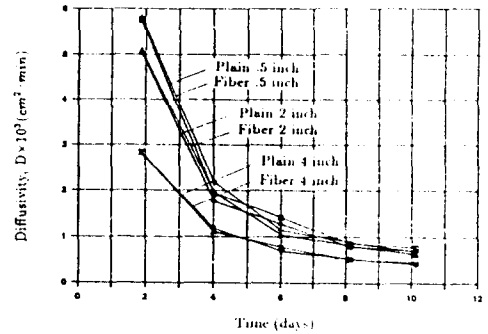


그림 11. 제 2 건조기 동안의 확산계수

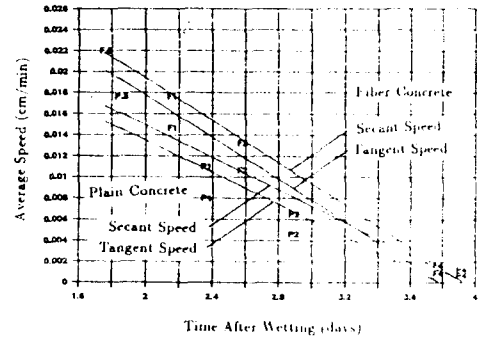


그림 12. Wetting Front의 침투 속도.

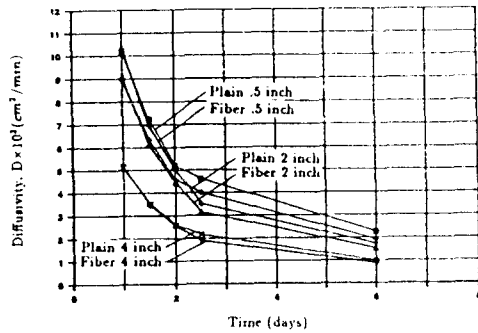


그림 13. Sorption Isotherm의 이력곡선