

# 수압을 받는 콘크리트의 투수성에 관한 연구

## Study on the Permeability of Concrete under Water Pressure

유조형\* 이한승\*\*

You, Jo Hyeong Lee, Han Seung

### ABSTRACT

The watertightness of concrete is judged by the depth of penetration of water forced in under pressure with the mechanism of flow of seepage water examined theoretically and experimentally. As a result, it is found that in the case of low water pressure approximately 0.15Mpa or less, the flow is Darcy seepage flow, the same as flow in an ordinary sand stratum, whereas in the case of high water pressure, the flow is diffused seepage flow accompanied by internal deformation of concrete. It is suggested that the watertightness of concrete be evaluated by seepage coefficient in the case of the former and diffusion coefficient in the case of the latter.

### 1. 서론

콘크리트는 다공성 재료로써 수분이나 유해한 공기가 자유롭게 출입하여 콘크리트 자체가 열화되어 내구성이 저하하는 측면도 있으나, 다공성 재료이므로 표면에서 방청제 등의 보수재료를 콘크리트 내부로 침투시키는 경우에는 압력을 가하여 철근위치까지 방청제를 침투시키는 것도 가능하다고 판단된다. 따라서, 방청제에 압력을 가하여 콘크리트내부로 침투시키는 경우에는 그 침투 특성을 명확히 규명하는 것이 필요하다. 일반적으로 콘크리트내로의 수분침투는 저압에서 다르시법칙으로 시간에 따른 침투깊이를 산정할 수 있으나, 고압이 작용하는 경우에는 다르시법칙이 잘 맞지 않고 침투확산류 해석 등이 필요하게 된다<sup>1)</sup>. 본 연구에서는 이러한 배경하에 고압을 받는 내압법에 의한 콘크리트의 투수 실험 및 기존 논문 조사를 통하여 콘크리트 투수계수를 파악한 후, 이를 침투확산류 해석에 적용함으로써 수압을 가한 경우의 콘크리트 내부로의 수분 침투를 해석적으로 검토하였다.

### 2. 콘크리트내 수분 침투에 관한 이론적 고찰

#### 2.1. 다르시 침투류

콘크리트 표면에 수압 P가 작용 하여 t시간 후에 거리x까지 물이 침투한다. 속도 u는 장소적으로 일정하기 때문에 동수구배(動水句配)는 선형이 된다. 그러므로 저압의 경우(일반적으로 0.15Mpa 이하)에는 식 (1)과 같이 다르시의 속도방정식을 이용한다.

$$K = \frac{w_0}{2Pt} d_m^2 \dots \dots \dots (1)$$

- 여기서,  $K$ : 침투계수 (mm/s),
- $P$ : 수압 (MPa)
- $t$ : 수압을 가해준 시간 (s)
- $w_0$ : 물의 단위용적중량 ( $9.8 \times 10^{-6} \text{N/mm}^3$ )
- $d_m$ : 평균 침투깊이 (mm)

\* 정희원. 한양대학교 대학원 건축공학과, 석사과정  
 \*\* 정희원. 한양대학교 공학대학 건축학부 조교수, 공학박사

2.2. 침투 확산류

고압으로 콘크리트에 물을 압입한 경우는, 콘크리트 내부변형이 무시할 수 없기 때문에 고압침투 모델을 적용해야 한다. 즉, 침투과정에서 물과 콘크리트 자체가 탄성변형을 일으킨다라는 조건을 다르시 법칙에 추가하는 것에 의하여 이런 흐름의 기초방정식을 구할 수 있다. 그림 1에 나타낸 것처럼, 단면 A를 가지는 콘크리트의 측면을 수밀하게 유지하고 한쪽 단면으로부터 상당한 압력 P로 물을 압입 하면, 수압을 가해준 면에서 거리 x에서 미소거리 dx로 떨어진 단면 I 및 II를 생각하면,

단면 I에서 dt 시간동안 유입된 수량,

$$Q_I = u(x) A dt$$

단면 II에서 dt 시간동안 유출된 수량,

$$Q_{II} = u(x+dx)A dt,$$

I, II 단면간에 잔류하는 수량,

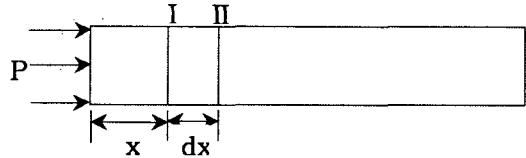


그림 1. 일차원류 해석 모델

$$\Delta Q = Q_I - Q_{II} = -\frac{\delta u}{\delta x} dx A dt \dots \dots \dots (2)$$

$\Delta Q$ 에 의해, I, II 단면적의 압력증분 dp는

$$dp = \frac{\delta p}{\delta t} dt = \frac{AQ}{A dx} E = -\frac{\delta u}{\delta x} E dx \dots \dots \dots (3)$$

여기서, E : 물과 콘크리트 자체를 공통으로 생각한 경우의 체적탄성계수

다르시의 법칙에서  $\frac{\delta u}{\delta x} = -\frac{k}{w_0} \frac{\delta^2 p}{\delta x^2} \dots \dots \dots (4)$

고수압에 의한 변형의 조건 식 (3)에 의해

$$\frac{\delta u}{\delta x} = -\frac{1}{E} \frac{\delta p}{\delta t} \dots \dots \dots (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입시키면,

$$\frac{\delta p}{\delta t} = \frac{kE}{w_0} \frac{\delta^2 p}{\delta x^2} = \beta^2 \frac{\delta^2 p}{\delta x^2} \dots \dots \dots (6)$$

식(6)은, 일차원의 고압 침투류의 압력에 관한 기초방정식이고, 열전도나 농도확산의 경우와 같은 형태의 미분방정식이기 때문에.  $\beta^2$ 을 콘크리트중의 침투류확산계수라고 정의한다. 식(6)을 초기조건  $p(x, 0) = 0$ , 경계조건  $p(0, t) = P$ ,  $p(l, t) = 0$  (여기서, l: 물의 침투부 길이) 하에서 계산하면,

$$p(x, t) = P \left(1 - \frac{x}{l}\right) - P \sum_{i=1}^n \frac{4}{\pi^2} \left(\sin \frac{\pi i x}{l}\right) e^{-\frac{\pi^2 i^2 \beta^2 t}{2}} \dots \dots \dots (7)$$

식(7)을 이용하여 확산계수  $\beta^2$ 를 구하기 위해서는, 물의 침투부 길이 l을 n개의 소구간으로 분할하여 각 분할점에 있어서 수압의 측정치가 필요하게 된다. 그러나, 짧은 공시체에 있어서는 실제로 불가능하기 때문에 다음의 방법이 생각되어 지고 있다. 즉, 초기 조건  $p(x, 0) = 0$ , 경계조건  $p(0, t) = P$ ,  $p(\infty, t) = 0$  이라면, 식(6)의 해는 여오차함수로 된다. 이러한 것은, 다르시 침투류의 경우 장소적인 수압분포가 직선이 되지만, 침투 확산류의 경우는 여오차함수곡선에 따르는 것을 나타내고 있다.

$$p(x, t) = \text{Perfc}\left(\frac{x}{2\beta\sqrt{t}}\right) = \frac{2P}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{x}{2\beta\sqrt{t}}}^{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda \dots \dots \dots (8)$$

식(8)은 침투깊이 x 시간 t에서의 해가 되므로, 소정시간 t 후의 침투깊이 x의 시험값을 사용하여,

침투깊이  $x$ (침투선단부)에서의 압력  $p=P_f$ 을 정하는 것으로 확산계수를 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 확산계수를 구하면 식 (9)와 같이 정의 할 수 있다.

$$\beta_0^2 = \alpha \frac{D_m^2}{4t^2} \dots \dots \dots (9)$$

- 여기서,  $\beta_0$  : 초기 확산계수 (mm<sup>2</sup>/s)
- $D_m$  : 평균 침투깊이 (mm)
- $t$  : 수압을 가해준 시간 (s)
- $\alpha$  : 보정계수 ( $\alpha = t^{3/7}$ )
- $\xi$  : 수압에 관계된 계수 ( $P_f=0.15\text{MPa}$ )

3. 콘크리트의 투수실험 및 결과분석

본 실험에서는 그림 2와 같은 중공원통형 공시체(Φ15 X 30 cm, 중앙직경 2 cm)를 제작하여, 공시체 상하면에 고무 패킹을 대어 누수를 방지시킨 상태에서 중공에서 내부로 0.5 MPa의 수압을 가하였다. 공시체 외부로부터 침출되어 내려오는 물의 증발을 방지시키면서 유출량이 일정하게 될 때까지 수량을 측정하였으며, 그 때의 유출량을 사용해서 식 (10)에 의해 투수계수를 구하였다.

$$K = \frac{\rho \log(r_0/r_i)}{2\pi h} \cdot \frac{Q}{P_i - P_0} (P_0 = 0) \dots \dots \dots (10)$$

- 여기서,  $K$  : 투수계수 (cm/s)
- $P_0, P_i$  : 수압 (kg/cm<sup>2</sup>)
- $Q$  : 유출량 (ml/s)
- $h$  : 공시체의 높이(cm)
- $r_0$  : 공시체의 반경(cm)
- $r_i$  : 중심공의 반경(cm)
- $\rho$  : 물의 단위 중량(kg/cm<sup>3</sup>)

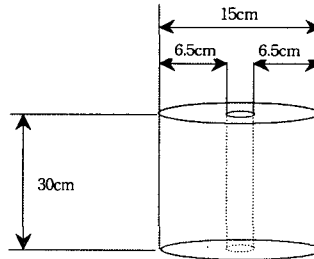


그림 2. Test Mold for Coefficient of Permeability of Concrete

표 1에 본 실험에 사용된 콘크리트의 배합 및 압축강도, 투수계수 실험결과를 나타낸다..

표 1. 콘크리트의 배합 및 실험결과

공시체 구분	배 합					실험결과				
	W/C (%)	목표 슬럼프 (cm)	잔골재율 (%)	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	중량(kg/m <sup>3</sup> )			슬럼프 (cm)	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	투수계수 ( $\times 10^{-12}$ cm/sec)
					시멘트	잔골재	굵은골재			
1	55	12	42.8	178	256	744	996	12.5	240	13.62
2								11	225	14.05
3								11.5	227	13.97

콘크리트의 물시멘트비는 55%로써 28일 압축 강도는 평균 230 kgf/cm<sup>2</sup> 이었으며, 내압법에 의한 콘크리트의 평균 투수계수는  $13.88 \times 10^{-12} \text{cm/s}$  으로 나타났다. 실험결과로부터 얻어진 투수계수를 이용하여 다르시 침투류에서는 침투 계수를 침투확산류에서는 확산 계수를 계산하여 압력과 시간에 따른 수분의 평균 침투 깊이를 계산하였다.

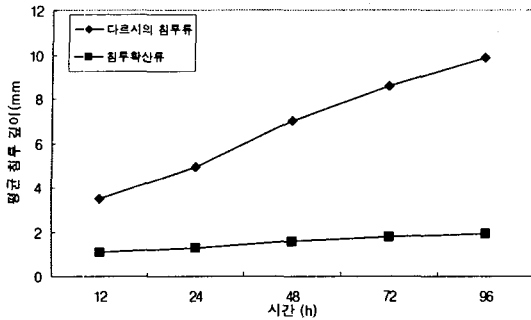


그림 3. 압력 0.15MPa 일 때의 다르시의 침투류와 침투확산류로 계산한 평균 침투 깊이

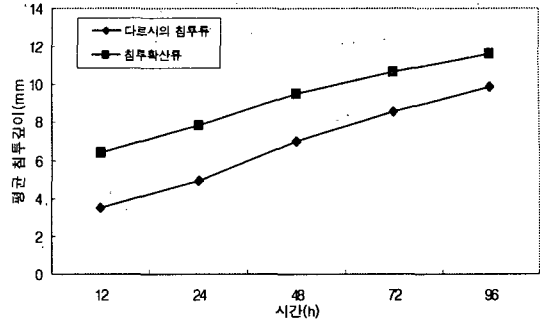


그림 4. 압력 0.5MPa 일 때의 다르시의 침투류와 침투확산류로 계산한 평균 침투 깊이

그림 3은 압력이 0.15MPa 일 때 시간에 따른 평균 침투 깊이를 다르시의 침투류와 침투 확산류로 계산한 결과이다. 수압이 작은 0.15MPa 일 때 다르시의 침투류는 증가함을 알 수 있으나, 침투확산류 계산에서는 침투깊이의 변화가 거의 없으며, 이것은 침투확산류의 압력에 관계된 계수가 저압인 경우에는 오히려 작은 값을 나타내기 때문이다. 그림 4는 그림 3과 같은 조건에서 압력만 고압인 0.5MPa로 올려 계산한 결과이다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 압력을 증가 시키면 그림3과 달리 침투확산류로 해석하는 것이 평균침투깊이가 더욱 큰 것을 알 수 있다. 따라서, 고압을 받는 경우에는 다르시의 침투류로 해석하는 것은 정밀하지 않고 침투확산류로 해석하는 것이 타당하다고 판단된다.

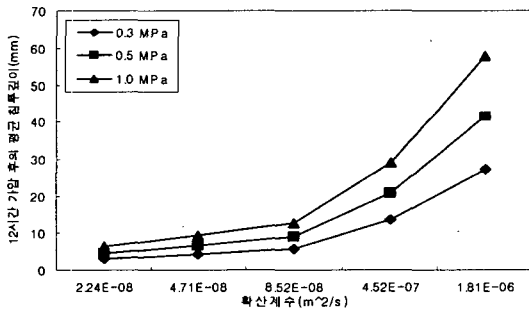


그림 5. 확산계수 변화에 따른 평균 침투깊이 변화

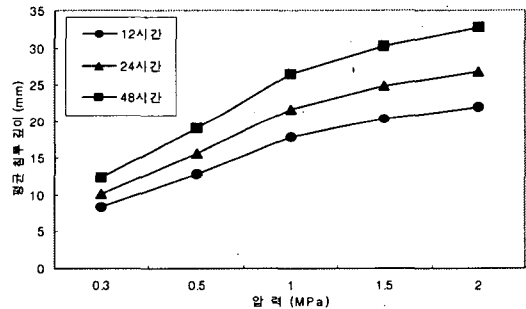


그림 6. 압력과 시간에 따른 평균 침투 깊이 변화

그림 5는 투수계수를 이용하여 얻은 콘크리트 확산계수에 따른 침투 깊이 변화이다. 수압이 커짐에 따라 침투깊이가 증가하였으며, 수압이 클수록 침투깊이도 비례적으로 증가하였다. 한편, 그림 6은 압력과 시간에 따른 침투깊이 변화를 나타낸 것으로 동일 압력하에서 시간이 증가함에 따라 침투깊이는 커지는 것을 알 수 있다. 따라서, 수압을 가한 경우의 콘크리트 내부 수분침투는 확산계수, 압력, 가압시간을 종합적으로 판단하여 정밀해석이 가능하다고 판단된다.

#### 4. 결론

콘크리트에 고압을 가하여 수분의 침투를 평가하기 위해서는 물체의 변형을 고려한 침투확산류가 더욱 정밀하다고 판단되며, 수압을 가한 경우의 콘크리트 내부 수분침투는 콘크리트 투수계수로부터 얻어진 확산계수와 압력크기, 가압시간을 종합적으로 판단함으로써 정밀해석이 가능하다고 판단된다.

#### 참고문헌

1. 村田二郎 著 “コンクリートの水密性とコンクリート構造物の水密性設計” p.5~p.33
2. 김영수 외 1인, “염화물 함유 콘크리트의 투수성에 관한 연구”, 대한 건축학회 학술발표 논문집 제15권 제2호 1995. 10