

# 탄산화 진행에 따른 시멘트 모르타르의 투수특성에 대한 연구

## Study on Permeability Characteristics of Cement Mortar under Carbonation

권성준\*      송하원\*\*      박찬규\*\*\*  
Kwon, Seung-Jun   Song, Ha-Won   Park, Chan-Kyu

---

### ABSTRACT

During the carbonation process in concrete, the rate of carbonation depends on porosity and moisture content of the concrete. For underground reinforced concrete structures, the interior concrete surface may be exposed to carbonation and the exterior concrete surface exposed to moisture due to wet soil or underground water. In this study, the permeability coefficients in mortar partially carbonated is derived as a function of carbonation depth and porosity of mortar by applying the so-called micro pore structure formation model (MPSFM) which was developed for the modeling of early-aged concrete. The permeability coefficient obtained from the micro-level modeling of carbonated mortar is verified with the results of accelerated carbonation test and water penetration test in cement mortar.

---

#### 1. 서론

콘크리트의 공극특성에 따라 좌우되는 투수성은 내구적인 특성을 판단하는 중요한 지표가 될 수 있으며, 중성화된 콘크리트의 경우, 열화인자의 유입과 수분의 이동에 대한 거동이 다르기 때문에 투수성도 변한다. 지하 구조물의 경우, 포화 또는 부분포화 상태의 외벽에서는 탄산화 진행을 무시할 수 있으나, 내측면에서는 이산화탄소의 농도가 일반 대기보다 높으므로 탄산화 속도가 빠르며 이 경우 콘크리트의 투수성은 탄산화에 따라 변동한다.

본 연구에서는 초기재령 콘크리트 모델링중 하나인 미세공극구조형성모델을 이용하여, 모르타르에서 탄산화 진행을 고려하여 시간에 따라 변화하는 투수계수를 모델링하였다. 즉, 탄산화의 진행에 따라 변화하는 투수층을 가진 모르타르 단면을 모델링하여, 탄산화에 노출된 콘크리트의 투수계수의 변화를 정량적으로 도출하려는 시도를 하였으며 실내축진실험을 통하여 시도된 모델링을 검증을 수행하였다. 제안된 모델은 탄산화 진행에 따른 투수계수의 변화를 잘 예측하고 있었으며, 굵은골재와의 천이영역 및 골재의 투수성 등이 고려되면 콘크리트의 투수성을 정량적으로 예측하는 합리적인 투수 모델링이 완성될 수 있을 것으로 사료된다.

---

\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사  
\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수  
\*\*\* 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 선임연구원

## 2. 공극구조 변화에 기초한 투수계수 모델링

### 2.1 공극경 분포에 따른 투수계수 모델링

공극을 가지고 있는 다공성 매체에서 수분이동을 평가하기 위해서는 전체공극량(total porosity)과 공극분포함수(pore size distribution)가 먼저 정의되어야 한다. 전체 공극량은 대표체적내를 통과할 수 있는 수분량을 결정할 수 있으며, 공극분포함수는 수분이 통과할 수 있는 유속을 결정하기 때문이다. 콘크리트와 같은 다공질 매체(porous media)에서 대표체적은 다양한 반경의  $i$ 개의 모세관이 연결되어 있는 정상상태의 흐름으로 가정하였으며, 대표체적을 통과하는 유량  $Q$ 는 식(1)과 같다.

$$Q = -\left(\frac{1}{8\eta} \int_0^\infty r_i^2 \Omega_i dr_i\right) \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

여기서,  $\Omega_i$ 는 다공질 매체에서 유속과 직각을 이루는 면에서의 평균 공극면적분포함수,  $r_i$ 은 공극경,  $\eta$ 는 유체의 점성,  $dP/dx$ 는 수압구배를 나타낸다. 식(1)을 고유투수계수의 형식으로 재정리 한 뒤, 체적공극률( $dV$ )를 적용하면 식(2)와 같이 도출할 수 있다.

$$k = C \frac{\phi_i^2}{8n^2} \left(\int_0^\infty r_{eq} dV\right)^2 \quad (2)$$

여기서,  $k$ 는 고유투수계수( $m^2$ ),  $r_{eq}$ 는 평균공극반경,  $dV$ 는 체적공극률,  $n$ 는 굴곡도 계수( $=(\pi/2)^2$ ),  $\phi_i$ 은 시멘트 페이스트의 전체공극률을 나타낸다. 식(2)의 적분항은 공극분포 밀도함수와의 관계를 통해서 이론적으로 도출할 수 있는데, Maekawa et al.,(1999)은 simplistic Rayleigh-Ritz 함수를 사용하여 식(3)과 같이 나타내었다.

$$V = 1 - \exp(-Br), \quad dV = Brexp(-Br)d\ln(r) \quad (3)$$

여기서,  $V$ 는 콘크리트의 체적공극률,  $B$ 는 공극구조형성모델을 통해서 도출된 매개변수,  $r$ 는 공극반경을 나타낸다. 식(3)을 식(2)에 대입하고 극한정리를 도입하여 정리하면 식(4)와 같은 고유투수계수식을 도출할 수 있으며, 이 식은 다시 식(5)와 같은 Darcy 법칙에 적용할 수 있는 투수계수식으로 변환할 수 있다.

$$k = C \frac{\phi_i^2}{8n^2} \frac{1}{B^2} \quad (4)$$

$$K = C \frac{\phi_i^2}{8n^2} \frac{1}{B^2} \cdot \rho \frac{g}{\eta} \quad (5)$$

여기서,  $\rho$ 는 물의 밀도( $999.3\text{kg/m}^3$ ),  $g$ 는 중력가속도( $\text{m/sec}^2$ ),  $\eta$ 는 물의 점성( $=1764 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )를 나타낸다.  $\phi_i$ 와  $B$ 는 기존의 다상수화발열모델 및 공극구조모델에서 도출된 전체공극률 및 매개변수이다 (Maekawa et al, 1999). 한편  $C$ 는 잔골재 사용에 따른 보정상수로서 0.2로 가정하였다.

### 2.2 탄산화에 따라 변화하는 투수계수 모델

두가지 이상의 다른 투수층을 가지고 있는 시편에 대한 투수계수는 그림 2와 같은 그림으로 설명할 수 있다. 연직방향에 국한된 투수문제이므로 연직방향에 대해 탄산화층과 비탄산화층의 두께가 각각  $H_1$ ,  $H_2$ 일때 유속은 동일하며 수두차이는 층마다 발생하게 되므로 전체 손실수두는 각 층에서의 손실수두합(즉,  $h = h_1 + h_2$ )과 같다(Das, 1998).

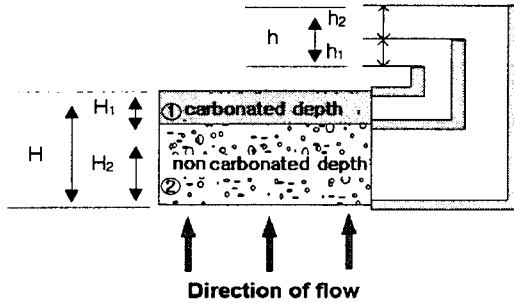


그림 2 상이한 투수층을 가진 시편에서의 투수특성

시편 전체에 대하여 평균화된 투수계수를  $K^{eq}$ 라고 정의하면, 식(6)과 같이 Darcy의 흐름에 따라 투수계수를 도출할 수 있으며, 탄산화 깊이에 따라 변화하는 투수계수는 식(7)과 같이 도출할 수 있다

$$K^{eq}\left(\frac{h}{H}\right) = K_1 i_1 + K_2 i_2 \quad (6)$$

$$K^{eq} = \frac{AH}{H_1 + (H - H_1) \cdot A} \cdot K_2 \quad (7)$$

여기서  $K_1$ 는 탄산화 영역의 투수계수(m/s)를,  $K_2$ 는 비탄산화 영역의 투수계수(m/s)를,  $i$ 는 해당층에서의 압력구배를,  $H$  및  $H_1$ 은 시편 전체의 길이 및 진행하는 탄산화 깊이를 나타낸다. 한편,  $A$ 는 투수계수비( $K_1/K_2$ )인데, 식(4)와 같이 공극률의 제공에 비례함을 알 수 있다. 기존의 실험결과에서는 탄산화 후의 공극률은 탄산화 전의 공극률의 대략 50%수준으로 평가되는 것으로 알려져 있으므로[Saeki et al, 1991b], 본 해석에서는 투수계수비( $A$ )는 0.25로 설정하였다.

### 3. 촉진 탄산화 실험 및 저압투수실험에 따른 투수특성

탄산화 거동전후의 투수특성의 변화를 분석하기 위해 기존에 사용되었던 저압투수실험(WPT : Water Penetration Test)를 수행하였다[Ludirja et al, 1989; 박상순 등, 2001]. 굵은골재를 사용한 경우보다 잔골재만을 사용한 경우 굵은골재와 시멘트풀 사이의 천이영역이 없어지고 균등한 투수계수값이 도출될 것으로 예상하여, 대상 시편을 시멘트 모르타르로 제조하였다. 동일하게 제조된 시멘트 모르타르를 재령 1일후 탈형하여 28일 수중양생기간을 거친 뒤 비탄산화된 조건의 투수계수실험을 수행하였다. 또한 동일하게 제작된 시편을 대상으로 촉진 탄산화 실험을 수행하여 탄산화된 조건의 투수계수를 실험하였고 존치기간(1달~4달)에 따른 탄산화 깊이 및 투수계수를 측정하였다. 탄산화 실험에 대해서는 28일 수중양생후 2주간 기중양생을 수행하였으며, 1차원 이산화탄소 유입을 위하여 양측면에 코팅을 수행하였다. 표 1에서는 시멘트 모르타르의 배합조건 및 촉진 탄산화 실험조건을 나타내고 있다. 실험방법 및 투수계수 도출과정은 기존의 문헌을 참고하는 것이 바람직하다. 한편 2장에서 도출된 투수계수의 실험적 도출 및 해석기법과의 비교는 그림 3에 나타내었다. 공극률의 제공에 비례하여 투수계수가 감소하게 되므로 탄산화 노출 1개월 이내에 급격하게 감소하지만 그 이후에는 급격한 투수계수의 변화가 크게 변화하지 않음을 알 수 있다. 그림 4에서는 탄산화 깊이 변화와 투수계수 해석결과를 같이 도시하였는데, 해석결과에서는 초기재령 거동 모델링을 고려한 탄산화 예측기법을 이용한 것이다(권성준 등, 2004).

표 1 시멘트 모르타르의 배합표 및 촉진탄산화 실험조건

W/C (%)	C (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	S/a (%)	온도 (°C)	습도 (%)	이산화탄소 농도 (%)	비고
55	485	267	-	1353	100	25	65	5	· 측정기간은 4주를 기본으로 함 · 측면의 코팅을 통한 1차원 유입
65	410	267	-	1445	100				

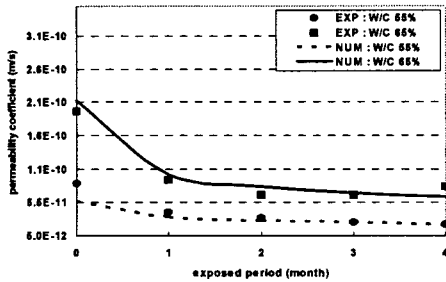


그림 3 탄산화에 따른 투수계수의 변화 (실험 및 해석)

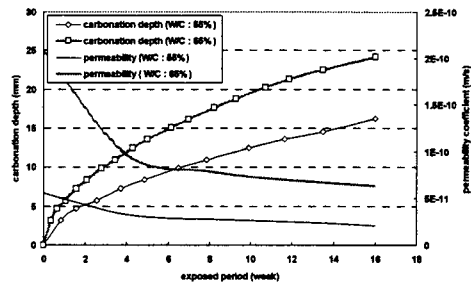


그림 4 탄산화 진행과 투수계수와의 관계 (해석값)

#### 4. 결론

본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 탄산화된 콘크리트의 투수특성을 규명하기 위해서 초기재령 콘크리트의 거동을 나타내는 수화발열 모델과 공극구조형성모델을 이용하여 시멘트 모르타르의 투수계수를 이론적으로 도출하였으며, 투수계수는 전체공극률에 선형적으로 비례하는 것이 아니라 제곱에 비례함을 알 수 있었다.
- 2) 탄산화 실험과 저압투수계수 실험을 수행하여, 탄산화 깊이에 따라 변화하는 모델링을 수행하였으며, 촉진 탄산화 실험과 저압투수계수 실험을 수행하여 검증하였다. 각 시편은 탄산화되기 전 투수계수가  $1.91 \times 10^{-10} \text{m/s}$  (W/C 65%인 경우),  $8.35 \times 10^{-11} \text{m/s}$  (W/C 55%인 경우)이었으나 시편이 탄산화됨에 따라 최종적으로는 25%수준으로 감소하는 것이 예측되었으며, 제안된 투수계수모델은 실험값을 잘 예측하고 있음을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2005년도 삼성물산 건설부문 기술연구소의 연구비 지원사업에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 권성준, 송하원, 변근주, 이승훈(2004), 균열을 가진 초기재령 콘크리트의 탄산화 해석, 토목학회논문집, 제 24권, 제 5-A호, pp. 1011~1022.
2. 박상준, 송하원, 변근주 (2001), 균열을 갖는 콘크리트의 염화물 확산 및 투수모델, 대한토목학회 논문집, 제 21권, 제 6-A호, pp.915~924.
3. Das, B.M.(1998), Principles of Geotechnical Engineering-Equivalent Hydraulic Conductivity in Stratified Soil, PWS Publishing Company
4. Ludirdja, D., Berger, R. L., and Young, F. (1990), Simple Method for Measuring Water Permeability of Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 5, pp. 433~439.
5. Maekawa, K., Chaube, R., and Kishi, T.(1999), Modeling of concrete performance: hydration, microstructure formation and mass transport, Routledge, London and New York
6. Saeki, T., Ohga, H., Nagataki, S. (1991), Change in Micro-Structure of Concrete due to Carbonation, Concrete library of JSCE, No.18, Dec., pp 1~11.