



## 탄산화 및 비탄산화된 콘크리트의 투수계수의 해석 기법 개발

윤인석<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>인덕대학 건설정보공학과

### Analytical Modeling for Microstructural Permeability Coefficient of (Non)Carbonated Concrete

In-Seok Yoon<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Construction Info. Engineering, Induk Institute of Technology, Seoul 139-749, Korea

**ABSTRACT** Permeability coefficient of concrete is a substantial key parameter for understanding the durability performance of concrete and its microstructural densification. Many researches for the issue have been accomplished, however, it is very rare to deal with the theoretical study on permeability coefficient in connection with carbonation of concrete and the effect of volumetric fraction of cement paste or aggregate on the permeability coefficient. The majority of these researches have not dealt with this issue combined with carbonation of concrete, although carbonation can significantly impact on the permeability coefficient of concrete. The purpose of this study is to establish a fundamental approach to compute the permeability coefficient of (non)carbonated concrete. When simulating a microstructural characteristics as a starting point for deriving a model for the permeability coefficient by the numerical simulation program for cementitious materials, HYMOSTRUC, a more realistic formulation can be achieved. For several compositions of cement pastes, the permeability coefficient was calculated with the analytical formulation, followed by a microstructure-based model. Emphasis was on the microstructural changes and its effective change of the permeability coefficient of carbonated concrete. For carbonated concrete, reduced porosity was calculated and this was used for calculating the permeability coefficient. The computational result was compared with experimental outcome.

**Keywords :** permeability coefficient, durability performance, carbonation, microstructure

#### 1. 서 론

콘크리트 내부로 유해물질의 침투에 대한 주요 구동력은 흡수, 투수, 확산작용으로 대별된다. 흡수는 단기간내 유체 침투의 주요 원인이지만, 투수 및 확산은 장기간에 걸쳐 시간의 경과에 따라 꾸준히 작용한다.<sup>1)</sup> 따라서, 콘크리트의 장기 내구특성을 이해하기 위해서는 투수계수 및 확산계수를 정량화할 필요가 있다. 저자는 콘크리트의 염소이온 확산계수를 시간단계별로 해석할 수 있는 기법을 제안한 바 있는데,<sup>2)</sup> 본 논문은 그 후속연구로서 콘크리트의 투수계수를 해석할 수 있는 방법을 구현하고자 하였다.

투수계수에 대한 기존의 연구문헌을 살펴보면, 시멘트 페이스트 및 콘크리트의 공극구조 특성과 투수계수와의 상관성을 구명하는 연구가 경험적 방법에서부터 공극구조 모델링에 의한 이미지 해석방법까지 다양한 접근 방

법으로 진행되었다.<sup>3-8)</sup>

경험적 방법으로서, Nyame<sup>3)</sup>는 최대 연속공극직경을 수은압입실험을 통하여 투수계수와의 상관식을 실험적 방법에 의하여 제안하였다. Mehta<sup>4)</sup>는 직경 1,320 Å보다 큰 직경을 갖는 공극체적과 290~1,320 Å 간에 존재하는 공극비율 함수로 투수계수 경험식을 제안하였다. 물리적 모델방법으로는 대부분의 연구들이 Hagen-Poiseuille의 법칙을 기초로 전개하였는데, 대표적인 해석방법이 Carman-Kozeny 모델<sup>5)</sup>로서 물질 침투경로의 굴곡특성 (tortuosity)이 고려되었다는 점이 이 방법의 가장 큰 장점이다. 또 다른 대표적인 물리적 해석방법인 Katz-Thompson 모델은 공극 네트워크간 삼출현상 (percolation)을 반영할 수 있었다.<sup>6)</sup> Christensen<sup>7)</sup> 등은 전도성 (conductivity)을 임피던스 분광기로, 유해물질 침투의 굴곡특성은 수은압입 실험방법으로 각각 측정 후, Katz-Thompson 모델에 반영하였다. 최근에는 컴퓨터를 이용한 이미지 해석 기법도 연구되고 있는데, Ye<sup>8)</sup>는 시멘트페이스트의 3차원 이미지를 임의 단면마다 공극을 상호연결시킨 입체해석학 기법으로 공극 네트워크를 가상화시켜서 투수성을 예측하였다.

이와 같이 투수계수 산정에 대한 연구는 장기간동안

\*Corresponding author E-mail : isyoon@induk.ac.kr  
Received June 12, 2008, Revised January 4, 2009,  
Accepted March 18, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

시멘트 콘크리트의 미세구조 측면에서 연구되어 왔음에도 불구하고, 복잡한 콘크리트의 구성 재료별 특성은 물론 탄산화와 같은 영향효과를 고려한 연구는 매우 부족하다. 그러나, 탄산화는 콘크리트의 염소이온 확산계수에 큰 영향을 미치고, 임계 염소이온량을 극단적으로 감소시켜 미소한 염소 이온량일지라도 탄산화가 되면 철근부식을 유발하는 것으로<sup>9)</sup> 저자의 연구에서 제시된 바 있다. 실 콘크리트구조물의 대부분이 탄산화가 진행되고 있으며 이는 투수 특성에도 커다란 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고, 탄산화된 콘크리트의 투수계수에 대한 연구 사례는 매우 드문 실정이다.

본 연구의 목적은 탄산화 및 비탄산화된 콘크리트의 투수계수 산정을 위한 실용적 해석 기법을 개발하는 것이다. 투수계수는 시멘트의 수화반응으로 인한 시멘트페이스트의 공극 구조 특성, 골재의 존재효과 등이 고려되었다. 본 연구의 접근방법은 향후, 시멘트의 물리화학적 재료 특성에서부터 콘크리트의 공학적 특성까지, 마이크로 스케일에서 메소단위의 스케일까지 고려한 멀티스케일 모델링 기법을 정립하고, 다양한 콘크리트 성능평가 시스템의 개발에 유용할 것으로 생각된다.

## 2. 콘크리트의 투수계수에 대한 재료 모델링

### 2.1 시멘트페이스트의 공극 시스템

#### 2.1.1 공극구조 특성

콘크리트 내부로의 유해물질의 침투성은 Fig. 1과 같이 기본적으로 공극구조 특성에 의존한다. 따라서, 콘크리트의 미세구조를 시간단계별로 추정할 필요가 있는데, 물질의 이동특성에 영향을 미치는 재료매체의 미세구조는 공극량 및 공극 분포의 2가지 요소가 고려되어야 한다. Koenders<sup>10)</sup>는 시멘트페이스트의 공극분포 특성을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$V_p = a \ln\left(\frac{d}{d_o}\right) \quad (1)$$

여기서,

- $V_p$  : 공극량,
- $a$  : 공극구조상수 (OPC 경우 약 0.1),
- $d$  : 모세공극의 직경,
- $d_o$  : 모세공극의 최소직경 ( $\approx 0.002$ ),
- $B$  : 공극분포 함수의 매개변수이다.

따라서, 공극량을 이미 알고 있다면 위의 함수를 이용하여 간단히 공극분포특성을 유추할 수 있다. 본 연구에서는 공극량을 시멘트계 재료의 수화단계별 시뮬레이션 프로그램인 HYMOSTRUC<sup>11)</sup>을 이용하여 구하였으며, 계산된 결과는 Fig. 2와 같다.

#### 2.1.2 유체 흐름경로의 굴곡특성

다공질성 재료의 굴곡 특성계수 ( $\tau_T$ , tortuosity)는 유체의 침투 경로에 대한 최단거리 ( $\lambda$ )와 유효거리 ( $\lambda_e$ )의 비율을 의미하며, 본 연구에서는  $\tau_T$ 를 투수계수에 영향을 미치는 요소 함수로 간주하였다. 굴곡특성에 영향을 미치는 영향인자로 침투 매체구성 재료의 종류와 균질성, 매

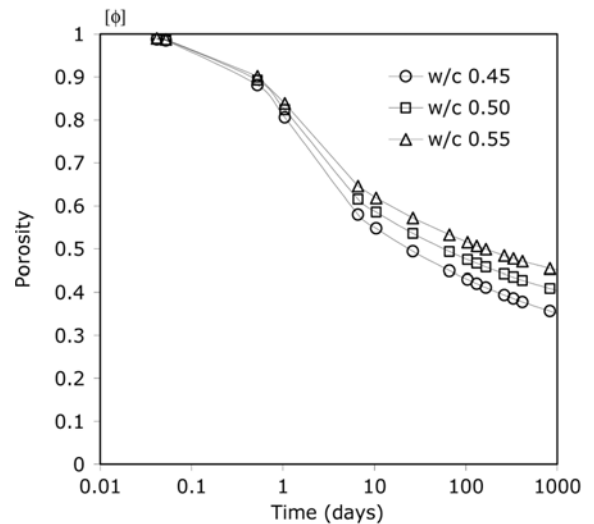


Fig. 2 Time evolution of capillary porosity in OPC cement paste for various w/c ratios

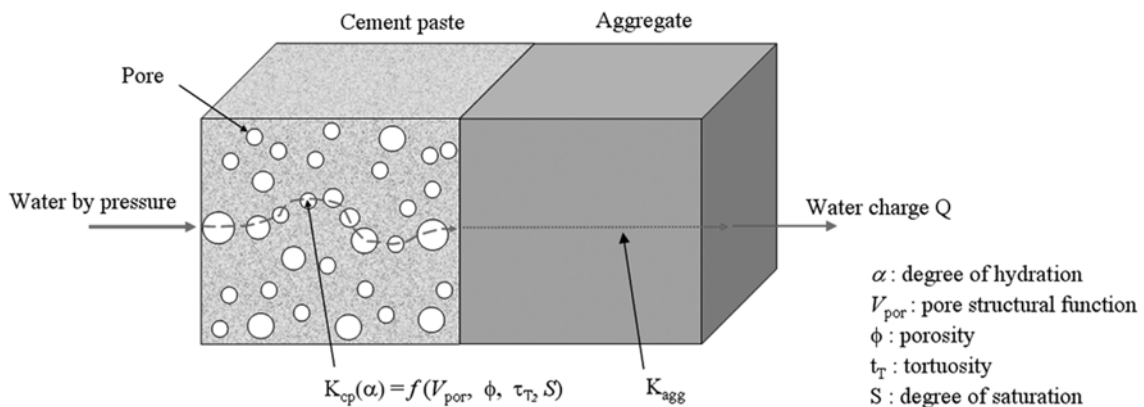


Fig. 1 Factors influencing permeability coefficient of concrete

체구성체의 응집 배열특성 및 침투 물질의 채널 형상 등이 있으나 가장 큰 요인은 공극률이다. 저자의 기존 연구에서,<sup>2)</sup> 단위체적당 존재하는 시멘트 경화체를 하나의 셀로 간주하고, 시멘트 코어를 정사각형으로 가정한 후, 원형과 정사각형의 형상함수를 고려함으로써 식 (2)를 얻은 바 있다. 본 연구에서도 투수에 의한 수분유입의 굴곡특성에 이 방법이 이용되었다.

$$\tau_T = \frac{\sqrt{1-\phi} \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{1-\phi}-1}\right)^2 + \frac{1}{4}} + \frac{1}{2} \sqrt{1-\phi} + 1}{4} \quad (2)$$

### 2.1.3 시멘트페이스트내 공극수량

시멘트계 재료의 공극 구조 시스템을 설명해주고 있는 Fig. 3을 보면 외부와 차단된 상태에서 시멘트계 재료의 공극구조는 공기가 차지하는 체적량  $\phi_{vapor}$ 와 배합수에 의한 내부 포화도  $S_i$ 에 의하여 모세공극 내 수분량  $\phi_{W(cap)}$ 으로 구성된다. 이상의 포화상태에 따른 콘크리트의 공극분포 특성을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\phi_{pore} = \phi_{W(cap)} + \phi_{vapor} \quad (3)$$

$$\phi_{W(cap)} \leq \phi_W \leq \phi_{pore} \quad (4)$$

$$S_i \left( = \frac{\phi_{W(cap)}}{\phi_{pore}} \right) \leq S \leq 1 \left( = \frac{\phi_W (= \phi_{pore})}{\phi_{pore}} \right) \quad (5)$$

여기서, 수분의 강제증발 및 외기의 상대습도와 같은 외부 환경조건을 배제한다면, 배합수에 의하여 시멘트페이스트의 체적  $V_{cp}$ 내에 존재하는 수분량은 Van Breugel<sup>11)</sup>이 제안한 식 (6)에 의하여 계산되며, 시멘트의 수화도는 HYMOSTRUC로 구하였다.

$$\phi_{W(cap)}(\alpha) = \frac{\rho_{ce}}{\rho_w + \rho_{ce} \cdot w/c} (w/c - 0.4\alpha) \cdot V_{cp} \quad (6)$$

여기서,

- $\alpha$  : 시멘트의 수화도,
- $\rho_{ce}$  : 시멘트의 단위중량,
- $\rho_w$  : 배합수의 단위중량,
- $w/c$  : 물-시멘트비이다.

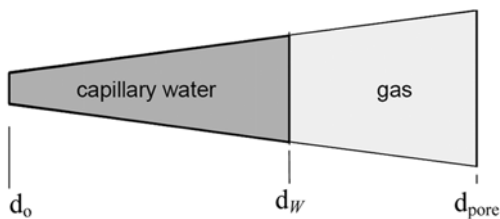


Fig. 3 Schematic representation of the border limits for the water permeability (between  $\phi_{W(cap)}$  and  $\phi_{pore}$ )

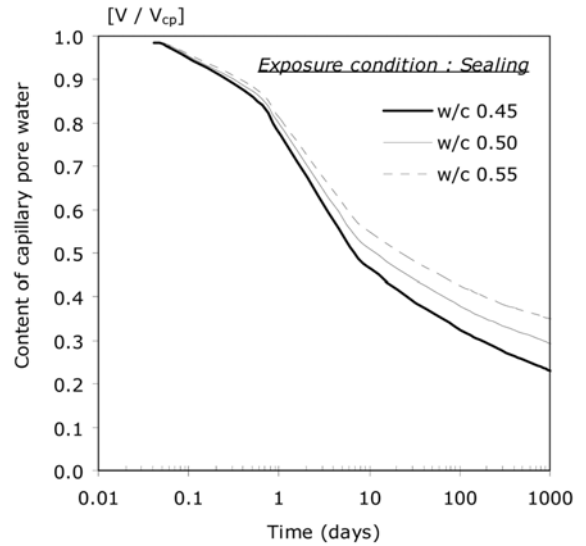


Fig. 4 Content of capillary pore water in unite volume of cement paste

Fig. 4는 시간단계별로 구한 시멘트페이스트내의 공극수를 보이고 있으며 시멘트 수화의 진행으로 지속적인 감소추세를 보이고 있다.

## 2.2 시멘트계 재료의 투수계수

### 2.2.1 시멘트페이스트의 투수계수

다공질성 재료의 투수계수 산정에 가장 보편적으로 이용되고 있는 Darcy의 법칙은 포화상태에서 공극을 통한 층류의 정상흐름은 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = K \cdot A \frac{\Delta h}{L} \quad (7)$$

여기서,

- $Q$  : 단위시간에 유입된 액체의 체적 ( $m^3/s$ ),
- $A$  : 시험편의 횡단면적 ( $m^2$ ),
- $L$  : 시험편의 두께,
- $\Delta h$  : 압력수두의 차이 (m)이다.

투수계수는 실험적 방법에 의하여 위 식을 역산하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K = \frac{L \cdot Q}{A \cdot \Delta h} \quad (8)$$

Muskat<sup>12)</sup>에 의하면 고유 투수계수 (intrinsic permeability coefficient)  $\kappa$ 와 투수계수  $K$ 의 관계는 다음과 같다.

$$K = \frac{\rho \cdot g \kappa}{\mu} \quad (9)$$

여기서,

- $\kappa$  : 고유투수계수, 보편적인 값은  $10^{-18} \sim 10^{-17} m^2$ 임.<sup>13)</sup>

$\mu$ : 액체의 동점성 (N s/m<sup>2</sup>),  
 $\rho$ : 액체의 밀도 (kg/m<sup>3</sup>),  
 $g$ : 중력가속도 (9.81 m/s<sup>2</sup>)이다.

따라서, Darcy의 법칙은 식 (10)과 같이 재표현되며, 20 °C 인 물의 경우, 변환계수  $\rho g / \mu = 9.76 \times 10^{-6} / \text{m}\cdot\text{s}$ 이다.

$$Q = A \frac{\kappa \rho g \Delta h}{\mu L} \quad (10)$$

한편, 해석적 관점에서 투수계수의 모델링은 대단히 복잡하다. Bear<sup>14)</sup>는 투수계수의 모델링을 구축하기 위하여 공극구조를 원통형 관 시스템으로 간주하고 이를 Hagen-Poiseuille 법칙을 적용하여 압력구배와 선형관계를 갖는 수량을 구하였다. Dullien<sup>15)</sup>은 직경  $d$ , 길이  $L$ 을 갖는 모세관 튜브의 수로성 (hydraulic conductivity)을 다음과 같이 제안하였다.

$$g = \frac{\pi d^4}{128L} \quad (11)$$

이로부터 물의 전체 흐름량  $Q_{cap}$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{cap} = -\frac{\pi d^4}{128\rho\nu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (12)$$

여기서,

$\rho$  : 공극내 액체의 밀도,  
 $\nu$  : 공극내 액체의 점성,  
 $\partial p / \partial x$  : 압력구배이다.

경화된 시멘트 구조체에서 압력구배와 특유량간의 관계는 식 (13)과 같다.

$$q = -\frac{(d^2 + d_o^2)}{64\rho\nu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (13)$$

유체의 흐름에 대한 굴곡 특성계수를 고려하면 다공질성 재료의 투수계수는 다음과 같다.

$$K = \frac{\kappa r_w}{\mu \tau_T} \quad (14)$$

액체 및 기체의 투수(기)성은 시멘트의 수화과정에서 공극이 수분에 의해 채워졌는지의 유무에 의존한다. 모세관 공극내 존재하는 수분을 Fig. 3에서 재고하면, 공극내 가장 작은 공극  $d_o$ 와 수분에 의해 채워진 공극  $d_{wat}$  사이에 존재한다고 가정할 수 있다. 외부의 수분이 차단된 조건에서 액체의 동점성  $\mu$ 와 점성을  $\nu$ 간의 관계로부터 건조상태인 시멘트페이스트의 투기계수는 다음과 같이 도출된다.

$$K_{cp}^{dry} = \frac{\kappa r_w}{\mu \tau_T} = \frac{(d_o^2 + d_{wat}^2) r_g}{64 \mu_g \tau_T} = \frac{(d_o^2 + d_{wat}^2) g}{64 \nu_g \tau_T} \quad (15)$$

여기서,  $\kappa$ 는 모세관공극의 고유침투계수를 의미하며,  $d_o$ 는 0.002  $\mu\text{m}$ 로 간주되었다.<sup>10)</sup> 배합수는 시멘트의 수화반응 의해 지속적으로 감소하되, 일부는 모세공극 내부에 잔존한다. 모세공극내 수분  $\phi_{wat}$ 을 고려하면 투수계수  $K$ 는 다음과 같다.

$$K_{cp}^{sat} = \frac{\kappa r_w}{\mu \tau_T} = \frac{(d_o^2 + d_{pore}^2) r_w}{64 \mu_w \tau_T} = \frac{(d_o^2 + d_{pore}^2) g}{64 \nu_w \tau_T} \quad (16)$$

### 2.2.2 콘크리트의 투수계수

콘크리트의 투수계수는 시멘트의 투수계수보다 영향을 미치는 요소가 더욱 많다. 복합재료로 구성되어 있는 콘크리트의 구성 특성을 단순화하기 위하여, 시멘트페이스트와 골재, 각각의 재료가 콘크리트의 투수계수에 미치는 영향을 정량적으로 표현할 필요가 있다.

Fig. 5는 Hooke의 탄성법칙과 Darcy 법칙을 상호 비교한 것으로 다음과 같은 유사성을 관찰할 수 있다. 첫째, 두법칙에서 재료에 영향을 미치는 구동력은 외력 (압력)에 기인한다. 둘째, 외력의 작용시 Hooke의 탄성법칙은 응력과 변형률이, Darcy 법칙은 압력과 압력구배가 각각 선형 거동을 한다. 셋째, Hooke의 탄성법칙에서는 하중재하에 따른 재료특성을 반영할 수 있는 강성을 탄성계수  $E$ 로, Darcy의 법칙은 재료의 수로성 (hydraulic conductivity)을 투수계수  $K$ 로 표현할 수 있다. 이상의 유사성을 정리한 것이 Table 1이다.

Hirsch<sup>16)</sup>은 Fig. 6과 같이 시멘트페이스트와 골재, 2가지 재료로 구성되어 있는 콘크리트 복합체의 재료적 성질을 고려하여 각 구성재료의 탄성계수로부터 다음과 같이 콘

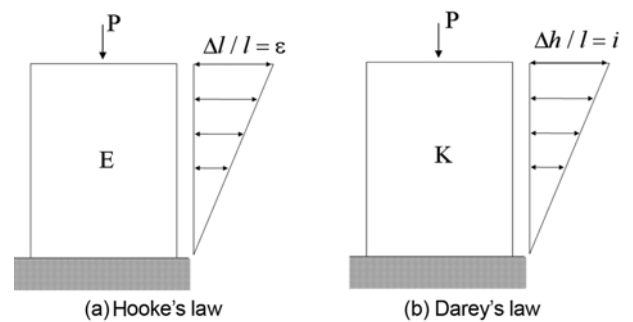


Fig. 5 Comparison of Hooke's law and Darcy's law

Table 1 Similarity of Hooke's law and Darcy's law

	Hooke's law	Darcy's law
Driving force	$P$	$P$
Impact to material	Stress, $f$	Water charge, $Q$
Response	Strain, $\epsilon$	Pressure gradient, $i$
Material properties	Elastic modulus, $E$	Permeability coeff., $K$

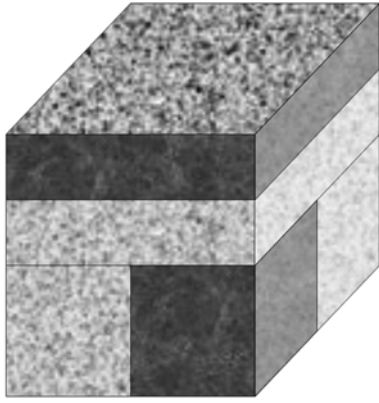


Fig. 6 Hirsch model: simple two-phase model for concrete

크리트의 탄성계수를 구할 수 있는 식을 제안한 바 있다.

$$\frac{1}{E_{con}(\alpha)} = \frac{\lambda}{\zeta \cdot E_{cp}(\alpha) + (1-\zeta)E_{agg}} + \frac{1-\lambda}{E_{cp}(\alpha)} \quad (17)$$

여기서,  $\lambda$ 와  $\zeta$ 는 콘크리트내의 골재량  $V_{agg}$ 에 의해 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\lambda = 1 - \zeta = \sqrt{V_{agg}} \quad (18)$$

위의 두 법칙간의 상사성을 토대로 탄성계수를 투수계수로 치환하면 콘크리트의 투수계수  $K_{con}$ 은 다음과 같이 재현할 수 있다.

$$K_{con}(\alpha) = \frac{K_{cp}(\alpha)[\zeta \cdot K_{cp}(\alpha) + (1-\zeta)K_{agg}]}{K_{cp}(\alpha)\lambda + (1-\lambda)[\zeta \cdot K_{cp}(\alpha) + (1-\zeta)K_{agg}]} \quad (19)$$

위 식에서 시멘트페이스트의 투수계수  $K_{cp}$ 는 시멘트의 수화단계별로 고려되며 골재의 투수계수  $K_{agg}$ 는 Table 2를 고려하였다. 여기서, 시멘트페이스트 경계영역사이에 존재하는 미소 경계영역 (ITZ, interfacial transition zone)은 본 연구의 투수계수의 계산에서 무시되었으며 이는 향후의 연구로 한다.

### 2.3 탄산화된 시멘트 콘크리트의 공극감소량

일반적으로, 콘크리트의 탄산화는 내부 미세구조를 변

Table 2 Permeability coefficient of rocks<sup>17)</sup>

Type of rock	Permeability coefficient (m/s)
Dense trap	$2.47 \times 10^{-14}$
Quarz diorite	$8.24 \times 10^{-14}$
Marble A	$2.39 \times 10^{-13}$
Marble B	$5.77 \times 10^{-12}$
Grinite A	$5.35 \times 10^{-11}$
Grinite B	$1.56 \times 10^{-10}$
Sandstone	$1.23 \times 10^{-10}$

화시키는 것으로 알려졌다. Papadakis<sup>18)</sup>는 보통 콘크리트에 국한하여 탄산화로 인한 공극의 변화량을 산정하기 위하여 시멘트 내의 클링커 광물학적 조성물에 대한 각각의 수화 반응물량을 계산한 후, 탄산화될 수 있는 수화물 CH와 C-S-H의 농도를 토대로 몰체적비율을 고려하여 탄산화로 인한 감소된 공극량 ( $\Delta\phi_c$ )을 구하였다.

$$\Delta\phi_c = [CH]\Delta\bar{V}_{CH} + [C-S-H]\Delta\bar{V}_{CSH} \quad (20)$$

여기서,

$$\Delta\bar{V}_{CH} = 3.85 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol},$$

$$\Delta\bar{V}_{CSH} = 15.39 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$$

위 식은 탄산화된 콘크리트에서의 감소 공극량으로서 시멘트페이스트에 대한 감소 공극량  $\Delta\phi_c(\text{cp})$ 는 단위체적 콘크리트내 시멘트페이스트량  $V_{cp}$ 를 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi_c(\text{cp}) = V_{cp} \{ [CH]\Delta\bar{V}_{CH} + [C-S-H]\Delta\bar{V}_{CSH} \} \quad (21)$$

이상의 방법에 의하여 탄산화 및 비탄산화된 콘크리트의 공극량에 대한 계산을 Fig. 7에 나타내었다. 최종적으로 탄산화 유무에 따른 시멘트페이스트는 다음과 같다.

$$\phi_c = \phi - \Delta\phi_c \quad (22)$$

여기서,

$\phi_c$ : 탄산화된 시멘트페이스트의 공극량,

$\phi$ : 비탄산화된 시멘트페이스트의 공극량으로서 Fig. 2과 같이 HYMOSTRUC에 의하여 구할 수 있다.

참고로, 본 연구에서 구한 계산결과 및 실험에 이용한 배합표는 Table 3과 같다. 식 (22)의 탄산화된 시멘트페이스트의 공극량은 앞서 설명한 시멘트 콘크리트의 공극시스템 함수식 (1)에 재차대입하여 공극분포를 얻어낼 수 있다.

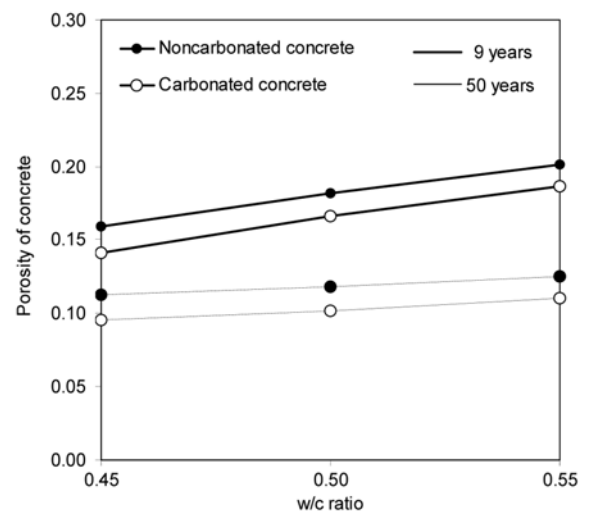


Fig. 7 Dependence of porosity of (non)carbonated concrete on time and water-cement ratio

**Table 3** Mixing proportion of concrete

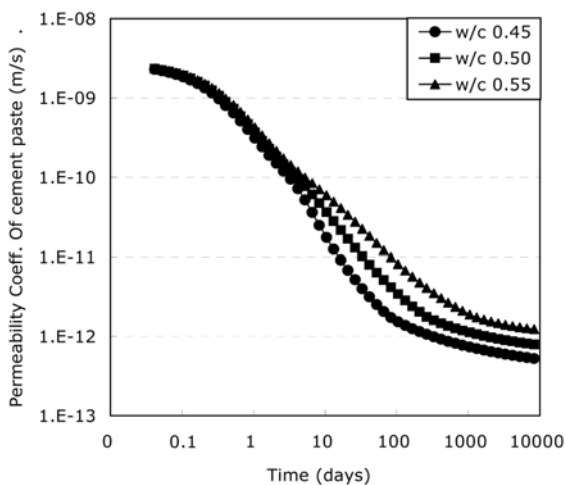
Air (%)	Slump (mm)	W/C	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )			
			Water	Cement	Sand	Gravel
4.5 ± 1.5	150 ± 10	0.45	185	411	706	1,001
4.5 ± 1.5	150 ± 10	0.50	185	370	720	1,021
4.5 ± 1.5	150 ± 10	0.55	185	336	732	1,038

### 3. 해석 결과 및 고찰

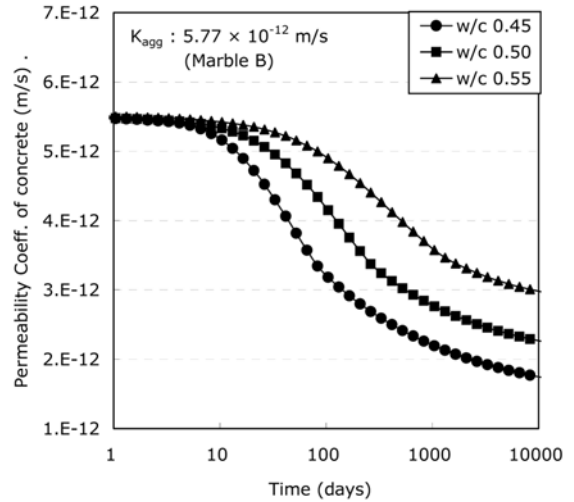
#### 3.1 비탄산화된 시멘트 콘크리트의 투수계수

Fig. 8은 본 연구에서 제안한 해석 방법에 의하여 물-시멘트비를 변수로 시간경과에 따른 시멘트페이스트의 투수계수의 변화율을 계산한 결과이다. 시간의 경과에 따라 투수계수가 초기에는 매우 가파르게 감소하는 추세를 보이지만, 재령 100일이 경과하면서 변화율이 비교적 완만하지만 꾸준히 감소추세를 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 8의 시멘트페이스트의 확산계수를 기초로 콘크리트의 투수계수를 산정한 결과이다. 초기재령에서 투수계수 값은 매우 낮는데, 이는 저자가 기존 연구에서 얻은 콘크리트의 염소이온 확산계수에 대한 시간단계별 변화추이와 유사한 결과이다. 따라서, 해양성 콘크리트구조물은 물론 수중 환경 콘크리트의 신설시, 시공 초기단계에서 콘크리트가 해수에 접하는 것이 매우 유해하므로, 이 기간동안 침투성을 제어할 수 있도록 각별한 주의와 대책 공법이 필요하다고 생각된다. 한편, 초기단계에서 콘크리트의 투수계수는 물-시멘트비와 무관하게 일정하지만, 재령이 경과함에 따라 물-시멘트비에 따라 뚜렷한 차이는 보였다. 이는 경화초기단계에서 콘크리트의 투수계수가 시멘트페이스트의 품질에 대한 영향이 적지만, 시멘트의 수화반응이 진행됨에 따라 물-시멘트비에 따른 공극구조의 발현이 차이를 보이기 때문인 것으로 생각된다.



**Fig. 8** Permeability coefficient of cement paste for three different w/c ratios, based on the effect of the time evolution on the micro-structural development



**Fig. 9** Permeability coefficient of concrete for three different w/c ratios

한편, 시멘트페이스트의 확산계수와 비교하여 비교적 불투수성을 갖는 골재의 존재로 인하여 초기재령의 콘크리트의 투수계수가 크게 감소하였다. 그러나 장기재령 10,000일에서는 오히려 콘크리트의 투수계수가 시멘트페이스트의 투수계수보다 낮은 결과가 나타났다. 이는 콘크리트의 투수계수 해석시, 장기재령에서 시멘트페이스트의 미세구조가 충분히 발현되면서 골재의 투수계수로 입력한  $5.77 \times 10^{-12} \text{ m/s}$  이하의 수준까지 시멘트페이스트의 투수계수가 감소하는 결과를 초래하였기 때문이다.

골재의 품질이 콘크리트의 투수계수에 영향을 미치는 요인을 고찰하기 위하여 Table 2의 골재별 투수계수에 따른 콘크리트의 투수계수의 변화추이를 산정한 결과가 Fig. 10이다. Fig. 9에서 골재의 품질이 일정한 상태에서, 콘크리트의 투수계수는 시멘트페이스트의 투수계수에 크게 의존하는 결과를 보였으나, Fig. 10에 의하면 역으로 초기 단계부터 골재의 품질이 콘크리트의 투수계수에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서, 밀실성이 우수한 콘크리트를 제조하기 위해서는 시멘트페이스트의 밀실성만으로는 어려우므로 고품질 골재의 사용이 필연적이며, 이는 수화초기 단계에서부터 장기재령에 걸쳐 콘크리트의 투수계수에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

#### 3.2 탄산화된 시멘트 콘크리트의 투수계수

Fig. 11은 탄산화된 시멘트페이스트의 투수계수를 비탄산화된 것과 비교하여 보인 결과이다. 예상했듯이, 탄산

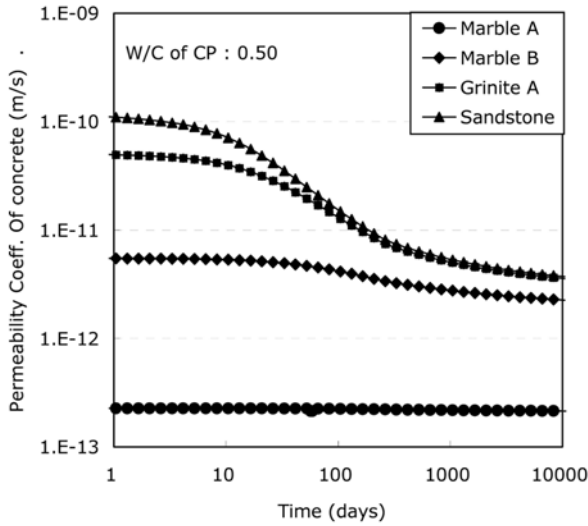


Fig. 10 Effect of type of aggregate on permeability of concrete

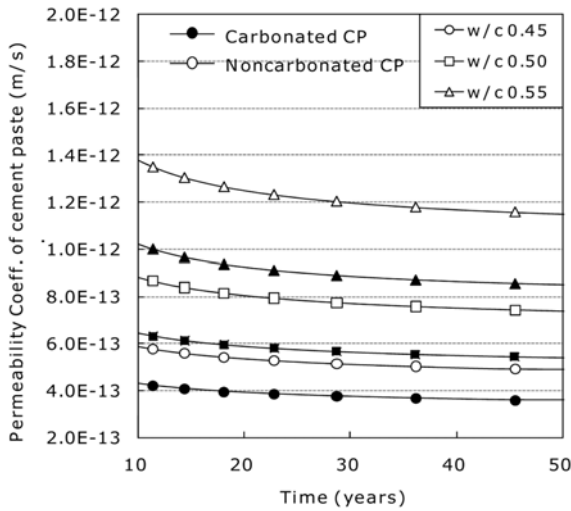


Fig. 11 Permeability coefficient of carbonated cement paste

화로 인한 공극 감소는 투수계수의 감소를 초래하였다. 이는 시멘트페이스트가 경화된 후에도 지속적으로 미세조직이 발현되어 수분 침투 제어효과가 증진될 뿐 아니라 안정성이 떨어지는 알칼리성 수화생성물이 갈슘 실리케이트 수화물로 전환되기 때문에 기인된 현상으로 생각된다. 본 해석기법에서는 이러한 현상이 탄산화로 인한 공극감소로 수분유입의 통로가 감소되었을 뿐 아니라, 유입경로의 굴곡성도 한층 복잡하여 투수계수가 감소하는 결과를 보인다.

본 연구 결과는 보통포틀랜드시멘트 콘크리트에 국한된 결과로서, 혼합시멘트 콘크리트의 경우는 투수계수에 영향을 미치는 유효 공극직경의 크기가 혼화재 종류 및 치환율에 의존하기 때문에 향후, 혼화재 사용에 따른 투수계수의 산출 및 탄산화로 인한 투수계수의 감소율에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

Fig. 12는 탄산화된 콘크리트의 투수계수에 대한 해석

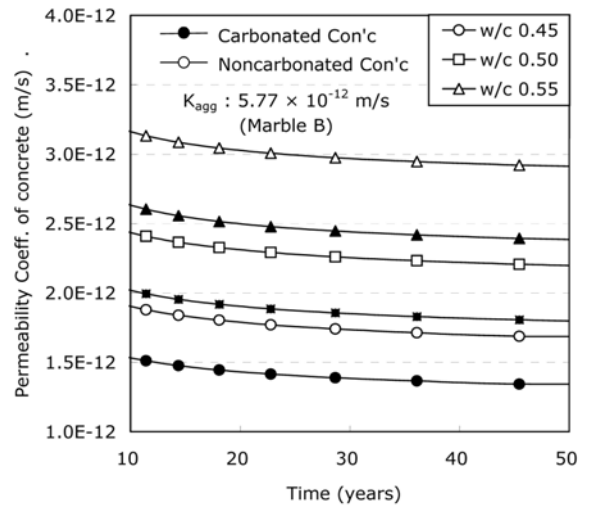


Fig. 12 Permeability coefficient of carbonated concrete

내용을 실험 결과와 비교하여 보인 것이다. 앞서 비탄산화가 된 시멘트 콘크리트의 경우와 유사하게, 시멘트페이스트가 콘크리트보다 투수계수가 작은 결과를 보였다. 향후, 탄산화된 콘크리트의 장기 투수계수의 산정을 더욱 정확히 추정하기 위하여 탄산화로 인하여 변한 시멘트 조직체의 물리 화학적 특성 및 공극 분포 특성을 특성화할 수 있는 기법이 필요할 것으로 생각된다.

## 4. 검증 실험 프로그램

### 4.1 실험 방법

#### 4.1.1 탄산화 촉진방법

실험에 사용된 콘크리트 배합표는 Table 3과 같으며, 동일배합·동일 시험항목별로 시멘트페이스트는 1개씩, 콘크리트는 3개씩 시험편을 각각 제조하였다. 굵은골재 최대치수는 16 mm인 천연골재로서 비중 2.7이며, 모래는 비중 2.63이다. 시험체의 크기는 보통포틀랜드시멘트를 사용하여 직경 95 mm 및 두께 50 mm인 디스크 모양으로서, 수중양생 2일후 기중양생하였다.

시험체의 세부적 탄산화 촉진조건 및 실험방법은 Fig. 13과 같다. 이때 탄산화된 콘크리트 시험편은 촉진재령 4달 후, 여분의 시험편에 페놀프탈레인 용액을 살포하여 시험편 전체에 탄산화가 완전히 진행되었는지를 확인하였다.

#### 4.1.2 시멘트 콘크리트의 투수실험

탄산화와 비탄산화된 콘크리트의 투수계수를 산출하기 위하여 Fig. 14와 같은 투수계수 장치가 이용되었다. 이 투수계수 측정1세트는 가스 압력장치, 가스/물 저장탱크, 3개의 셀로 구성되어 있다. 지나치게 큰 공기압은 시멘트페이스트의 미세구조에 손상을 일으킬 수 있으므로 평균 0.4 MPa의 공기압으로 가압한 후, 압력이 일정한지를 상시 모니터링하였다. 투과된 수량으로부터 투수율 Q는 다음과 같이 계산된다.

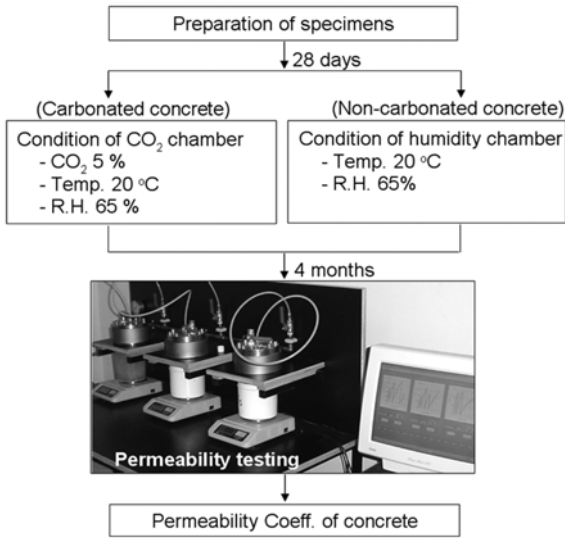


Fig. 13 Experimental procedure for acquisition of permeability coefficient of (non)carbonated concrete

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (23)$$

여기서,

$\Delta V$ : 수량의 미세증가량 ( $\text{m}^3$ ),

$\Delta t$ : 통과된 수량이 측정되기까지 시간간격 (s)이다.

이 실험에서 시험편 하부의 압력  $P_1$ 은 대기압력 0.1013 MPa로, 등가 수위  $h_1$ 을 10.34 m로 각각 각주된다. 정수압  $P_2$ 를 가하면 등가 수위  $h_2$ 는 다음과 같다.

$$h_2 = \frac{10.34P_2}{0.1013} = 102.07P_2 \text{ (mm)} \quad (24)$$

따라서, 수두  $\Delta h$ 는 다음과 같다.

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 102.07P_2 - 10.34 \text{ (mm)} \quad (25)$$

측정된 실험 결과로부터 식 (7)에 대입하여 투수계수를 산정할 수 있다.

#### 4.2 실험 결과 및 검증

Fig. 15는 재령 158일이 경과한 시멘트페이스트의 투수계수를 실험 및 해석 결과를 각각 비교한 결과이다. 실험 결과가 해석치보다 높은 결과를 보이고 있다. Fig. 16은 같은 재령 158일째에 완전히 탄산화된 시멘트페이스트의 투수계수를 실험 및 해석 결과를 상호 비교한 결과이다. Fig. 16과는 달리 해석치가 실험 결과보다 높은 결과를 보이고 있다. 따라서 Figs. 15 및 16으로부터 본 해석방법은 비탄산화된 시멘트페이스트를 과소평가하며, 탄산화된 시멘트페이스트는 과대 평가되는 경향이 있는 것으로 생각된다.

Fig. 17은 본 연구방법에 의하여 계산된 시멘트페이스트의 투수계수를 본 실험 결과와 비교하여 시간경과에 따라 나타낸 것이며, Fig. 18은 콘크리트의 투수계수에 대하여 비교한 결과이다. 감소추세의 비율은 대체로 일치하는 경향이 있으나, 실험 결과치가 본 연구의 해석 결과보다 평균적으로 약 5.6% 높은 추이를 보였다. 일반적으로, 물-시멘트비 0.45인 콘크리트는  $10^{-11} \sim 10^{-12}$  m/s, 물-시멘트비 0.50인 콘크리트는  $10^{-12}$  m/s 규모의 투수계수를 갖는 것으로 알려졌는데,<sup>19)</sup> 본 연구의 해석 결과는

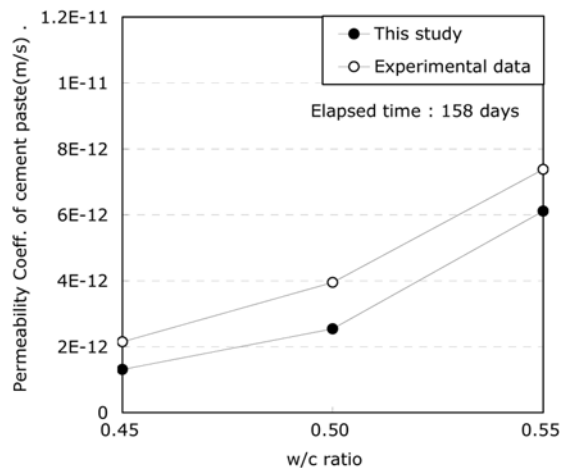


Fig. 15 Comparison of permeability of this numerical study & experimental data of permeability testing for non-carbonated cement paste

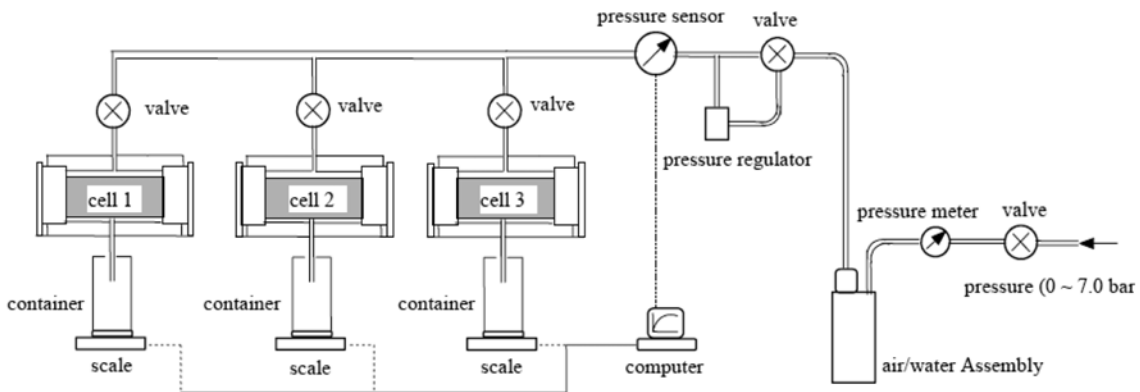


Fig. 14 Experimental design for permeability coefficient for cement paste and concrete



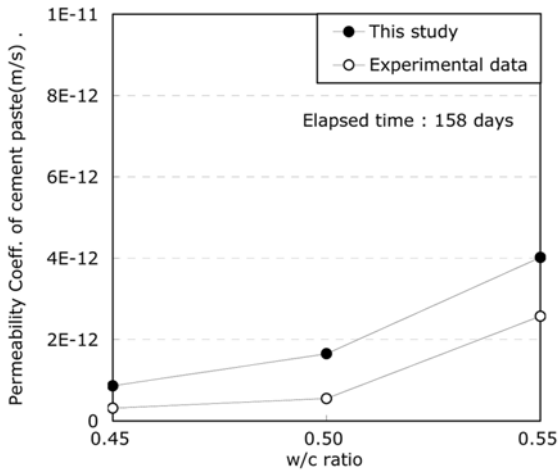


Fig. 16 Comparison of permeability of this numerical study & permeability testing for carbonated cement paste

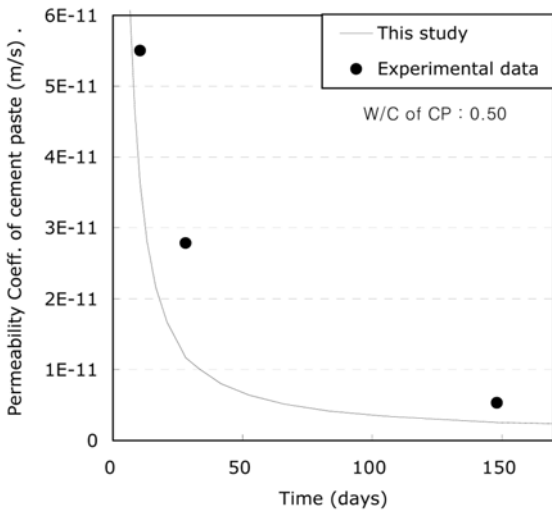


Fig. 17 Comparison of this numerical study & experimental data for time evolution of permeability coefficient of cement paste

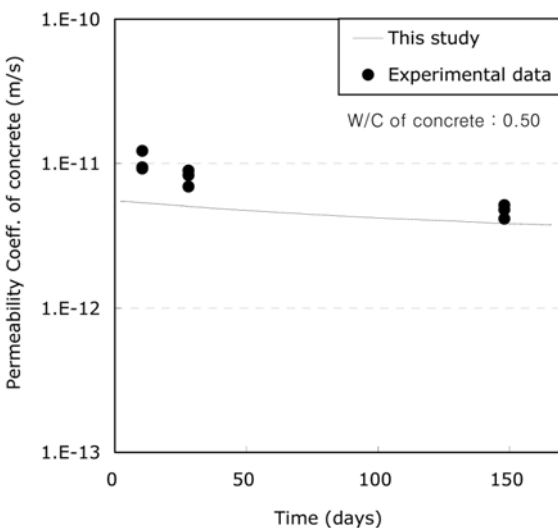


Fig. 18 Comparison of this numerical study & experimental data for time evolution of permeability coefficient of concrete

이 범주를 만족하는 수준이다.

향후, 본 연구에서 제안한 투수계수를 얻는 방법에서 시멘트페이스트와 골재 표면의 경계영역에 존재하는 ITZ의 효과를 투수계수의 산출식에 반영하고, 탄산화가 ITZ 효과에 미치는 영향 및 화학적 변화특성을 고려한 세부적 연구가 필요하다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 시멘트의 수화 진행에 따른 시멘트페이스트의 공극구조, 골재 존재, 탄산화로 인한 공극 감소 등을 고려하여 투수계수를 산정할 수 있는 기법을 개발하였고, 실험 결과와 비교 검증하였다.

비탄산화된 콘크리트의 투수계수는 재령 28일까지 가파르게 감소하였으며 이후에는 그 감소성이 완만하였다. 또한, 실험 결과가 해석치보다 약 평균적으로 5.6% 높게 나타났는데, 이는 시멘트페이스트와 골재의 경계영역에 존재하는 ITZ 효과를 해석에서 반영하지 않은데 따른 차이인 것으로 생각된다.

또한, 탄산화로 인한 콘크리트의 공극 변화량을 토대로 탄산화된 콘크리트의 투수계수를 계산하였다. 보통 콘크리트는 탄산화로 인하여 공극이 감소되며 이는 투수계수의 감소를 초래하였다. 해석과 실험 결과는 전반적인 추세율이 일치하지만, 세부적인 비교측면에서는 실험적 결과와 다소의 오차를 보여, 향후 감소된 공극량의 계산 등에 보완이 필요할 것으로 사료된다.

콘크리트 구성재료가 투수계수에 미치는 영향을 고찰한 결과, 시멘트페이스트의 품질은 초기단계에서 콘크리트 투수계수에 큰 영향을 미치지 않으나, 재령이 경과함에 따라 뚜렷한 관련성을 보였다. 반면, 골재의 품질은 초기재령에서 장기재령까지 콘크리트의 투수계수에 큰 영향을 미쳤다. 따라서, 밀실한 콘크리트를 얻는데 고품질의 골재가 반드시 필요한 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 인덕대학교내 학술연구비로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. RILEM Report 12, *Performance Criteria for Concrete Durability*, J. Kropp and H. K. Hilsdorf(Eds.), E & FN SPON, 1995, 327 pp.
2. 윤인석, 김은겸, 이창수, “중성화의 영향을 고려한 콘크리트의 염소이온 확산계수 산정에 대한 해석적 기법 연구,” 대한토목학회 논문집, 27권, 4A호, 2007, pp. 617~625.
3. Nyame, B. K. and Illston, J. M., “Capillary Pore Structure and Permeability of Hardened Cement Paste,” *Proc. 7th International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, France, Vol. 3, No. 4, 1980, pp. 181~185.

4. Mehta, P. K. and Manmohan, C., "Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Paste," *7th International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, France, Vol. 3, No. 7, 1980, pp. 1~5.
5. Dullien, F. A. L., "Characterization of Porous Media-Pore Level," *Transport in Porous Media*, Vol. 6, 1991, pp. 581~60.
6. Katz, A. J. and Thompson, A. H., "Quantitative Prediction of Permeability in Porous Rock," *Physical Review. B*, Vol. 34, 1986, pp. 8179~8181.
7. Christensen, B. J., Mason, T. O., and Jennings, H. M., "Comparison of Measured and Calculated Permeabilities for Hardened Cement Pastes," *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 9, 1996, pp. 1325~1334.
8. Ye, G., "Experimental Study and Numerical Simulation of the Development of the Microstructure and Permeability of the Cementitious Materials," Ph.D Dissertation of Delft University of Technology, The Netherlands, 2003.
9. 윤인석, "시멘트 수화특성 및 탄산화를 고려한 콘크리트의 임계 염소이온량에 대한 해석적 기법," 콘크리트학회 논문집, 19권, 3호, 2007, pp. 367~375.
10. Koenders E. A. B., "Simulation of Volume Changes in Hardening Cement-Based Materials," Ph.D Dissertation of Delft University of Technology, The Netherlands, 1997, 171 pp.
11. Breugel, K. van, "Simulation of Hydration and Formation of Structures in Hardening Cement-Based Materials," Ph.D Dissertation of Delft University of Technology, The Netherlands, 1991, 305 pp.
12. Muskat, M., *The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media*, McGraw-Hill Book Company Inc., New York, 1937, 763 pp.
13. Hanaor, A. and Sullivan, P. J. E., "Factors Affecting Concrete Permeability to Cryogenic Fluids," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 35, No. 124, 1983, pp. 142~150.
14. Bear, J., *Dynamics of Fluids in Porous Media*, New York, London Amsterdam, American Elsevier Company, 1972, 764 pp.
15. Dullien, F. A. L., "Characterization of Porous Media-Pore Level," *Transport in Porous Media*, Vol. 6, 1991, pp. 581~60.
16. Hirsch, T. J., "Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Moduli of Cement Paste Matrix and Aggregate," *Journal of the American Concrete Institute*, No. 59~12, 1962, pp. 427~451.
17. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, Fourth Edition, London, 1995, pp. 490~494.
18. Papadakis, V. G. and Vayenas, C. G., "Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 8, No. 2, 1991, pp. 186~196.
19. Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M., *Concrete-Microstructure, Properties and Materials*, Third Edition, New York, 2006, pp. 125~130.

---

**요 약** 콘크리트의 투수계수는 콘크리트 구조물의 내구성능 및 미세구조의 밀실성을 판단할 수 있는 핵심적인 재료 매개변수이다. 투수계수를 산정하기 위한 많은 연구들이 있었으나, 시멘트페이스트 및 골재 각각이 콘크리트의 투수 성능에 미치는 영향을 다룬 연구는 드물다. 더우기, 탄산화가 염소이온의 확산계수에 큰 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고, 탄산화된 콘크리트에 대한 확산계수를 다룬 연구는 매우 드문 실정이다. 본 연구의 목적은 탄산화 및 비탄산화된 콘크리트의 투수계수를 추정할 수 있는 기초적 접근방법을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 미세구조 모델 및 시멘트의 경화특성을 기초로 투수계수를 산정할 수 있는 해석적 기법이 개발되었는데, 시간단계별로 변화하는 투수계수의 해석과 탄산화된 콘크리트의 투수계수를 계산할 수 있다. 탄산화된 콘크리트에서 감소된 공극량이 계산되었으며 이는 투수계수의 산정에 이용되었다. 해석 결과는 실험적 결과를 얻어서 상호비교하여 검증하였다.

**핵심용어** : 투수계수, 내구성, 탄산화, 미세구조