

시멘트계 재료의 기체 투기계수 해석 및 투수계수와 의 상관성 연구

윤인석*

Yoon, In-Seok*

Modeling of Gas Permeability Coefficient for Cementitious Materials with Relation to Water Permeability Coefficient

ABSTRACT

Permeability can not be expressed as a function of porosity alone, it depends on the porosity, pore size and distribution, and tortuosity of pore channels in concrete. There has been considerable interest in the relationship between microstructure and transport in cementitious materials, however, it is very rare to deal with the theoretical study on gas 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. In this study, fundamental approach to compute gas permeability of (non)carbonated concrete is suggested. For several compositions of cement pastes, the gas permeability coefficient was calculated with the analytical formulation, followed by a microstructure-based model. For carbonated concrete, reduced porosity was calculated and this was used for calculating the gas permeability coefficient. As the result of calculation of gas permeability for carbonated concrete, carbonation led to the significant reduction of gas permeability coefficient and this was obvious for concrete with high w/c ratio. Meanwhile, the relationship between gas permeability and water permeability has a linear function for cement paste based on Klinkenberg effect, however, which is not effective for concrete. For the evidence of the modeling, YOON's test was accomplished and these results were compared to each other.

Key words : Gas permeability coefficient, Carbonation, Micro-structure, Water permeability, YOON's test

초 록

투기계수는 콘크리트의 공극뿐만 아니라 공극크기, 공극분포, 공극간의 굴곡특성에 의해서도 영향을 받는다. 투기계수는 시멘트 페이스트의 미세구조에 의해 지배되는데, 시멘트 페이스트 및 골재 각각이 콘크리트의 투기성능에 미치는 영향을 다룬 연구는 드물다. 더우기, 탄산화가 투기계수에 큰 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고, 탄산화된 콘크리트에 대한 투기계수를 다룬 연구는 더욱 드문 실정이다. 본 연구의 목적은 탄산화 및 비탄산화된 콘크리트의 투기계수를 추정할 수 있는 기초적 접근방법을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 미세구조 모델 및 시멘트의 경화특성을 기초로 투기계수를 산정할 수 있는 해석적 기법이 제안되었다. 탄산화된 콘크리트에서 감소된 공극량이 계산되었으며 이는 투기계수의 산정에 이용하여 탄산화된 콘크리트의 투기계수를 계산하였다. 높은 물-시멘트비를 갖는 콘크리트는 탄산화로 인하여 투기계수의 감소가 더욱 뚜렷한 것을 확인되었다. 한편, 시멘트 페이스트에서 투기계수와 투수계수는 Klinkenberg 효과에 의한 선형관계가 성립되나, 콘크리트에서는 성립되지 않았다. 해석결과는 YOON's 실험방법을 수행하여 검증하였다.

검색어 : 투기계수, 탄산화, 미세구조, 투수성, YOON's 실험

* 종신회원 · 교신저자 · 인덕대학교 건설정보공학과, 교수 (Corresponding Author · Induk University · isyoon@induk.ac.kr)

Received July 21, 2015/ revised January 6, 2016/ accepted February 24, 2016

1. 서론

콘크리트 구조물의 장기 내구특성을 이해하기 위해서는 유해물질에 대한 침투계수를 정량화할 수 있는 실험적 방법과 해석 방법이 필요하다. 그래서 침투계수, 특히 투과성(permeability)에 대한 많은 연구가 행해져 왔으며 콘크리트의 복잡한 재료적 특성으로 인한 영향요인 등이 구명되었다.

투과성은 전기전도성의 변화를 측정하면서 연속경로를 표현할 수 있는 공극 네트워크의 삼출현상(percolation)에 의한 현상으로서 공극량과 정규전도성과의 관계를 구명하기 위한 다양한 연구가 있었다(Katz and Thomson, 1986; Nokken et al., 2008). 그러나 공극량만으로는 투과성능을 정량적으로 표현하기 위해서 시멘트 경화체의 미세공극 특성에서부터 기인되어야 한다. 미세공극 특성은 공극량외에 공극크기, 분포, 공극체널에 의한 유체의 흐름의 굴곡특성 등을 의미하며 실질적으로 유체의 흐름에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Neithalath et al., 2003; Ahmad et al., 2012).

투과성은 크게 2가지로 나뉘어지는데 투수성(water permeability)과 투기성(gas permeability)이다. 투수성과 달리 투기성은 콘크리트의 포화도에 크게 의존하는데 특히, 50% 이하의 포화도에서 투기성은 급격히 증가하며, 간습반복 효과 등의 습윤 이력에 의해서도 영향을 받는 것으로 알려져 있다(FORGE, 2011).

투수성과 달리 투기성을 구하는 이유는 2가지이다. 첫째는 기체의 침투성능을 얻어서 CO₂ 침투에 의한 콘크리트의 탄산화를 간접적으로 판단할 수 있는 지표로 활용할 수 있으며, 두번째는 투수성 실험에 비하여 간편하게 실험할 수 있기 때문이다. 그럼에도 투기계수 산정에 대한 연구는 투수계수에 비하여 연구사례가 극히 적은데, 특히 실 콘크리트 구조물의 대부분이 탄산화가 진행되고 있음에도 불구하고, 탄산화된 콘크리트의 기체 투기계수에 대한 연구 사례는 매우 드문 실정이다. 투기계수는 입자의 분포와 비표면적과 같은 입자의 특성에 의존할 뿐만 아니라 입자의 진압과 유관된 물-시멘트비, 골재 함량 및 크기 등에도 영향을 받는다(Bear, 1972; Picandet et al., 2011). 이와 같이 투기계수는 시멘트 페이스트 및 콘크리트의 공극구조 특성과 투수계수와 상관성의 기반하에서 공극구조 모델링 기반하에 수행되어야 한다.

저자는 본 논문과 유사한 방법으로 기체내부의 수분을 고려하여 콘크리트의 투수계수의 해석기법을 개발하고, 시멘트 경화체 및 골재의 품질이 투수계수에 미치는 영향을 해석적 측면에서 고찰한 바 있다(Yoon, 2009). 본 연구는 후속 연구로서 시멘트 콘크리트의 기체 투과율을 예측할 수 있는 투기계수의 실용적 해석 기법을 개발하는 것이 목적이다. 기체의 투기계수는 시멘트의 수화반응으로 인한 시멘트 페이스트의 공극 구조 특성, 골재의 존재효과 등이

고려되었으며 압력에 의하여 공극을 통한 기체의 흐름을 표현하였다. 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. 기체 투기계수의 재료 모델링

2.1 시멘트 페이스트의 공극 시스템(Yoon et al., 2007; Yoon, 2009)

2.1.1 공극구조 특성

콘크리트 내부의 유해물질의 침투성은 Fig. 1과 같이 기본적으로 미세구조에 영향을 미치는 공극 특성에 의존한다. 따라서, 콘크리트의 미세구조를 시간단계별로 추정할 필요가 있는데, 물질의 이동 특성에 영향을 미치는 재료 매체의 미세구조는 공극량 및 공극 분포, 2가지 요소가 고려되어야 한다. 본 연구에서는 단위시멘트 페이스트 체적 V_p 당 공극량 V_{pore} 을 Van Breugel (1991)의 제안 방법에 의하여, 시멘트 페이스트의 공극 특성분포는 Koenders (1997)의 제안방법에 의하여 구하였다.

2.1.2 유체 흐름경로의 굴곡특성

다공질성 재료의 굴곡 특성계수(τ_T , Tortuosity)는 유체의 침투 경로에 대한 최단거리(ℓ)와 유효거리(ℓ_e)의 비율을 의미한다. 저자의 기존 연구에서 단위체적당 존재하는 시멘트 경화체를 하나의 셀로 간주하고, 시멘트 코어를 정사각형으로 가정한 후, 원형과 정사각형의 형상합수를 고려함으로써 Eq. (1)을 얻은 바 있다(Yoon et al., 2007). 본 연구에서도 압력에 의한 기체유입의 굴곡특성에 이 방법이 이용되었다. 시간의 경과에 따라 공극량이 감소하므로 굴곡특성계수는 커지는 경향을 갖는다.

$$\tau_T = \sqrt{\pi} \frac{\sqrt{1-V_{pore}} \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{1-V_{pore}}-1}\right)^2 + \frac{1}{4}} + \frac{1}{2} \sqrt{1-V_{pore}} + 1}{4} \tag{1}$$

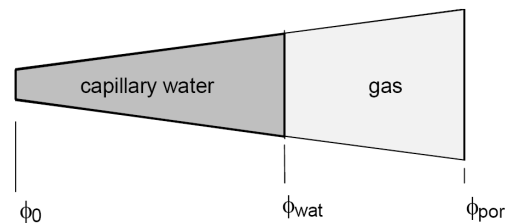


Fig. 1. Schematic Representation of the Border Limits for the Gas Permeability (Van Breugel, 1991)

2.1.3 시멘트 경화체 내 기체 체적량

재료의 내투기성은 재료의 포화도에 크게 의존된다. 유체 유입의 허용 공극량(V_{ap})은 전체공극에서 포화도(S_r)된 공극을 제외한 잔류량이므로 다음과 같이 표현된다(FORGE, 2011).

$$V_{ap} = V_{pore}(1 - S_r) \quad (2)$$

본 연구에서는 포화도 조건을 Fig. 1과 같이 시멘트계 재료의 공극 구조 시스템으로부터 배합수의 잔존량을 계산하여 반영하였다. 먼저, 외부와 차단된 상태에서 시멘트계 재료의 공극 구조 시스템은 기체가 차지하는 체적량 ϕ_{vapor} 와 수분량 ϕ_w 으로 구성된다. 그런데, 수분의 강제증발 및 외기의 상대습도와 같은 외부 환경조건을 배제한다면, 공극내 수분량 ϕ_w 은 배합수내 수화반응에 의해 소비되지 않고 잔존하고 있는 모세관 수분량 $\phi_{w(cap)}$ 와 같으며, 이는 시멘트 수화도의 함수로서 표현할 수 있다.

시멘트 경화체 단위 체적당 공극내 기체 체적량 V_g 은 시멘트 페이스트의 체적 V_{cp} 내에 존재하는 공극내 모세관 수분량 이외의 체적량으로서 다음과 같다.

$$V_g(\alpha) = \frac{V_{pore} - \frac{\rho_{ce}}{\rho_w + \rho_{ce} \cdot w/c} (w/c - 0.4\alpha) \cdot V_{cp}}{V_{pore}} \quad (3)$$

여기서, α : 시멘트의 수화도, ρ_{ce} : 시멘트의 단위중량, ρ_w : 배합수의 단위중량이다.

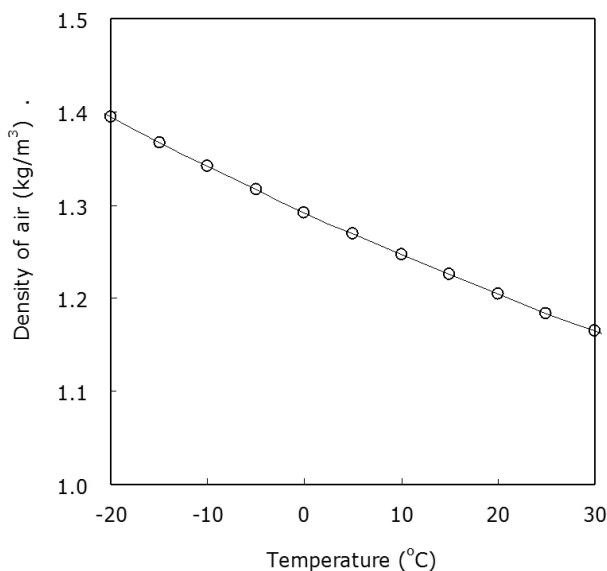


Fig. 2. Volumeric Fraction of Gas in Unite Volume of Cement Paste Pore

Fig. 2는 시간 단계별로 구한 단위 시멘트 페이스트당 공극내 기체의 체적량을 보인 것이다. 배합수는 시멘트 입자와의 수화반응에 소비되므로, 공극체적당 기체 체적량은 상대적으로 지속적인 증가하는 추이를 보이고 있다.

2.2 시멘트계 재료의 기체 투기계수(Yoon, 2009)

2.2.1 시멘트 페이스트의 기체 투기계수

다공질성 재료의 투과계수 산정에 가장 보편적으로 이용되고 있는 Darcy의 법칙에서 포화상태에서 공극을 통한 층류의 정상흐름은 Eq. (4)와 같다. 투과계수는 실험적 방법에 의하여 이 식을 역산하여 구할 수 있다.

$$Q = K \cdot A \frac{\Delta h}{L} \quad (4)$$

여기서, Q : 단위시간에 유입된 투과물질의 체적(m^3/s), A : 시험편의 횡단면적(m^2), L : 시험편의 두께, Δh : 압력수두의 차이(m)이다.

고유 투과계수(Intrinsic permeability coefficient) κ 와 투과계수 K 의 관계는 다음과 같다.

$$K = \frac{\rho \cdot g}{\mu} \kappa \quad (5)$$

여기서, μ : 투과물질의 동점성($N \cdot s/m^2$), ρ : 투과물질의 밀도(kg/m^3), g : 중력가속도 (9.81 m/s^2)이다. 투과물질이 기체일 경우

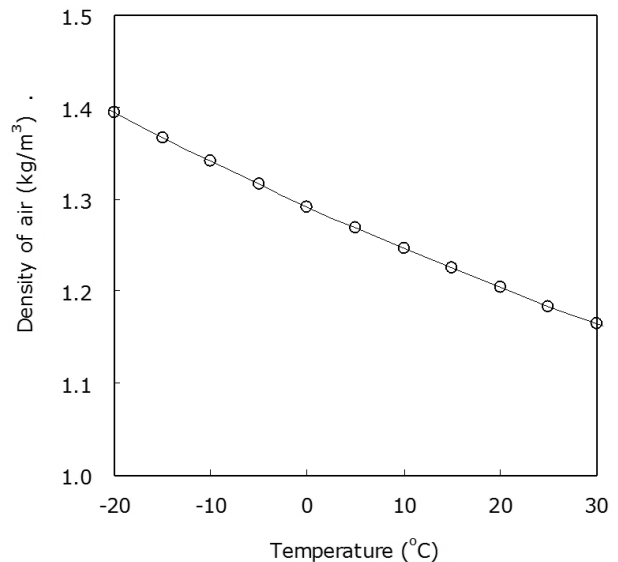


Fig. 3. Density of Air with Atmospherc Temperature

밀도는 Fig. 3과 같이 온도의존성을 갖는다.

Eq. (5)를 Eq. (4)에 대입하면 Darcy의 법칙은 Eq. (6)과 같이 재현된다.

$$Q = A \frac{\kappa \rho g}{\mu} \frac{\Delta h}{L} \quad (6)$$

해석적 관점에서 투과계수의 모델링은 대단히 복잡하므로, 이를 단순화하고자 직경 d , 길이 L 을 갖는 모세관 튜브 형태의 관로로 이상화하여 구하면 전도성(conductivity)으로부터 유체의 전체 흐름량 Q_{cap} 은 다음과 같다.

$$Q_{cap} = - \frac{\pi d^4}{128 \rho \nu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (7)$$

여기서, ρ : 공극내 유체의 밀도, ν : 공극내 유체의 점성, $\partial p/\partial x$: 압력구배이다. 경화된 시멘트 구조체에서 압력구배와 특유량간의 관계는 Eq. (8)과 같다.

$$q = - \frac{(d^2 + d_o^2)}{64 \rho \nu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (8)$$

여기서, 외부의 수분이 차단된 조건에서 기체의 동점성 μ 와 점성률 ν 의 관계로부터 시멘트 페이스트의 기체 투기계수는 Eq. (9)와 같으며, 여기서, κ_g 는 고유 투기계수, r_g 는 기체의 비중이다. 기체의 투기성은 시멘트의 수화과정에서 공극이 수분에 의해 채워진 이외의 공극에 의존하므로, 모세관 공극내 존재하는 기체의 체적량 Fig. 2를 참고하면, 수분에 의해 채워진 공극 직경 d_w 와 공극 전체직경 d_{pore} 사이 영역에서 기체의 투기성이 발생한다고 간주할 수 있다(Fig. 1).

$$K_g = \frac{\kappa_g r_g}{\mu_g} \frac{1}{\tau_T} = \frac{(d_w^2 + d_{pore}^2) r_g}{64 \mu_g} \frac{1}{\tau_T} = \frac{(d_w^2 + d_{pore}^2) g}{64 \nu_g} \frac{1}{\tau_T} \quad (9)$$

2.2.2 콘크리트의 기체 투기계수

복합재료로 구성되어 있는 콘크리트의 구성 특성을 단순화하기 위하여, 시멘트 페이스트와 골재, 각각의 재료가 콘크리트의 투기계수에 미치는 영향을 정량적으로 표현할 필요가 있다.

Hooke의 탄성법칙과 Darcy 법칙을 상사성을 도출하고 이를 근거로 투수 투기성에 적용할 수 있도록 Hirsch의 모델을 다음과 같이 변형하였다.

$$K_{com}(\alpha) = \frac{K_{cp}(\alpha) [\zeta \cdot K_{cp}(\alpha) + (1-\zeta)K_{agg}]}{K_{cp}(\alpha)\lambda + (1-\lambda) [\zeta \cdot K_{cp}(\alpha) + (1-\zeta)K_{agg}]} \quad (10)$$

여기서, K_{cp} 는 시멘트 페이스트의 투기계수, K_{agg} 는 골재의 투기계수이며, λ 와 ζ 는 콘크리트내의 골재체적량 V_{agg} 에 의해 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\lambda = 1 - \zeta = \sqrt{V_{agg}} \quad (11)$$

위 식에서 시멘트 페이스트의 투기계수는 시멘트의 수화단계별로 고려되며 골재의 투기계수 K_{agg} 는 1×10^{-11} m/s로 간주하였다 (FORGE, 2011).

2.3 탄산화된 시멘트 콘크리트의 공극감소량

탄산화된 콘크리트의 투기계수를 구하기 위해서는 탄산화로 인한 기체의 공극 변화율을 알아야 한다. Papadakis et al. (1991)은 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.

$$\Delta\phi_c = [CH] \Delta \overline{V_{CH}} + [C-S-H] \Delta \overline{V_{CSH}} \quad (12)$$

여기서, $\Delta \overline{V_{CH}} = 3.85 \times 10^{-6}$ m³/mol, $\Delta \overline{V_{CSH}} = 15.39 \times 10^{-6}$ m³/mol이다.

위 식은 탄산화된 콘크리트에서의 감소 공극량으로서 시멘트 페이스트에 대한 감소 공극량 $\Delta\phi_c(cp)$ 은 단위체적 콘크리트내 시멘트 페이스트량 V_{cp} 을 고려하여 다음과 같다.

$$\Delta\phi_c(cp) = V_{cp} \{ [CH] \Delta \overline{V_{CH}} + [C-S-H] \Delta \overline{V_{CSH}} \} \quad (13)$$

최종적으로 탄산화 유무에 따른 시멘트 페이스트는 다음과 같다.

$$\phi_c = \phi - \Delta\phi_c \quad (14)$$

여기서, ϕ_c : 탄산화된 시멘트 페이스트의 공극량, ϕ : 비탄산화된 시멘트 페이스트의 공극량이다.

탄산화된 시멘트 페이스트의 공극량은 시멘트 콘크리트의 공극 시스템 함수식에 재차대입하여 공극분포를 얻어낼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시멘트 콘크리트의 기체의 투기계수

Fig. 4는 본 연구에서 제안한 해석 방법에 의하여 물-시멘트비를 변수로 시간경과에 따른 시멘트 페이스트의 기체 투기계수의 변화율을 계산한 결과이다. 물-시멘트비에 따라 뚜렷한 추이를 보였으며, 시멘트의 수화가 진행됨에 따라 재령초기부터 꾸준히 가파르게 감소하는 추세를 보였다. 그러나 시간이 경과함에 따라 투기계수의 감소율이 다소 완화되고 있는 것을 확인할 수 있다. 재령 4일까지는 물-시멘트비의 변화에 따른 추이가 뚜렷하지 않았는데 이는 초기재령에서는 물-시멘트비에 따른 뚜렷한 차이를 보일 정도로 미세구조의 발현이 이루어지지 않고 미성숙한 공극 시스템으로 인하여 기체가 빠르게 통과하기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 재령 4일이 경과하면서는 공극구조가 뚜렷하게 차이를 보임에 따라 투기계수에도 커다란 영향을 보이고 있음을 알 수 있다.

시간경과에 따른 기체 투기계수는 시간이 경과하면서 감소하는 추이가 비교적 완만하지만 꾸준히 감소추세를 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 물-시멘트비의 변수를 더욱 다변화하여 재령 28일에 대한 시멘트 페이스트의 기체 투기계수를 보인 결과이다. Fig. 4보다 더욱 뚜렷하게 물-시멘트비가 클수록 투기계수도 큰폭으로 상승하는 추이를 보였다. 콘크리트의 기체 투기계수는 물-시멘트비 0.55를 초과하면서 뚜렷히 증가하였고, 0.60을 초과하면서는 더욱 급격히 상승하였는데 이는 기존의 실험결과와 유사한 결과이다 (Mindness et al., 2003). 또한, Verbeck (1975)의 연구에 의하면 물-시멘트비 0.40인 콘크리트에 대비하여 0.60인 콘크리트가 약

11배 가량 상승하는 것으로 나타났는데, 본 연구는 약 15배, 물-시멘트비 0.65인 것과 대비해서는 약 30배 이상의 상승률을 보였다.

Fig. 6은 Fig. 4에서 구한 시멘트 페이스트의 기체 투기계수를 기초로 콘크리트의 기체 투기계수를 산정한 결과이다. 초기단계에서 콘크리트의 투기계수는 물-시멘트비에 따른 큰 차이 없이 대체적으로 일정하지만, 재령이 경과함에 따라 물-시멘트비에 따라 뚜렷한 차이는 보였는데 이는 저자가 이전에 연구한 투수계수 해석 결과와도 동일한 결과이다(Yoon, 2009). 이것은 초기 수화단계 수일동안 공극구조가 뚜렷하게 형성되지 않다가 이후 물-시멘트비에 따라 뚜렷한 미세구조 발현 특성을 갖는 시멘트 페이스트의 특성과 시간의 변화추이를 갖지 않는 골재의 특성에 기인한 것으로 생각된다

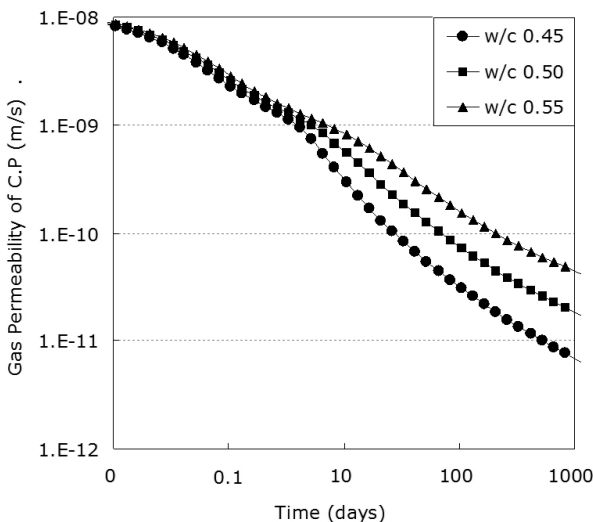


Fig. 4. Gas Permeability Coefficient of Cement Paste for Three Different w/c Ratios, Based on the Effect of the Time Evolution on the Micro-Structural Development

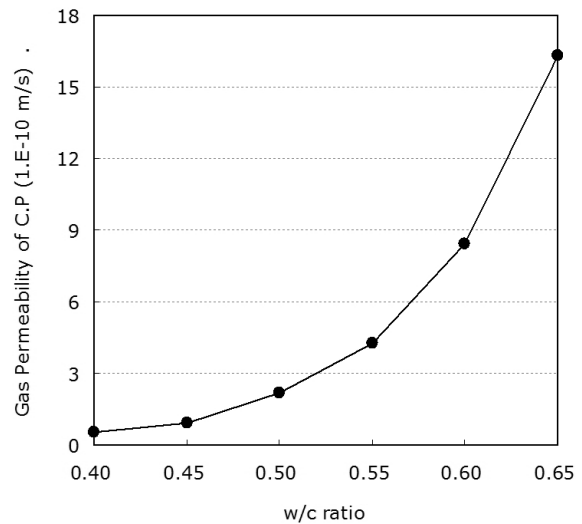


Fig. 5. Gas Permeability Coefficient of Cement Paste with Various w/c Ratios at 28 Days

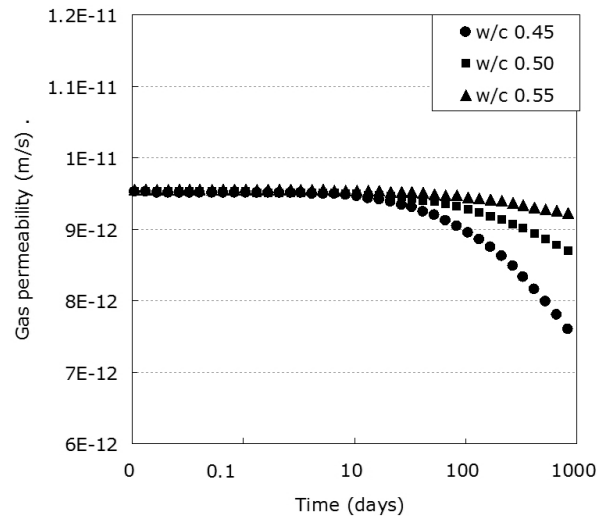


Fig. 6. Gas Permeability Coefficient of Concrete for Three Different w/c Ratios

다. 즉, 초기수화 단계에서 물-시멘트비에 따른 미세구조 발현이 뚜렷하지 않은 시멘트 풀, 그리고 시간과 무관하게 일정한 품질을 갖는 골재, 양측의 영향에 의하여 물-시멘트비에 따른 차이가 분명하지 않았으나, 수화가 진행되면서 시멘트 페이스트에서 물-시멘트비에 따른 미세구조 발현 차이를 보이면서 투기계수도 같은 추이를 갖는 것으로 생각된다.

3.2 탄산화된 시멘트 콘크리트의 기체 투기계수

탄산화가 콘크리트의 기체 투기계수에 미치는 영향을 고찰하고자, 탄산화로 인한 시멘트 페이스트의 공극 변화율을 계산하여 변화된 공극 구조체내의 기체 투기계수를 Fig. 7에 보이고 있다. 예상했듯이, 탄산화로 인한 공극 감소는 투수계수의 감소를 초래하

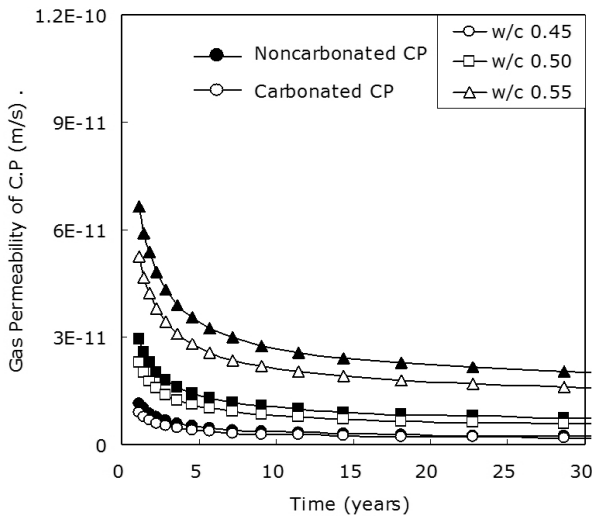


Fig. 7. Gas Permeability Coefficient of Carbonated Cement Paste

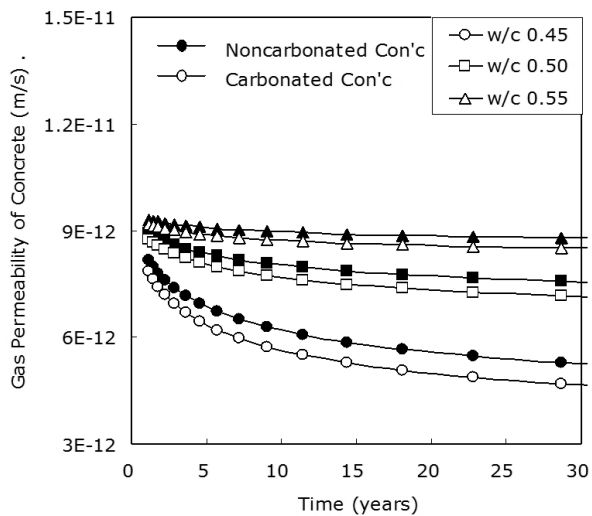


Fig. 8. Gas Permeability Coefficient of Carbonated Concrete

였다. 이는 시멘트 페이스트가 경화된 후에도 지속적으로 미세조직이 발현되어 수분 침투 제어효과가 증진될 뿐 아니라 안정성이 떨어지는 알칼리성 수화생성물이 낱습 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 보였다.

Fig. 8은 탄산화된 콘크리트의 투수계수에 대한 해석내용을 실험결과와 비교하여 보인 것이다. 앞서 비탄산화가 된 시멘트 콘크리트의 경우와 유사하게, 시멘트 페이스트가 콘크리트보다 투기계수가 작은 결과를 보였다.

본 연구결과는 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트에 국한된 결과로서, 혼합시멘트 콘크리트의 경우는 투수계수에 영향을 미치는 유효 공극직경의 크기가 혼화재 종류 및 치환율에 의존하기 때문에 향후, 혼화재 사용에 따른 투기계수의 산출 및 탄산화로 인한 투기계수의 감소율에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

3.3 투수계수와 투기계수의 비교

기체 투기계수와 액체 투수계수는 공통적으로 공극내 수분과 공극 직경에 의해 지배된다. 즉, 다공질성 재료가 완전히 건조되어 있다면 Eq. (15), 일정부분의 수분이 있다면 Eq. (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$K_g(RH=0) \approx K_w \quad (15)$$

$$K_g(RH>0) < K_w \quad (16)$$

그런데, 두계수에 상이한 영향을 미치는 지배요인도 있는데, Klinkenberg (1941)은 투기계수는 기체의 성분 및 인가된 압력의 평균치와 연관되나, 투수계수는 이와 무관하다고 제안하였다. 두계수의 상관성을 구명하고자, 본 연구결과를 동일한 수분 및 동일 크기의 공극 직경에서 투수계수 해석 기법 개발에 대한 저자의 기존 연구결과(Yoon, 2009) 와 상호 비교하였다.

Fig. 9는 시멘트 경화체에서의 양 계수를 비교한 결과로서 투기계수가 투수계수보다 다소 크게 나타났다. 이에 대하여 Klinkenberg (1941)은 미끌림 흐름도(slip flow)로서 설명을 하였다. 이는 기체와 액체의 흐름은 공극벽 표면에 대하여 다른 저항성의 차이 때문에 기인한다. 즉, 물질 분자의 농도가 기체보다 액체에서 매우 높으므로, 액체의 흐름에 대한 저항성도 높기 때문에 기인한 현상으로 사료된다(Tang and Nilsson, 1992). 이 저항은 공극이 작을수록 더욱 커지게 되는데 Eqs. (17) and (18)과 같이 공극직경의 크기에 의존된다(RILEM Report12, 1997). 이는 앞서 제시한 Eq. (16)의 관계와 상반되는 결과로서, 투수계수와 투기계수의 상관성은 시멘

트 및 콘크리트에서 수분량보다는 공극 직경이 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

$$\text{큰 공극 직경인 경우 } K_g \approx K_w \quad (17)$$

$$\text{작은 공극 직경인 경우 } K_g > K_w \quad (18)$$

Klinkenberg 효과의 다공질성 재료의 미끌림 흐름차이를 토대로, 기체 투기계수와 액체 투수계수의 상관성을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K_g = K_w \left(1 + \frac{4c\ell}{r} \right) \quad (19)$$

여기서, ℓ : 기체분자의 자유통로 평균길이(m), r : 공극반경(m), c : 상수이다. Furbish (1997)에 의하면 기체분자의 자유통로 평균 길이는 다음과 같다.

$$\ell = \frac{\kappa_B}{4\pi\sqrt{2}r^2} \frac{T}{p} \quad (20)$$

여기서, κ_B : Boltzmann 상수(J/K), p : 기체의 평균압력(Pa), T : 온도(K)이다. Eq. (19) 및 Eq. (20)로부터 기체 투기계수와 액체 투수계수의 상관성은 다음과 같다.

$$K_g = K_w \left(\frac{ck_B}{\pi\sqrt{2}r^3} \frac{T}{p} \right) \quad (21)$$

공극반경과 기체 공극압력이 작고 기체 온도가 높으면 투기계수는 투수계수보다 매우 크게 되며, 공극압력이 무한대로 가해지면 투수계수는 유사하게 된다.

한편, Klinkenberg 미끌림계수(slip coefficient) b 는 투수계수와 log함수 관계를 갖는데(Persoff and Hulen, 2001), 다음과 같다.

$$b = \frac{ck_B}{\sqrt{2}\pi r^3} \quad (22)$$

Eq. (22)를 Eq. (21)에 대입하면 투기계수와 투수계수의 상관식은 다음과 같이 선형관계를 갖는다.

$$K_g = K_w \left(1 + \frac{b}{p} \right) = K_w \cdot \alpha \quad (23)$$

Fig. 9에 의하면 시멘트 페이스트에서 물-시멘트비와 무관하게 투수계수와 투기계수의 관계는 선형관계가 성립하였는데 이는 Eq. (23)의 Klinkenberg의 선형식과 같은 결과를 보인 것이다. Fig. 9에서 두 계수의 상관성에 대한 선형식은 다음과 같다.

$$K_g = 4.345 K_w \quad (24)$$

Fig. 10은 콘크리트에서 양계수를 비교한 결과이다. Fig. 9와 상이하게 Eq. (23)의 Klinkenberg 효과가 성립되지 않았다. 즉, 시멘트 페이스트의 경우처럼 투기계수가 투수계수보다 큰 경향을 보인 것은 동일하나 양계수의 상관관계는 다소 이중선형함수 형태

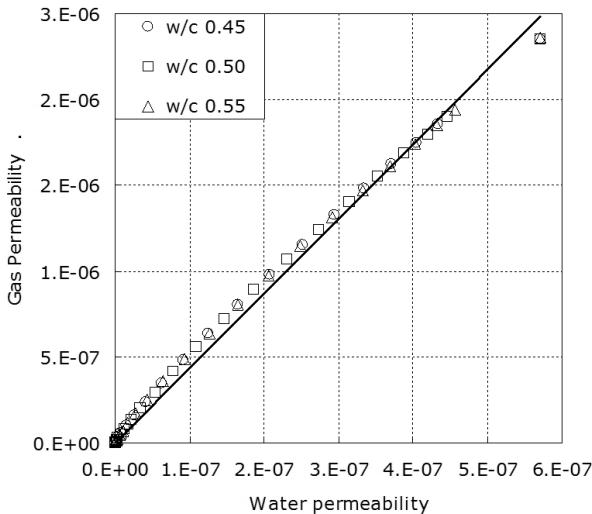


Fig. 9. Relationship Between Gas Permeability Coeff. and Water Permeability Coeff. for Cement Paste

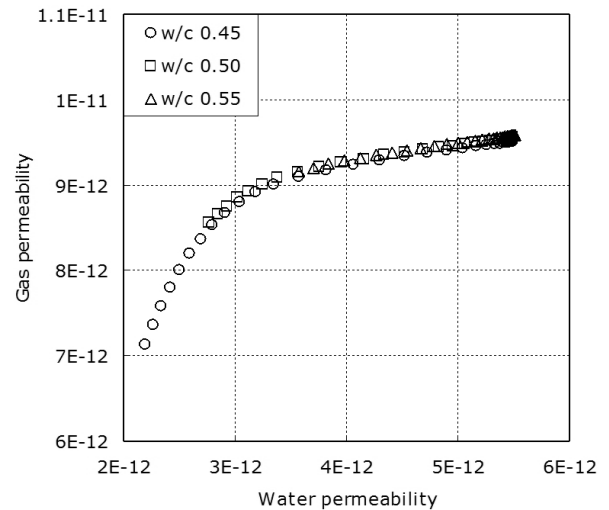


Fig. 10. Relationship Between Gas Permeability Coeff. and Water Permeability Coeff. for Concrete

를 보였다. 이에 대한 이유는 Klinkenberg 효과가 다공성 재료에 적용할 수 있는 것으로 콘크리트내 존재하는 골재를 실질적으로 다공성 재료로 간주하기에는 한계가 있기 때문이다. 또한 해석시 이용된 골재의 투수계수와 투기계수가 동일 골재 물성에 대한 두계수의 상관성 없이 문헌을 참고로 한 임의치를 입력하여 콘크리트의 투수계수와 투기계수의 관계에 영향을 미친 것으로 생각된다. 향후, 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

4. YOON's test에 의한 실험 검증

4.1 실험방법

4.1.1 탄산화 촉진방법

실험에 사용된 콘크리트 배합표는 Table 1과 같으며, 동일배합·동일 시험항목별로 시멘트 페이스트는 1개씩, 콘크리트는 3개씩 시험편을 각각 제조하였다. 굵은골재 최대치수는 16 mm인 천연골재로서 비중 2.7이며, 모래는 비중 2.63이다. 시험체는 보통포틀랜드 시멘트를 사용하여 직경 100 mm 및 두께 5 mm인 디스크 모양을 가지며, 기중양생하였다.

Table 1. Mixing Proportion of Concrete

Air (%)	Slump (mm)	W/C	Unit weight (kg/m ³)			
			Water	Cement	Sand	Gravel
4.5±1.5	150±10	0.45	185	411	706	1001
4.5±1.5	150±10	0.50	185	370	720	1021
4.5±1.5	150±10	0.55	185	336	732	1038

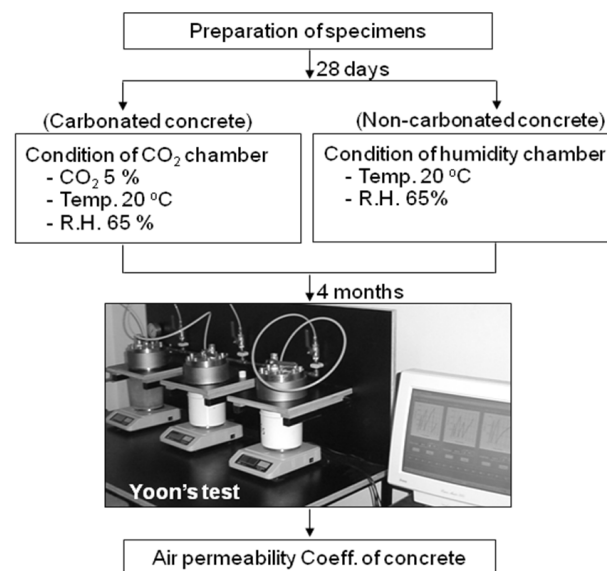


Fig. 11. Experimental Procedure for Acquisition of Gas Permeability Coefficient of (Non)Carbonated Cementitious Materials

시험체의 세부적 탄산화 촉진조건 및 실험방법은 Fig. 11과 같다. 이때 탄산화된 시험편은 촉진제령 4달후, 페놀프탈레인 용액을 살포하여 시험편 전체에 탄산화가 완전히 진행되었는지를 확인하였다.

4.1.2 YOON's test에 의한 투기계수 실험

저자는 압력구배에 따른 콘크리트의 투수계수, 기체 투기계수, 급속 염수침투 실험이 가능한 새로운 실험장치 YOON's test를 개발하였다. YOON's test에 의한 가압은 시멘트 페이스트의 미세 구조에 손상을 일으킬 수 있으므로 평균 0.65 MPa의 공기압으로 가압한 후, 가압력과 시험편 반대편의 기압이 모니터링되며 사용된 투기셀은 Fig. 12와 같다. 투과된 공기량으로부터 투기율 Q 는 다음과 같다.

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} (m^3/s) \quad (25)$$

여기서, ΔV : 기체의 미세증가량(m^3), Δt : 통과된 기체량이 추정되기까지 시간간격(s)이다.

기체의 미세증가량을 직접적으로 측정할 방법은 없으므로, 간접적인 방법에 의해서 기체의 통과량을 추정한다. 즉, 가압력이 인가된 시험편 상면의 반대편 하면에 일정체적의 공기실(air reservoir)를 두고, 가압력이 인가된 상태에서 반대편 하면의 압력 P_2 을 모니터링 하여 더 이상 압력이 증가하지 않을 시까지 실험이 지속된다. 압력 증가분이 없이 일정할 때 시간에 따라 통과된 기체가 공기실을 다 채운 것으로 인정하고 이때, 기체의 통과량은 공기실의 체적으로 간주한다. 시험편의 상면에는 가압력 P_1 을 가하고, 시험편을 통과하고 하면에 작용하는 압력 P_2 를 측정하여 압력차이 ΔP 를 얻고, 압력구배 차이는 Eq. (26)과 같이 구형된다.

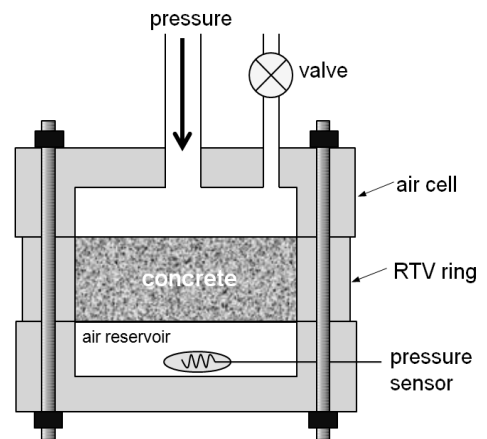


Fig. 12. Air Cell of YOON's Test

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (26)$$

γ 는 공기의 단위중량으로서, 20°C일 때 1.25 kg/m³을 적용하였다. 측정된 실험결과로부터 Eq. (6)의 Darcy's 법칙을 역산하여 투기계수를 산정할 수 있다.

4.2 실험 결과 및 검증

Fig. 13은 재령 165일이 경과한 시멘트 페이스트의 투기계수를 실험 및 해석 결과를 각각 비교한 결과이다. 실험결과가 해석치보다 높은 결과를 보이고 있다. Fig. 14는 같은 재령 165일째에 완전히

탄산화된 시멘트 페이스트의 투기계수를 실험 및 해석결과를 상호 비교한 결과이다. Fig. 13과는 반대로 해석치가 실험결과보다 높은 추이를 보이고 있다. 따라서 Fig. 13 및 Fig. 14로부터 본 해석방법은 비탄산화된 시멘트 페이스트를 과소 평가하며, 탄산화된 시멘트 페이스트는 과대 평가되는 경향이 있는 것으로 생각된다.

Fig. 15는 본 연구방법에 의하여 계산된 시멘트 페이스트의 투기계수를 본 실험결과와 비교하여 시간경과에 따라 나타낸 것이며, Fig. 16은 물-시멘트비 0.50인 콘크리트의 투기계수에 대하여 비교한 결과이다. 콘크리트에서 해석결과는 시간에 따라 뚜렷하게 감소하는 것이 반영되지는 못하였다. 또한, 감소추세의 비율은

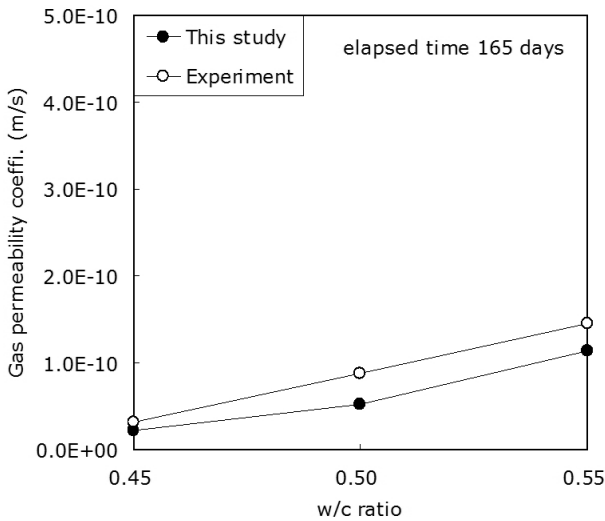


Fig. 13. Comparison of Permeability of This Analysis & Experimental Data of Permeability Testing for Non-Carbonated Cement Paste

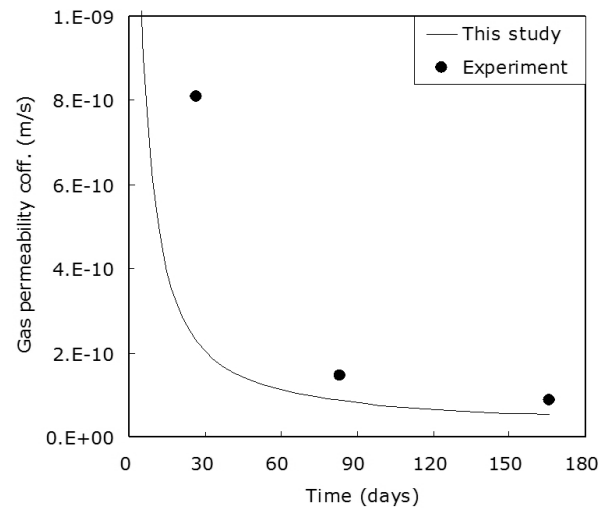


Fig. 15. Comparison of This Analysis & Experimental Data for Time Evolution of Permeability Coefficient of Cement Paste with w/c Ratio 0.50

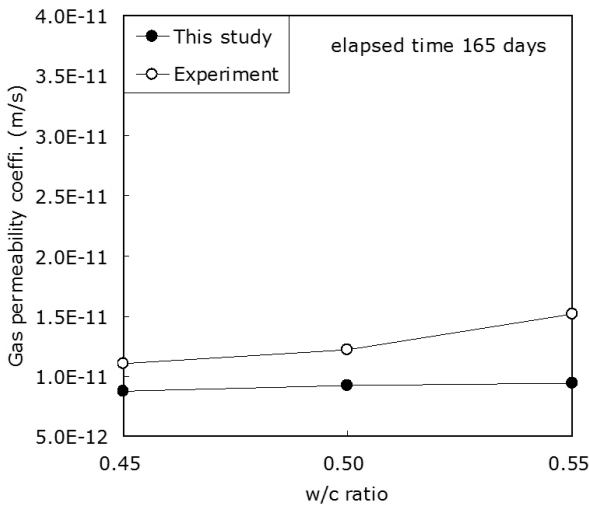


Fig. 14. Comparison of Permeability of This Analysis & Permeability Testing for Carbonated Cement Paste

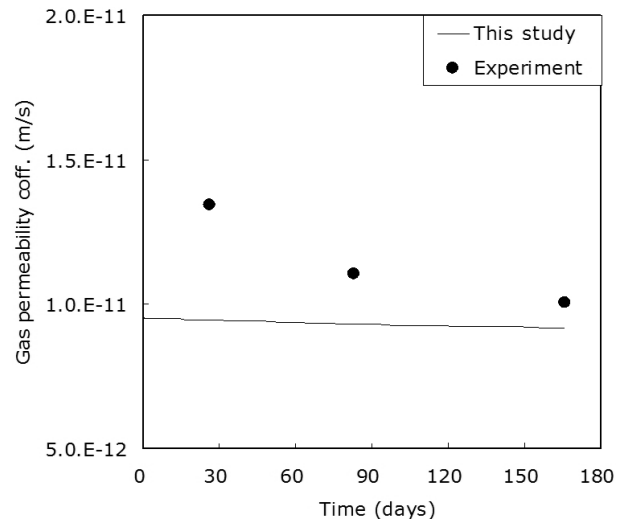


Fig. 16. Comparison of This Analysis & Experimental Data for Time Evolution of Permeability Coefficient of Concrete with w/c Ratio 0.50

대체로 일치하는 경향이 있으나, 실험결과치가 본 연구의 해석결과보다 평균적으로 높은 추이를 보였다. 해석과 실험이 차이가 있는 가장 큰 이유는 공극간의 접촉각에 따른 상호 연결성, 이로 인한 굴곡특성의 변화 등과 같이 해석시 반영하지 못했던 영향요소들이 존재하여, 해석때 고려된 것보다 실제 미세구조 특성이 더욱 복잡하기 때문인 것으로 생각된다. 또한, 투기성 실험에서 실험을 용이하게 하고 시간을 절약하고자 시험편의 두께를 5 mm로 하여 골재와 시멘트간의 경계영역 ITZ효과에 의하여 기체가 빠르게 통과됨에 따른 오류도 있다고 판단된다.

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

5. 결론

본 연구는 시멘트 콘크리트의 배합조건 및 수화도, 미세구조에 기인하여 시멘트계 재료의 기체 투기계수를 예측할 수 있는 기법을 개발하였다. 본 해석결과는 시멘트 콘크리트의 배합조건, 골재량 등을 고려하여 투기계수를 배합 및 시간의 함수조건에 따라 효과적으로 추정할 수 있었다.

- (1) 투기 계수 모델은 수화진행에 따른 공극감소로 인하여 시간이 경과함에 따른 투기 계수의 감소 및 물-시멘트비 추이를 효과적으로 표현할 수 있었다. 또한, 탄산화로 인한 공극 변화량을 추정하여 본 해석기법에 활용하면, 탄산화된 시멘트 콘크리트의 기체 투기계수를 해석할 수 있었다.
- (2) 탄산화로 인한 콘크리트의 공극 변화량을 토대로 탄산화된 콘크리트의 투기계수를 계산할 수 있었다. 보통 콘크리트는 탄산화로 인하여 공극이 감소되며 이는 투기계수의 감소를 초래하였다. 이는 물-시멘트비에 따라서도 일정한 추이를 보였다.
- (3) 투수계수와 투기 계수의 상관성을 얻기 위하여 비교한 결과, 시멘트 페이스트에서 투기계수가 투수계수보다 4.35배 높게 선형관계를 갖어서 Klinkenberg효과를 입증할 수 있었다. 그러나, 콘크리트에서는 비선형 관계를 보였다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원하에 수행되었음(NRF-2013R1A1A2060227).

References

- Ahmad, S., Azad, A. K. and Loughlin, K. F. (2012). "Effect of the key mixture parameters on tortuosity and permeability of concrete." *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 10, pp. 86-94.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*, American Elsevier Publishing Co. Ltd., New York.
- Dias, W. P. S. (2000). "Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation." *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1255-1261.
- FORGE (2011). *Results of the Tests on Concrete*, Technical Report CIEMAT/DMA/2G207/1/12, Euratom 7th Framework Programme Project, Madrid.
- Furbish, D. J. (1997). *Fluid Physics in Geology; An Introduction to Fluid Motions on Earth's Surface and within its Crust*, Oxford University Press, New York.
- Hirsch, T. J. (1962). "Modulus of elasticity of concrete affected by elastic moduli of cement paste matrix and aggregate." *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 59-12, pp. 427-451.
- Katz, A. J. and Thompson, A. H. (1986). "Quantitative prediction of permeability in porous rock." *Physical Review B.*, Vol. 34, No. 11, pp. 8179-8181.
- Klinkenberg, L. J. (1941). *The Permeability of Porous Media to Liquids and Gases*, Drilling and Productions Practices, American Petroleum Institute.
- Koenders, E. A. B. (1997). *Simulation of Volume Changes in Hardening Cement-Based Materials*, Ph D Dissertation of Delft University of Technology, The Netherlands.
- Neithalath, N., Weiss, J. and Olek, J. (2003). "Enhanced porosity of concrete: Permeability, Electrical Conductivity and Acoustic Performance." *ACI Fall Convention*, Boston.
- Ngala, V. T. and Page, C. L. (1997). "Effect of carbonation on pore structure and diffusion properties of hydrated cement pastes." *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 7, pp. 995-1007.
- Nokken, M. R. and Hooton, R. D. (2008). "Using pore parameters to estimate permeability or conductivity of concrete." *Materials and Structures*, Vol. 41, No. 1, pp. 1-16.
- Papadakis, V. G. and Vayenas, C. G. (1991). "Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete." *ACI Materials Journal*, Vol. 8, No. 2, pp. 186-196.
- Persoff, P. and Hulen, J. B. (2001). *Hydrologic Characterization of Reservoir Metagraywacke from Shallow and Deep Levels of the Geysers Vapor-dominated Geothermal System, California, USA*, *Geothermics*, 30, 169-192.
- Peter, A. C., Hanaa, E. S. and Ibrahim, G. S. (1999). "Permeability and pore volume of carbonated concrete." *ACI Materials Journal*, May-June, pp. 378-382.
- Picandet, V., Rangeard, D., Perrot, A. and Lecompte, T. (2011). "Permeability measurement of fresh cement paste." *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, No. 3, pp. 330-338.
- RILEM Report 12 (1997). *Peromance Criteria for Concrete Durability*, Kropp, J. Hilsdorf, H.K.(Eds.), E & FN Spon, 24-25.

- Samson, E., Marchand, J. and Snyder, K. A. (2003). "Calculation of ionic diffusion coefficients on the basis of migration test results." *Materials and Structure*, Vol. 36, No. 257, pp. 156-165.
- Tang, L. and Nilsson, L.-O. (1992). "A study on the quantitative relationship between permeability and pore size distribution of hardened cement pastes." *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, No. 4, pp. 541-550.
- Van Breugel, K. (1991). *Simulation of Hydration and Formation of Structures in Hardening Cement-Based Materials*, Ph.D Dissertation of Delft University of Technology, The Netherlands.
- Verbeck, G. J. (1975). "Corrosion of metals in concrete." *ACI SP49*, Special Publication, pp. 21-28.
- Yoon, I. S. (2009). "Analytical modeling for microstructural permeability coefficient of (Non)carbonated concrete." *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 3, pp. 255-264 (in Korean).
- Yoon, I. S., Kim, E. K. and Lee, C. S. (2007). "Material modeling of concrete for chloride diffusivity considering carbonation of concrete." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 4-A, pp. 617-625 (in Korean).