

실리카폼 혼입 콘크리트의 확산계수 및 투수계수의 미시학적 추정

Micromechanics-based evaluation of diffusivity and permeability of concrete containing silica fume

장 중 철* 송 하 원** 변 근 주**
Jong-Chul Jang Ha-Won Song Keun-Joo Byun

ABSTRACT

Silica fume influences concrete diffusivity and permeability as well as strength by densifying the microstructure of the interfacial transition zone (ITZ) of high strength concrete, by reducing the capillary porosity of cement paste and by producing less diffusible and permeable pozzolanic CSH gel than CSH gel of conventional cement hydration. This paper presents a procedure to predict the chloride ion diffusivity and water permeability of the high strength concrete containing silica fume. Water binder ratio, silica fume addition, degree of hydration and volume fraction of aggregates are considered as the major factors influencing concrete diffusivity and permeability in the procedure. Analytical results using the procedure are shown and verified with other data.

1. 서론

본 연구에서는 콘크리트의 내구성에 있어서의 중요한 지표인 확산계수와 투수계수를 미시학적인 방법을 통해서 도출하고자 한다. 콘크리트의 확산성과 투수성은 미시구조상의 공극구조에 의해 크게 좌우되므로 미시구조의 특성을 잘 알아야 한다. 콘크리트는 미시적인 관점에서 보면 시멘트, 골재, 물, 미시공극 그리고 골재와 시멘트 페이스트의 경계면인 천이영역 (Interfacial Transition Zone : ITZ)을 가진 복합체이다. 실리카폼을 치환하게 되면 상대적으로 미세한 실리카폼 입자가 공극을 매워주어 공극구조를 치밀하게 하고, 포졸란 CSH를 생산하여 콘크리트의 확산성과 투수성에 많은 영향을 주게 된다. 따라서 본 연구에서는 실리카폼을 치환하였을 경우의 공극구조와 천이영역의 변화를 예상하여 미시학적인 방법을 통해서 확산계수와 투수계수를 추정하였다.

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 석사과정

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

2. 콘크리트 확산계수의 산출

2.1 모세공극률의 계산

본 논문에서 사용된 시멘트 수화모델에서는 시멘트입자를 모두 C₃S로 구성되어있는 것으로 가정하였으며, 이 모델에서는 수화물의 종류를 CSH와 CH 두 가지로 가정하고 있다. 시멘트 페이스트내의 모세공극률을 구하기 위해서 수화도에 따라 다음과 같은 두 가지 경우를 고려할 수 있다.

(1) 먼저 수화도가 낮아서 미수화 C₃S와 미수화 실리카폼이 남아있는 경우($\alpha \leq \alpha_c$)의 모세공극률은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \phi_{\text{①}} &= 1 - V_{\text{solid①}} = 1 - (V_{\text{pozzolanic hydrated products}} + V_{\text{unreacted C}_3\text{S}} + V_{\text{unreacted SF}}) \\ &= 1 - \left(\frac{2.2(1-\text{SF})}{2.2+\text{SF}} \alpha \beta' f + \frac{2.2(1-\text{SF})}{2.2+\text{SF}} (1-\alpha) f + \left[\frac{3.2\text{SF}}{2.2+\text{SF}} - \gamma \times \frac{2.2(1-\text{SF})}{2.2+\text{SF}} \right] f \right) \end{aligned} \quad (1)$$

이때, α 는 수화도, β 는 C₃S 수화물의 부피팽창계수($\beta=2.31$), β' 은 CH가 실리카폼과 포졸란반응할 때의 C₃S 수화물의 부피팽창계수($\beta'=3.048$), f 는 결합재가 전체 페이스트에서 차지하는 부피비, γ 는 단위 C₃S에 의해 만들어진 CH와 반응하는데 필요한 실리카폼의 부피비($\gamma=0.293$)이다.

(2) 수화도가 어느 정도 높아서 미수화 실리카폼이 남아있지 않은 경우($\alpha > \alpha_c$)의 모세공극률은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \phi_{\text{②}} &= 1 - V_{\text{solid②}} = 1 - (V_{\text{pozzolanic hydrated products}} + V_{\text{unreacted C}_3\text{S}} + V_{\text{nonpozzolanic hydrated products}}) \\ &= 1 - \left(\frac{2.2(1-\text{SF})}{2.2+\text{SF}} \alpha_c \beta' f + \frac{2.2(1-\text{SF})}{2.2+\text{SF}} (1-\alpha) f + \frac{2.2(1-\text{SF})}{2.2+\text{SF}} \beta (\alpha - \alpha_c) f \right) \end{aligned} \quad (2)$$

이때, $\phi_{\text{①}} = \phi_{\text{②}}$ 를 만족할 때의 수화도가 한계수화도 α_c 이며, $\alpha_c = \frac{3.2\text{SF}}{0.6446(1-\text{SF})}$ 이다. 한편 천이영역에서는 벽효과에 의해 모세공극률이 높아지므로 천이영역의 모세공극률은 위에서 구한 모세공극률에 기존의 실험자료로부터 얻어진 모세공극률 증가분 δ 를 더하여 얻어진다.

2.2 시멘트 페이스트의 상대확산계수의 도출

시멘트 페이스트의 상대확산계수(D/D₀)를 모세공극률과 실리카폼 치환율의 함수로 나타내었다.

$$\frac{D}{D_0}(\phi, \text{SF}) = \frac{0.0004}{\beta(\text{SF})} + \frac{0.03}{\beta(\text{SF})} \phi^2 + 1.7(\phi - \phi_c)^2 H(\phi - \phi_c) \quad (3)$$

이때, D는 시멘트 페이스트의 염화이온 확산계수이며, D₀=1.81×10⁻⁹m²/s는 물에서의 염화이온 확산계수이다. $\phi_c(=0.17)$ 는 한계모세공극률이며, H($\phi - \phi_c$)는 $\phi - \phi_c > 0$ 일 때 1이고, $\phi - \phi_c < 0$ 일 때 0이다. 또한 $\beta(\text{SF})$ 는 시멘트의 수화에서 생기는 CSH보다 투수계수가 낮은 포졸란반응에 의한 CSH의 생성

에 따른 시멘트 페이스트의 투수계수 감소를 나타내는 요소이며, $0 \leq SF \leq 2.5$ 일 때는 1, $SF > 12.0$ 일 때는 9, $2.5 < SF \leq 12.0$ 일 때는 $\beta(SF) = 1 - 48.6 \cdot SF + 2330 \cdot SF^2 - 11400 \cdot SF^3$.

한편 식(1)과 (2)에서 구한 모세공극률을 식(3)에 대입하면 페이스트의 상대확산계수(D_{bulk}/D_0)와 천이 영역의 상대확산계수(D_{ITZ}/D_0)를 구할 수 있다.

2.3 콘크리트 확산계수의 산출

콘크리트의 상대확산계수(D_{conc}/D_{bulk}) 추정을 위해 DEMT(Differential effective medium theory)⁽¹⁾를 사용하였다. 골재와 천이영역을 평균화한 확산계수가 D_p 인 입자를 가정하고, 그 입자가 확산계수 D_{bulk} 인 결합재에 묻혀있다면, 콘크리트의 유효확산계수를 계산하기 위한 방정식을 도출하기 위해 희석한계(dilute limit)를 사용한다. 희석한계에서는 골재부피비 V_{agg} 가 충분히 작아서 골재들간에 서로 영향을 미치지 않는다. 이때, 천이영역의 두께는 $15\mu m$ 로 가정하였으며, 콘크리트의 유효확산계수 D 는 다음과 같은 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$D = D_{bulk} + D_{bulk} m V_{agg} + O(V_{agg}^2) \quad (4)$$

이때 골재입자간의 상호작용을 고려한 V_{agg}^2 항은 희석한계에서는 무시될 수 있고, m 은 희석한계의 기울기 혹은 고유 확산계수라고 불리는 무차원 계수이며, 식(5)을 Gaussian quadratures에 의한 수치적분을 하면, 전체 골재에 대해서 평균화된 m 값을 얻을 수 있다.

$$- \int_{D_{bulk}}^D \frac{dD'}{m(D')D'} = \int_1^\beta \frac{d\beta'}{\beta'} = \ln(\beta) \quad (5)$$

이때 β 은 유효입자모델에서의 결합재의 부피비이며, D' 은 유효골재입자의 확산계수이다. 여기에서 구한 m 값을 식(4)에 적용하면 다음과 같은 콘크리트의 상대확산계수 추정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{D_{conc}}{D_{bulk}} = a \left(\frac{D_{ITZ}}{D_{bulk}} - b \right)^c \quad (6)$$

표 1 콘크리트 상대유효확산계수 추정식의 골재부피비에 따른 맞춤계수

Fitting coefficients	Aggregate volume fraction (V_{agg})					
	60%	62%	64%	66%	68%	70%
a	0.1591	0.1479	0.1378	0.1278	0.1184	0.1094
b	1.6656	1.5762	1.4643	1.3661	1.2650	1.1671
c	0.5081	0.5285	0.5487	0.5701	0.5917	0.6143

결론적으로 콘크리트의 확산계수는 위에서 구한 값들을 이용하여 식(7)과 같이 계산될 수 있으며, 콘크리트의 확산계수를 구하는 과정의 흐름도는 그림 1에 제시되어있다.

$$D_{conc} = \frac{D_{conc}}{D_{bulk}} \times \frac{D_{bulk}}{D_0} \times D_0 \quad (7)$$

3. 콘크리트의 투수계수 산출

3.1 시멘트 페이스트의 투수계수(k_{bulk}) 산출

상대확산계수를 이용하여 투수계수를 예측하는 방법으로서 식(8)과 같은 Katz and Thompson 이론⁽²⁾이 사용된다. 이 이론은 공극률이 큰 물질에 잘 들어맞는다고 밝혀졌다.

$$k = \frac{l_c^2}{226} \cdot \frac{D_{bulk}}{D_0} \quad (8)$$

이때, l_c 는 재료의 한계공극직경(critical pore diameter)으로서 MIP실험을 통해 얻어질 수 있는 값이며, D_{bulk}/D_0 는 시멘트 페이스트의 상대확산계수이다. D_{bulk}/D_0 값은 2.2절에서 계산되어지고 이 결과를 식(8)에 대입하여 투수계수를 예측할 수 있다.

높은 공극률에서는 투수계수가 훨씬 큰 모세공극률만을 고려하므로, Katz and Thompson 이론이 적용될 수 있지만, 낮은 공극률에서는 모세공극과 겔공극 모두를 고려하는 모델을 사용해야한다. 따라서 본 논문에서는 시멘트 페이스트의 투수계수를 계산하기 위해서 GEM(General Effective Media)이론⁽³⁾을 이용하였다. GEM 이론은 투수계수가 높은 물질과 투수계수가 낮은 물질로 이루어진 2상(相)복합물의 전체 투수계수를 계산하기 위해 McLachlan et al에 의해 개발되었다. Bruggeman의 대칭이론과 삼투이론에 근거하여, 그가 제안한 방정식의 전기전도계수 항을 투수계수 항으로 바꾸면 식(9)와 같다. 이러한 치환은 다공성물질에서의 물의 이동은 전도체에서의 전자의 이동과는 물리적인 과정이 다르지만, 물의 이동을 지배하는 Darcy의 법칙과 전자의 이동을 지배하는 Ohm의 법칙은 수학적 표현이 같기 때문에 가능하다.

$$\frac{(1-\phi) \cdot (k_l^{1/t} - k^{1/t})}{k_l^{1/t} + Ak^{1/t}} + \frac{\phi \cdot (k_h^{1/t} - k^{1/t})}{k_h^{1/t} + Ak^{1/t}} = 0 \quad (9)$$

이때, $A = (1-\phi_c)/\phi_c$ 는 모세공극률, ϕ_c 는 한계 모세공극률, k_h 는 높은 투수성 물질(모세공극)의 투수계수, k_l 는 낮은 투수성 물질(CSH gel, CH, 무수화물)의 투수계수, k 는 2상(相)복합물의 전체 투수계수이다. 식(9)를 이용하여 시멘트 페이스트의 투수계수를 계산하는 과정은 그림 2에 제시되어있다.

3.2 콘크리트의 투수계수 산출

결론적으로 콘크리트의 투수계수(k_{conc})는 앞에서 구한 값들을 이용하여 식(10)과 같이 계산되며, 이 경우에는 Katz and Thompson이론인 간접적으로 이용되었다.

$$k_{conc} = k_{bulk} \times \frac{k_{conc}}{k_{bulk}} = k_{bulk} \times \frac{D_{conc} \cdot l_c^2(conc)}{D_{bulk} \cdot l_c^2(bulk)} \quad (m^2) \quad (10)$$

이때 D_{conc}/D_{bulk} 는 2장에서 계산결과로부터 얻을 수 있으며, l_c 는 MIP실험을 통해 얻어질 수 있다. 식(10)에서 구한 콘크리트의 투수계수의 단위는 m^2 이며, 투수계수에 흔히 사용되는 m/s의 단위로 환

산하기 위해서는 식(11)과 같은 계산이 필요하다.

$$k_{conc}' = k_{conc} \times \frac{\rho g}{\eta} \quad (\text{m/s}) \quad (11)$$

이때, 물의 밀도 $\rho=1000\text{kg/m}^3$, 중력가속도 $g=9.8\text{m/s}^2$, 물의 점성력 $\eta=0.001\text{Pa}\cdot\text{s}$ 이다.

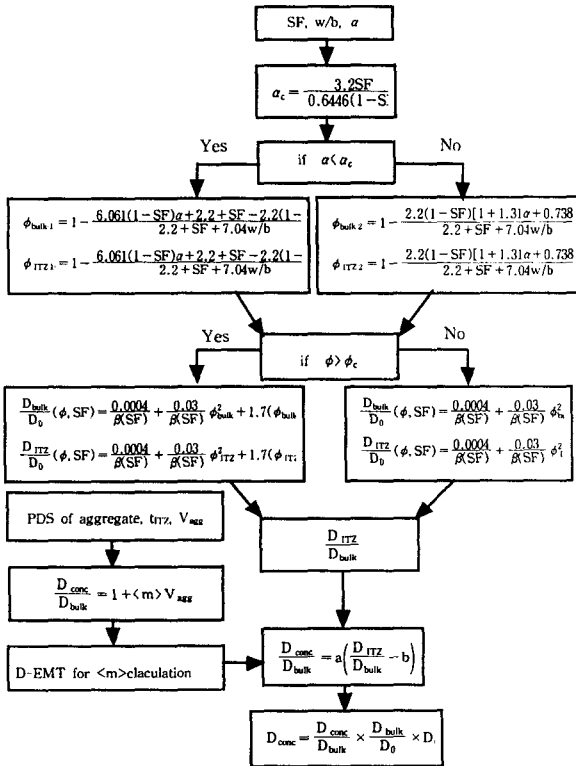


그림 1 콘크리트의 확산계수 계산과정

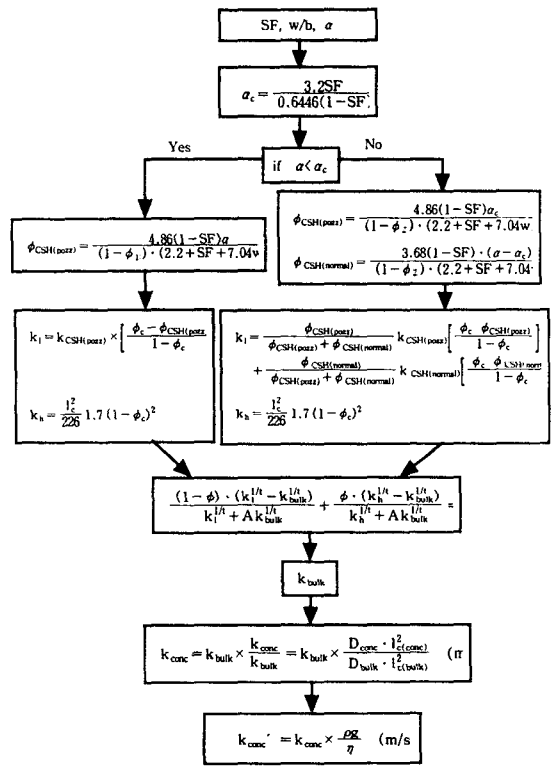


그림 2 콘크리트의 투수계수 계산과정

4. 검증 및 계산결과

본 연구의 확산계수와 투수계수 추정방법을 검증하기 위해서 Benz의 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 확산계수결과⁽⁴⁾와 본 연구를 통해 계산된 확산계수결과를 그림 3과 같이 비교하였다. 그 결과 기존의 컴퓨터 기반의 모델링에 의한 결과와 잘 부합하였다. 본 연구의 확산계수 계산방법을 사용하여 w/b=0.3, w/b=0.45일 때의 실리카폼 치환율에 따른 확산계수의 결과값을 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 이때, 수화도는 0.7, 골재부피비

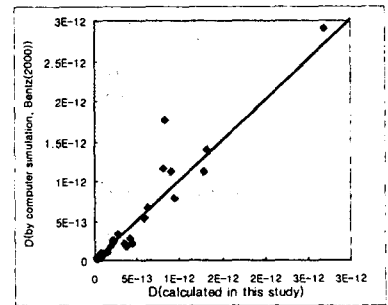


그림 3 Benz의 해석결과와의 비교

는 70%가 적용되었다.

그림 4와 그림 5에서 알 수 있듯이 실리카폼의 치환으로 인하여 콘크리트의 확산계수가 크게는 15배 이상 감소하였다. 그러나 실리카폼 치환율이 10%를 넘어가면 콘크리트의 확산계수 감소효과가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 또한 Katz and Thompson 이론식의 확산계수와 투수계수간의 관계를 통하여 투수계수의 결과도 이와 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

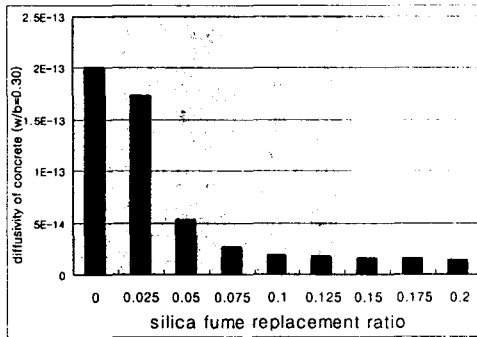


그림 4 SF에 따른 확산계수(w/b=0.30)

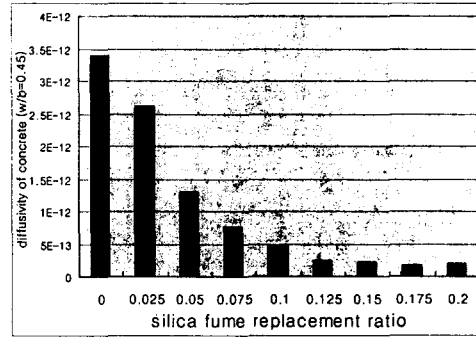


그림 5 SF에 따른 확산계수(w/b=0.45)

5. 결론

본 연구에서 사용된 확산계수와 투수계수 예측방법을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 미시역학적 방법을 통해 실리카폼의 치환에 따른 콘크리트의 미세구조의 변화를 고려하여 고강도 콘크리트의 확산계수 및 투수계수를 추정하는 방법을 제안하였다.
- (2) 본 연구의 계산방법에 의한 예측결과는 기존의 컴퓨터 모델링에 의한 모의실험결과를 잘 만족하고 있으며, 수화도, 실리카폼 치환율, 물결합재비, 골재부피비 등의 변수를 사용하여 콘크리트의 확산계수와 투수계수를 예측할 수 있음을 확인하였다.
- (3) 실리카폼의 치환은 콘크리트의 확산계수와 투수계수를 크게 감소시켜 콘크리트의 내구성향상에 상당히 기여할 수 있고, 특히 실리카폼 치환율이 10%일 때 가장 효과적임을 규명하였다.

참고문헌

1. Garboczi, E. J. and Berryman, J. G., "New effective medium theory for the diffusivity or conductivity of a multi-scale concrete microstructure model", *Concrete Science and Engineering*, Vol. 2, pp 88-96, 2000.
2. Katz, A. J. and Thompson, A. H., "Quantitative prediction of permeability in porous rock", *Physical Review B*, Vol. 34, pp. 8179-8182, 1986.
3. Cui, L. and Cahyadi, J. H., "Permeability and pore structure of OPC paste", *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 277-282, 2001.
4. Bentz, D. P., "Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials; II. Multi-scale modeling of concrete diffusivity", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1121-1129, 2000.