

확률적 최적화를 활용한 연속적인 공극비 기울기를 갖는 시멘트 풀 가상 시편 제작 및 투기율 분석

김 세 윤¹ · 한 동 석^{1*}

¹연세대학교 토목환경공학과

Evaluation of Air Permeability of Virtual Cement Paste Specimen with Linear Void Ratio Gradient Constructed using Stochastic Optimization

Se-Yun Kim¹ and Tong-Seok Han^{1*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

Abstract

In this study, a virtual specimen with a linear continuous gradient of void ratio (FGM: Functional Graded Material) is constructed using low-order probability functions of two real cement paste specimens. Two real specimens with difference void ratios are taken from X-ray CT to construct the virtual specimen. A virtual specimen with a gradient void distribution, whose average void ratio is between void ratios of two homogeneous real specimens, is constructed using a stochastic optimization approach. The void ratio distribution is assumed to be linear, and continuously varies in the vertical direction. In this study, a gradient term of void ratio is incorporated into the objective function as well as low-order probability functions from the previous research. To confirm the effect of gradient void distribution on the material response, air permeability is evaluated using finite element analysis. The analysis results are compared with experimental results, and confirm the effect of gradient void distribution on permeability.

Keywords : cement paste, functional graded material, probability functions, stochastic optimization, finite element analysis

1. 서 론

최근 과거에 건설된 사회 기반 시설들의 노후화 시기가 다가와 철근 콘크리트의 내구성 판단 및 예측 방법의 필요성이 대두되고 있다. 철근 콘크리트의 내구성은 철근에 부식에서 기인되는 경우가 잦으며, 부식이 진행됨에 따라 철근이 콘크리트 내부에서 팽창하여 콘크리트의 성능저하가 함께 발생하게 된다. 이러한 철근의 부식은 콘크리트를 투과하는 부식인자의 투과율에 의해 가속화되므로 철근 콘크리트의 내구성 판단을 위해 정확한 콘크리트의 투과율 판단이 필요하다(Andrade, 1993). 철근 콘크리트는 다양한 요인에

의하여 콘크리트의 공극 분포가 일정하지 않고 기울기를 갖는 영역이 존재한다(Rimmelé *et al.*, 2008). 공극 분포의 기울기를 갖는 영역은 콘크리트의 물성을 균일하지 않도록 하여 콘크리트 전체 내구성에 큰 영향을 미치게 될 수 있다. 그러나 공극 분포의 기울기를 갖는 콘크리트는 실제 현장과 동일한 구현이 실험적으로 어려워 투과율 판단에 어려움을 겪고 있다. 본 연구에서는 실험적으로 구현이 어려운 공극비 기울기를 가상 시편을 사용하여 구현한다. 실제 시멘트 풀 시편을 기반으로 공극비가 기울기를 갖도록 가상 시편을 구성하여 해석을 통해 투기율을 분석한다.

본 연구는 정확한 콘크리트 내부 투기율 분석을 위한

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2123-5801; E-mail: tshan@yonsei.ac.kr
Received August 22 2016; Revised September 23 2016;
Accepted September 24 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연속적인 공극비 기율기를 갖는 시멘트 풀 가상 시편을 구성하였다. 콘크리트에서 투기율에 가장 주요한 영향을 미치는 공극과 시멘트 풀 영역에서 경사기능재료(FGM: Functional Graded Material)를 구현하는 것은 콘크리트의 취약 부분에서 투기율 외에도 다양한 물성의 분석을 확인할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 공극 분포 특성은 동일하지만 공극 분포 형상이 다른 가상 시편을 구성할 수 있어 반복적인 해석을 통해 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 시멘트 풀 시편 내부 공극 분포 확인을 위해 X-선 CT를 통해 촬영된 이미지를 사용하였으며, 이전의 다양한 연구에서도 콘크리트의 내부 구조 확인을 위해 X-선 CT를 사용하여 단면 이미지를 통해 3차원으로 내부 구조를 확인하였다(Ponikiewski *et al.*, 2014). X-선 CT 이미지를 이진화 처리 과정을 통해 16bit 형태의 이미지를 1bit로 변환하고, 변환된 이미지를 적층하여 시멘트 풀 내부의 3차원 공극 분포 모델을 구성하였다. 구성된 모델의 공극 분포 특성을 저차원 확률 함수(Torquato, 2002)를 통해 표현하였으며, 이를 기반으로 확률적 최적화를 수행하여 공극비 기율기를 갖는 가상 시편을 제작하고 투기율 해석을 진행하였다.

2. 시멘트 풀 시편의 공극 분포 특성 수치화

이 장에서는 가상 시편을 구성하기 위해 필요한 실제 시편의 배합비와 실제 시편의 공극 분포 특성을 수치화할 수 있는 저차원 확률 함수 그리고 확률적 최적화 과정에 대해 소개한다. 이후 확률적 최적화를 통해 구현된 공극비의 기율기를 갖는 가상 시편의 저차원 확률 함수 및 투기율 분석 결과를 제시한다.

2.1 시멘트 풀 시편의 배합비 및 공극비

본 연구에서는 두 종류의 실제 시멘트 풀 시편의 정보를 사용하여 시멘트 풀의 공극 특성에 기반한 가상 시편을 제작하였다. 또한 공극 특성 기율기를 발생시키기 위해 서로 다른 배합비를 갖는 시편(Shibata *et al.*, 2014)을 사용하였다. 각 시멘트 풀 시편의 물성은 Table 1에 표시하였다.

시멘트 풀 시편은 보통 포틀랜드 시멘트(OPC: Ordinary Portland Cement)를 사용하여 제작되었으며, 시멘트 풀

Table 1 Mix design and void ratio of cement paste specimens

Specimen	W/C (%)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Porosity (%)
OPC40	40	527	1396	32.17
OPC65	65	649	1035	45.10

시편이 공극비에 차이를 갖도록 각 시편의 물시멘트비가 다르게 제작되었다. OPC40 시편은 물시멘트비 40%에 공극비 32.17%, OPC65 시편은 물시멘트비 65%에 공극비 45.10%를 지닌다. 시멘트 풀 시편의 공극비는 아르키메데스 방법을 통해 실험적으로 측정되었으며, 공극 구조 내에서 유체의 흐름을 확인할 수 있도록 일반적인 콘크리트의 공극비보다 큰 값을 가질 수 있도록 제작되었다.

2.2 X-선 CT 단면 이미지 처리

본 연구에서는 시멘트 풀 내부 공극 분포를 확인하기 위해 이전의 시멘트 풀 투기율 연구(Shibata *et al.*, 2014)에서 사용된 X-선 CT(X-ray CT: X-ray Computed Tomography)로 촬영된 단면 이미지를 사용하였다. X-선 CT는 재료를 손상시키지 않고 일련의 단층 이미지를 얻어 재료의 내부 구조를 파악할 수 있다. 본 연구에서는 시멘트 풀 시편 OPC40과 OPC65를 512×512 픽셀로 구성된 16bit형태로 단면 이미지를 촬영하였으며, 촬영된 이미지는 픽셀 당 2.136μm의 해상도로 표현된다.

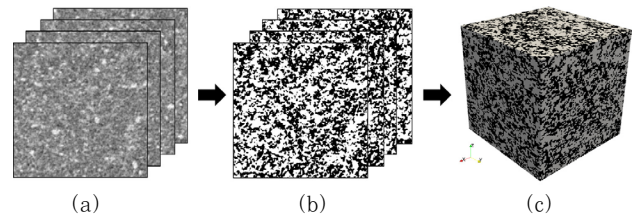


Fig. 1 Image processing of X-ray CT image

시멘트 풀 시편의 내부 구조를 시멘트 풀 고체 부분과 공극 두 상으로 구분하기 위해 단면 이미지를 Fig. 1(Chung *et al.*, 2015)과 같이 이진화 처리하였다. 16bit 단면 이미지는 검정색 0에서 흰색 65535($2^{16}=65536$)까지의 값을 지니며, 전체 단면 이미지의 공극비가 실험적으로 구한 공극비와 같은 공극비를 갖도록 하는 0~65535 사이에 경계값을 선택하여 이미지 내에서 시멘트 풀과 공극을 결정한다. 이진화 처리된 이미지를 적층하여 두 시멘트 풀 시편의 3차원 공극 분포 모델을 제작할 수 있으며, 이를 사용하여 가상 시편의 구현과 투기율 해석을 진행하였다.

2.3 공극 분포 특성 수치화

본 연구에서는 실제 시편인 시멘트 풀 내 공극 분포의 특성을 수치화 하여 나타내기 위해 저차원 확률 함수(low-order probability functions) 중 two-point correlation function과 lineal-path function을 사용하였다(Torquato, 2002).

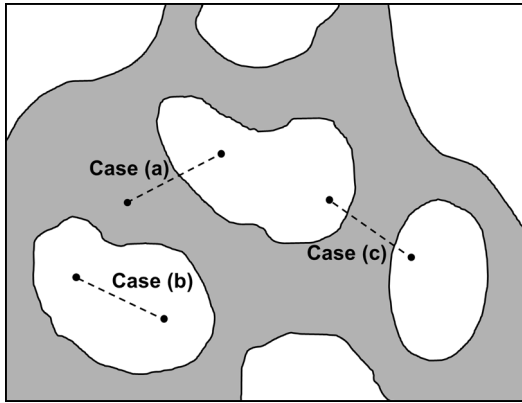


Fig. 2 Scheme of low-order probability function

시멘트 풀의 투기율은 공극비 뿐만 아니라 공극의 분포에도 큰 영향을 받으므로 정확한 투기율 비교를 위해 실제 두 시멘트 풀 시편에서 얻은 수치화된 공극 분포 특성을 기반으로 가상 시편을 제작한다.

2.3.1 상 균집 정도 묘사

시멘트 풀 시편 내부의 공극이 얼마나 균집을 이루고 있는지 수치화하기 위해 상 균집 정도를 나타낼 수 있는 two-point correlation function을 사용하였다. Two-point correlation function $P_v(r)$ 은 시멘트 풀 시편 공간 내부에 거리 r 만큼 떨어진 두 점이 임의의 위치에 존재할 때, 두 점이 모두 공극에 존재할 확률을 나타낸다. Fig. 2는 어두운 부분이 공극, 흰 부분이 시멘트 풀을 나타내며, 이 중에서 $P_v(r)$ 에 고려되는 경우를 확인하면, Case A는 두 점이 공극(흰색)과 시멘트 풀(회색)에 존재하므로 $P_v(r)$ 에 고려 대상이 아니며, Case B와 C는 두 점이 모두 공극(흰색)에 존재하여 $P_v(r)$ 에 고려됨을 알 수 있다. two-point correlation function $P_v(r)$ 의 극한 값은 다음 식 (1)에 나타나 있다.

$$\lim_{r \rightarrow 0} P_v(r) = f_v \tag{1a}$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} P_v(r) = [f_v]^2 \tag{1b}$$

여기서, f_v 는 공극비를 뜻하며, 식 (1a)는 두 점 사이의 거리가 0으로 수렴하면 $P_v(r)$ 이 공극비(f_v) 값을, 식 (1b)는 두 점사이의 거리가 ∞ 로 발산하면 $P_v(r)$ 가 공극비의 제곱 값을 가짐을 뜻한다.

2.3.2 상 분포 연속성 묘사

시멘트 풀 시편 내부에 공극 분포가 얼마나 연속적인지 수치화하기 위해 상 분포의 연속성을 나타내는 lineal-path

function을 사용하였다. Lineal-path function $L_v(r)$ 은 두 점 사이의 거리 r 을 가지는 선분이 시멘트 풀 내부에 임의의 위치에 존재할 때 선 전체가 공극 내부에 위치하고 있을 확률을 뜻한다. Fig. 2에서 Case A와 C는 선의 일부가 시멘트 풀(회색)부분에 포함되므로 $L_v(r)$ 에 고려되지 않으나, Case B는 공극(흰색)에 선 전체가 포함되어 $L_v(r)$ 의 고려 대상이 된다. Lineal-path function $L_v(r)$ 의 극한값은 다음 식 (2)에 나타나 있다.

$$\lim_{r \rightarrow 0} L_v(r) = f_v \tag{2a}$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} L_v(r) = 0 \tag{2b}$$

식 (2a)는 선의 길이 r 이 0에 수렴하는 경우 $L_v(r)$ 가 공극비 값을, 식 (2b)는 선의 길이 r 이 무한대로 커지는 경우 $L_v(r)$ 의 값이 0이 됨을 뜻한다.

3. 가상 시편의 확률적 최적화 및 공극 특성 비교

본 연구에서는 실제 시편을 기반으로 공극비의 기울기를 갖는 경사기능재료(FGM: Functional Graded Material) 시편의 구현을 위해 확률적 최적화(stochastic optimization) 과정을 수행한다(Torquato, 2002). 가상 시편은 실제 두 시멘트 풀 시편 사이에 존재하는 시편을 구현하며, 두 실제 시편 OPC40과 OPC65의 공극 분포 특성의 평균값과 축 방향에 따른 연속적인 선형 형태의 공극비를 지니도록 제작되었다. 이전에 진행된 기울기를 갖는 가상 시편에 대한 연구(Chung *et al.*, 2015)에서 사용된 이산화된 공극 분포 특성과 달리 본 연구에서는 공극비에 대해 연속적인 분포를 확인한다.

3.1 확률적 최적화

실제 시편의 수치화 된 공극 분포 특성을 통해 가상 시편을 제작하기 위해 확률적 최적화 기법을 사용한다. 확률적 최적화 과정을 통해 가상 시편 내 공극을 재배치하여 가상시편이 목적하는 공극 분포 특성을 가질 수 있도록 한다. 본 연구에서는 이전에 진행된 연구(Chung *et al.*, 2010)와 같이 일반적으로 가상 시편이 목적하는 저차원 확률 함수를 갖도록 확률적 최적화가 진행될 뿐 아니라 공극비가 연속적인 선형 형태의 기울기를 갖는 경사기능재료의 형상을 나타낼 수 있도록 하였다. 확률적 최적화 과정은 식 (3)의 확률적 최적화 에너지를 최소화하며 진행한다.

$$E = \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_r [\hat{f}_{\beta}^{\alpha}(r) - f_{\beta}^{\alpha}(r)]^2 \quad (3)$$

$\hat{f}_{\beta}^{\alpha}(r)$ 는 가상 시편의 공극 분포 특성, $f_{\beta}^{\alpha}(r)$ 는 가상 시편이 목적하는 공극 분포 특성, α 는 공극 분포 특성의 종류 (two-point correlation function, lineal-path function, two-point cluster function), β 는 축 방향 x, y, z, r 은 임의의 두 점 사이의 거리로 나타낸다. 확률적 최적화의 에너지는 가상 시편과 목적하는 공극 분포 특성의 오차의 제곱을 뜻한다. 확률적 최적화 과정에서 공극 분포 특성으로는 이전 연구에서 사용된 저차원 확률 함수뿐만 아니라 본 연구에서는 가상 시편의 z 축 방향에 대해 연속적인 선형 형태의 공극비 기울기를 공극 분포 특성으로 사용하였다. 확률적 최적화 과정에서 목적함수에 공극비 기울기를 추가하여 가상 시편의 공극비 분포가 목적 함수에 수렴하도록 진행하였다.

확률적 최적화를 진행하기 위해 임의의 공극 분포를 갖는 가상 시편을 3차원 공극 분포 모델로 구성한다. 구성된 가상 시편 내 임의로 선택된 시멘트 풀 요소와 공극 요소의 상을 서로 치환하여 공극 분포의 형태를 변화시켜 확률적 최적화 과정이 진행된다. 식 (4)의 ΔE 는 상 치환 전후 에너지의 차이를 나타내며, $p(\Delta E)$ 는 확률적 최적화 과정의 판별식을 나타낸다.

$$p(\Delta E) = \begin{cases} 1, & \text{if } \Delta E \leq 0 \\ \exp(-\Delta E/T), & \text{if } \Delta E \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$p(\Delta E)$ 를 0과 1 사이의 임의의 값 R 과 비교하여 $p(\Delta E) > R$ 인 경우에 요소 간 상 치환을 진행시키고 다음 임의의 요소를 선택하며, $p(\Delta E) \leq R$ 인 경우 요소 간 상을 치환하지 않는다. 확률적 최적화 판별식의 값이 ΔE 에 의해 결정되므로 확률적 최적화가 진행될수록 에너지는 0에 수렴한다. $\Delta E > 0$ 에 해당하는 $\exp(-\Delta E/T)$ 에서 T 는 가상 온도도 확률적 최적화 과정이 진행될수록 점차 감소한다. 가상 온도 T 는 초기 값은 1이지만 매 5000회 확률적 최적화가 반복시행 된 후 50%로 값이 줄어들도록 한다(Kumar *et al.*, 2004).

확률적 최적화 과정을 통해 실제 시편 사이의 공극 분포 특성과 연속적인 기울기를 갖는 가상 시편의 구현이 가능하다. 실제 시편에 기반하여 가상 시편을 제작하는 경우 실제 현상과 근접한 시편을 통해 해석을 수행하여 물성 분석의 정확성을 높일 수 있다. 또한 공극 분포 형상이 달라도 같은 공극 분포 특성을 가지는 다양한 시편을 통해서도 정확한 물성 예측이 가능하도록 한다.

3.2 가상 시편 제작

확률적 최적화 과정을 통해 실제 두 시멘트 풀 시편 사이에 존재하는 가상 시편을 연속적인 공극비 기울기를 갖도록 Fig. 3과 같이 제작하였다.

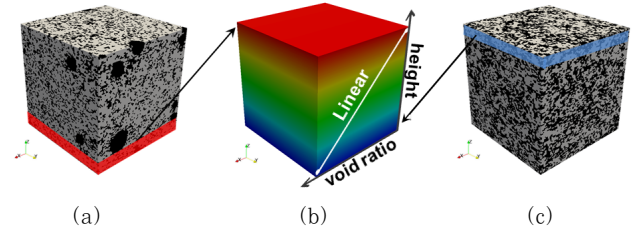


Fig. 3 (a) OPC40, (b) the virtual specimen with gradient void distribution and (c) OPC65

실제 두 시편 (a) OPC40와 (c) OPC65 사이에 존재하는 가상 시편 (b)를 구성하였으며, 저차원 확률 함수는 평균값, 공극비는 선형 기울기를 갖도록 하였다. Fig. 3과 같이 가상 시편 (b)의 z 축 높이에 따라 상부에는 OPC40의 공극비 32.17%, 하부에는 45.10%를 가지며, 선형 기울기의 공극비를 갖는다. 3차원 공극 분포 모델은 $50 \times 50 \times 50(x \times y \times z)$ 로 구성하여 투기율 해석을 진행하였다.

3.3 공극 분포 특성 비교

실제 시멘트 풀 시편을 기반으로 한 가상 시편의 제작을 위해 본 연구에서는 저차원 확률 함수와 연속적인 선형 공극비 기울기를 공극 분포 특성으로 사용하였다. 공극비 기울기는 Fig. 4(a)에 목적 함수와 z 축 방향 요소 층의 공극비로 나타내었다. x 축은 가상 시편의 z 축 방향의 높이(z/D , $D = z$ 축 방향 요소 개수), y 축은 공극비로 목적하는 연속적인 선형 형태의 함수와 가상 시편의 공극비 기울기가 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 공극비 기울기를 갖는 시편의 저차원 확률 함수 그래프는 Fig. 4(b), (c)에 나타내었다. 가상 시편의 z 축 방향에 대한 two-point correlation function $P_v(r)$ 와 lineal-path function $L_v(r)$ 를 y 축에 나타내었으며, x 축은 두 점 사이의 거리 r 에 대해 r/D 로 표현하였다. 그래프 Fig. 4(b), (c)를 통해 가상 시편의 저차원 확률 함수 값이 실제 두 시편 사이의 값을 갖도록 구성된 것을 확인이 가능하다.

가상 시편은 위의 그래프 Fig. 4와 같이 실제 두 시멘트 풀 시편의 저차원 확률 함수의 평균값과 연속적인 공극비 기울기를 가지며, 이를 통해 불균등한 공극비 분포 내 존재하는 시멘트 풀의 공극 분포를 구현하였다. 제작된 공극 분포는 실험적

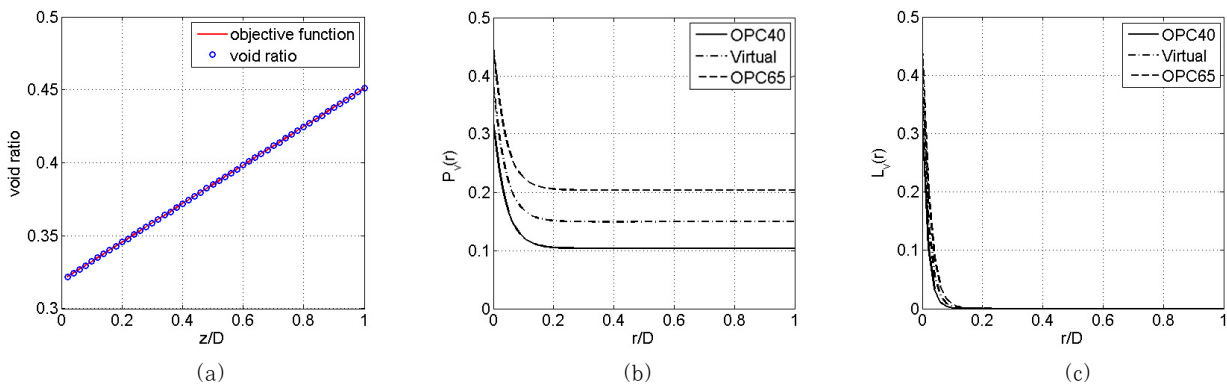


Fig. 4 Plots of the void distribution characteristics of the virtual and two real specimens for the z-directions (a) void ratio, (b) two-point correlation function($P_v(r)$) and (c) lineal-path function($L_v(r)$)

으로는 구현이 어려우나, 본 연구에 사용된 저차원 확률 함수 및 확률적 최적화를 통해 구현이 가능하다.

4. 가상 시편의 투기율 해석

실제 시편을 기반으로 한 저차원 확률 함수 및 공극비 기울기를 갖는 가상 시편의 공극 분포 특성 분석을 위해 본 연구에서는 투기율 해석을 수행하였다. 투기율은 공극 분포에 가장 큰 영향을 받는 재료 물성으로 철근 콘크리트 내구성 판단에 주요한 영향을 미친다. 공극 분포 특성 간 비교 결과와 투기율 해석 결과를 비교하여 공극 분포 특성이 투기율에 미치는 영향을 확인한다.

4.1 유한요소해석

본 연구에서는 콘크리트의 투기율 분석을 위해 범용 프로그램인 ABAQUS를 사용한 유한요소해석을 진행하였다. z 축 방향으로 시멘트 풀 가상 시편과 실제 시편에 공기를 투과 시키는 방식으로 투기율 해석을 진행하였으며, 해석은 식 (5) 나비에-스토크스 방정식(navier-stokes equation)을 사용하여 비압축성 유체 해석을 통해 투수계수(hydraulic conductivity)를 계산하였다.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho_w (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nabla p - \eta \nabla^2 \mathbf{v} = -\rho g \nabla z \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{v}} = -K \cdot \nabla h \quad (6)$$

여기서, 식 (5)의 ρ 는 유체의 밀도, \mathbf{v} 는 유체의 속도, ∇p 는 압력차이, η 는 동점성계수(dynamic viscosity), g 는 중력 가속도, ∇z 는 유체의 높이 차이를 나타낸다. 유한요소해석은 $1000\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m}$ 크기의 시편을 사용하여 실은

상태의 공기의 물성($\rho = 1.225\text{kg/m}^3$, $\eta = 1.82 \times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{m}$)과 ∇p 에 101.325 Pa , 점착경계(no-slip)를 사용하여 진행하였다. 유한요소해석을 진행한 후 식 (6)의 다시의 법칙(darcy's law)을 통해 투수계수 K 를 계산한다. 식 (6)에서 $\bar{\mathbf{v}}$ 는 유효속도(effective velocity), ∇h 는 수리경사(hydraulic gradient)를 나타낸다. 본 연구에서는 투기율을 투수계수 K 로부터 계산하여 얻는다.

4.2 투기율 해석 결과

가상 시편과 두 실제 시편 OPC40과 OPC65의 투기율 해석 결과를 Fig. 5와 Table 2에 나타내었다. Fig. 5의 (a), (b), (c)는 각각 OPC40, 가상 시편, OPC65의 투기율 분석을 위해 유한요소해석을 통해 공극 내 유체의 흐름을 속도로 나타낸 것이다. 속도를 $0\mu\text{m}$ 에서 $1\mu\text{m}$ 까지 표시하여 각 시편의 유체 흐름을 비교하였으며, Fig. 5에서 OPC65, 가상 시편, OPC40 순으로 공극을 통과하는 유체의 속도가 빠른 것을 확인할 수 있다.

Table 2에는 시편의 투기율 해석 결과뿐만 아니라 이전의 연구(Shibata *et al.*, 2014)에서 실험한 실제 시멘트 풀 시편 OPC40, OPC65의 투기율 실험 결과를 통해 실험과 해석 결과를 비교할 수 있도록 하였다. 실제 시멘트 풀 시편의 투기율 실험 결과와 해석 결과를 비교하면, 두 시편 OPC40, OPC65의 투기율이 각각 같은 차수를 갖는 것을 통해 유한요소방법을 사용한 해석이 합리적인 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 가상 시편의 투기율 해석 결과는 OPC40, OPC65의 해석 결과 사이에 존재하며, 실험 결과는 존재하지 않지만 두 실제 시편의 투기율을 기반으로 예측된 결과와 비교가 가능하다. 유한요소해석을 통한 투기율의 해석 결과와 실험 결과의 비교를 통해 연속적인 공극비 기울기를 갖는 가상 시편을 사용한 시멘트 풀 시편의 투기율 예측이 가능함을 확인하였다.

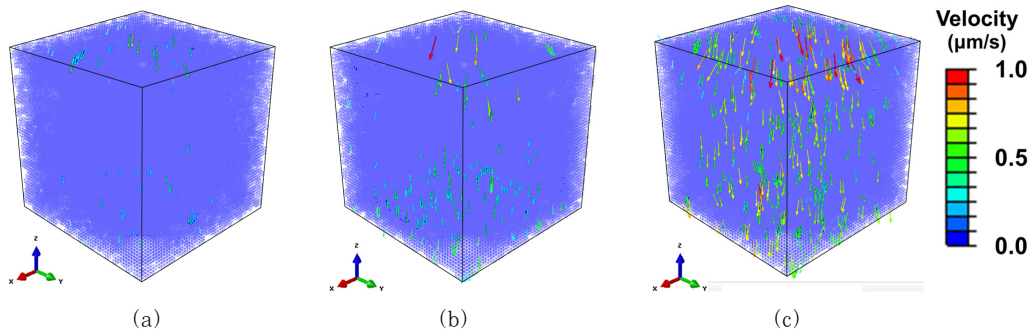


Fig. 5 Velocity of the virtual and real specimens using ABAQUS (a) OPC40, (b) virtual specimen and (c) OPC65

Table 2 Air permeability of the virtual and real specimens from the experimental and simulation results

Specimen	Porosity (%)	Experiments (m ²)	Simulation (m ²)
OPC40	32.17	2.594×10 ⁻¹¹	4.174×10 ⁻¹¹
Virtual specimen	35.53	-	1.457×10 ⁻¹⁰
OPC65	45.10	5.10×10 ⁻¹⁰	4.868×10 ⁻¹⁰

연속적인 기울기 구현을 통해 정확한 물성 분석이 가능할 것으로 예상된다.

5. 결 론

본 연구에서는 철근 콘크리트의 내구성에 큰 영향을 미치는 콘크리트의 투기율을 시멘트 풀 가상 시편을 사용하여 분석하였다. 실험적으로 구현하거나, 실제 구조물에서 검사를 통해 확인이 어려운 형태의 시멘트 풀 시편의 분석을 통해 다양한 원인에 의해 발생하는 콘크리트 내 불균등한 공극 분포 특성으로 인한 영향을 확인할 수 있도록 하였다. 실제 시멘트 풀 시편의 공극 분포 특성의 반영을 위해 X-선 CT 단면 이미지를 사용하여 실제 시멘트 풀 시편의 3차원 공극 분포 모델을 구현하고, 이를 기반으로 저차원 확률 함수 및 공극비를 통해 가상 시편을 제작하였다. 이전의 연구에서 사용한 이산화된 공극 분포 특성과 다르게 본 연구에서는 확률적 최적화의 목적 함수에 공극비 기울기를 사용하여 연속적인 선형 공극비 기울기를 구현하여 더 발전된 형태의 가상 시편을 구현할 수 있도록 하였다.

저차원 확률 함수와 공극비 기울기 그래프를 통해 가상 시편이 목적하는 공극 분포 특성을 지니도록 구성된 것을 확인하였다. 그래프를 통해 확인한 공극 분포 특성은 유한요소 해석을 통한 투기율 해석 결과와 비교를 통해 가상 시편이 시멘트 풀의 공극 분포 특성을 충분히 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 투기율 실험 결과와 해석 결과의 비교를 통해 유한요소해석을 통한 시멘트 풀의 투기율 분석이 가능한 것을 확인하였다. 본 연구에서 사용된 공극비 기울기의 구현 방법을 통해 선형 이외에도 다양한 형태를 갖는 공극비 기울기의 구현이 가능하며, 확률적 최적화의 목적함수를 활용함으로써

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 (NRF-2012R1A1A2006629, NRF-2014R1A2A2A09052374 및 NRF-2015K1A3A1A59073929) 수행되었습니다.

References

Andrade C. (1993) Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements, *Cement & Concr. Res.*, 23, pp.724~742.

Chung, S-Y., Han, T-S. (2010) Reconstruction of Random Two-phase Polycrystalline Solids using Low-order Probability Functions and Evaluation of Mechanical Behavior, *Comput. Mater. Sci.*, 49, pp.705~719.

Chung, S-Y., Han, T-S., Kim, S-Y. (2015) Reconstruction and Evaluation of the Air Permeability of a Cement Paste Specimen with a Void Distribution Gradient using CT Images and Numerical Methods, *Constr. & Build. Mater.*, 87, pp.45~53.

Kumar, H., Briant, C.L., Curtin, W.A. (2004) Using Microstructure Reconstruction to Model Mechanical Behavior in Complex Microstructures, *Mech. Mater.*, 38, pp.818~832.

Ponikiewskia, T., Katzerb, J., Bugdolc, M., Rudzki, M. (2014) Determination of 3D Porosity in Steel Fiber Reinforced SCC Beams using X-ray Computed Tomography, *Constr. & Build. Mater.*, 68, pp.333~340.

Rimmelé, G., Barlet-Gouédard, V., Porcherie, O., Goffé, B., Brunet, F. (2008) Heterogeneous Porosity Distribution in Portland Cement Exposed to CO₂-rich Fluids, *Cement & Concr. Res.*, 38, pp.1038~1048.

Shibata, M., Okazaki, S., Ujike, I. (2014) Acquisition

of Capillary Pore Structure by X-ray CT and Visualization of Flow by Numerical Analysis, *Adv. Mater. Res.*, 845, pp.163~167.

Torquato, S. (2002) Random Heterogeneous Materials, *New York: Springer*, pp.25~43.

요 지

본 논문에서는 저차원 확률 함수를 사용하여 연속적인 선형 공극비 기울기를 갖는 기능경사재료 형태의 가상 시편을 제작하였다. 실제 물 시멘트 비가 다른 두 종류 시멘트 풀 시편의 X-선 CT 단면 이미지를 통해 3차원 공극 분포 모델을 제작하여 이를 기반으로 가상 시편을 제작하였다. 가상 시편이 두 실제 시편 사이에 위치하도록 공극 분포 특성을 저차원 확률 함수와 공극비 기울기로 구성하였다. 공극 분포의 기울기는 연속적인 형태의 수직 방향의 선형 공극비 기울기로 구현하며, 이를 위해 확률적 최적화의 목적 함수로 저차원 확률 함수와 공극비 기울기에 관한 함수를 사용하였다. 가상 시편 내 공극 분포 특성 확인을 위해 본 연구에서는 투기율 분석을 유한요소해석을 통해 수행하였다. 공극 분포 특성과 투기율 해석 결과를 비교하여 가상 시편이 갖는 공극 분포 특성이 투기율에 미치는 영향을 확인하고, 투기율의 실제 실험 결과와 해석 결과의 비교를 통해 해석 결과의 타당성을 입증하였다.

핵심용어 : 시멘트 풀, 기능경사재료, 확률 함수, 확률적 최적화, 유한요소해석