

CT 이미지를 활용한 경량 골재의 방향에 따른 공극 분포 및 강성도의 이방성 분석

Analysis on Anisotropy of Void Distribution and Stiffness of Lightweight Aggregate using CT Images

정 상 업* 한 동 석† 윤 태 섭** 염 광 수***
Chung, Sang-Yeop Han, Tong-Seok Yun, Tae Sup Youm, Kwang Soo
전 현 규**** 강 동 훈*****
Jeon, Hyun-Gyu Kang, Dong Hun

요 지

대표적인 다상 재료인 콘크리트는 구성 성분의 공간적 분포에 의해 재료 특성이 큰 영향을 받는다. 특히 공극(void)은 콘크리트의 특성에 큰 영향을 주는 요인으로서, 콘크리트 내부에 분포하는 공극의 공간적 분포를 파악하는 것은 재료의 특성을 이해하는데 매우 중요하다. 본 연구에서는 콘크리트 내부에 존재하는 경량 골재의 공극 분포 분석을 위해서, CT(computed tomography)로부터 얻은 단면 이미지를 활용하여 생성된 3차원 경량 골재 이미지를 활용하여 공극 분포를 시각화(visualization)하였다. 방향에 따른 3차원 경량 골재 내부의 공극 분포 상태를 정성적으로 묘사하기 위해서 확률 분포 함수인 두점 상관함수(two-point correlation function)를 사용하여 공극의 공간적 분포 경향을 구(sphere)에 표현하였다. 또한 방향에 대한 골재의 강성도(stiffness)를 계산하여 각 방향에 따른 골재의 역학적 물성치 분포 변화를 확인하였다. 각 방향으로의 확률 분포 함수로 표현된 공극 분포와 강성도 분석함으로서 CT 이미지를 통한 공극 분포 특성 분석 및 경량 골재의 역학적 특성을 효과적으로 예측할 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 경량 골재, 공극, CT 이미지 분석, 확률 분포 함수, 강성도, 미세구조

Abstract

The void distribution in concrete materials strongly affects its material properties. Therefore, the identification of spatial distribution of void is important to understand and estimate material behavior. To examine and quantify the void distribution inside lightweight aggregates, CT(computed tomography) image is used. 3D lightweight aggregate images are generated by stacking of cross-sectional images from CT. Spatial distribution of void of aggregate along the direction is visualized on the sphere using probability distribution function. Stiffness of lightweight aggregate for the directions is also examined. It is confirmed that direction-based probability distribution and stiffness from CT images are effective in characterizing void distributions of aggregates.

Keywords : *lightweight aggregate, void, CT image processing, probability distribution function, stiffness, microstructure*

1. 서 론

임의 불균질성(random heterogeneous)을 가진 다상 재료(multi-phase materials)인 콘크리트는 골재, 시멘트 등

† 책임저자, 정회원 · 연세대학교 토목환경공학과 조교수

Tel: 02-2123-5801 ; Fax: 02-364-5300

E-mail: tshan@yonsei.ac.kr

* 학생회원 · 연세대학교 토목환경공학과 박사과정

** 연세대학교 토목환경공학과 조교수

*** GS건설(주) 기술연구소 선임연구원

**** GS건설(주) 기술연구소 책임연구원

***** 연세대학교 토목환경공학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 8월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

의 구성 성분의 비율 및 분포에 따라 재료의 특성이 큰 영향을 받는다. 특히 콘크리트는 내부에 존재하는 공극(void)에 의해 강도 등의 특성이 큰 영향을 받는다(Dorey 등, 2002). 콘크리트는 다상 재료임과 동시에 다공질 재료이기 때문에 육안으로 보이는 표면의 공극 이외에도 재료 내부에 많은 공극이 존재한다. 특히, 콘크리트 부재의 자중 감소 효과를 위해 제작되는 경량 콘크리트의 경우, 사용되는 경량 골재 내부에 많은 공극이 존재하기 때문에 재료의 효과적인 건전성 확보를 위해서는 공극 분포와 재료 물성치를 정량화하는 것이 필요하다.

경량 골재에 존재하는 내부 공극은 육안으로 직접 관찰하기 어렵기 때문에 공극의 크기 및 분포 형태를 파악하는 것은 쉽지 않다. 본 연구에서는 육안으로 관찰할 수 없는 경량 골재 내부의 공극을 살펴보기 위하여 CT(computed tomography)를 사용하여 경량 골재 내부의 공극 구조를 살펴보았다. CT를 사용하는 기법은 분석 대상의 원형에 손상을 가하지 않고 픽셀(pixel)로 이루어진 단면 이미지를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 CT를 통해 얻은 경량 골재의 단면 이미지를 연속적으로 적층해서 3차원 이미지를 구성한 후, 이를 분석하여 경량 골재 내부의 공극 크기 및 공간적 분포 상태를 파악하였다.

경량 골재 내부에 존재하는 공극 분포 상태를 확률적으로 묘사하기 위하여 두점 상관함수(two-point correlation function)(Gokhale 등, 2005; Chung 등, 2010)를 사용하였다. 두점 상관함수를 활용하여 경량 골재 내부의 공극 분포 경향을 3차원 구(sphere)에 표현함으로써 방향에 따른 공극의 균집 정도 및 이방성(anisotropy)과 같은 공간적 분포 상태를 파악할 수 있다. 또한 CT를 통해서 얻은 이미지와 유한요소해석을 사용하여 방향에 따른 골재의 강성도(stiffness)를 살펴보았다. 두점 상관함수와 마찬가지로 각 방향에 대한 강성도를 계산하고 구에 표현함으로써 방향에 따른 경량 골재의 역학적 물성치를 파악하였다. 본 연구에서는 CT를 사용해 생성된 3차원 경량 골재 이미지를 통하여 골재 내부의 공극 분포를 파악함으로써,

경량 골재 내부의 공극 분석을 위한 도구로써 CT 이미지 분석 방법의 활용성을 살펴보았다. 또한 각 방향으로의 공극 분포와 강성도를 비교함으로써 공극 분포와 재료의 역학적 물성치의 상관관계를 분석하였다.

2. 경량 골재의 이미지 처리 및 확률 분포 함수를 이용한 공극 분포 분석

2.1 경량 골재의 이미지 처리

경량 골재를 관찰할 때, 골재 내부에 분포하는 공극의 구조는 육안으로 파악하기 어렵다. 본 연구에서는 CT(NFR-POLARIS_GSOMVC, 나노포커스레이)를 사용하여 경량 골재의 단면 이미지를 얻고, 이를 활용하여 골재 내부에 존재하는 공극의 분포 상태를 살펴보았다. 그림 1(a)는 CT를 사용하여 촬영한 경량 골재의 8비트 단면 이미지이다. 그림 1(a)에서 회색조로 표현된 부분은 경량 골재를 나타내며, 경량 골재 내부에 검은색으로 표현된 부분은 골재에 포함된 내부 공극을 의미한다. 그림 1(a)와 같은 단면 이미지가 아닌 골재 원형을 살펴보면 내부에 있는 공극을 파악하기 어렵다. 특히, 골재 내부에 균집 형태로 존재하는 공극 이외에 미세하게 존재하는 공극들은 공간적 분포 및 크기를 파악하기 쉽지 않다. 본 연구에서는 8비트 CT 이미지의 이진화(binary) 처리를 통해 경량 골재 내부에 분포하는 공극을 묘사하였다.

그림 1(b)의 밝은 부분은 그림 1(a)에서 골재 내부에 분포하는 공극을 묘사한 것이다. 그림 1(b)를 생성하기 위하여, 256개의 값(0에 가까울수록 어두운 색)에 의해 표현되는 8비트 이미지인 그림 1(a)에서 골재 부분의 경계를 구분하였다. 일정한 한계점(threshold)을 정하고 그림 1(a)의 골재 내부에서 한계점 이하의 값을 갖는 픽셀은 모두 공극으로 가정하여 그림 1(b)의 흰색 부분과 같이 표현하였다. 이미지 처리 과정에서는 MATLAB(Mathworks, R2010a)의



그림 1 CT를 활용한 경량 골재 단면 이미지와 공극의 3차원 이미지

이미지 도구(image toolbox)를 사용하였으며, 본 연구에서는 유사 선형 연구(정상엽 등, 2011)의 결과를 참고해서 한계점을 35로 설정하여 공극 부분과 골재 부분을 구분하였다. 경량 골재의 공극을 3차원으로 묘사하기 위하여 그림 1(b)와 같이 흑백 처리된 여러 장의 공극 단면 이미지를 연속적으로 중첩하여 그림 1(c)와 같이 묘사하였다. 그림 1(c)은 복셀(voxel)로 표현되어 있는 3차원 경량 골재 공극 이미지이다. 그림 1(c)에서 살펴볼 수 있듯이, CT 단면 이미지와 이진화 이미지 처리 방법을 활용하면 육안으로 관찰하기 어려운 경량 골재 내부의 공극 분포 상태를 효과적으로 묘사할 수 있다.

2.2 두점 상관함수를 이용한 공극 분포의 3차원 묘사

다상 재료에서 상의 공간적 분포에 의해 재료의 특성 및 거동이 큰 영향을 주듯이(Torquato, 2002; Han 등, 2005) 경량 골재 내부에 분포하는 공극의 공간적 분포 상태도 경량 골재의 강도에 큰 영향을 준다. 경량 골재 내부의 공극 분포를 파악하기 위해서는 공극의 공간적 분포를 묘사할 수 있는 적절한 방법이 필요하다. 본 연구에서는 저차원(low-order) 확률 분포 함수인 두점 상관함수를 활용하여 골재 내부의 공극 분포를 살펴보았다(정상엽 등, 2011). 두점 상관함수, P_{ij} 는 재료 내부에 위치한 임의의 두 점이 나타내는 정보를 바탕으로 상 분포 상태를 표현하는 확률 분포 함수로써, 두 점이 각각 i 와 j 상에 위치할 확률을 의미한다. 3차원 공간에서 2상 재료를 예로 들면 $P_{ij}(r, \theta, \phi)$ 에서 i (또는 j)는 1 또는 2가 된다. r 은 양 끝점 사이의 거리를 의미하며 θ 는 test line과 z 축과의 각도, ϕ 는 두 점을 잇는 test line의 xy 평면으로의 정사영과 x 축 사이의 각도를 의미한다. 두점 상관함수에서는 양 끝 점이 위치한 상의 정보만이 고려되기 때문

에, 두 점사이의 어떠한 정보도 포함하지 않는다. 일반적인 두점 상관함수의 극값은 다음과 같다.

$$\lim_{r \rightarrow 0} P_{ii}(r, \theta, \phi) = f_i, \quad \lim_{r \rightarrow 0} P_{ij}(r, \theta, \phi) = 0 \quad (i \neq j) \quad (1)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} P_{ii}(r, \theta, \phi) = [f_i]^2, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} P_{ij}(r, \theta, \phi) = [f_i][f_j] \quad (i \neq j) \quad (2)$$

여기서, f_i 는 i 상의 부피비를 의미한다. 식 (1)에 나타난 바와 같이 두 점사이의 거리 r 이 0에 가까워질수록 두 점이 동일한 상에 위치할 확률은 상의 부피비로 수렴하고, 두 점 서로 다른 상에 위치할 확률은 0이 된다. 반대로 r 이 증가할수록 함수 값은 식 (2)와 같이 각 상의 부피비의 곱으로 수렴한다. 본 연구에서는 확률 분포 함수의 고려 대상을 경량 골재 내부의 공극 부분으로 제한하고 있기 때문에, 표현상의 편의를 위해 $P_{ij}(r, \theta, \phi)$ 를 $P_{vv}(r, \theta, \phi)$ 로 표기한다.

본 연구에서는 다양한 형태의 두점 상관함수 가운데, Gokhale 등(2005)이 제안한, 통계적 정보를 이용하는 간단한 지수 함수 형태의 두점 상관함수를 이용하였으며, 식은 다음과 같다.

$$P_{ij}(r, \theta, \phi) = f_i f_j [1 - \exp\{-([P_L(\theta, \phi)]_{ij} / (2f_i f_j))r\}] \quad (i \neq j) \quad (3)$$

$$P_{ii}(r, \theta, \phi) + P_{ij}(r, \theta, \phi) = f_i \quad (4)$$

식 (3)에서 $P_L(\theta, \phi)_{ij}$ 는 두점 상관함수를 살펴보고자 하는 방향으로 test line을 재료 내부에 위치시켰을 때, 단위 test line길이 당 $i-j$ 교차면이 만나는 교차점의 개수이다. 두 점이 i 상에 위치할 확률 P_{ii} 는 2상 재료의 경우 식 (3)과 (4)를 이용하여 계산된다.

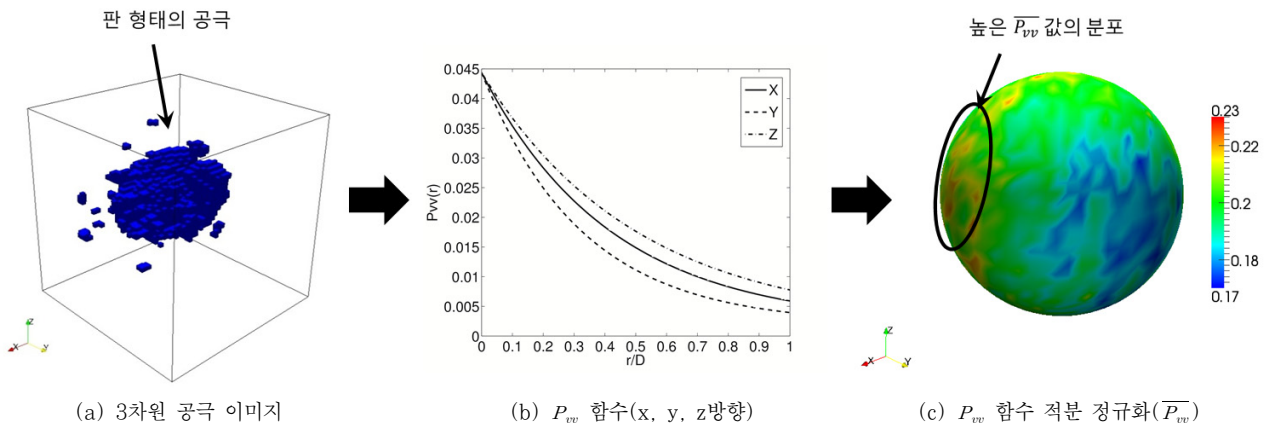


그림 2 CT를 활용한 경량 골재 단면 이미지와 각 방향에 따른 P_{vv} 함수의 적분 정규화($\overline{P_w}$) 결과 (참고 : 그림 2(c)의 colorbar는 방향에 따른 (P_{vv} 함수의 적분값/부피) 값을 의미함)

그림 2(b)는 그림 2(a)의 공극 이미지에 대한 x, y, z방향으로의 P_{vv} 의 결과이다. P_{vv} 의 결과는 그림 2(b)에서 확인할 수 있듯이 각 방향에 대해서 확률 분포 함수의 형태로 표현되기 때문에, 3차원 대상의 방향에 따른 확률 분포를 효과적으로 시각화하는 것에는 한계가 있다. 확률 분포 함수의 형태인 P_{vv} 를 대표값으로 표현하기 위하여, 식 (5)와 같이 각 방향에 따른 0부터 1사이의 P_{vv} 를 적분하여 부피(volume fraction)로 나누어 정규화 하였다. 본 연구에서는 이러한 계산 과정을 P_{vv} 적분 정규화, $\overline{P_{vv}}$ 로 표현하였다.

$$\overline{P_{vv}} = \frac{1}{f_i} \int_0^1 P_{vv} d\left(\frac{r}{D}\right) \quad (5)$$

방향에 따른 P_{vv} 의 결과를 살펴보기 위해서 각 방향에 대한 P_{vv} 적분 정규화 된 $\overline{P_{vv}}$ 값을 그림 2(c)와 같이 구에 표현하였다. 그림 2(c)에서는 단위 반지름의 구를 1536개의 사각형 요소로 분할하여 근사화하고, 요소의 각 절점을 평가 방향으로 하여 총 1538개의 방향에 대해 $\overline{P_{vv}}$ 값을 구하고 요소 사이의 값은 절점으로부터 보간(interpolation)하여 가시화 하였다(Han 등, 2005). 그림 2(a)를 살펴보면 공극 군집이 x축과 나란한 방향으로 넓게 퍼져 있으며, 수직 방향인 y축 방향으로의 두께는 상대적으로 작은 판 형태로 분포하는 것을 확인할 수 있다. 그림 2(c)에서 판 형태의 공극 군집이 분포하는 방향으로 $\overline{P_{vv}}$ 값이 다른 방향에 비해 크게 표현됨과 동시에, 판과 수직(두께)방향으로의 함수 값은 매우 작게 표현된 것을 살펴봄으로써 $\overline{P_{vv}}$ 의 결과가 공극의 공간적 분포를 효과적으로 묘사하고 있음을 확인할 수 있다. 다만 $\overline{P_{vv}}$ 의 경우, 식 (3)에서 확인할 수 있듯이 부피 등에 의하여 함수 값이 큰 영향을 받기 때문에 서로 다른 부피를 가지고 있는 골재들의 공극 분포에 대한 절대적인 비교에 활용하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 $\overline{P_{vv}}$ 를 경량 골재 내부에 분포하는 공극의 이방성을 살펴보기 위한 도구로 활용하기 위하여, 골재 내의 각 방향에 대한 최소 $\overline{P_{vv}}$ 값을 기준으로 하여 골재 내부 공극의 이방성을 표현하였다. 이에 대한 자세한 결과는 본 논문의 4절에 나타나 있다.

3. 경량 골재 강성도의 이방성 분석

경량 골재의 강성도(stiffness)의 평가는 CT 이미지를 이용한 유한요소해석으로 수행하였다. 제작이 완료된 경량 골재의 구형 형상으로는 실험적인 강성도 측정이 매우 어렵기

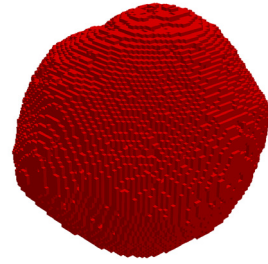


그림 3 경량 골재 1의 유한요소메쉬

때문에 CT 이미지를 통한 실제 미세구조와 해석을 통한 골재의 강성도의 상관관계를 파악하고 건전성을 평가하는 기법이 활용되었다.

경량 골재의 강성도는 CT 이미지로부터 얻은 복셀형태의 격자를 유한요소메쉬로 이용하여 얻었다. 그림 3에는 그림 4(f)에 나타난 경량 골재(공극 이미지) 6의 CT 이미지로부터 얻은 자료의 격자 간격을 재조정하여 계산시간과 결과를 합리적으로 얻을 수 있는 요소 수의 유한요소메쉬로 작성한 예를 제시하였다. 유한요소메쉬는 8점 적분 8절점 육면체요소를 사용하였고, 각 경량 골재 유한요소메쉬의 모델에 따라 7만에서 20만개의 요소수를 포함하였다. 고체(매트릭스)를 나타내는 각 유한요소는 등방성으로 가정하여 탄성계수는 경량 골재 제작에 사용된 모르타르의 탄성계수인 5GPa를 사용하였고 프아송비는 0.15를 사용하였다. 유한요소코드는 탄성 해석을 수행하며 위에서 기술한 경계조건을 적용할 수 있도록 Fortran 95 언어를 이용하여 직접 작성 후, 해석을 수행하였다.

강성도를 얻기 위하여, 각 변형을 요소의 단위 변형을 메쉬에 재하(load)한 결과를 이용한다. 이로부터 얻은 응력 요소가 해당 변형에 대한 강성도 벡터를 이루며 총 6개의 변형을 구성 요소에 대하여 재하를 반복하여 강성도 매트릭스를 얻는다. 즉, 벡터로 표현된 응력(σ_α)과 변형율(ϵ_β)을 이용한 구성방정식은

$$\sigma_\alpha = C_{\alpha\beta} \epsilon_\beta, \beta = 1, 2, \dots, 6. \quad (6)$$

이며, ϵ_β 의 각 요소별 벡터를(예: β 가 1일 경우에는 $\epsilon_\beta = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$) 골재 유한요소메쉬의 경계 표면 상의 각 절점에 변형으로 환산하여 적용하고 탄성해석을 실행한다. 해석 후에 골재 유한요소메쉬 내부 요소로부터 얻어진 응력(σ_α^{elem})은 요소당 전체에 대하여 부피비를 고려하여 평균값을 다음과 같이 구한다.

$$\sigma_\alpha = \frac{1}{V^*} \int_V \sigma_\alpha^{elem} dV \quad (7)$$

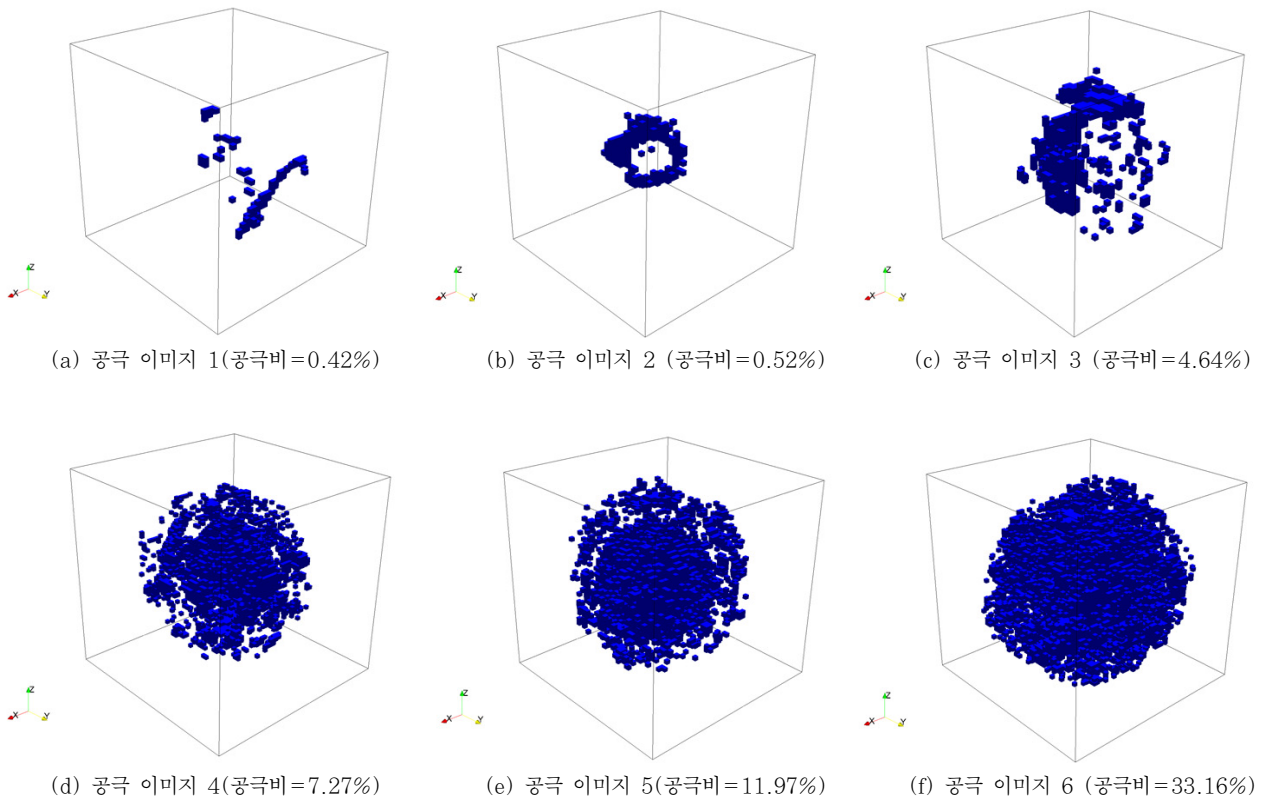


그림 4 경량 골재 내부의 3차원 공극 이미지
 (참고 : 각 공극 이미지의 특성 설명 (a) x축 평면과 나란하게 얇은 판형의 공극 분포, (b) 가운데가 비어 있는 셸 형태의 공극, (c) x축과 z축으로 수직인 방향의 공극 분포, (d)~(e) 구 형태의 공극 군집 분포)

여기서, V 는 골재를 이루고 있는 고체의 부피이고 V^* 는 골재 내의 고체와 공극을 포함한 골재의 전체 부피이다. σ_α^{elem} 는 각 요소의 중심에서의 값을 추출하여 사용하였다. 이렇게 얻은 σ_α 는 $C_{\alpha\beta}$ 매트릭스의 β 열의 강성도 벡터가 되며 모든 β 에 대하여 위의 작업을 반복하여 강성도 매트릭스 $C_{\alpha\beta}$ 를 얻을 수 있다. 2차원 $C_{\alpha\beta}$ 매트릭스의 구성 요소를 재 배열해서 4차원 강성도 텐서 C_{ijkl} 를 구한다.

본 연구에서는 공극 분포 특성에 대한 강성도의 이방성을 제시하는 방법으로 탄성계수의 확장된 개념인 방향 탄성계수 (directional elastic modulus)를 가시화하였다. 방향 탄성계수는 일방향 하중이 임의의 방향(\mathbf{n})으로 작용할 때 재료의 탄성계수이며 다음과 같은 관계를 가진다(Nye, 1985).

$$\frac{1}{E(\mathbf{n})} = n_i n_j n_k n_l S_{ijkl} \quad (8)$$

아래첨자 i, j, k, l 은 1, 2, 3을 나타내는 인덱스이며, S_{ijkl} 은 연성도(compliance) 텐서로서 다음과 같이 강성도 텐서와 $S_{ijkl} = C_{ijkl}^{-1}$ 의 관계를 갖는다.

방향에 탄성계수 $E(\mathbf{n})$ 의 가시화는 $\overline{P_{vv}}$ 의 가시화방법(그

림 2(c))과 동일하다. 이와 같이 구한 방향 탄성계수와 공극 분포와의 비교 결과 및 분석을 다음 절에 기술하였다.

4. 결과 및 분석

본 연구에서는 공극 분포에 따른 경량 골재의 확률 분포 함수 및 역학적 물성치의 차이를 살펴보기 위해 그림 4와 같이 서로 다른 공극 분포를 가진 골재들을 비교, 분석하였다. 그림 4는 서로 다른 부피비를 가진 골재들의 내부 공극 분포를 3차원 이미지로 표현한 것이다. 경량 골재는 골재의 종류에 따라 내부 공극비의 차이가 크고, 확률 분포 함수의 특성 상, 공극비에 의해 함수가 큰 영향을 받기 때문에, 본 연구에서는 그림 4의 골재 공극 이미지를 대상으로 공극비를 크기를 기준으로 구분하여 공극의 이방성 및 강성도를 살펴보았다.

4.1 경량 골재 내부 공극의 이방성 분석

경량 골재의 공극 분포를 파악하기 위해서 확률 분포 함수인 두점 상관함수를 사용하였다. 그림 2에서 나타난 바와 같이 3차원 공극 이미지를 대상으로 각 방향에 대한 확률 분포

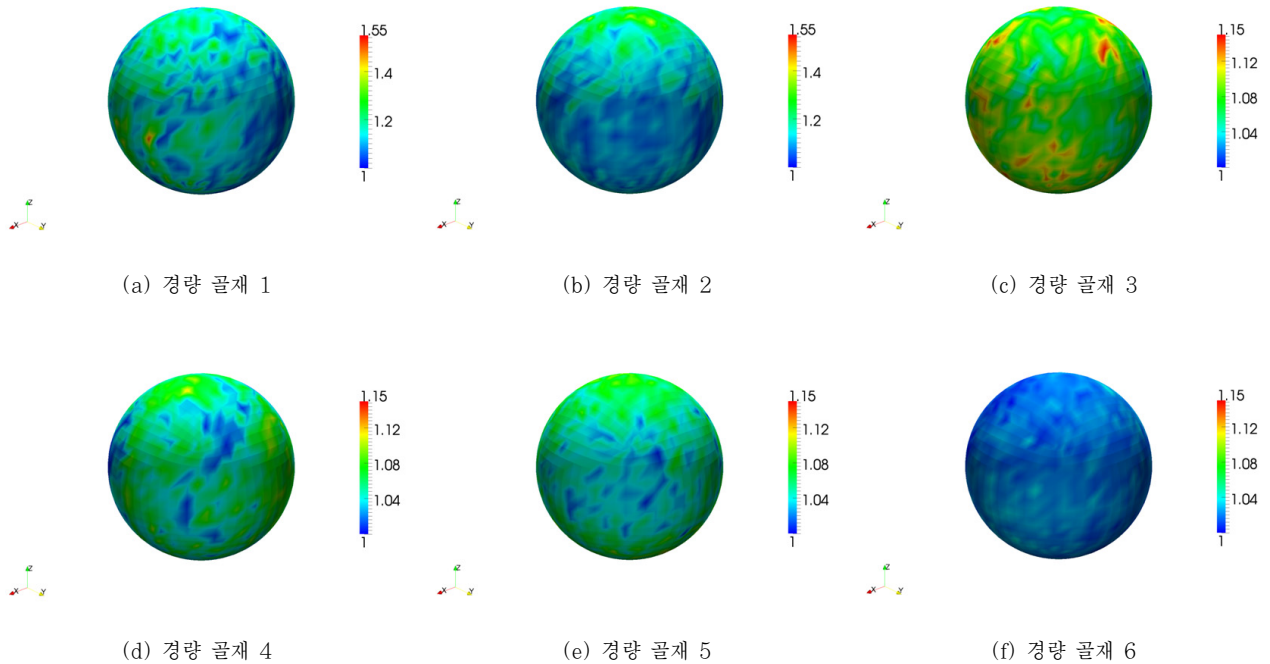


그림 5 $\overline{P_{vv}}$ 를 활용한 경량 골재 내부 공극의 이방성

(참고 : 컬러바의 숫자는 각 방향에 따른 $\overline{P_{vv}}$ 값을 해당 골재의 최소 $\overline{P_{vv}}$ 값으로 나누어서 이방성을 표현한 것으로서, 골재의 공극비 및 이방성 범위에 따라 스케일 조정(컬러바 범위는 (a)~(b)=1.0~1.55, (c)~(f)=1.0~1.55))

함수의 결과를 적분하고 부피로 나누어 스칼라 값을 계산하였다. 다만, 2.2절에서 언급한 바와 같이, P_{vv} 함수는 부피 등에 의하여 함수 값이 큰 영향을 받기 때문에 서로 다른 부피를 가진 공극들 사이의 절대적인 수치를 비교하기에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 각 골재마다 모든 방향에 대한 $\overline{P_{vv}}$ 값을 해당 골재의 최소 $\overline{P_{vv}}$ 값으로 나누어서 경량 골재 내부의 공극 분포의 이방성을 표현하였다.

그림 5는 그림 4에 나타난 공극의 공간적 분포 상태를 $\overline{P_{vv}}$ 를 활용하여 표현한 것이다. 그림 5는 각 방향에 따른 $\overline{P_{vv}}$ 값을 모든 방향의 $\overline{P_{vv}}$ 값들 가운데 최소값으로 나누어 공극 분포의 이방성을 표현한 그림이다. 그림 4의 3차원 공극 이미지와 그림 5의 확률 분포 함수를 이용한 공극 분포의 확률적인 묘사를 비교하면, 각 경량 골재의 공간적 공극 분포 특성을 파악할 수 있다.

공극비가 5% 이하인 그림 4의 (a)부터 (c)의 경량 골재 공극은 (d)부터 (f)의 공극과는 달리, 공극 이미지를 통해서 뚜렷한 방향성을 확인할 수 있다. 특히 공극 분포의 뚜렷한 이방성은 본 연구에서 관찰한 골재 중, 공극비가 1% 미만인 경량 골재에서 더 뚜렷하게 나타나는 것으로 확인되었다. 그림 4(a)와 그림 5(a)의 경량 골재 1을 비교해 보면 공극 분포의 이방성이 최대 55%까지 차이가 나는 것이 묘사되는 것을 확인할 수 있고, 그림 4(b)의 경량 골재 2를 살펴보면 원

점에서부터 z축과 나란한 방향으로 가운데가 비어있는 쉘 형태의 공극이 분포하고 있다. 그림 5(b)를 살펴보면 z축 방향으로 공극 분포가 크게 나타나고, 쉘과 수직인 방향으로 공극 분포가 매우 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그림 4(c)의 경량 골재 3 공극 이미지는 x축과 z축으로 수직인 방향으로 공극이 쉘(shell) 형태로 분포하고 있다. 그림 5(c)를 살펴보면 그림 4(c)에서 쉘 형태의 공극이 분포하는 방향으로의 $\overline{P_{vv}}$ 값이 다른 방향의 값들보다 최대 15%정도 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해서, $\overline{P_{vv}}$ 를 활용한 그림을 통해 공극 분포의 특성을 효과적으로 표현할 수 있음을 알 수 있다.

그림 4에서 공극비가 5% 이상인 (d)부터 (f)의 공극 분포들은 전체적으로 구 형태의 공극 분포를 나타내며 각 방향으로 비교적 고른 공극 분포를 나타내는 것처럼 보이지만 그림 5의 확률 분포 함수를 통해서 확인하면 그림 4(d) 경량 골재 4의 경우, 방향에 따라 최대 15%정도의 이방성을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 특정 방향으로의 $\overline{P_{vv}}$ 값이 크게 나타나는 것은 그 방향으로 더 많은 공극 군집이 분포할 확률이 높다는 것을 의미한다. 그림 4(e)의 경량 골재 5의 공극 이미지도 그림 5(e)를 통해서 확인해 보면, 전체적으로 균등하게 분포된 것처럼 보이지만 x축과 y축 방향으로의 공극 분포가 상대적으로 다른 방향에 비해 더 밀집된 것을 확

인할 수 있다. 그림 4(f)의 경량 골재 6의 경우, 최대 4% 정도의 이방성을 보이기는 하지만, 다른 골재에 비해 비교적 균등한 공극 분포를 가지고 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 5의 결과를 확인함으로써, $\overline{P_{vv}}$ 의 활용을 통해 경량 골재 공극의 공간적 분포를 효과적으로 묘사하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 $\overline{P_{vv}}$ 를 사용하는 방법을 활용하면, 경량 골재 내부의 공극 분포 특성을 효과적으로 묘사할 수 있을 뿐만 아니라, 정성적인 묘사를 통해서 공극 분포의 이방성과 같은 특성을 파악할 수 있음을 확인하였다.

4.2 경량 골재의 방향에 따른 강성도 분석

경량 골재 공극의 분포에 따른 역학적 특성을 살펴보기 위하여, 본 논문의 3절에 제시된 방법을 사용하여 그림 6과와 7에 나타난 바와 같이 방향에 따른 경량 골재의 강성도를 계산하였다. 그림 6은 각 방향으로 계산된 강성도의 절대적인 크기를 비교하기 위하여, 그림 4에서 공극비 5%를 기준으로 구분한 것을 바탕으로 컬러바(color bar)의 스케일(scale)을 구분하여 표현하였다. 그림 6의 (a)부터 (c)는 0.14(최소 0.85~최대 0.99)로 표현하였고, (d)부터 (f)는 컬러바의 크기를 0.3(최소 0.6~최대 0.9)으로 표현하였다. 그림 6의

(a)~(c)를 살펴보면, 그림 4에서 공극비가 작을수록 경량 골재의 강성도가 큰 것을 확인할 수 있다. 즉, 골재 내부에 많은 공극을 포함하고 있을수록 골재 자체의 강도는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 6의 (d)~(f)에서도 공극비가 큰 골재일수록 골재의 강도가 작은 것을 확인하였다.

그림 6을 살펴보면 절대적인 강성도의 크기에 상관없이 방향에 따른 이방성이 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 경량 골재 강성도의 이방성을 확인하기 위하여, 그림 5에서 적용한 방법과 마찬가지로 골재마다 강성도의 최소값으로 각 방향의 강성도를 나누어서 그림 7과 같이 강성도의 이방성을 표현하였다. 그림 7을 살펴보면 각 골재의 방향에 따른 강성도의 차이가 표현되어 있다. 특히, 공극비가 작은 경량 골재의 경우인 경량 골재 1(그림 7(a))에서 경량 골재 3(그림 7(c))을 살펴보면 방향에 따른 강성도의 차이가 경량 골재 1과 2의 경우 최대 1.2%로써 상대적으로 작은 이방성을 나타내는 것을 확인하였으며, 경량 골재 3의 경우 에도 최대 7%의 이방성을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 하지만 공극비가 큰 경량 골재(그림 7(d)~(f))의 경우 최대 15%의 이방성을 보임으로써, 상대적으로 공극이 작은 골재에 비해 이방성이 뚜렷한 것을 관찰할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로, 공극 분포에 따라 골재의 강성도가 이방성을 나타냄을 확인할 수 있지만, 골재 내부의 공극비가 작을수록 방향이 골재

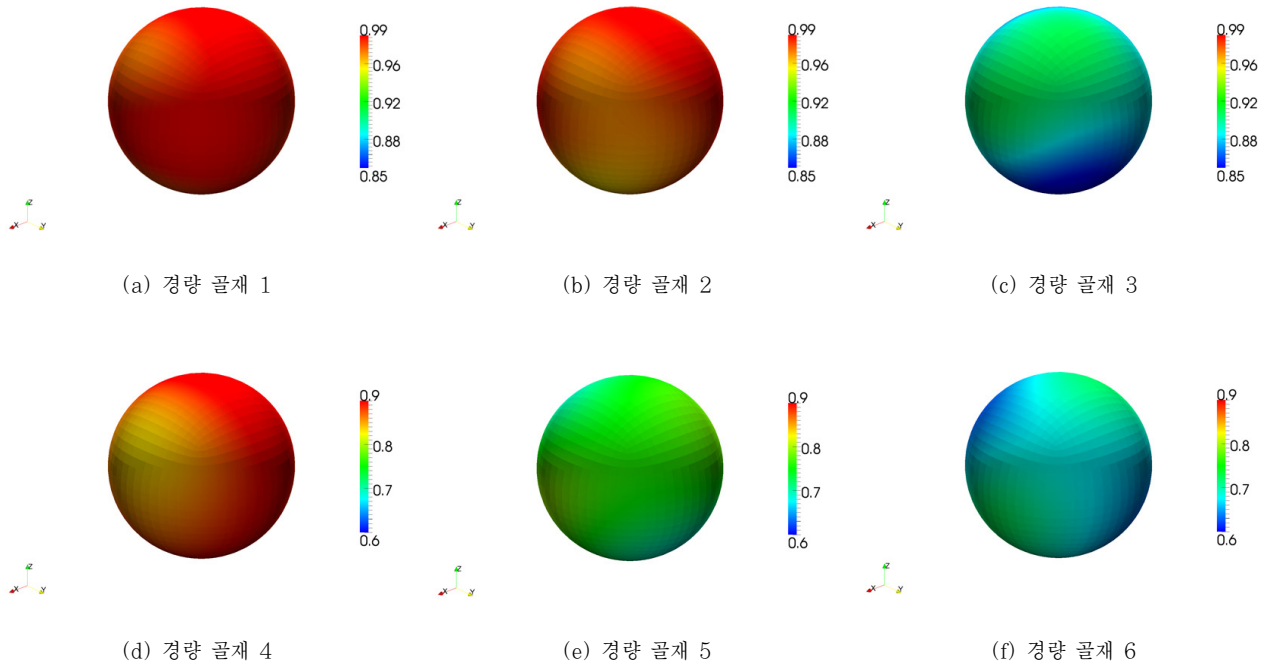


그림 6 서로 다른 공극 분포를 가진 경량 골재의 방향에 따른 강성도

(참고 : 컬러바의 숫자는 각 골재의 방향에 따른 방향 탄성계수의 값에 대한 정보를 표현한 것으로서, 공극비에 의해 두 그룹으로 나누어 표현됨. (a), (b), (c) - 내부 공극비 5% 미만의 골재 그룹(컬러바 범위 : 0.85~0.99), (d), (e), (f) - 내부 공극비 5% 이상의 골재 그룹(컬러바 범위 : 0.6~0.9))

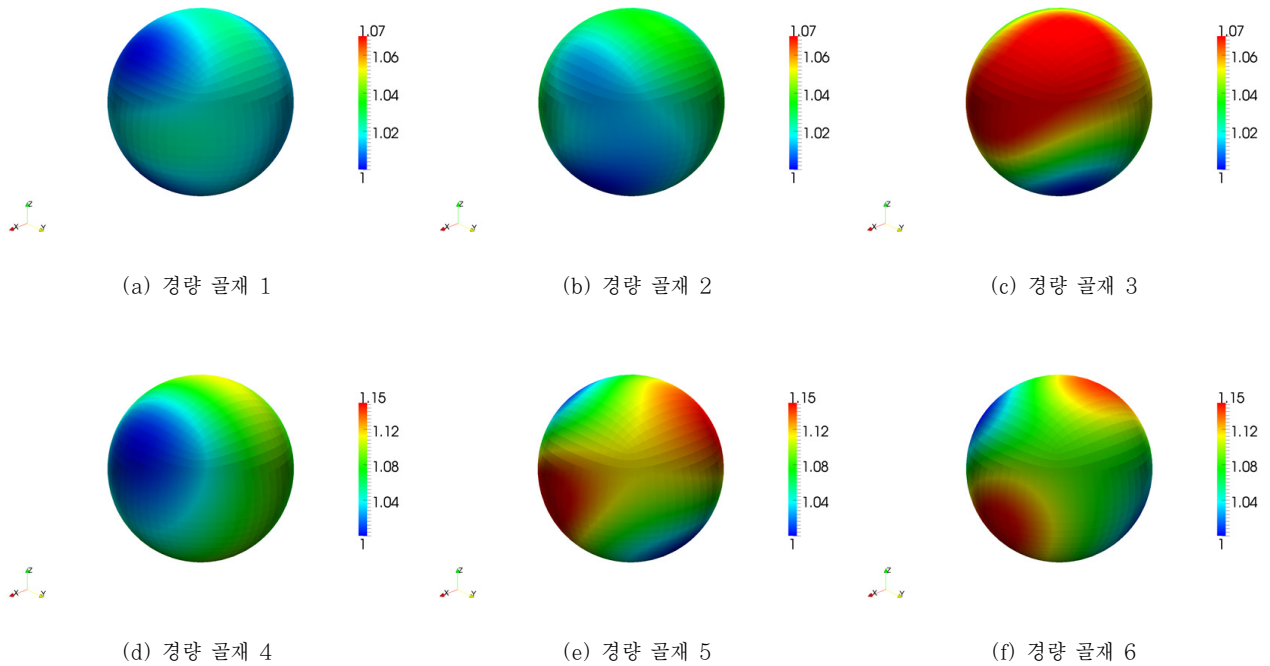


그림 7 방향에 따른 최소 강성도 값을 기준으로 표현된 경량 골재 강성도의 이방성

(참고 : 컬러바의 숫자는 각 방향에 따른 방향 탄성계수의 값을 해당 골재의 최소 방향 탄성계수 값으로 나누어 표현한 것으로서, 이방성의 크기에 따라 두 그룹으로 구분하여 표현됨 (a), (b), (c) - 강성도 이방성 7% 미만의 골재 그룹(컬러바 범위 : 1~1.07), (d), (e), (f) - 강성도 이방성 7% 이상의 골재 그룹(컬러바 범위 : 1.0~1.15))

의 역학적 특성에 미치는 영향이 감소하는 것을 알 수 있다.

공극 분포와 강성도의 상관관계를 확인하기 위해서 그림 5와 그림 7을 비교하면, 골재의 방향에 따른 공극 분포의 이방성이 나타나는 것과 마찬가지로 강성도에서도 이방성을 확인할 수 있다. 골재의 공극비와 강성도의 상관관계를 분석하면, 공극비가 1% 미만인 경량 골재 1과 2에서는 $\overline{P_{vv}}$ 로 확인한 공극 분포의 이방성이 매우 뚜렷함에도 불구하고, 강성도의 이방성은 3%내외로 매우 작은 것을 확인하였다. 하지만 공극비가 4~12%인 경량 골재 3~5의 경우, 경량 골재 1과 2에 비해 상대적으로 작은 공극 분포의 이방성이 있는 것으로 확인되었음에도 불구하고, 강성도의 이방성은 7~15%의 이방성을 나타낸다. 즉, 이러한 결과를 바탕으로 공극 분포의 이방성을 갖는 경량 골재의 경우, 공극 분포의 방향과 일치하지는 않지만, 공극 분포가 이방성을 나타내는 것과 마찬가지로 골재의 강성도에서도 이방성을 확인할 수 있다. 특히 공극비가 높은 경량 골재일수록 공극 분포의 이방성이 강성도의 이방성에 더 큰 영향을 미치는 것을 결과를 통해 알 수 있다. 다만, 경량 골재 6의 경우 그림 5의 $\overline{P_{vv}}$ 를 통해 확인한 공극 분포는 거의 등방성이었으나, 그림 7을 통해 살펴볼 수 있듯이 경량 골재의 강성도는 뚜렷한 이방성을 나타내었다. 즉, 경량 골재 6과 같이 공극비가 30% 이상으로 공극비가 매우 큰 골재의 경우, 부피비에 큰 영향을 받는

$\overline{P_{vv}}$ 를 통해서도 공극 분포의 이방성이 뚜렷하게 표현되지 않기 때문에 공극 분포와 강성도의 이방성에 대한 관계를 확인하기 위해서는 $\overline{P_{vv}}$ 이외에 공극의 다차원 연결성을 표현할 수 있도록 추가적인 공극 분포를 정량화하는 인덱스(index)가 필요한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 CT 이미지 처리 기법을 활용하여 경량 콘 크리트를 구성하는 경량 골재 내부에 포함된 공극의 공간적 분포를 살펴보았다. 육안으로 확인하기 어려운 경량 골재 내부의 구조를 파악하기 위해 CT를 사용하여 얻은 연속적인 골재 단면 이미지를 적층하여 3차원으로 경량 골재의 공극 분포를 묘사하였다. 경량 골재 내부에 존재하는 공극의 공간적 분포를 수학적으로 묘사하기 위하여 확률 분포 함수인 두 점 상관함수를 활용하여 골재 내부의 공극 군집 정도를 파악하였다. 또한 유한요소해석을 이용하여 공극 군집의 방향에 따른 강성도를 계산함으로써, 공극 분포가 골재의 역학적 물성치에 미치는 영향을 살펴보았다. 그 결과, CT를 이용한 이미지 분석 방법을 통해서 경량 골재 내부에 존재하는 공극 분포를 효과적으로 묘사할 수 있음을 확인하였고, 공극비에 따라서 공극 분포와 강성도 사이의 상관관계가 존재하는 것

을 확인하였다. 추후 연구로써, 높은 공극비의 공극 분포를 정량화하는 인덱스에 대한 연구 및 본 연구의 결과를 바탕으로 경량 골재의 강도(strength)와 공극 분포의 관계 등에 대한 분석 및 실험과의 비교 연구를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#09 첨단도시 A01)에 의해 수행되었습니다. 또한, 시편의 X-선 CT 촬영은 한국건설기술연구원의 장비 협조로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

정상엽, 김영진, 윤태섭, 전현규 (2011) Micro CT 이미지 분석을 통한 경량 골재 콘크리트의 공극 분포 분석, 대한토목학회논문집, 31(2A), pp.121~127.

정상엽, 한동석 (2011) 2상 다결정 미세구조의 상 분포 위상에 따른 역학적 거동 분석, 한국전산구조공학회 논문집, 24(1), pp.9~16.

정상엽, 한동석 (2011) 투수 콘크리트의 투수성과 확률 분포 함수의 상관관계 분석, 한국방재학회 논문집, 11(6), pp.91~98.

Chung, S.-Y., Han, T.-S. (2010) Reconstruction of Random Two-Phase Polycrystalline Solids using Low-Order Probability Functions and Evaluation of Mechanical Behavior, *Computational Materials Science*, 49, pp.705~719.

Coker, D.A., Torquato, S. (1995) Extraction of Morphological Quantities from a Digitized Medium, *Journal of Applied Physics*, 77, pp.6087~6099.

Corson, P.B. (1974) Correlation Functions for Predicting Properties of Heterogeneous Materials. I. Experimental Measurement of Spatial Correlation

Functions in Multiphase Solids, *Journal of Applied Physics*, 45, pp.3159~3164.

Dorey, R.A., Yeomans, J.A., Smith, P.A. (2002) Effect of pore Clustering on the Mechanical Properties of Ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, 22, pp.403~409.

Gokhale, A.M., Tewari, A., Garmestani, H. (2005) Constraint on Microstructural Two-Point Correlation Functions, *Scripta Materialia*, 53, pp.989~993.

Han, T.-S., Dawson, P.R. (2005) Representation of Anisotropic Phase Morphology, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 13, pp.203~223.

Singh, H., Gokhale, A.M., Lieberman, S.I., Tamirisakandala, S. (2008) Image Based Computations of Lineal Path Probability Distributions for Microstructure Representation, *Materials Science and Engineering A*, 474, pp.104~111.

Tewari, A., Gokhale, A.M., Spowart, J.E., Miracle, D.B. (2004) Quantitative Characterization of Spatial Clustering in Three-Dimensional Microstructures using Two-Point Correlation Functions, *Acta Materialia*, 52, pp.307~319.

Torquato, S. (2002) *Random heterogeneous materials*, Springer, New York, p.701.

Underwood, E. (1970) *Quantitative stereology*, Addison-Wesley, Massachusetts, p.274.

- 논문접수일 2012년 3월 2일
- 논문심사일
 - 1차 2012년 3월 18일
 - 2차 2012년 5월 22일
- 게재확정일 2012년 5월 23일