

# Micro X-ray CT를 이용한 글라스 비드의 3차원 간극 구조 정량화

## Quantification of 3D Pore Structure in Glass Bead Using Micro X-ray CT

정 연 종<sup>1</sup> Jung, Yeon Jong

윤 태 섭<sup>2</sup> Yun, Tae Sup

### Abstract

The random and heterogeneous pore structure is a significant factor that dominates physical and mechanical behaviors of soils such as fluid flow and geomechanical responses driven by loading. The characterization method using non-destructive testing such as micro X-ray CT technique which has a high resolution with micrometer unit allows to observe internal structure of soils. However, the application has been limited to qualitatively observe 2D and 3D CT images and to obtain the void ratio at macro-scale although the CT images contain enormous information of materials of interests. In this study, we constructed the 3D particle and pore structures based on sequentially taken 2D images of glass beads and quantitatively defined complex pore structure with void cell and void channel. This approach was enabled by implementing image processing techniques that include coordinate transformation, binarization, Delaunay Triangulation, and Euclidean Distance Transform. It was confirmed that the suggested algorithm allows to quantitatively evaluate the distribution of void cells and their connectivity of heterogeneous pore structures for glass beads.

### 요 지

무질서하고 불균질한 형상을 갖는 지반 재료 내 간극 구조는 하중에 의한 재료의 변형 및 간극 내 유체의 흐름 등 물리 역학적 거동에 중요한 영향 인자이다. 최근 들어 X-ray CT에 의한 비파괴 검사를 통해 지반 재료의 내부 구조를 마이크로미터 단위의 높은 해상도를 통해 평가하는 기법이 사용되고 있다. CT 이미지는 재료의 많은 정보를 포함하고 있음에도 그에 따른 이미지 해석 기법의 개발이 다소 미흡하여 2, 3차원 이미지의 정성적 관찰 및 간극비와 같은 거시적인 물성치 획득만이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 연속적으로 획득된 글라스 비드의 2차원 CT 이미지에 기반하여 3차원 입자 및 간극 구조를 형성하고, 복잡한 간극구조를 간극셀과 간극채널로 정량적 분리를 실시하였다. 이를 위해 좌표 변환법, 이진화, 들로네 삼각망, 그리고 유클리디안 거리변환법과 같은 이미지 프로세싱 기법을 3차원 CT 이미지에 적용하였고 불균질한 글라스 비드의 간극구조에 대해 정량적으로 간극셀의 분포 및 간극간의 연결도 평가가 가능함을 확인하였다.

**Keywords :** Image processing, Pore structure, Void cell, X-ray CT

## 1. 서 론

흙의 물리 역학적 거동 분석 및 물성치 획득을 위해

널리 사용되고 있는 탄성파와 전자기파에 의한 비파괴 검사기법은 연속적으로 배치된 센서로부터 대상 재료를 거쳐 나온 신호를 중복하여 획득한 후 2, 3차원에

1 정희원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 석박사통합과정 (Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ.)

2 정희원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 조교수 (Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ. taesup@yonsei.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

서의 역산기법을 통해 토모그램을 생산한다. 이러한 기법들은 측정에 사용된 센서의 개수 및 배열에 따라 대상 물질내부를 판단할 수 있는 해상도가 결정되며 거시적인 흠의 거동 파악에 유용하다. 그러나 흠은 무질서하고 불균질성을 갖는 입자상 물질로 동일한 간극비를 갖는 입자 패킹이라도 평가되는 수리전도도 값이 상이하게 평가되는 등 거시적 거동에 영향을 미친다(Kress et al., 2011). 특히 실내 실험을 통해 흠의 물성치 평가를 수행할 경우 물질의 종류, 상(phase) 및 공간적 분포에 대한 높은 해상도 정보가 필수적이다. 입자 스케일에서의 거동 평가는 개별요소법을 사용한 가상의 입자구조의 분석 또는 X-ray CT를 통한 마이크로 미터 단위의 높은 해상도를 갖는 2, 3차원 이미지의 획득을 바탕으로 물리적 이미지 구축을 통해 수행한다(Vogel and Roth, 2001). 다양한 기법을 통해 획득된 3차원 이미지는 구성 물질의 공간적 분포를 정성적으로 보여주며 이를 통해 간극률과 같은 기본적인 물성치 획득이 가능하다(김광엽 등, 2011).

국외의 경우 사질토 및 점성토에 하중을 가하며 연속적인 CT 촬영을 통해 파괴거동 및 전단면 형성과 같은 재료의 역학적 거동을 평가하고 고해상도 장비를 이용한 입자 형상 평가 등에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Barboczi, 2010; Hall et al., 2010; Kikuchi et al., 2010; Watanabe et al., 2010). 하지만 대부분의 연구가 시편의 변형 및 불연속면 발달에 대한 거시적 관찰에 한정되고 있으며 입자의 거동 및 개별 공극에 대한 분석은 미흡하다. 국내의 경우 암석 및 콘크리트를 대상으로 내부 공극 구조의 평가 및 유체흐름과의 상관성 분석에 대해 일부 연구가 수행되고 있으나 입자상 물질인 사질토를 대상으로 한 연구는 아직 미흡하다(김종태 등, 2011; 정교철과 Takahashi, 2010; 정상엽 등, 2011). 흠에 대한 연구는 분석 대상이 되는 입자 및 간극의 크기가 CT 장비 해상도로 측정이 가능할 만큼 커야 하므로 점성토에는 적용이 제한적이며, 사질토의 경우 간극 구조가 다른 재료에 비해 복잡하여 정량화에 어려움이 많다. 특히 간극 구조는 지반 내 유체 흐름을 모사할 경우 중요하며 모사 시료 및 CT 이미지에 기반한 유한요소해석을 통해 전도도 산출이 가능하다(Narsilio et al., 2009). 하지만 이는 해석에 필요한 컴퓨터 처리용량이 상당하여 적용이 제한된다(Bosl et al., 1998; Fredrich et al., 2006; Narsilio et al., 2010). 이미지에 기반한 네트워크 모델 및 볼츠만 격자 모델 등과 같은 방법을 이용하여

유체 흐름을 분석하는 연구의 경우 간극 이미지 정량화 과정에 따라 해석 결과가 다소 상이하다. 개별 요소법으로 생성된 모사 시료를 이용하여 간극 구조 정량화 및 네트워크 모델을 이용한 연구를 통해 수리전도도 산출이 가능하나 이 경우 입자의 위치 정보가 이미 알려진 상태로 간극 구조 분석이 실제 CT 이미지를 사용했을 경우와 비교하여 분석이 다소 용이하다(Kress et al., 2011). 해석의 어려움에도 불구하고 X-ray CT에 의한 3차원 입자 및 간극 이미지는 물리, 역학적 해석에 직접적인 기초자료일 뿐만 아니라 간극 막힘 현상에 따른 흠의 거동 변화, 간극내 결정화 작용에 의한 유체 흐름 변화, 유체 흐름의 주요한 통로가 되는 간극의 연결도 평가, 외부 하중에 따른 불연속면 발달 등 거시적으로 관찰이 불가능한 현상들을 규명하는데 유용한 자료가 된다. 이를 통해 실험으로 규명하기 어려운 전도 현상에 대한 근본적인 이해가 가능하고 지하수의 흐름, 에너지 회수 등 흠내의 유체 거동은 간극비 이외에도 간극 구조에 영향을 많이 받기 때문에 넓은 활용성을 갖는다(Kress et al., 2011; Man and Jing, 1999).

본 연구에서는 micro X-ray CT를 이용하여 입자상 물질의 3차원 간극 이미지를 획득하고 간극 구조를 정량화하는 알고리즘을 제안하였다. 다양한 이미지 프로세싱 기법의 적용을 통해 불균질한 3차원 간극 구조 및 상호간 연결도 분석을 수행하여 정성적인 3차원 CT 영상을 통해 정량화된 간극 구조를 산출하였다.

## 2. 지반 재료의 3차원 이미지 획득 및 처리

### 2.1. 입자상 물질의 3차원 간극 구조

흠은 고체물질인 입자와 입자들 사이의 간극으로 구성된다. 미시적 관점에서 흠의 간극은 서로 유기적으로 연결되어 있으며 이들 간극의 형상은 입자들의 상대적 위치와 배열에 따라 결정된다. 따라서 불규칙한 형태의 3차원 간극구조를 정량화하기 위해 입자들로 둘러싸인 가장 큰 공간을 간극셀(void cell)이라 하고 이들끼리 연결되는 통로를 간극채널(void channel), 간극채널 가운데 가장 좁은 단면을 가지는 지점을 간극통로(void throat)라고 정의할 수 있다(Abichou et al., 2004; Al-Raoush and Willson, 2005). 그림 1은 규칙적인 배열을 갖는 입자들에서 위에서 정의한 간극구조의 정의를 보여준다. 간극셀의 경우 그림 1에 표시된 점을 기준으로 인접

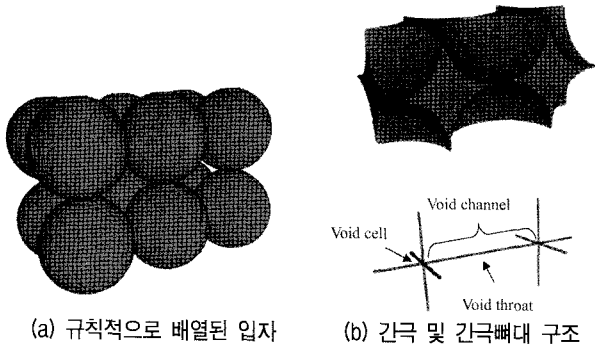


그림 1. 규칙적인 입자에서의 간극구조 정의

한 입자들에 최적으로 내접할 수 있는 구(sphere)로 표현되며 3차원 무질서 패킹의 경우 간극채널은 선형이 아닌 곡선의 형태를 보인다. 이와 같이 간극구조를 대표할 수 있는 간극셀과 간극채널 구조를 분석하기 위해 X-ray CT 이미지에 기반한 정량화를 다음과 같이 수행하였다.

## 2.2. 이미지 획득

자연상태의 사질토의 경우 입자 형상이 불규칙하고 그에 따른 간극 형상이 상당히 복잡하여 본 연구에서는 구형에 가까운 글라스 비드 패킹의 3차원 이미지를 Micro X-ray CT(NFP-POLARIS-G90MVC, X-ray 출력: 90kVp 이하, 전류범위: 180 $\mu$ A 이하, 이미지 재구성: Feldkamp-Davis-Kress's(FDK) 방법, 최대 해상도: 15 $\mu$ m, 나노포커스레이)를 이용하여 획득하였다. 일반적으로 재료의 형상을 적절히 표현하기 위해서는 최소한 20개 이상의 픽셀로 구성되어야 하므로 본 연구에서는 실제 사질토의 직경 범위와 유사한 0.5mm~2mm 직경을 갖는 입자를 선택하였다. Micro X-ray CT는 2차원 단면을 갖는 연속적인 8비트 이미지를 생성하여 촬영단면에 수직 한 방향으로 적층할 경우 3차원 이미지의 구성이 가능하다. 그림 2a는 본 연구에서 획득한 원본 이미지로 픽셀의 크기는 0.028mm  $\times$  0.028mm 이며 시료 수직방향으로는 0.03mm간격으로 2차원 이미지가 획득되었다.

검은색으로 표현된 부분은 입자 내부 간극, 회색은 입자를 나타낸다. 전체적인 이미지는 입자와 간극의 구분이 명확하게 보이나 입자-경계부분을 확대할 경우 그 경계가 불분명하다.(그림 2b). 이는 CT 촬영 시 픽셀 내부에 흩입자와 간극이 동시에 존재함에 기인하며 이에 대한 보정 및 간극 구조 추출을 위한 알고리즘은 다음과 같다.

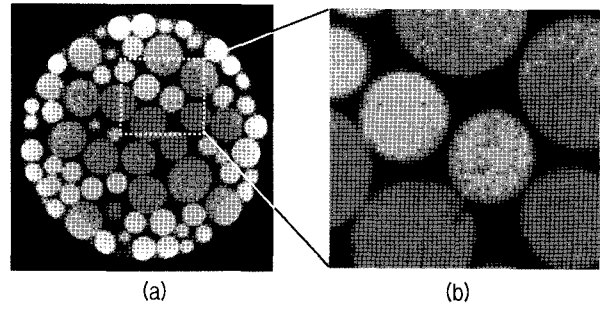


그림 2. (a) 8비트 원본 이미지 및 (b) 입자와 간극 경계

## 2.3. 간극 평가 알고리즘

8비트 영상 정보를 갖는 2차원 원본 이미지는 재료의 감쇠계수(attenuation coefficient)에 따라 X-ray 에너지의 투과 정도가 달라지고 고체인 입자상 물질이 255에 가까운 밝은 색을, 간극 및 외부 배경은 0에 가까운 어두운 색을 갖는다. 또한 CT에 의해 획득된 이미지는 다양한 형태의 노이즈를 포함하고 있어 이미지 향상 기법의 적용이 필수적이다. 일반적으로 노이즈 제거는 주변 이미지와의 평균값을 사용하여 이미지를 부드럽게 만드는 평균값 필터(median filter)를 사용하나 이는 서로 다른 상(phase)간의 경계를 모호하게 하므로 본 연구에서는 다음과 같은 단계의 이미지 향상 기법을 순차적으로 적용하여 간극과 입자를 분리하였다.

### 2.3.1 이방성 확산 필터(Anisotropic diffusion filter)

서로 다른 상(phase)간의 노이즈를 감소시키는데 효과적인 방법으로 평균 필터(mean filter)나 중간값 필터(median filter)를 적용할 때 발생할 수 있는 경계의 뭉뚱화(smoothing) 현상을 줄일 수 있다.

### 2.3.2 라플라시안 필터(Laplacian filter)

경계(edge)를 검출하고 이를 강조시킴으로써 이진화(binanzation) 작업시 입자와 간극 경계를 보다 명확히 할 수 있다. 본 연구에서 적용한 라플라시안 필터는 5 $\times$ 5 커널(kernel) 사이즈를 갖고 중심부의 픽셀값을 주변부 대비 32배 증폭시켰다. 그림 3a는 이방성 확산 필터 및 라플라시안 필터가 적용된 이미지이다.

### 2.3.3. 한계값 처리를 통한 이진화

필터링을 통해 향상된 이미지는 8비트 이미지 정보를 가지고 있으며 입자는 255에 가까운 값을, 간극은 0에

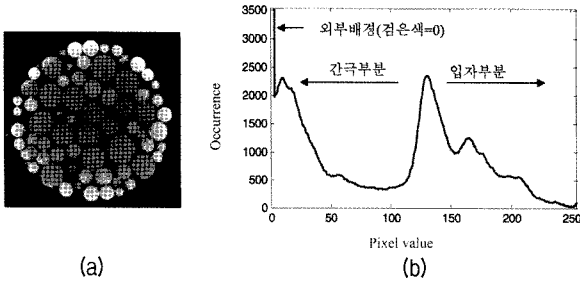


그림 3. (a) 필터링 된 원본 이미지 및 (b) 8비트 픽셀값 분포

가까운 픽셀값을 갖는다. 따라서 간극을 분리하기 위해서 일정한 한계값을 설정하여 입자와 간극을 구분하는 이진화 과정이 필수적이다. 그림 3a 이미지내의 픽셀값 분포는 그림 3b의 히스토그램과 같다. 0의 값은 외부 배경에 의한 것이며 낮은 픽셀값을 갖는 부분이 간극, 큰 값은 입자에 해당한다. 한계값을 정하는 방법은 픽셀값의 분포에 기반한 Otsu 방법과 전역적 연속 반복법이 있다(Otsu, 1979; Rafael and Woods, 2002). Otsu 방법은 식 (1)과 같이 임의로 설정된 한계값( $t$ )을 기준으로 두 개의 클래스(class)를 나누고 해당 클래스의 분산(variance,  $\sigma^2$ )과 확률값의 곱을 합하여 계산된 내부클래스분산 (intra-class variance,  $\sigma_w^2$ )의 값이 최소가 될 때의 한계값을 정한다.

$$\sigma_w^2(t) = \omega_1(t)\sigma_1^2(t) + \omega_2(t)\sigma_2^2(t) \quad (1)$$

연속 반복법은 초기 한계값( $t_0$ )을 선택 후 이를 바탕으로 두 개의 클래스를 만들어 각 클래스 영역내 픽셀의 평균 명암도( $\mu_1$ 과  $\mu_2$ )에 해당하는 8비트 값의 평균을 구한 후(식 2) 이를 다시 초기 한계값으로 선택하는 과정을 되풀이 한다. 이때 한계값 간의 차이가 미리 정한 값보다 작을 때까지 반복 계산을 되풀이하여 최종 한계값을 설정한다.

$$t = \frac{1}{2}(\mu_1 + \mu_2) \quad (2)$$

한계값을 정한 후 그 값보다 작거나 같으면 간극(0)으로, 크면 입자(1)로 이진화하면(식 3) 한계값에 따라 그림 4와 같은 이미지 획득이 가능하다.

$$I(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x, y) > t \\ 0 & \text{if } f(x, y) \leq t \end{cases} \quad (3)$$

한계값이 80일 경우 많은 픽셀 정보가 입자로 인식되어 구형으로 나타난 입자 단면이 서로 중첩되고 간극의 면적이 적은 반면 한계값을 160으로 정할 경우 입자간 경계가 보다 명확하고 이미지 중심부의 입자들이 간극으로 인식되어 사라지고 외곽 부분의 입자만이 인식된다. 이는 X-ray 에너지가 시편 내부로 투과되며 낮은 에너지가 먼저 감쇠하여 중심부로 투과되는 에너지양이 적으므로 이미지의 음영이 내부로 갈수록 어두워지며 나타나는 컵핑(cupping) 현상에 기인한다.

#### 2.3.4. 형태적 닫힘(close)과 채움(fill)을 통한 입자 내부 간극 채움

닫힘은 외곽선을 따라 존재하는 작은 간격을 메워 경계면을 부드럽게 하는 효과가 있으며 입자의 미세한 균열이나 내부 간극, 혹은 노이즈로 인해 입자 내부에 간극이 존재할 경우 채움을 통해 보정이 가능하다.

#### 2.3.5. 유역분할(watershed)을 통한 입자 구분

CT 해상도의 제한과 앞서 기술한 문제들로 인해 인접한 입자들끼리 과도하게 접촉하고 있는 형태로 이미지가 산출되므로 이는 입자의 중심점 획득의 정확도를 감소시킨다. 입자 중심점 획득은 인접하고 있는 입자들 간

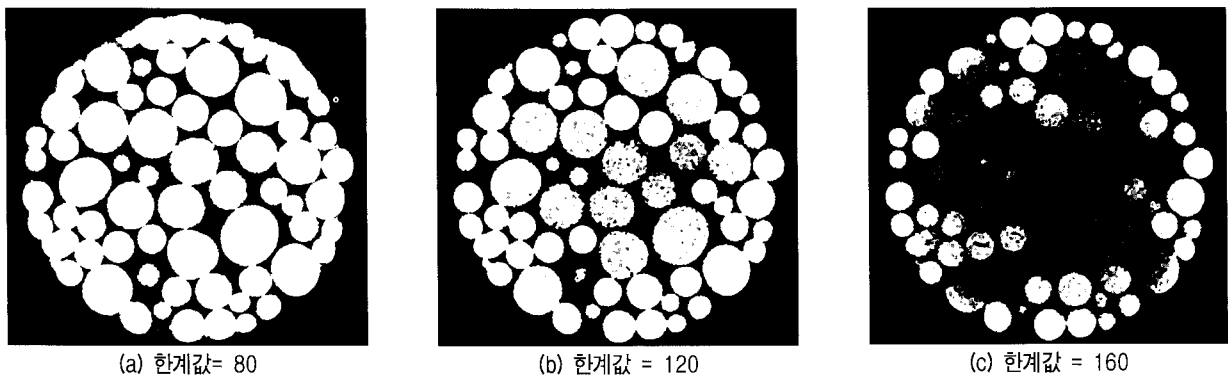


그림 4. 한계값에 따른 이미지 이진화 및 컵핑 현상

의 정보를 추출하여 간극셀을 평가하기 위한 단계이며, 유역분할 알고리즘을 통해 입자간 접촉을 분리하였다.

### 3. 이미지 기반 간극 구조 정량화 알고리즘

불규칙한 형태의 간극 구조로부터 간극셀을 정의하기 위해서는 단위 간극셀을 만드는 인접한 입자 정보가 필수적이다. 일반적으로 개별요소법으로 생성된 3차원 이미지는 입자의 중심점 정보가 개별적으로 정의되어 있지만 CT 이미지는 입자들의 중심점이 어느 곳에 위치하고 있는지 명확하지 않으므로 입자의 중심점 위치정보를 찾는 것이 중요하다. 따라서 간극구조의 정량화는 입자의 중심점을 우선적으로 산출하고 해당입자들예 의해 둘러싸인 간극셀을 분리해내는 과정을 거친다.

#### 3.1. 좌표 변환 및 정규화

그림 3과 4에서 보이듯 원본 이미지는 내부로 갈수록 픽셀값이 작아지는 커핑 현상으로 인해 입자를 구분하기 위한 한계값을 적용할 경우 내부 입자가 사라지는 현상을 피할 수 없다. 이진화시 한계값을 적용할 때 중심부로부터 외곽으로 갈수록 방사형으로 다른 한계값

을 적용할 경우 이 문제를 극복할 수 있으나 직교좌표 이미지에 2차원으로 극좌표 형태를 갖는 임의의 한계값 함수를 적용하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 직교좌표 형태의 원본 이미지를 극좌표 형태로 전환하여 각 열(column)을 따라 산출된 최댓값으로 해당 열의 픽셀값을 정규화 함으로써 이미지의 상대적 위치에 따라 달리 측정된 픽셀값을 보정하였다. 그림 5a는 극좌표로 표현된 이미지로  $x$ 축은  $r$ , 즉 원본 이미지 크기의 반을 나타내고,  $y$ 축은  $\theta$ 로 원본 이미지의 중심으로부터  $360^\circ$  회전하는 라디안 값을 나타낸다. 라디안 값은  $2 \cdot \pi \cdot r$ 의 개수만큼 격자화하여 이미지 정보 손실을 최소화 하였다. 극좌표로 표현된 이미지는 원편이 원본 이미지의 중심, 오른쪽이 외곽부분에 해당하여 원편으로 갈수록 이미지의 밝기가 어두워짐을 확인할 수 있다. 각 열의 최댓값으로 정규화된 이미지는 그림 5b와 같이 이미지의 밝기가  $r$  방향으로 고르게 표현됨을 알 수 있다. 그림 5b를 다시 직교좌표 형태로 재구성하면 그림 5c와 같이 이미지 외곽부터 중심까지의 밝기가 고르게 분포한다.

위와 같이 좌표 변환 및 정규화 과정을 거친 후 2.3절에 기술한 5단계의 간극 평가 알고리즘을 거치면 그림 6과 같이 한계값에 따른 입자 사라짐 효과가 없어지며 입자간 분리가 보다 명확해진다. 2.3.3절에서 기술한 한

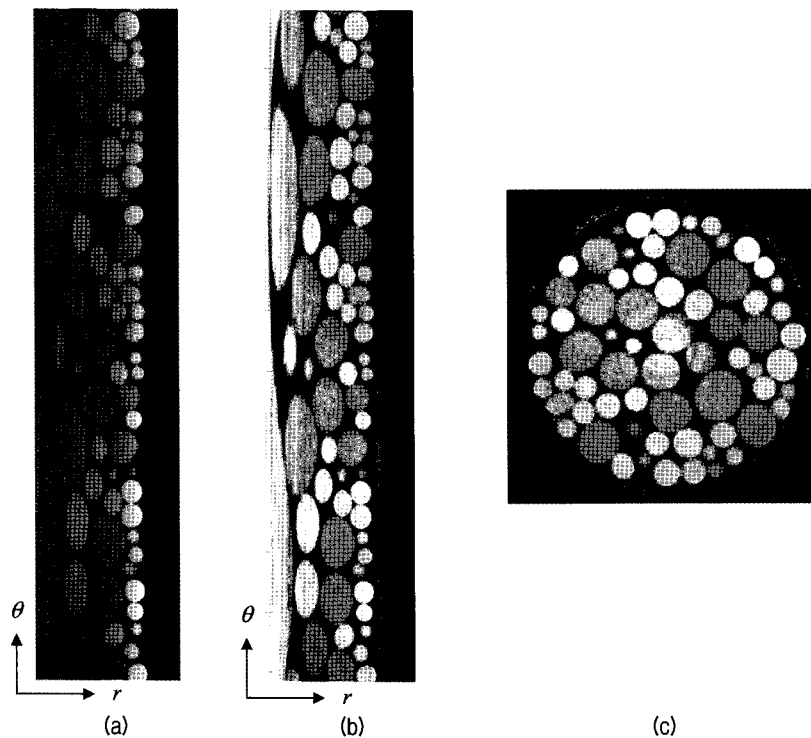


그림 5. 좌표 변환에 의해 재구성된 이미지. (a) 극좌표로 표현된 필터링 된 원본 이미지. (b) 각 열을 기준으로 정규화된 극좌표 이미지. (c) 직교좌표로 표현된 정규화된 이미지

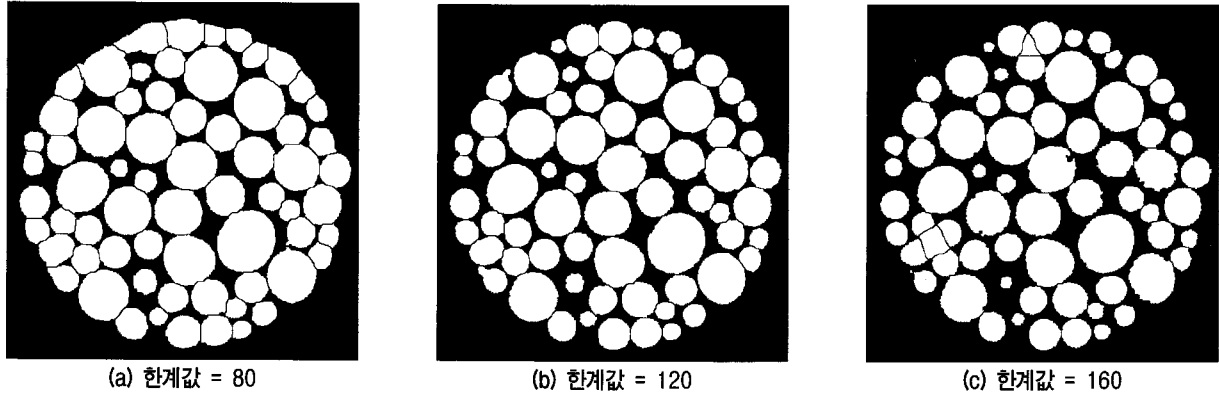


그림 6. 좌표변환과 정규화에 의해 향상된 이진화의 한계값에 따른 입자 및 간극 이미지

계값 설정시 식 (1)과 (2)를 적용할 경우 각각  $t = 147$ 과 132의 한계값이 통계적 방법에 의해 산출되며 각 2D 이미지마다 다른 값이 산출된다. 본 값을 이용하여 이진화 이미지를 확인해본 결과 147을 적용할 때 입자간 뭉침 효과가 발생하고 132는 120과 유사한 형태의 입자 및 간극 경계가 설정된다. 본 연구의 목적이 최적화된 한계값 설정이 아니므로 가시적 판단에 의해 원본 이미지의 간극 구조를 가장 적절히 표현할 수 있다고 판단된 한계값 120을 전체 2D 이미지에 적용하여 이진화를 수행하였다.

### 3.2. 유클리디안 거리 변환(Euclidean Distance Transform, EDT)

유클리디안 거리 변환법은 이미지의 픽셀들 가운데 가장 인접한 물체까지의 거리를 구하는 연산으로 이진화 이미지에서 거짓값(구하고자 하는 지점)을 가지는 점들에서 참값(물체)을 가지는 점까지의 거리를 산출하는 방법으로 CT 이미지에 의한 입자 및 간극구조 분석에 사용된다(Al-Raoush and Willson, 2005; Rafael and Woods, 2002; Svensson and Borgfors, 2002). 따라서 간극을 참값으로 가정하고 EDT를 적용할 경우 입자를 구성하는 픽셀들은 입자 외곽부터 내부로 갈수록 큰 값을 가지게 되고 가장 큰 값을 갖는 지점이 입자의 중심점이 된다. 입자내부의 EDT 최댓값이 복수로 존재할 경우에는 다음의 과정을 통해 하나의 중심점 좌표를 결정한다.

- ① 입자를 구성하는 픽셀에서 간극까지의 EDT값 산출
- ② 지역적으로 최댓값을 가지는 점들을 가상의 입자 중심으로 가정
- ③ 입자의 중심점들이 갖는 EDT값을 반지름으로 가정할 때 입자 중심점간의 거리가 반지름보다 작

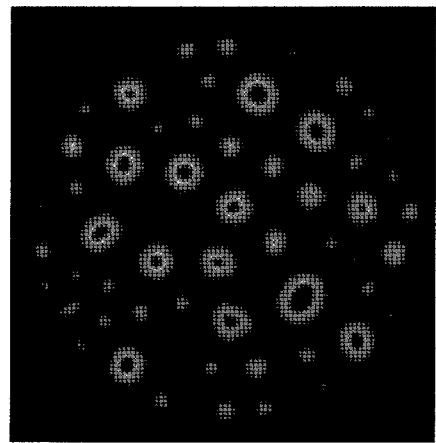


그림 7. 유클리디안 거리 변환법(EDT)에 의한 입자 중심점 산출의 2차원 예

으면 하나의 입자 내부 점으로 간주

- ④ 하나의 입자 내부의 중심점들 가운데 가장 큰 EDT값을 갖는 픽셀을 해당 입자의 실제 중심점으로 정의

그림 6b의 이미지에 EDT를 적용할 경우 그림 7과 같은 형태를 얻을 수 있다. 실제 분석 과정에서는 2차원 이미지가 적층된 3차원 입자 정보를 대상으로 위의 중심점 좌표 결정을 수행하였다.

### 3.3. 들로네 삼각망(Delaunay Triangulation)

들로네 삼각망은 공간상에 주어진 점들을 이용하여 공간을 분할하는 알고리즘이다. 공간 분할의 최소 단위는 세 점으로 구성된 삼각형으로 2차원에서 들로네 삼각망은 해당 점들의 집합을 가장 균등한 형태로 분할하지만 3차원 공간에서는 네 점을 기준으로 4개의 삼각형으로 구성된 사면체로 분할한다. 이와 같은 성질을 이용

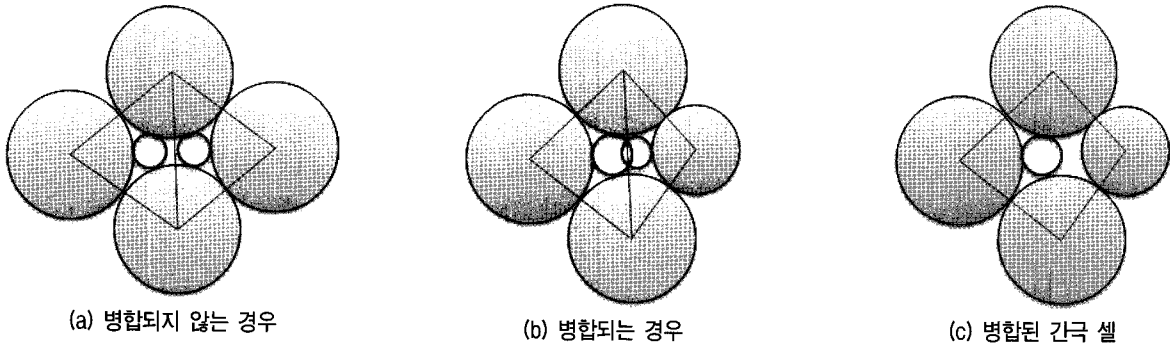


그림 8. 들로네 삼각망에 의한 셀 나눔 및 병합 기준

하여 3.1절의 EDT에 의해 정의된 입자 중심점을 기준으로 3차원에서 공간을 분할하면 각각의 사면체 내부에 단위 간극이 분할되어 위치하게 된다(Al-Raoush et al., 2003; Thompson et al., 2008). 분할된 간극을 간극셀이라고 바로 정의할 수도 있으나 단순히 삼각망에 의해 분할된 간극이 3차원 상에서는 단위 간극 형상을 대표한다고 할 수 없다. 따라서 분할된 간극을 병합하는 과정이 필요하며 이는 입자의 중심을 찾는 과정과 유사하게 구현된다.

- ① 전체 간극 픽셀을 대상으로 입자 표면으로부터의 EDT값을 계산(3.1절에서 기술된 거짓값과 참값을 반대로 할 경우)
- ② 분할된 단위 간극 내에서 최대 EDT값을 가지는 점을 가상의 간극 중심으로 가정하고 해당 EDT값을 반지름으로 가정
- ③ 같은 삼각면을 공유하는 두 단위 간극의 중심간의 거리가 두 중심점에서 반지름의 합보다 작으면, 즉 두 원이 접하면 하나의 간극셀로 간주
- ④ 분할된 모든 간극에 대해 더 이상 병합이 일어나지 않을 때까지 ③번의 과정을 반복
- ⑤ 최종적으로 병합된 간극들을 새로운 단위 간극이라 가정하고 각 단위 간극에서 최대 EDT값을 가지는 픽셀 지점을 선정
- ⑥ 최대 EDT값은 입자 표면으로부터 가장 멀리 떨어져 있는 픽셀이므로 해당 EDT값을 단위 간극에서 최적으로 내접하는 구형의 간극셀 반지름으로 설정

그림 8은 앞서 기술한 방법을 통해 단위 간극을 설정하고 간극셀의 중심을 찾는 방법을 2차원에서 보여준다. 그림 8a의 경우 횡방향으로 전개된 간극이 2개의 간

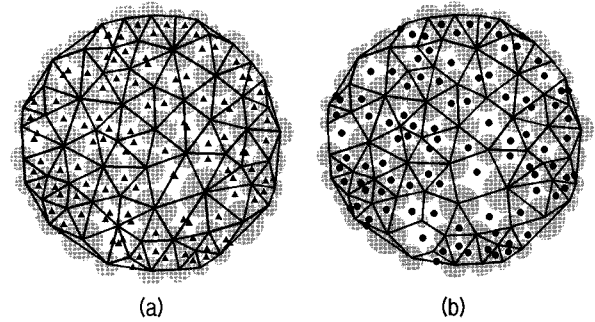


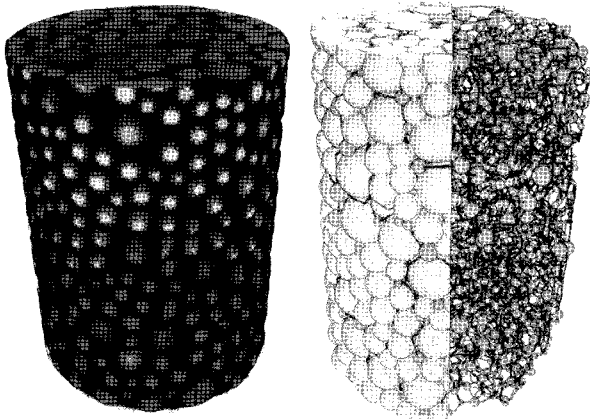
그림 9. 2차원에서의 간극셀 정보 추출 과정. (a) 들로네 삼각망 형성. (b) 삼각망에 의한 단위 간극의 병합 및 EDT를 이용한 단위 간극내 간극셀 중심 설정

극셀로 표현되는 반면 간극셀 간의 간격이 작아지며 서로 중첩 할 경우(위의 ③단계) 두 단위 간극은 병합되어 하나의 간극셀로 대표된다(그림 8b와 8c).

2차원 공간에서 들로네 삼각망을 형성할 경우 그림 9a와 같은 구조가 형성되며 앞서 기술한 병합 기준을 적용하면 단위 간극이 형성되고 해당 단위 간극 내에서 최대 EDT값을 지정, 즉 간극셀의 중심을 산출할 경우 그림 9b와 같은 중심점 산출이 가능하다. 위의 접근법이 실제 적용에서는 3차원에서 수행되었다.

### 3.4. 간극 채널 평가

들로네 삼각망을 적용하고 앞서 기술한 병합 기준을 적용할 경우 사면체를 공유하는 단위 간극은 서로 연결되어 있다. 또한 3.3절의 ①단계에서 이미 계산된 전체 간극에 대한 EDT값 가운데 최댓값(간극셀의 중심)을 연결하는 국지적 공간상 최댓값들의 연속적인 픽셀들은 간극채널이 된다. 즉 불규칙한 형태를 띠는 3차원 형상의 내부 골격구조는 중심축(medial axis)으로부터 산출이 가능하며 이는 EDT값의 분포로부터 찾아낼 수 있다.



(a) 2차원 원본의 3차원 적층 이미지 (b) 간극셀과 간극채널의 네트워크

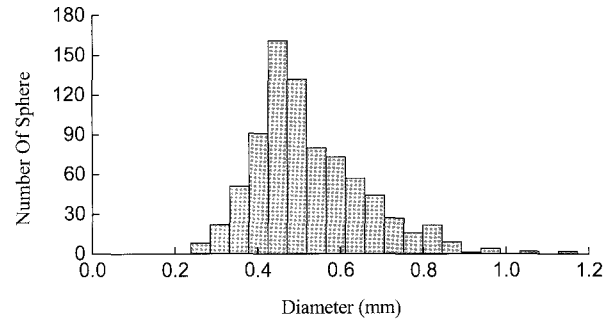
그림 10. 3차원상에서 구성된 간극셀과 간극채널

#### 4. 정량화된 간극 구조 네트워크

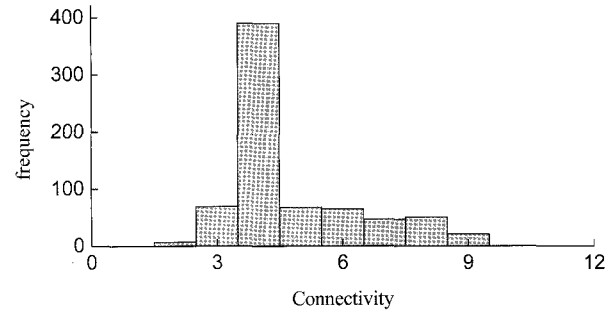
그림 10a는 3차원으로 적층된 원본 이미지이며 2절과 3절에서 기술한 간극 구조 정량화 알고리즘을 3차원 이진화 이미지에 적용하면 그림 10b와 같은 간극셀과 간극채널의 네트워크 형성이 가능하다. 주변입자들에 둘러싸인 구형의 간극셀이 간극채널을 통해 유기적으로 연결되어 있다.

들로네 삼각망에 의해 나누어진 단위간극의 부피를 간극셀의 등가 부피(equivalent volume)과 일치화 하지 않았으므로 본 연구에서 제안한 간극 구조 정량화에 의한 간극셀의 전체 부피는 실제 간극 부피와 일치하지 않는다. 이는 간극셀의 중심점을 산출한 후 EDT값에 의한 반지름을 산출하지 않고 유효부피를 만족시키는 구의 반지름을 계산하면 가능하지만 이 경우 평가된 간극셀이 입자와 중첩되어 적용하지 않았다. 하지만, 내접구(inscribing sphere)로 표현되는 간극셀의 크기 분포는 전체적인 간극 크기 분포를 평가하는데 쓰일 수 있다. 이미지 외곽부분의 간극셀의 크기 및 연결도는 경계에 의해 왜곡될 수 있음을 고려하여 전체 부피가운데 가운데 65% 부피내부에 위치한 간극셀만을 고려하였을 경우, 그림 11a는 간극셀 직경의 분포도로 평균 0.5mm의 직경을 가지며 정규분포 형태로 고르게 존재함을 알 수 있다. 간극셀간 연결도는 해당 간극셀이 주변 몇 개의 간극셀과 연결되어 있는지 나타내며 그림 11b와 같다. 대부분의 간극셀은 4개의 주변 간극셀과 연결되어 있으며 최대 9개의 주변 간극과 연결되어 있다.

간극 구조를 입자 정보로 분리하기 위해 본 연구에서



(a)



(b)

그림 11. (a) 간극셀 크기 및 (b) 간극간 연결도 분포

제시된 일련의 이미지 프로세싱 단계는 간극비 등의 기본 정보를 산출하기 위해서도 반드시 적용해야만 하는 기법이다. 커핑 현상에 대한 보정 없이 간극비를 산출할 경우 간극비를 과대평가할 수 있으며(그림 4) 부적절한 한계값을 적용할 경우 간극 부피 및 입자간 접촉 정보 오류로 인해 간극비가 달라진다(그림 6). 또한 간극셀의 위치 및 크기, 간극간 연결도 평가는 특히 네트워크 모델을 이용하여 다공성 재료 내 유체의 흐름 및 전도 현상 평가에 매우 유용하다(Abichou et al., 2004; Bryant et al., 1993; Nordhaug et al., 2003).

#### 5. 토 의

규칙적인 배열의 경우 간극셀의 위치와 크기가 입자 직경( $D$ )으로부터 산술적으로 계산이 가능하므로 직경 1mm를 갖는 두 가지 규칙적인 입자 구조, 단순 입방 구조(simple cubic structure)와 면심 입방 구조(face centered cubic structure)에 알고리즘을 적용하였다. 그림 12는 제안된 기법을 통해 구성된 간극셀의 형상을 보여주며 단순입방구조의 경우 0.732mm 지름을 갖는 구가 주변 입자들 사이에 규칙적으로 배열하고 있음을 알 수 있다. 면심입방구조의 경우 0.403mm와 0.221mm 직경을 갖는 2개의 구가 존재한다. 이는 이론적으로 계산된 직경과



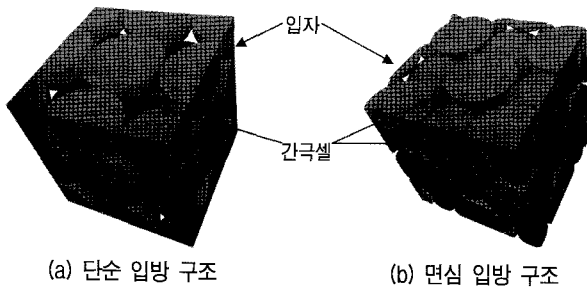


그림 12. 규칙적인 배열의 입자구조에서의 간극셀

2% 미만의 오차를 보여 제안된 알고리즘의 적용성을 확인할 수 있다.

재료의 간극비 정보를 알 경우 입자-간극 경계를 결정짓는 중요한 요소인 한계값을 결정시 해당 간극비를 맞추기 위한 한계값을 역으로 산출 가능하다. 하지만 재료내의 미세한 간극이 CT 해상도에 못 미칠 경우 이미지에서 판별이 가능한 간극의 크기가 과다 평가될 가능성이 있으며 이는 암석 및 콘크리트 시편의 경우에 해당한다. 흙 입자 내부에는 미세 간극이 존재하지 않다고 가정할 수 있지만 입자간 접촉점이 실제로는 점에 가까운 반면 CT 이미지에서는 면으로 나타나므로 앞서 제시된 통계적 방법에 의한 한계값 결정을 적용시 주의가 필요하다. 간극 구조 평가가 목적인 경우 한계값을 다소 다르게 적용하더라도 전체적인 간극 구조 형태가 변하지 않으므로 원본 영상과 비교하여 사용자가 평가하고자 하는 구조가 가장 잘 추출될 수 있는 값을 적용하거나 앞서 소개한 통계적 방법에 의한 것이 바람직하다.

## 6. 결론

장비의 해상도에 따라 적용 가능한 지반 재료의 종류가 제한적이고, 암석 및 콘크리트 재료에 비해 사질토에 대한 CT 이미지를 활용한 연구가 아직 널리 수행되지 않았지만 CT 이미지는 다른 어느 비파괴 검사 기법보다 높은 해상도를 가지고 내부 구조 평가에 유용하게 사용할 수 있다. 복잡한 이미지 프로세싱 기법을 적용하지 않더라도 미시적 관점에서의 내부 구조 관찰은 거시적 재료 거동의 메커니즘을 규명하는 자료로 사용이 가능하며 최근 널리 수행되고 있는 마이크로미케닉스를 이용한 개별요소법과 같은 수치해석을 수행함에 있어 모델을 보정할 수 있는 중요한 실험 자료로 그 활용도가 높다.

본 연구에서는 Micro X-ray CT에 의해 획득된 글라

스 비드의 2차원 이미지를 이방성 확산 필터, 라플라시안 필터, 채움과 영역 분할 등의 기법을 향상시켰다. 또한 커핑 현상과 같이 CT 장비 및 X-ray 에너지의 감쇠에 따른 커핑 현상 등 영상이 포함하고 있는 근본적인 노이즈를 제거하기 위해 좌표변환에 따른 정규화 과정을 수행하였고 간극 구조와 입자를 분리시키는 이미지 처리를 수행하였다. 간극 구조의 정량화를 위해 적용된 거리 변환법은 입자와 간극의 중심점을 찾는 데 유용한 방법으로 제시되었으며 들로네 삼각망에 의한 간극 분할 및 병합은 복잡한 3차원 형태의 간극구조를 단위 간극으로 분리하고 그 내부에 최적으로 내접하는 간극셀 위치를 찾는 데 사용되었다. 제안된 이미지 프로세싱 기법의 적용을 통해 무질서하고 불균질한 3차원 간극 구조가 간극셀과 간극 채널로 정량화되어 내부 간극에 대한 보다 정확한 구조 평가가 가능함을 확인하였다. 제안된 기법의 적용성을 검토하기 위해 수행한 격자화된 입자 구조와 무질서 단일입자 구조분석 결과는 추가적인 수치 해석을 수행할 때 중요한 입력 자료로 사용될 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2011-0005593)과 한국지질자원연구원의 지원(No. 2011-8-0261)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 김광염, 신휴성, 허성준, 임성빈, 권영철, 김홍택 (2011), "X-ray CT 스캔을 이용한 사질토 간극비 측정", *한국지반공학학회논문집*, 27(1), pp.87-98.
2. 김종태, Takahashi, M., 추창오, 노병돈, 정교철 (2011), "암석의 X-ray CT 분석 결과와 저 투수성의 비료.", *Korean Society of Engineering Geology*, Jeju, Korea, pp.169-172.
3. 정교철, Takahashi, M. (2010), "미소 쫓점 X선 CT를 이용한 암석 내 공극의 분포 및 공극률 분석", *The Journal of Engineering Geology*, 20(4), pp.461-465.
4. 정상엽, 김영진, 윤태섭, 전현규 (2011), "Micro CT 이미지 분석을 통한 경량 골재 콘크리트의 공극 분포 분석", *대한토목학회 논문집*, 31(2A), pp.121-127.
5. Abichou, T., Benson, C. H., and Edil, T. B. (2004), "Network model for hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures", *Canadian Geotechnical Journal*, 41(4), pp.698-712.
6. Al-Raoush, R. I., Thompson, K., and Wilson, C. S. (2003), "Comparison of network generation techniques for unconsolidated

- porous media”, *Soil Science Society of American Journal*, 67(6), pp.1687-1700.
7. Al-Raoush, R. I. and Willson, C. S. (2005), “Extraction of physically realistic pore network properties from three-dimensional synchrotron X-ray microtomography images of unconsolidated porous media systems”, *Journal of Hydrology*, 300(1-4), pp.44-64.
  8. Barbozci, E. J. (2010), “Quantifying particle shape in 3D.”, *Advances in computed tomography for geomaterials, GEOX 2010*, New Orleans, LA, USA, pp.94-100.
  9. Bosl, W. J., Dvorkin, J., and Nur, A. (1998), “A study of porosity and permeability using a Lattice-Boltzmann simulation”, *Geophysical Research Letters*, 25(9), pp.1475-1478.
  10. Bryant, S. L., King, P. R., and Mellor, D. W. (1993), “Network model evaluation of permeability and spatial correlation in a real random sphere packing”, *Transport in Porous Media*, 11(1), pp.53-70.
  11. Fredrich, J. T., DiGiovanni, A. A., and Noble, D. R. (2006), “Predictin macroscopic transport properties using microscopic image data”, *Journal of geophysical research*, 111(B03201), pp.1-14.
  12. Hall, S. A., Lenoir, N., Viggini, G., Besuelle, P., and Desrues, J. (2010), “Characterization of the evolving grain-scale structure in a sand deforming under triaxial compression.”, *Advances in computed tomography for geomaterials, GEOX 2010*, New Orleans, LA, USA, pp.34-42.
  13. Kikuchi, Y., Hidaka, T., Sato, T., and Hazarika, H. (2010), “Deformation characteristics of tire chips-sand mixture in triaxial compression test by using X-ray CT scanning.”, *Advances in computed tomography for geomaterials, GEOX 2010*, New Orleans, LA, USA, pp.67-75.
  14. Kress, J., Yun, T. S., Narsilio, G., Evans, M., and Lee, D.-S. (2011), “Evaluation of hydraulic conductivity in 3D random and heterogeneous particulate materials using network model”, *Computers and Geotechnics*, in press.
  15. Man, H. N. and Jing, X. D. (1999), “Network modelling of wettability and pore geometry effects on electrical resistivity and capillary pressure”, *Journal of Petroleum Science and Technology*, 24, pp.255-267.
  16. Narsilio, G., Buzzi, O., Fityus, S., Yun, T. S., and Smith, D. W. (2009), “Upscaling of Navier-Stokes equations in porous media: Theoretical, numerical and experimental approach”, *Computers and Geotechnics*, 36, pp.1200-1206.
  17. Narsilio, G., Kress, J., and Yun, T. S. (2010), “Characterization of conduction phenomena in soils at the particle-scale: Finite element analyses in conjunction with synthetic 3D imaging”, *Computers and Geotechnics*, 37, pp.828-836.
  18. Nordhaug, H. F., Celia, M., and Dahle, H. K. (2003), “A pore network model for calculation of interfacial velocities”, *Advances in Water Resources*, 26, pp.1061-1074.
  19. Otsu, N. (1979), “A threshold selection method from gray-level histogram”, *IEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9, pp.62-66.
  20. Rafael, C. G. and Woods, R. E. (2002), *Digital Image Processing*: Prentice Hall.
  21. Svensson, S. and Borgefors, G. (2002), “Digital distance transforms in 3D images using information from neighbourhoods up to 5×5×5”, *Computers Vision and Image Understanding*, 88, pp.24-53.
  22. Thompson, K. E., Willson, C. S., White, C. D., Nyman, S., Bhattacharya, J. P., and Reed, A. H. (2008), “Application of a new grain based reconstruction algorithm to microtomography images for quantitative characterization and flow modeling”, *SPE Journal*, 13(2), pp.164-176.
  23. Vogel, H. J. and Roth, K. (2001), “Quantitative morphology and network representation of soil pore structure”, *Advances in Water Resources*, 24(3-4), pp.233-242.
  24. Watanabe, Y., Lenoir, N., Hall, S. A., and Otani, J., (2010), “Strain field measurements in sand under triaxial compression using X-ray CT data and digital image correlation.”, *Advances in computed tomography for geomaterials, GEOX 2010*, New Orleans, LA, USA, pp.76-83.

(접수일자 2011. 9. 26, 심사완료일 2011. 10. 25)