

## X-ray CT를 이용한 베레아 사암의 공극크기분포 산정

김광엽<sup>1\*</sup> · 김경민<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원, <sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교

### Evaluation of Pore Size Distribution of Berea Sandstone using X-ray Computed Tomography

Kwang Yeom Kim<sup>1\*</sup> and Kyeongmin Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Construction Technology

<sup>2</sup>University of a Science & Technology

Received 29 July 2014; received in revised form 21 August 2014; accepted 26 August 2014

---

다공질 암석의 공극구조는 그 암석의 수리-역학적 거동에 매우 큰 영향을 미친다. 다공질 암석의 공극구조 특성을 표현하는 대표적인 방법은 공극률, 공극크기분포, 방향성 등이 있다. 암석의 유효공극률은 실험적으로 비교적 쉽게 구할 수 있지만, 공극의 크기분포 특성을 파악하는 것은 매우 어려운 실정이다. 본 연구에서는 X-ray CT를 이용하여 대표적 다공질 암석인 베레아 사암의 공극구조 중 공극크기분포를 이미지 기반으로 평가하였다. 공극크기분포 평가를 위해 본 연구에서는 이미지 필터링, 이진화, 골격화 등의 이미지 기반 처리 작업을 수행하였으며, 국부 두께평가 및 star chord를 이용하여 베레아 사암의 공극크기분포를 구하였다. 본 연구에서 제시된 X-ray CT 기반의 공극크기분포 평가방법을 이용하여 향후 다공질 재료의 공극구조 평가에 새롭고 효율적인 방안을 제시하고자 하였다.

**주요어** : 다공질 암석, 베레아 사암, 공극구조, 공극크기분포

Pore structures in porous rock play an important role in hydraulic & mechanical behaviour of rock. Porosity, size distribution and orientation of pores represent the characteristics of pore structures of porous rock. While effective porosity can be measured easily by conventional experiment, pore size distribution is hard to be quantified due to the lack of corresponding experiment. We assessed pore size distribution of Berea sandstone using X-ray CT image based analysis combined with associated images processing, i.e., image filtering, binarization and skeletonization subsequently followed by the assessment of local thickness and star chord length. The aim of this study is to propose a new and effective way to evaluate pore structures of porous rock using X-ray CT based analysis for pore size distribution.

**Key words** : porous rock, Berea sandstone, pore structure, pore size distribution

---

---

\*Corresponding author: kimky@kict.re.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

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.

## 서 론

다공질 재료의 공극구조는 재료의 물리적 역학적 특성에 매우 큰 영향을 미치기 때문에 다양한 분야에서 재료내부의 공극구조를 정량적으로 평가하기 위한 연구가 수행되어왔다(David et al., 1993; Grattoni and Dawe, 1995; Choo et al., 2011; Stewart et al., 2002; Louis et al., 2003). 재료의 공극구조를 형태학적으로 특성화하기 위해서는 공극의 크기와 공극크기분포(pore size distribution, PSD)를 산출하는 것이 매우 중요하다. 암석의 공극구조 특성과 관련된 기존 연구들은 주로 베레아 사암과 같은 공극률과 투수율이 상대적으로 큰 퇴적암을 대상으로 진행되어 왔다(David et al., 1993; Meyer, 2002; Louis et al., 2003; Choo et al., 2011; Yang et al., 2013). 오일, 가스, 지하수와 같은 정통적인 수리암반 관련 산업 및 최근에 국내에서도 활발히 연구가 진행되고 있는 CO<sub>2</sub> 지중저장 등에서도 다공질 사암의 공극 특성 파악이 매우 중요하게 다루어져 왔다.

이러한 공극구조를 평가하기 위해 기존에 적용한 방법들은 대부분 유체를 공극안으로 주입시키는 실험적 방법을 이용한 간접 측정방식이 대부분이다. 하지만 이러한 방법을 이용해도 공극의 크기분포특성은 산출이 매우 어렵고 측정의 오차가 크게 발생하게 된다. 본 연구에서는 X-ray CT (computed tomography)를 이용하여 다공질 암석의 공극크기분포를 산정하는 방법론을 제시하고자 하였다. X-ray CT는 X선에 대한 재료 고유의 감쇄특성을 이용하여 재료 내부의 구조를 영상화 하는 기술로서 1970년대 의료용으로 첫 개발이 되었고 그 후로 1980년대 산업용으로 개발되어 사용되어 왔다. X-ray CT 장비는 발생장치를 통해 생성된 X선을 재료에 투과 시킨 후 감쇄된 X선의 양을 디텍터라고 불리는 장치를 통해 측정하는 과정으로 이루어진다. 이렇게 획득된 CT 데이터는 재구성(reconstruction) 과정을 거쳐 슬라이스(slice)형태의 디지털 데이터로 최종 변환된다. 이렇게 생성된 디지털 데이터는 소프트웨어를 통해 3차원 영상으로 구현(visualization) 하거나 다양한 분석에 활용될 수 있다(Taud et al., 2005). X-ray CT를 이용한 분석과정은 재료에 대한 비파괴적인 프로세스를 통해 분

석 후 다른 실험에 동일 시편을 활용할 수 있으며, 분석 프로세스가 잘 정립되어 있는 경우 시간과 노력이 다른 실험적 방법에 비해 적게 소요된다.

X-ray CT장비의 지질 또는 암반공학적 활용은 주로 재료 내부의 밀도 변화, 공극률 분석에 주로 적용되어 왔으며(Vardoulakis and Graf, 1985; Taud et al., 2005), 장비 및 분석 기술의 발달에 따라 최근에는 재료의 파괴 거동이나 수리-역학적 거동의 분석에 적용하기 위한 시도가 지속적으로 이루어지고 있다(Rasolofosan and Zinszner, 2002; Clavaud et al., 2008; Yang et al., 2013). 다공질 사암의 공극구조 특성과 관련된 연구로서, Whattler et al. (1995)는 다공질 암석의 공극 구조가 가지는 이방성에 대해 언급 하면서 이전의 모델링에서 고려되지 않았던 요소의 중요성을 강조하고, 사암 코어링 샘플로부터 얻은 X-ray CT 이미지를 분석하여 공극률과 투수성과의 관계식을 도출하였다. 하지만 아직까지도 공극의 3차원 내부구조의 정량적 평가에 대해서는 연구가 미비한 실정이다.

본 연구에서는 대표적인 다공질 사암인 베레아 사암(Berea sandstone)의 공극구조에 대한 특성 중 공극크기 분포를 X-ray CT를 이용하여 산정하는 방법을 제시하고자 하였다. 이렇게 구해진 공극크기분포 정보를 활용하여 다공질 재료의 수리역학 모델링 분석에 주요 인자로 활용할 수 있도록 하는 것을 주요 연구목표로 하였다.

## 샘플 및 실험방법

### 베레아 사암

본 실험에서 사용된 암석은 층리가 발달한 베레아(Berea)사암이며 공극률과 투수율이 상대적으로 큰 암석으로, 주 구성광물은 석영과 장석이다. 광물조성 분석을 위하여 XRD 분석을 실시하여 분석결과를 Table 1에 정리하였으며, 베레아 사암의 광학현미경 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 베레아 사암은 오히이오북부에서 채석되며, 입자크기 범위는 0.1~0.8 mm로 나타나고 평균 입자크기는 0.2 mm이다(Dehler and Labuz, 2007).

### X-ray CT 장비

X-ray CT는 물체의 내부를 가지적으로 나타낼 뿐만

**Table 1.** Mineral composition and its content.

Minerals	Quartz	Microcline	Kaolin	Albite	etc.
Content (%)	85.3	10.3	2.8	1.6	-

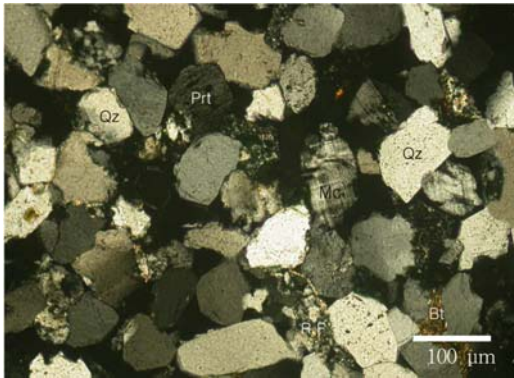


Fig. 1. Microscopic image of Berea sandstone (Qz: quartz, Mc: microcline, Prt: perthite, R.F: rock fragment, Bt: biotite).



Fig. 2. View of X-ray CT scanning for Berea sandstone.

Table 2. Specification of X-ray CT equipment in this study.

Model	KICT_XCT system		
	1	2	3
X-ray tube	MXR-320HP/11AX	225 kV Open type Micro-focus X-ray tube	120 kV Open type Nano-focus X-ray tube
Voltage range	20 to 320 kV	30 to 225 kV	30 to 120 kV
Tube current range	22.5 mA	10 to 3000 $\mu$ A	10 to 200 $\mu$ A
Focal spot size	0.4 mm	6 $\mu$ m	0.4 $\mu$ m
Detector	Total pixel number	2,048 $\times$ 2,048	
	Pixel pitch	200 $\mu$ m	

아니라 비파괴 분석을 수행 할 수 있는 이점이 있어 최근 지반재료 분석 등 다양한 연구범위에 적용되고 있다. 특히, 암석의 입자 및 공극의 미세구조를 가시적으로 나타내고 정량적으로 평가하기에 유리하므로 공극의 구조 분석에 적용하는 사례가 증가하고 있다.

본 연구에서 사용된 X-ray CT장비는 Fig. 2와 같이 이미지의 상이 맺히는 디텍터(detector) 하나를 세 개의 X-ray tube와 함께 사용할 수 있도록 제작된 Triple Head X-ray CT이다. 세 개의 X-ray tube는 서로 다른 촬영조건에 최적화 되어 있기 때문에 필요한 목적에 따라서 적절한 X-ray tube를 선택하여 최적의 촬영조건으로 조절하여 사용할 수 있다. 본 연구에서는 한국건설기술연구원에서 보유하고 있는 고해상도 산업용 X-ray CT 시스템을 활용하였으며, 시스템의 세부 사양은 Table 2와 같다.

사용한 X-ray tube는 최대 관전압 225 kV를 갖는 micro-focus X-ray CT이다. 최적의 해상도를 가진 영상을 얻기 위하여 촬영조건은 관전압 80 kV, 관전류 400  $\mu$ A, 노출타임 2초, 투영횟수를 2,000번으로 설정하여 1

초에 0.09°씩 촬영이 수행될 수 있도록 하였다. 입자와 공극의 명확한 분리를 위하여 지름 10 mm, 길이 20 mm인 암석시편을 사용하였으며, 확대율이 약 33배가 되도록 X-ray tube와 시편의 거리를 조정하였다. 촬영된 X-ray CT이미지의 voxel pitch는 약 12  $\mu$ m이다. Figure 3은 베레아 사암 사진과 CT 이미지로부터 실제 분석이 이루어진 영역을 나타내고 있다.

## 실험결과 및 토의

### CT 이미지 영상 처리 및 분석

X-ray CT를 통해 생성된 디지털 슬라이스 이미지는 2차원 함수  $f(x, y)$ 로 정의될 수 있으며, 이때  $x$ 와  $y$ 는 공간 좌표이고, 좌표  $(x, y)$ 에서의  $f$  값이 그 점에서의 영상의 밝기(intensity) 또는 그레이 레벨(gray-level)이라고 불린다.  $x$ ,  $y$ 와  $f$  값들이 모두 유한하고 이산적 수량일 때, 그 영상을 디지털 영상이라고 한다. 디지털 영상 처리는 디지털 컴퓨터로 디지털 영상을 처리하는 것으로 정의 된다.

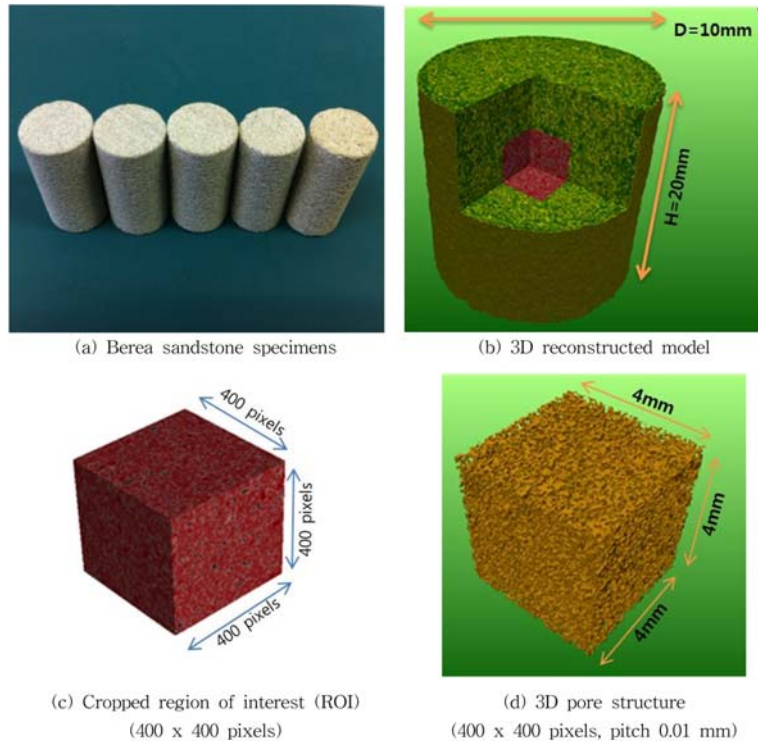


Fig. 3. 3D reconstructed model preparation for pores evaluation.

X-ray CT 이미지와 같은 디지털 영상은 영상 획득과 전송 과정에서 노이즈가 발생한다. 또한 영상 수집장치인 디텍터의 센서들은 영상 획득시 환경 조건 등의 여러 가지 요인과 센서 소자들의 품질에 의해 영향을 받는다. 예를 들면 CCD 카메라로 영상을 획득할 때, 빛의 레벨과 센서 온도는 결과 영상의 노이즈(noise) 양에 영향을 주는 주된 요인이 된다. 그렇기 때문에 X-ray CT 이미지에 대해 후속영상 처리를 하지 않고 분석을 하게 되면 이미지 내 노이즈의 증가 및 이미지의 왜곡 등이 발생할 수 있으며, 결과적으로 분석결과의 신뢰도를 저하시키는 요인이 된다.

본 연구에서는 X-ray CT 이미지에서 불가피하게 발생하는 일반적인 결함요소인 링결함(ring artifact)과 빔하드닝(beam hardening)의 두 요소를 제거하였다. 링결함은 주로 디텍터의 소자결함이나 하드웨어 보정을 제대로 이루어지지 못했을 때 발생하는 일반적인 CT 현상이다. 링결함은 스캔 중심축을 중심으로 하는 다양한 크기의 원이 발생하게 되는데 일반적으로 같은 위치에 여러장의 슬라이스 이미지에서 공통적으로 발생하게 된다. 빔하드닝은 튜브에서 발생한 X-ray 중 저에너지의

광자가 필터링 됨에 의해 평균에너지가 증가하는 현상을 의미한다. 이로 인해 이미지에서는 이미지의 중심부보다 외곽부가 상대적으로 높은 CT값을 가지게 되는 왜곡 현상이 발생할 수가 있다. 불가피하게 발생하는 링결함은 푸리에변환을 통해 링과 주변부를 분리하고 링을 제거한 후에 다시 주변부 값을 이용하여 스무딩(smoothing) 시키는 방법을 적용하였다(Stock, 2008). 빔하드닝의 경우 X-ray 발생장치부에 금속 필터를 적용함으로써 이미지의 왜곡을 최소화 하였다.

CT 이미지로부터 재료의 공극구조를 분석하기 위해서 가장 중요한 작업은 이진화 작업이다. 이진화 작업은 CT 이미지에 분포되어 있는 각 픽셀의 강도값(intensity)을 0과 1로 재구성하는 과정이다. 이를 위해서는 경계값(threshold)을 설정하는 것이 매우 중요하다. 경계값을 효율적으로 설정하기 위한 다양한 이론(Sheppard et al., 2004)들이 나와 있으나, 본 연구에서는 실제 실험적으로 구한 유효공극률을 기준으로 이진화 이미지에서 산출한 공극률을 반복적 수행법에 의해 맞추는 방식으로 경계값을 설정하였다. CT 이미지로부터 이진화하는 작업의 주요 과정이 Fig. 4에 나타나 있다.

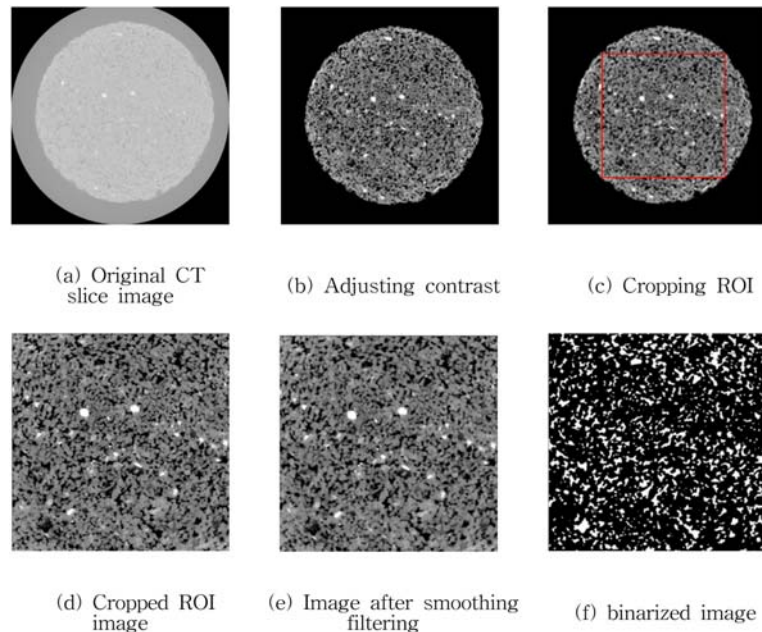


Fig. 4. Pre image processing procedure.

#### 공극의 골격화

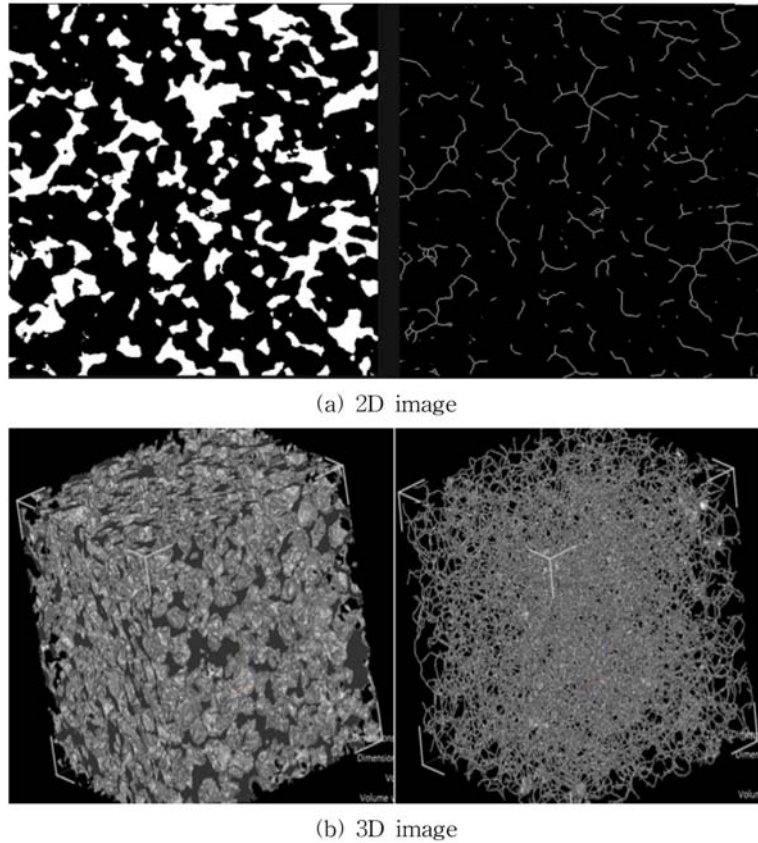
CT로부터 생성된 볼륨에 대해 공극의 골격(skeleton)을 추출하고, 이로부터 공극크기분포(PSD)를 얻어내는 방법을 적용하였다. PSD를 산출하기 위해서는 객체의 정확한 골격을 추출하는 것이 중요하다. 이산 공간에서의 골격을 추출하는 방법은 크게 두가지로 분류되는데, 첫 번째는 거리변환(distance transformation)을 이용한 방법이며, 두 번째는 세선화 알고리즘(thinning algorithm)을 이용한 방법이다(Lee et al., 1994). 본 연구에서는 객체의 위상학적(topological) 제약 조건을 만족하는 범위 내에서 외곽의 점들을 반복해서 제거하는 알고리즘인 세선화 알고리즘을 적용하여 골격을 구성하였다. 여기서, 위상학적 제약조건이란 세선화의 결과로 생성된 볼륨내의 연결된 객체(connected objects), 홀(hole) 및 공동(cavity)의 개수가 원본과 같아야 한다는 것을 의미한다. 즉, 오일러(Euler) 특성과 연결성에서의 변화가 없다는 것이 이러한 위상학적 불변성을 보장하게 된다. 이러한 세선화를 통한 골격을 추출하는 과정은 다음의 순서로 진행된다.

- step 1. 탐색점이 경계선인지 확인하여 경계선일 때만 제거 가능한지를 파악한다.
- step 2. 탐색점이 경계가 아니라면 다음 탐색점으로 이

동하지만, 탐색점이라면 탐색점을 포함한 27개의 복셀을 얻는다.

- step 3. 탐색점 주변을 검색하였을 때, 연결된 점이 하나밖에 없다면 endpoint라 판단하고 이 점을 제거 할 수 없다.
- step 4. 해당 점을 제거 하였을 때, 공동의 개수, 홀의 개수, 연결된 개수를 고려한 Euler characteristic이 변경된다면 이 점은 제거 불가능하다.
- step 5. 6방향(동, 서, 남, 북, 위, 아래) 중 하나의 방향씩 탐색하며 복셀들을 제거한다.
- step 6. 한 방향에 대해 모든 복셀을 순회하며 제거할 가능성이 있는 점들을 찾는다.
- step 7. 연결성이 변경되지 않으면 그 점(simple point)을 제거한다. 만약 simple point가 아니라면 제거 불가능하다.
- step 8. 제거 가능한 점 simple point들을 list에 저장시킨 후 삭제하기 전 순차적으로 제거 가능한지 다시 확인하여 제거 가능한 점이 되면 배경으로 설정된다.

이를 통해 베레아 시험의 공극에 대한 골격을 추출한 결과가 Fig. 5에 나타나 있다.



**Fig. 5.** Skeletonized image of pore structures in Berea sandstone reconstructed from X-ray CT image using thinning algorithm.

#### 국부두께 계산을 통한 PSD 하한 계산

공극크기분포는 재료내의 공극 형태의 특징을 표현하는데 매우 효과적인 방법이며, 공극률과 함께 다공질 재료의 유동 능력을 평가하는데 매우 중요한 요소이기도 하다. PSD의 하한을 결정하기 위한 방법으로 주로 국부두께(local thickness) 방법을 사용한다(Delerue et al., 1999). 국부두께 결정방법은 공극의 골격을 중심으로 하며 공극 외벽에 접하게 되는 최대 원을 생성시키는 것이다. 이러한 방법은 3차원 공간상에 있는 공극에도 그대로 적용하여 공간상의 골격을 중심으로 하고, 공극 외벽에 내접하는 최대의 구(sphere)를 생성시키는 방식으로 적용하게 된다.

베레아 사암의 CT 이미지에 대하여 2D와 3D의 내접하는 원 또는 구를 생성하여 공극구조를 재구성한 영상이 Fig. 6에 나타나 있다. 각각의 골격 포인트에서 생성된 원 또는 구의 반지름 또는 직경을 이용하여 PSD를 구할 수 있다.

#### Star Chord Length를 이용한 PSD 상한 계산

Star Chord Length (SCL) 방법은 공극내 골격상의 임의의 한점을 지나면서 공극 외벽에 접하는 선분을 의미한다. 공극 이진화 이미지의 좌측 상단을 기준점으로 하고 좌상단에서 우측방향을 X의 (+)방향, 세로축의 아래 방향을 Y의 (+)로 한다. 3차원의 공간에서 Z축은 아래 방향을 (+)로 설정 하였다. Figure 7에 공극의 이진화 이미지로부터 SCL를 계산하는 과정을 나타내고 있다.

$$\text{Void} = (0, 0), (1, 0), (2, 0), (0, 1), (0, 2), (1, 1)$$

$$\text{Material} = (2, 1), (1, 2), (2, 2)$$

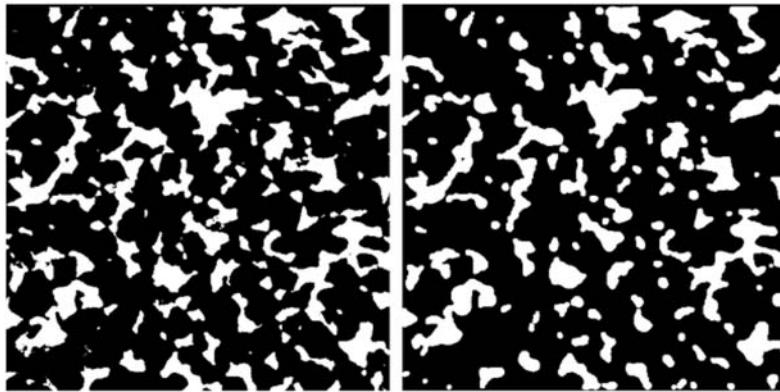
$$\text{IF } [L] = L(x, y) \in \text{Void} \quad (1)$$

then Length +  $\alpha$

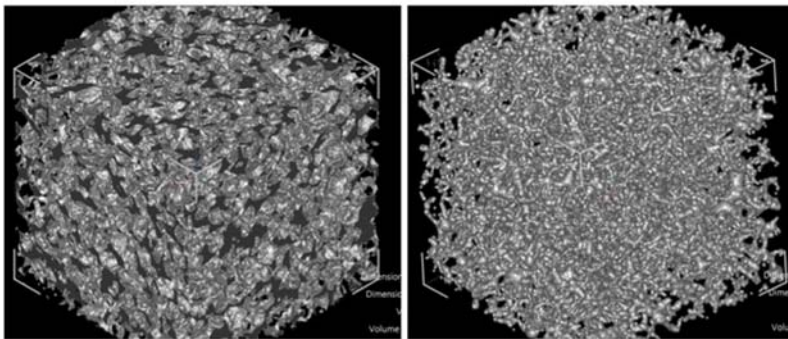
else STOP

measure Length = 'Two points distance'

공극 내부의 골격점 중 SCL 방법을 적용시키는 기준



(a) 2D image



(b) 3D image

Fig. 6. Pore structure reconstructed from CT image using local thickness analysis.

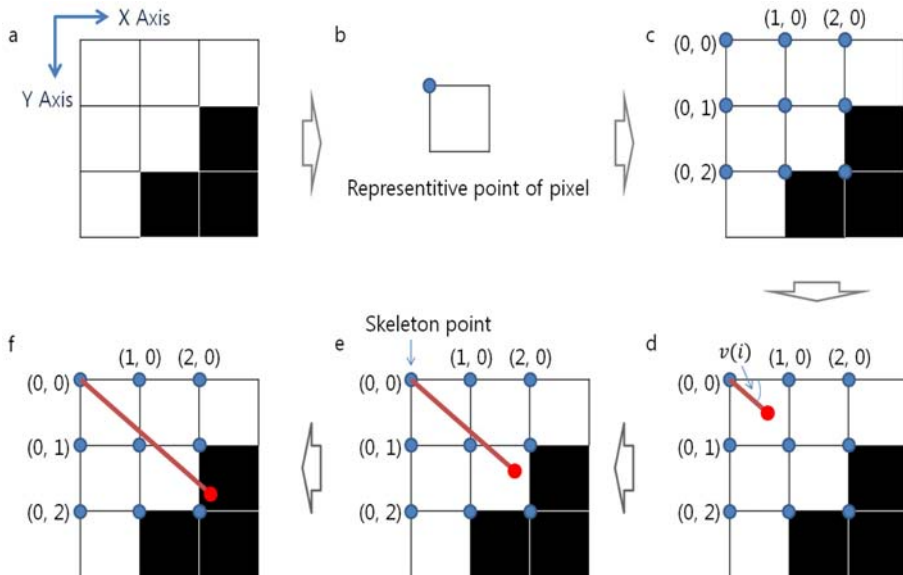


Fig. 7. Schematic concept of Star Chor Length calculation.

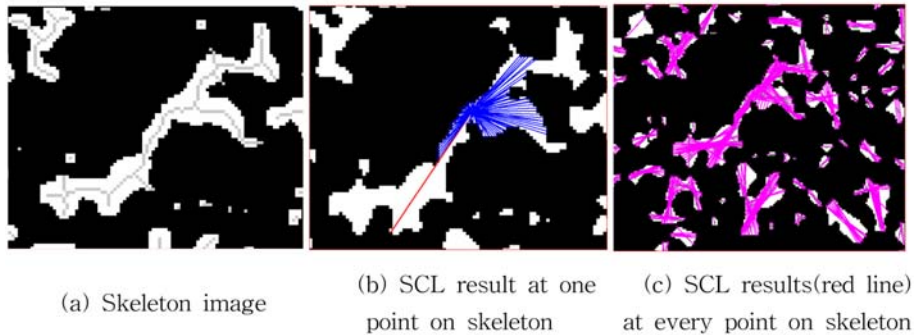


Fig. 8. Schematic plot for the SCL result.

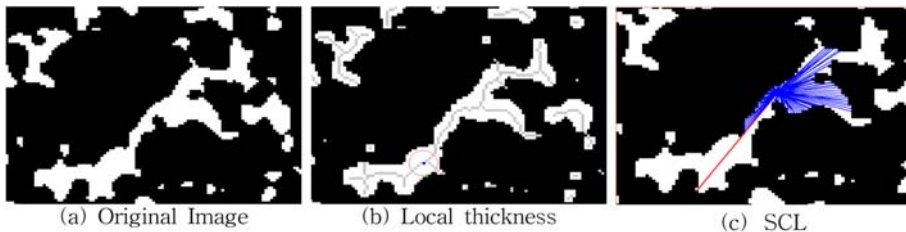


Fig. 9. Comparison of local thickness and SCL for PSD.

점을  $(0, 0)$ 이라 하였을 때, SCL은  $(1, 0)$ 의 방향에서 일정 각도를 가지는 방향벡터( $v_i$ ) 방향으로의 탐색을 수행하게 된다. 방향벡터( $v_i$ )에서 생성된 선분은 길이를 양쪽으로 점점 확장 시켜 양쪽의 선분 끝이 공극 외벽에 닿으면 길이 증가를 정지하고 해당 길이를 측정하게 된다. Figure 7d와 같이  $i$ 각도 만큼 회전을 하게 된 경우 방향벡터는  $(\cos i, \sin i)$ 이 되고 길이를 증가시키면 Fig. 7e, f와 같이 재료(검은색)를 만날때까지 계속 길이를 증가시키게 된다. Figure 7f의 경우 끝점이 공극이 아닌 부위에 놓이게 되고 식 (1)과 같은 계산을 통해 길이가 결정된다. 이러한 과정을 모든 방향에 대해 수행하게 되면 공극의 골격점을 지나는 모든 선분의 길이를 구할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 SCL을 2D 이진화 이미지 및 3D 이진화 영상에서 탐색할 수 있는 알고리즘 및 계산 프로그램을 Visual C++언어를 사용하여 구현하였다. 특히, 탐색 및 계산시간을 단축시키기 위해 멀티코어(multi-core)를 활용하여 계산되도록 하였다. Figure 8에는 이러한 과정을 통해 계산된 SCL 결과를 이진화 이미지 상에 표현한 것이다.

이러한 과정을 통해 한 골격점에서 얻어진 수많은 SCL 선분들의 평균값을 그 지점에서의 공극의 크기로

산정하게 된다. 이렇게 산정된 공극의 크기는 앞서 설명한 국부두께 방법에 의한 PSD와 비교할 때 다소 크게 평가될 있다. 국부두께의 경우에는 원이나 구가 첫 번째 외벽에 접하는 순간의 크기로 결정하는 반면, SCL을 이용한 방법은 선분의 양쪽 끝이 모두 닿았을 때 선분의 길이를 측정하고 이러한 선분의 값들의 평균을 취하기 때문에 더 크게 평가되게 되어진다.

#### PSD 산출 결과

국부두께로 산출한 PSD와 SCL 방법에 의한 PSD를 비교분석하였다. Figure 9는 동일한 2D 공극이미지에 대하여 국부두께와 SCL 방법을 적용한 모습이다. 이러한 방법을 통해 산출한 PSD 결과가 Fig. 10에 나타나 있다. Figure 10은 3D 공간상에서 각각의 알고리즘을 적용하여 산출한 것이다. Figure 10a에서 나타난 바와 같이 국부두께를 사용한 방법에서는 공극크기가 약 0.06 mm 정도로 분석되었다. 하지만, SCL 방법에서는 공극의 크기가 0.18 mm로 나타났다.

앞서 설명한 바와 같이 국부두께를 측정하는 방법은 공극내에 원 또는 구를 골격지점을 중심으로 하여 내접시키기 때문에 그 지점에서의 골격지점에서 가장 가까운 경계면까지의 거리가 산출이 된다. 반면, SCL은 골



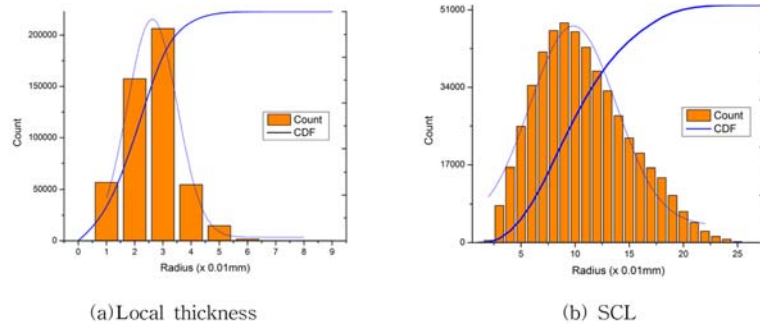


Fig. 10. Pore size distribution calculated from two methods.

격점을 지나는 모든 선분의 거리의 평균으로 PSD를 측정하기 때문에 국부두께 법에 비해 공극크기가 크게 평가되는 것이 일반적이다. 따라서, 기존 연구(Delerue, 1999) 등에서는 국부두께를 통해 산출된 공극의 크기를 하한크기로, SCL에 의한 공극 크기를 상한크기로 평가하는 것이 타당하다는 의견을 제시하고 있다. 본 연구에서 대상재료인 베레아 사암은 공극이 대부분 연결되어 있는 연결성이 매우 좋은 다공질 암석이다. 따라서, 연결된 공극에 대한 형태학적 평가는 매우 신중히 접근하여야 한다. 특히, CT 이미지는 래스터이미지(raster image)로서 이미지가 픽셀로 이루어져 있기 때문에 공극에 대한 이미지가 매우 이산적인 격자형태로 경계가 표현될 수 밖에 없다. 따라서, 공극의 크기와 이미지 해상도(픽셀 크기)가 실제 결과에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서, 이러한 연구를 기초로 하여 추가적인 연구가 지속적으로 수행되어 결과에 대한 영향인자들의 민감도 분석 등이 수행되어진다면, 다공질 암석의 공극 구조에 기반한 수리역학적 특성 규명에 좋은 정보를 제공할 수 있을 것이다.

## 결 론

본 연구에서는 베레아 사암의 공극구조를 정량화하기 위해 X-ray CT 이미지와 공극의 형태학적 평가 방법론에 기반한 공극크기분포 특성 산정 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 영상을 분석하기 전 다양한 필터링을 통해 이미지를 분석이 용이하도록 품질을 향상한 후에 분석을 수행하였다.

베레아 사암의 공극크기분포를 평가하기 위해 골격화, 국부두께산정, Star chord length 등의 다양한 공극구조 평가할 수 있는 알고리즘을 탑재한 소프트웨어를 직접 개발하여 분석에 활용하였다. 국부두께 산정에 의한 방

법이 상대적으로 공극크기분포를 과소평가할 수 있고, Star chord length를 이용한 방법은 과대평가할 수 있음을 확인하였다. 향후 이러한 방법을 통해 산출된 공극크기분포에 대한 통계적 수치가 실제 수리모델링 등에 활용되기 위해서는 다양한 실험적 결과와 수치해석 결과와의 비교 분석이 추가적으로 수행될 필요가 있을 것이다. 또한, CT 이미지 기반의 분석은 이미지의 해상도가 결과에 미치는 영향이 크기 때문에, 이를 고려한 민감도 분석도 분석방법의 신뢰도를 높이기 위해서 수행되어야 할 것으로 보인다.

이러한 제약사항에도 불구하고, X-ray CT를 통한 다공질 암석의 수리적 특성 규명을 위해 공극구조를 평가하는 방법은 기존의 실험적 방법이 가지는 근본적인 한계점을 혁신적으로 극복할 수 있다는 점에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 이미지 전처리 과정, 분석과정의 신뢰도 향상, 분석결과와 정확도 검증 등과 같은 부분에서 지속적인 연구성과 확보를 통해 이러한 새로운 평가 방법의 적용성을 높이기를 기대하는 바이다.

## 사 사

본 연구는 산업통상자원부 지원으로 한국에너지기술평가원에서 주관하는 신재생에너지융합원천기술개발-핵심기술개발사업인 “EGS 인공 지열저류층 생성 시뮬레이션 이터 개발” 과제(과제번호 : 20133030000240)의 일환으로 수행되었습니다. 또한, 본 연구에서 사용된 유한요소 해석에 도움을 주신 경희대학교 정영훈 교수님께 감사드립니다.

## References

Choo, M. K., Song, I. S., Lee, H. K., Kim, T. H., and

- Chang, C. D., 2011, Application of the electrical impedance of rocks in characterizing pore geometry, *The Journal of Engineering Geology*, 21(4), 323-336 (in Korea with English abstract).
- Clavaud, J. B., Maineult, A., Zamora, M., Rasolofosaon, P., and Schlitter, C., 2008, Permeability anisotropy and its relations with porous medium structure, *Journal of Geophysical Research*, 113p.
- David, C. and Darot, M., 1993, Pore structures and transport properties of sandstone, *Transport in porous media*, 11, 161-177.
- Dehler, W. and Labuz, J. F., 2007, Stress path testing of an anisotropic sandstone, *J. Geotech. Eng.*, 133(1), 157-164.
- Delerue, J. F., Perrier, E., Yu, Z. Y., and Velde, B., 1999, New algorithm in 3D image analysis and their application to the measurement of a spatialized pore size distribution in soils, *Phys. Chem. Earth(A)*, 24(7), 639-644.
- Grattoni, C. A. and Dawe, R. A., 1995, Anisotropy in pore structure of porous media, *Powder Technology*, 85, 143-151.
- Lee, T. C., Kashyap, R., and Chu, C. N., 1994, Building skeleton models via 3-D medial surface/axis thinning algorithms, *Graphical Models and Image Processing*, 56(6), 462-478.
- Louis, L., David, C., and Robion, P., 2003, Comparison of the anisotropic behaviour of undeformed sandstones under dry and saturated conditions, *Tectonophysics*, 370, 193-212.
- Meyer, R., 2002, Anisotropy of sandstone permeability, CREWES Research Report, 14p.
- Rasolofosaon, P. N. and Zinszner, B. E., 2002, Comparison between permeability anisotropy and elasticity anisotropy of reservoir rocks, *Geophysics*, 67(1), 230-240.
- Sheppard, A. P., Sok, R. M., and Averdunk, H., 2004, Techniques for image enhancement and segmentation of tomographic images of porous materials, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 339(1), 145-151.
- Stock, S., 2008, Recent advances in X-ray microtomography applied to materials, *International materials reviews*, 53(3), 129-181.
- Taud, H., Martinez-Angeles, R., Parrot, J. F., and Hernandez-Escobedo, L., 2005, Porosity estimation method by X-ray computed tomography, *Journal of petroleum science and engineering*, 47(3), 209-217.
- Vardoulakis, I. and Graf, B., 1985, Calibration of constitutive models for granular materials using data from biaxial experiments, *Geotechnique*, 35(3), 299-317.
- Whattler, P. R., Basan P. B., and Moss, B. P., 1995, Pore geometry and rock properties, *Proceedings of SCA conference*, No. 9521.
- Yang, H. Y., Kim, H. N., Kim, K. M., Kim, K. Y., and Min, K. B., 2013, A study of locally changing pore characteristics and hydraulic anisotropy due to bedding of porous sandstone, *Tunnel and Underground Space*, 23(3), 228-240 (in Korea with English abstract).

#### 김광엽

한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실

412-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283

Tel: 031-910-0225

E-mail: kimky@kict.re.kr

#### 김경민

과학기술연합대학원대학교(UST)

412-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283

Tel: 031-910-0776

E-mail: kimkm@kict.re.kr