지구물리와 물리탐사
Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa
Vol. 12, No. 4, 2009, p. 347~354

X선 토모그램의 Smoothing 효과가 암석의 물성 예측에 미치는 영향 분석

이민희 · 김영석*
공주대학교 지질환경과학과

Smoothing Effect in X-ray Microtomogram and Its Influence on the Physical Property Estimation of Rocks

Minhui Lee and Youngseuk Keehm*
Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

요 약: 암석의 물성을 정확히 예측하기 위해서는 물성에 일차적인 효과를 미치는 공극구조에 대한 이해가 매우 중요하며, 정확한 공극구조와 물성시뮬레이션을 이용한 다양한 물성예측 및 변화양상의 정량적 상관관계는 많은 지구물리분야에 응용할 수 있다. 최근 비파괴 구조해석방법, 특히 X선 토모그래피를 이용한 고분해능 스캔 등이 상용화되고 컴퓨터의 성능이 향상됨에 따라 실제의 공극구조를 이용하여 투수율을 예측하는 연구가 시도되고 있다. 본 연구에서는 이러한 연구를 투수율뿐만 아니라 속도와 전기전도도의 영역으로 확장하려는 시도를 하였다. 하지만 토모그래피 방법에서 발생하는 smoothing 효과에 의해 공극구조가 왜곡되고 계산된 물성에 오차가 발생하여, 영상처리기법(sharpening filtering 및 인공신경망 분류법)을 사용하여 smoothing 효과를 제거하는 방법을 시도하였다. 그 결과 가시적으로 향상된 공극구조를 얻을 수 있었고, 투수율 및 전기전도도의 계산값도 이론적 모델링과 유사한 정도의 정확도를 얻을 수 있었다. 하지만 속도의 경우에는 smoothing 효과의 제거에도 불구하고 오차도 상대적으로 크고 향상정도도 매우 미미하였다. 박편과 토모그래피에서 얻어진 공극구조의 비교 연구를 통하여 본 연구에서 사용된 사암의 경우에는 토모그래피에서 얻어진 해상도가 너무 낮은 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 이유로 smoothing 효과가 제거되어도 속도예측의 향상은 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 결론적으로 본 연구에서 제시된 방법은 토모그램의 smoothing 효과를 효율적으로 제거하였으며 이는 토모그래피방법으로 공극구조를 획득할 때 유용하게 사용될 것으로 기대된다. 또한 속도예측의 경우 토모그램의 해상도가 매우 중요한 인자로 판명되었으며 투수율 예측에 일반적으로 사용되는 해상도보다 최소 세 배 이상의 높은 해상도가 요구되는 것으로 파악되었다.

주요어: X선 토모그래피, smoothing 효과, 공극스케일 전산모사, 투수율, 전기전도도, 속도예측, 영상처리기법

Abstract: Physical properties of rocks are strongly dependant on details of pore micro-structures, which can be used for quantifying relations between physical properties of rocks through pore-scale simulation techniques. Recently, high-resolution scan techniques, such as X-ray microtomography and high performance computers make it possible to calculate permeability from pore micro-structures of rocks. We try to extend this simulation methodology to velocity and electrical conductivity. However, the smoothing effect during tomographic inversion creates artifacts in pore micro-structures and causes inaccurate property estimation. To mitigate this artifact, we tried to use sharpening filter and neural network classification techniques. Both methods gave noticeable improvement in pore structure imaging and accurate estimation of permeability and electrical conductivity, which implies that our method effectively removes the smoothing effect in pore structures. However, the calculated velocities showed only incremental improvement. By comparison between thin section images and tomogram, we found that our resolution is not high enough, and it is mainly responsible for the inaccuracy in velocity despite the successful removal of the smoothing effect. In conclusion, our methods can be very useful for pore-scale modeling, since it can create accurate pore structure without the smoothing effect. For accurate velocity estimation, the resolution of pore structure should be at least three times higher than that for permeability simulation.

Key words: X-ray microtomography, smoothing effect, pore-scale simulation, permeability, electrical conductivity, velocity estimation, image processing

2009년 11월 2일 접수; 2009년 11월 16일 채택
*Corresponding author
E-mail: keehm@kongju.ac.kr
Address: Department of Geoenvironmental Sciences,
Kongju National University 182 Shinkwan-dong,
Kongju 314-701, Korea

서 론

암석의 물성을 정확히 예측하고 물성간의 상관관계를 파악하기 위해서는 물성에 일차적인 효과를 미치는 공극구조의 형태와 포함유체의 분포 및 그 영향에 대한 이해가 요구된다. 하지만 공극구조의 복잡성 및 모델링의 어려움 등의 이유로 암석의 공극구조를 단순화한 공극 네트워크 모델이나 단열모델 등의 유효매질이론(effective medium theory)을 사용하여 왔다. 하지만 최근 컴퓨터 및 관련 측정기술의 발달로 고분해능 공극구조의 획득이 가능해지고 전산모사방법이 개발됨에 따라 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Arns *et al.*, 2001; Keehm, 2003; Cundde *et al.*, 2006; Keehm *et al.*, 2006; Prokopiev and Sevostianov, 2007). 이러한 연구에서는 일반적으로 유체의 유동에 관계되는(투수율) 전산모사들이 많이 시도되었다. 이에 본 연구에서는 고분해능 공극구조 해석에 가장 많이 사용되고 있는 X선 토모그래피 방법(X-ray microtomography)을 이용하여 미국 네바다주의 Valley of Fire 주립공원에서 얻은 풍성기원 사암시료의 공극구조를 획득하고 이를 이용하여 투수율을 비롯한 암석의 전기전도도 및 속도를 공극스케일 시뮬레이션 방법을 이용하여 예측하였다. 이러한 다양한 물성들을 하나의 공극구조로부터 정확히 계산하게 되면 암상에 따라 달라지는 물성들 간의 상관관계 해석, 특히 속도로부터 저류물성(공극률, 투수율 등)을 예측할 수 있는 매우 유용한 도구를 제공하게 된다.

하지만 공극스케일 시뮬레이션 결과 토모그램의 획득과정에 발생하는 smoothing 효과에 의해 공극구조의 왜곡이 생기며 이로 인해 계산된 물성에 오차가 발생함을 확인하였다. 특히 그 오차는 속도예측의 경우 매우 크게 나타났다. 그 이유는 smoothing 효과에 의해 입자 접촉부분 주변의 공극이 인접한 입자의 영향으로 입자로 잘못 분류되어 접촉부분의 면적이 실제보다 커지는 결과 때문인 것으로 보인다. 이러한 입자의 접촉부분의 왜곡은 투수율이나 전기전도도의 계산 결과에는 큰 영향을 미치지 않으나, 입자 간의 접촉면적에 직접적인 영향을 받는 탄성물성, 즉 속도에는 많은 오차를 야기한다. 따라서 본 연구에서는 X선 토모그래피 방법으로 획득된 공극구조에서 발생되는 smoothing 효과에 대해 알아보고, 이러한 왜곡을 제거하기 위해 영상처리기법을 시도하여 이것이 암석물성 예측에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. 그리고 마지막으로 공극구조의 해상도와 속도예측과의 관계를 살펴보았다.

공극구조의 획득

본 연구에서는 미국 네바다주의 Valley of Fire 주립공원(Fig. 1)에서 획득된 아즈텍 사암 시료를 사용하였다. 아즈텍 사암은 쥬라기에 형성된 풍성기원의 퇴적암으로 입자의 크기

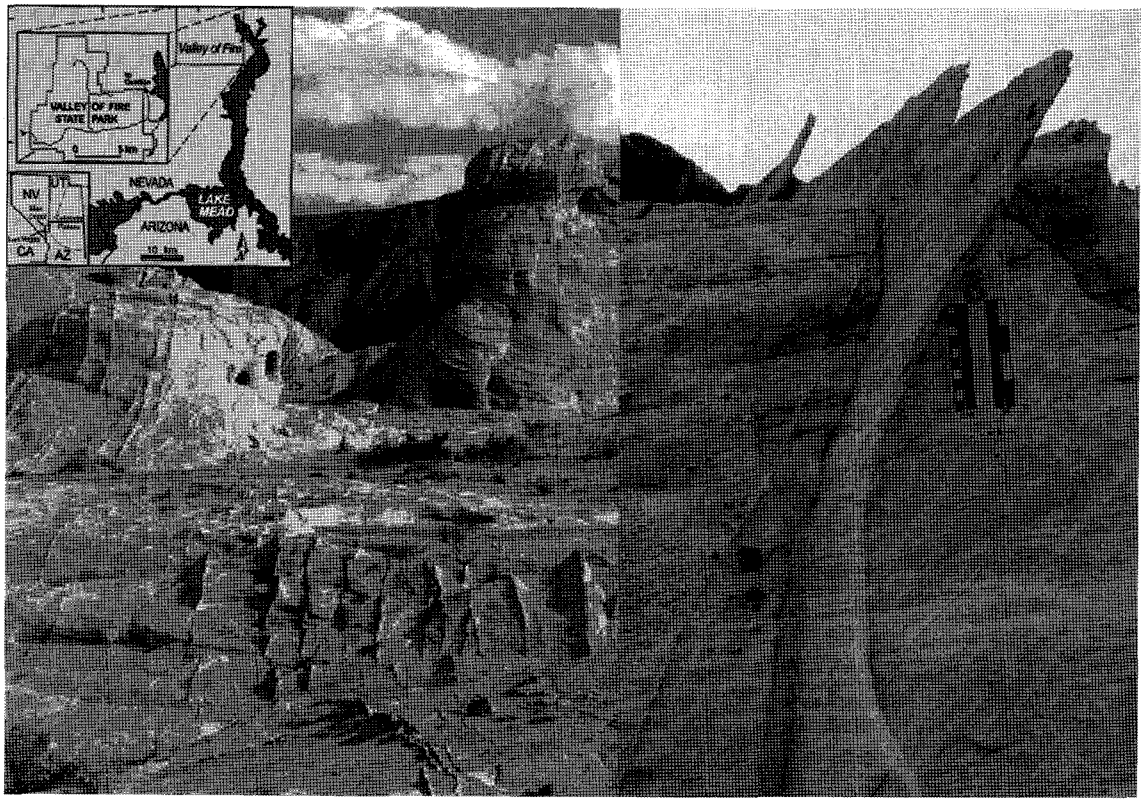

Fig. 1. Location map of Valley of Fire State Park (inset), and outcrop pictures of the Aztec sandstone (Keehm *et al.*, 2006).

는 0.1 ~ 0.4 mm로 비교적 좋은 입도를 보이며, 약 20 ~ 25%의 공극률을 가진다(Mollema and Antonellini, 1996; Du Benard *et al.*, 2002). 이 암상에는 compaction band라는 변형대가 발달하고 있는데 이는 불균질한 응력의 집중현상이 국지적으로 높은 변형을 유발하여 생성된 것으로 투수율 시뮬레이션이 이미 적용된 바 있다(Keehm *et al.*, 2006). 공극구조의 해석에는 고해상도 구조 해석에 가장 많이 사용되고 있는 X선 토모그래피 방법을 이용하였다(Cnudde *et al.*, 2006). 이 방법은 X선이 암석의 여러 방향을 통과하여 얻어지는 수많은 1차원 감쇠(attenuation)값들을 역산을 통해 2차원 이미지인 토모그램(X-ray microtomogram)으로 영상화하는 방법으로 미국 텍사스주립대학 토모그래피실험실(UTCT)에 분석을 의뢰하여 획득하였다(Ketcham and Carlson, 2001). 토모그램은 각각의 픽셀에서의 X선의 감쇠 정도를 나타내는 gray-scale의 intensity 영상으로, 밀도가 높아 상대적으로 높은 감쇠가 일어나는 입자의 경우에는 높은 값을 가져 밝은 색을 띠며 공극은 이와 반대로 낮은 값을 갖고 어두운 색을 보인다(Fig. 2a). 연구에 사용한 토모그램은 1024×1024개의 픽셀로 구성되어 있으며, 각 픽셀은 약 11 μm의 크기를 갖는 16-bit gray-scale(65536 등급)의 이미지이다. 획득된 2차원 토모그램을 중합한 후 불필요한 부분을 제거하는 과정을 거쳐 3차원 구조를 생성하였다(Fig. 2). 다음으로 얻어진 3차원 토모그램을 광물입자와 공극으로 구분된 미세공극구조(pore microstructure)로 만드는 과정이 필요한데, 본 연구에 사용된 사암의 경우 대부분의 입자가 석영으로 구성되어 있어 공극과 석영의 두 가지 성분으로 이분화(binarization)하는 방법을 통해 공극구조로 변환하였다. 이분화 과정은 16bit gray-scale (65536 등급)인 토모그램을 2가지 등급인 공극(1)과 입자(0)로 치환하는 방법으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(x,y)=\begin{cases}1 & \text{if } f(x,y)<T\\ 0 & otherwise\end{cases} \qquad (1)$$
$$\phi=\langle g(x,y)\rangle$$

여기서 $f(x,y)$는 토모그램이며, $g(x,y)$는 공극구조를 의미한다. 이렇게 분류되고 나면 공극률(ϕ)은 이진화 공극구조의 평균으로 주어진다. 식에서 주어진 T는 공극과 입자의 경계(threshold)를 나타내는 것으로 이 값의 변화에 따라 공극구조 및 공극률이 변하게 된다. 일반적으로 T값의 선정은 이진화 공극구조에서 계산된 공극률이 실험실에서 측정된 공극률과 같게 하는 값을 계산하여 사용한다. 이렇게 하나의 경계값을 기준으로 공극과 입자로 이분화하는 방법을 single threshold 방법이라고 한다.

Smoothing 효과

이분화 방법으로 얻어진 공극구조를 동일한 암석으로 제작된 박편과 비교해 보면 박편의 경우 공극과 입자의 구분이 용이하고 입자의 접촉 부분도 명확하게 나타나고 있다(Fig. 3). 그러나 토모그램의 경우 smoothing 효과로 공극과 입자의 정확한 경계를 확인하기 어려우며 입자의 접촉 부분도 불분명하게 표현되는 문제점이 나타난다. 이러한 현상은 Fig. 4의

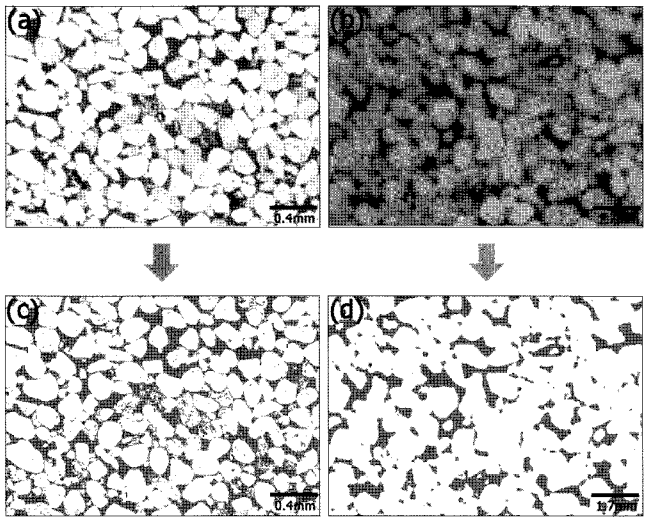

Fig. 3. Comparison between binary images from a tomogram and a thin section. (a) Thin section. (b) 2D tomogram. (c) Binary image by the single threshold classification from the thin section. (d) Binary image from the 2D tomogram.

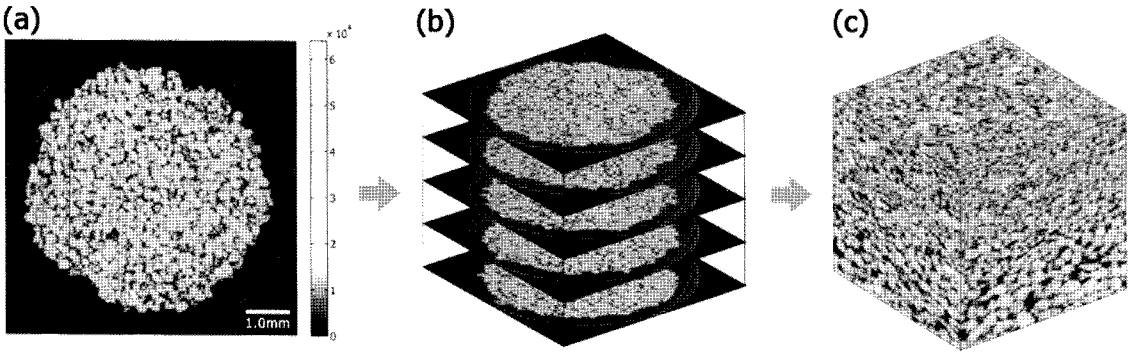

Fig. 2. Schematic procedures of the acquisition of 3D tomogram. (a) An example of 2D tomogram. (b) 3D structure by stacking 2D slices. (c) 3D tomogram in the cubical grid by cropping boundary areas.

도식화된 공극구조의 예를 살펴보면 보다 명확한 이해가 가능하다. Fig. 4a는 구(sphere)들이 규칙적으로 배열된 이상적인 공극구조를 보여주는 것으로 황색 구로 표시된 부분은 입자를, 청색으로 표현된 부분은 공극을 의미한다. 그림에서 원으로 표시한 부분은 입자 간의 접촉면 주변으로, 이 부분에 위치하는 공극은 주변에 높은 intensity를 갖는 입자로 둘러싸여 있어 토모그램에서 얻어진 intensity 값이 실제 보다 높게 된다. 이러한 영향이 매우 큰 경우 이진화 분류에서 사용된 경계값보다 그 값이 커져서 공극이지만 입자로 분류된다. 반대로 낮은 intensity를 갖는 공극으로 둘러싸여 있는 입자부분에서는 주변 공극의 영향으로 실제보다 낮은 값을 갖게 되어 입자가 공극으로 잘못 분류될 가능성이 높다. 이러한 영향을 받은 토모그램을 single threshold 방법으로 이진화 공극구조를 생성한 그림이 Fig. 4b에 나타나 있는데 입자의 접촉면이 실제보다 상당히 커지는 왜곡이 발생하고 공극의 모양도 더 원형화하는 smoothing 효과가 발생하게 된다.

이러한 smoothing 효과가 물성 시뮬레이션에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보기 위해서 Fig. 4에서 얻어진 smoothing 효과를 받지 않은 모델과 받은 모델을 선정하여 각각의 모델에 대해 투수율, 전기전도도 그리고 P파속도를 공극스케일 전산모사 방법을 이용하여 계산하였다. Fig. 5에서는 각 시뮬레이션의 결과로 나타난 공극 내의 유체의 속도, 전류의 흐름 및 응력의 분포를 나타내고 있다. 투수율 계산 결과 smoothing 효과를 받지 않은 경우 1.02 *Darcy*이고, 받은 경우 1.19 *Darcy*로 smoothing 효과에 의해 약 10% 정도의 투수율이 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 공극이 원형화 되어 유체가 보다 쉽게 투과될 수 있는 효과로 설명이 가능하다. 전기전도도의 경우 smoothing 효과를 받지 않은 모델의 경우 σ_{eff}/σ_w=0.342이고 받은 모델은 σ_{eff}/σ_w=0.341로 계산되었다. 여기서 σ_{eff}는 물로 포화된 암석의 전기전도도이며, σ_w는 물의 전기전도도로 이를 formation factor (F)를 이용해 표현하면 $\sigma_{eff}/\sigma_w=1/F$가 된다. 전류의 흐름은 공극률과 공극의 연결성에 영향을 받으나 공극의 모양에 의한 영향은 미미한 것으로 알려져 있기 때문에 큰 변화가 없는 것으로 판단된다. 마지막으로 암석내의 입자의 접촉면적에 매우 민감한 속도의 경우 smoothing 효과를 받지 않은 모델은 Vp=3.55 km/s, 영향을 받은 모델은 Vp=4.62 km/s로 큰 차이를 보였다. 두 모델에서 수행된 전산모사에서 얻어진 응력장의 분포를 살펴보면 smoothing 효과를 받지 않은 모델의 경우 좁은 접촉 면적에서 응력(stress)이 집중되고 있다(Fig. 5). 이는 적은 힘으로도 더 많은 변형(strain)을 유발하므로 암석의 경도(stiffness)가 낮고 따라서 속도가 낮게 나타난다. 반면에 smoothing 효과에 의해 입자의 접촉 면적이 넓어진 경우 응력이 집중되는 부분이 넓어져 암석의 경도가 더 높은 것으로 왜곡되고 계산된 속도가 과대평가되는 오차를 유발한다. 따라서 입자의 접촉면적에 좌우되는 속도를 정확하게 예측 및 계산하기 위해서는 smoothing 효과를 제거하는 것이 매우 중요할 것으로 판단되었다.

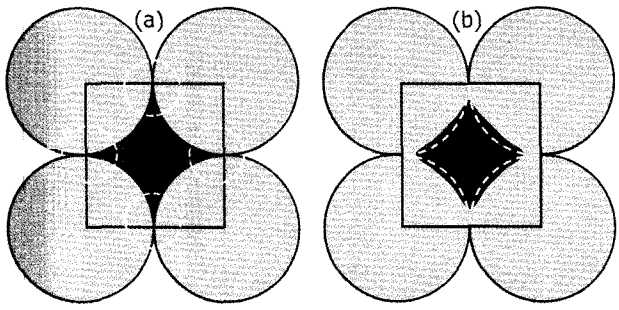

Fig. 4. Schematic diagrams showing the smoothing effect in the tomogram. (a) A simple pore structure from regular packing of spheres. (b) The pore geometry by the single-threshold classification from tomogram with artifacts near grain contacts. Yellow denotes grains and blue areas are pore space.

Smoothing 효과의 제거 방법

앞에서 토모그램의 획득과 smoothing 효과가 물성시뮬레이션에 미치는 영향에 대해서 알아보았다. 이러한 smoothing 효

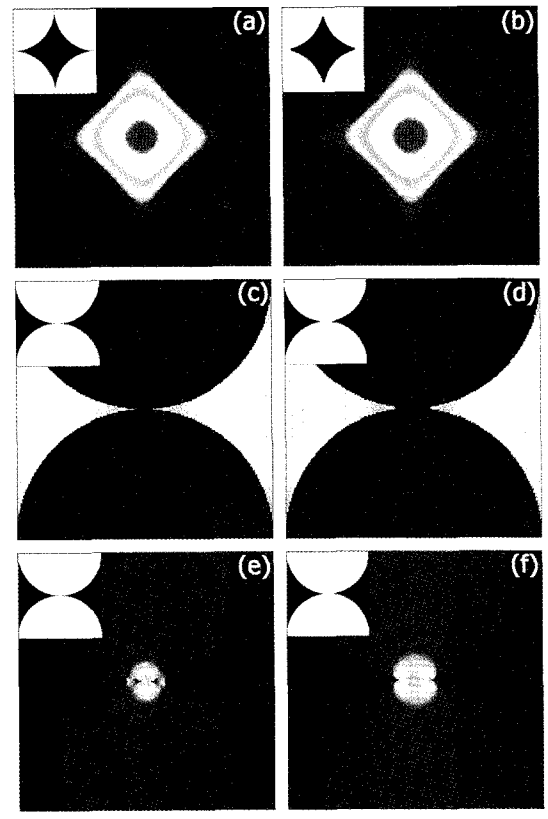

Fig. 5. Results of physical property simulations: fluid velocity (top row); electrical current (middle row); and local stress distribution (bottom row). Figures at the left column are from the correct pore structure, while right column shows results from pore structure with the smoothing artifacts. The inset denotes pore structure used in each simulation.

과를 제거하기 위해 두 가지의 영상처리기법, 즉 이미지의 경계를 향상시키는 sharpening filter를 이용한 방법과 인공신경망을 이용하여 비선형적으로 발생하는 smoothing 효과를 고려한 분류기법을 적용하여 보았다.

Sharpening filter를 이용한 방법

Sharpening filter는 영역기반 처리방법의 하나로 영상처리 분야에서 흔히 사용되는 unsharp mask를 변형한 방법이다. 이는 가장 간단한 등방성 미분연산자인 라플라시안(laplacian)을 이용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(Haralick and Shapiro, 1992).

$$g(x,y)=f(x,y)+f_u(x,y)\approx f(x,y)+\nabla^2 f(x,y) \quad (2)$$

여기서 $f_u(x,y)$는 unsharp mask된 이미지, $f(x,y)$는 원래의 이미지, 그리고 $g(x,y)$는 sharpening filter를 이용하여 보정된 이미지를 나타낸다. Sharpening filter를 이용한 방법은 각각의 픽셀에서 주변 픽셀 값들의 평균을 제거하여 픽셀 간 값의 변화량을 잘 나타나게 하는 방법이다. 토모그램에 이 방법을 적용하게 되면 각각의 픽셀에서 주변 픽셀의 평균을 제거하여 값의 변화가 큰 공극에서 입자 혹은 입자에서 공극으로 변화하는 부분을 강조하는 기능을 갖는다. 우리가 관심이 있는 입자의 접촉면 주변의 공극의 경우 토모그램에서 그 intensity값이 실제의 공극이 갖는 값보다 높지만 sharpening filter를 적용하게 되면 주변의 높은 평균값이 제거되어 실제로 주변보다 낮은 정도가 커지고 이를 찾아내어 공극으로 올바르게 분류할 수 있게 된다. 방법의 효율성 향상을 위해 single threshold 분류로도 충분히 분류 가능한 부분은 single threshold 방법으로 분류하고, 공극과 입자의 구별이 불확실한 부분(single threshold의 경계값 주변)에만 sharpening filter를 적용하여 이 분화하는 dual threshold 방법을 사용하였다. Fig. 6에서 도식적으로 이 방법을 살펴보면 점선으로 표시된 single threhold 방법의 경계값을 중심으로 일정한 영역에 sharpening filter를 적용하여 따로 분류하였다. Sharpening filter의 가중치 설정은 가우시안 함수(Gaussian function)를 이용하였고, 필터의 크기는 smoothing 효과의 영향반경에 대한 민감도 분석을 위해 2차원에서는 3×3, 5×5, 7×7, 9×9, 11×11의 크기를, 3차원에서도 동일한 크기의 5가지 3차원 필터를 사용하였다. 민감도 분석의 결과 필터의 크기가 커질수록 분류결과가 향상되나 일정 크기 이상으로 증가하면 향상정도가 차이가 나지 않음을 확인하였고, 가장 효율적인 크기는 2차원에서는 9×9, 3차원에서는 9×9×9 크기로 나타났다(Fig. 7). Sharpening filter를 이용한 방법의 분류 결과 single threshold 방법을 이용한 분류 결과보다 입자의 접촉부분이 명확히 표현되었으며, 3차원 필터를 이용한 경우가 2차원 필터를 이용한 경우보다 향상된 결과를 얻을 수 있었다(Fig 8).

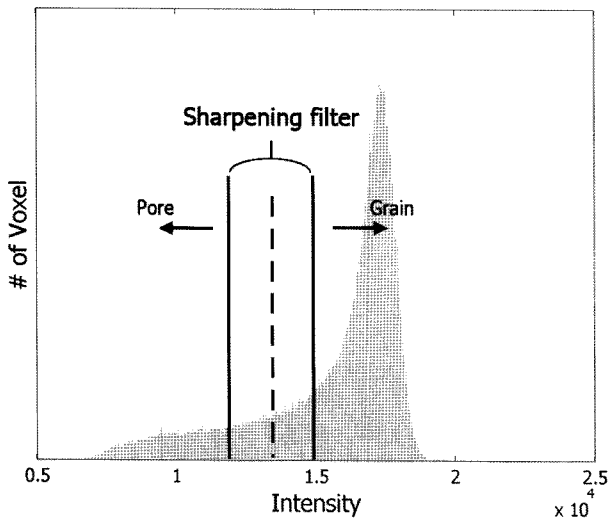

Fig. 6. Two thresholds in the dual-threshold method. The dashed line shows the single threshold in the histogram of tomogram intensity distribution.

인공신경망 분류방법

인공신경망(artificial neural network) 분류방법은 정확한 학

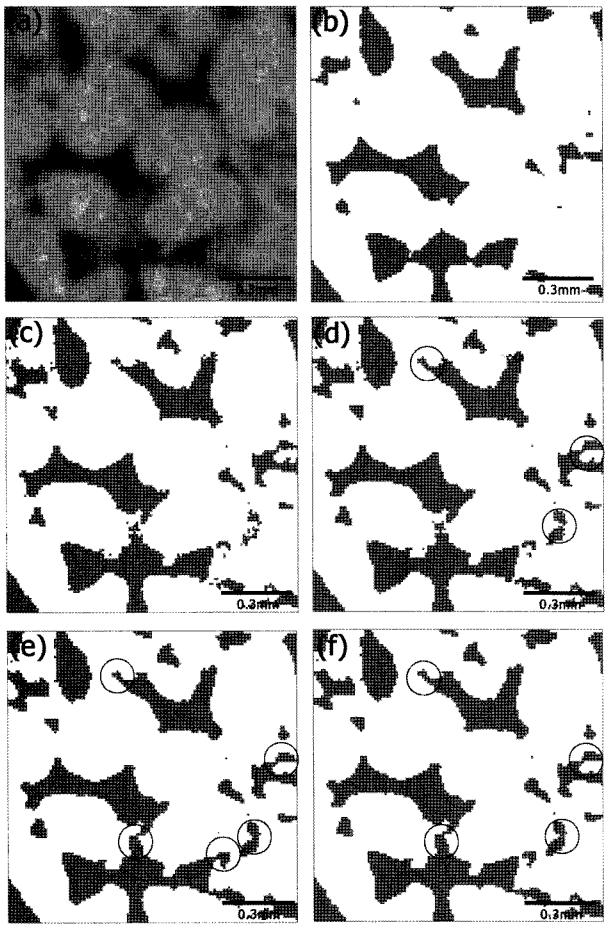

Fig. 7. The effect of sharpening filter size. (a) Tomogram. (b) Binary image by the single threshold method. (c) Binary image by 3×3 sharpening filter. (d) 5×5. (e) 9×9. (f) 11×11.

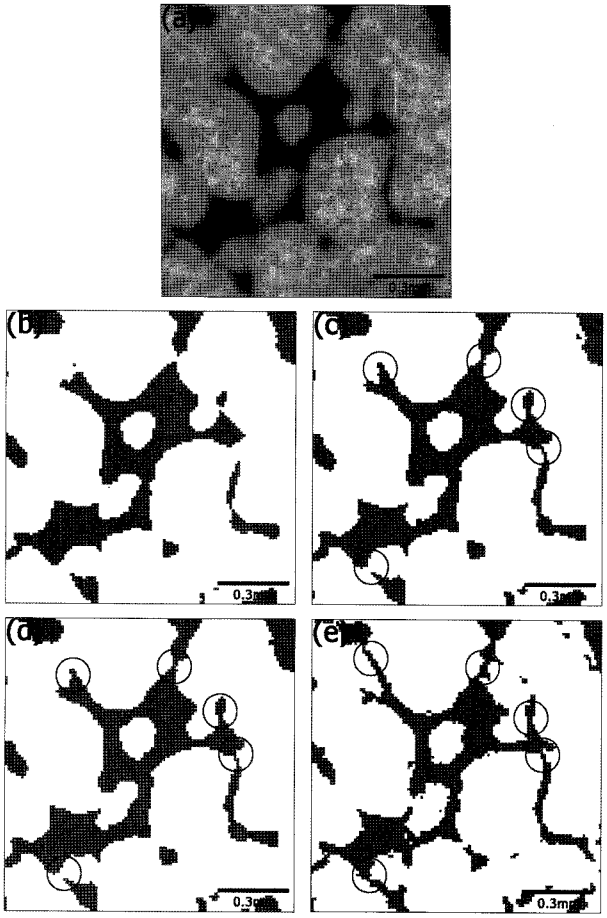

Fig. 8. Pore structures from different binary classification methods. (a) Tomogram. (b) Binary image using the single threshold method. (c) Using the 2D sharpening filter method. (d) Using the 3D sharpening filter method. (e) Using the neural network classification.

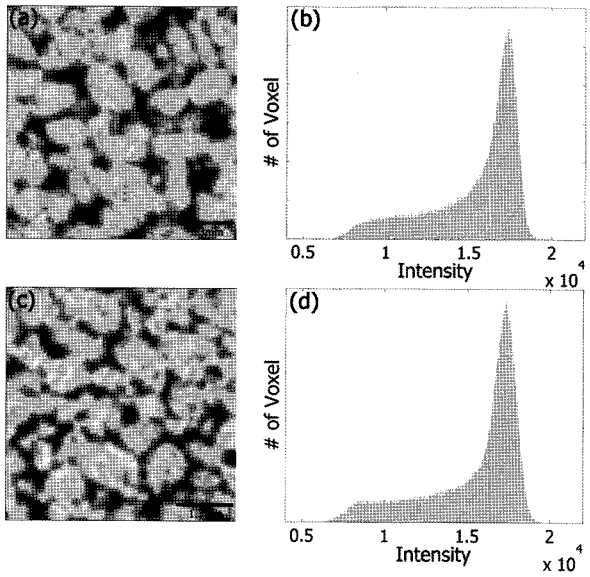

Fig. 9. Comparison of intensity distribution of real and artificial tomograms. (a) Real tomogram from X-ray microtomography. (b) Intensity distribution of real tomogram. (c) Artificial tomogram from thin section image. (d) Intensity distribution of artificial tomogram.

습 데이터인 입력자료와 목표출력을 이용하여 비선형적인 상관관계를 도출한 후 이 상관관계를 이용하여 자료를 분류하는 방법이다. 인공신경망 분류 방법은 최근 원격탐사, 영상처리 등의 이미지 분류뿐만 아니라 패턴인식, 각종 통계분석 등의 다양한 분야의 데이터 분류에 이용되고 있다(김대수, 2005). 인공신경망 분류방법을 토모그램에 적용하기 위해서는 학습데이터인 입력자료와 목표출력이 요구되는데 입력자료는 토모그램이며 목표출력은 이진화된 공극구조이다. 하지만 토모그램 자료에 상응하는 정확한 공극구조는 현재 본 연구에서 얻고자 하는 것으로 존재하지 않기 때문에 동일한 암석으로 제작된 박편이미지를 이용하였다. 박편이미지(해상도 2.4 μm)의 경우에는 토모그램보다 해상도도 높고 비교적 정확한 이진화 분류가 가능하기 때문에 박편이미지를 이진화하고 해상도를 인위적으로 토모그램의 해상도인 11 μm로 낮춘 자료를 목표출력으로 사용하였다. 다음으로는 이러한 목표출력에 대응하는 입력자료(토모그램)가 필요한데 이는 이진화된 목표출력에 Gaussian 필터로 인위적으로 smoothing 효과를 적용하여 생성하였다. 이 경우 인위적으로 얻어진 토모그램이 실제의 토모그램과 유사한 정도가 매우 중요하기 때문에 실제 토모그램과 박편이미지로부터 인위적으로 얻어진 토모그램의 히스토그램을 비교하여 필터링의 정도를 조절하였다. Fig. 9에 이 결과가 나타나 있는데 위의 그림이 실제 토모그램 및 intensity 분포를 나타내고, 아래가 박편으로부터 인위적으로 생성된 토모그램 및 intensity 분포를 보이고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 인위적으로 smoothing 효과를 가해서 얻어진 토모그램의 영상 및 히스토그램은 실제 데이터와 매우 유사하여 이를 입력자료로 사용하였다. 인공신경망 분류모델의 생성에서 smoothing 효과를 고려하기 위해서 입력패턴을 각 픽셀을 중심으로 일정한 범위를 갖도록 설정했는데 이를 도식적으로 나타내면 Fig. 10과 같다. 실제로 입력패턴은 9×9 크기로 사용하였고, 결과적으로 9×9 크기의 입력패턴의 상호관계 및 영향을 고려하여 이 패턴의 중심에 있는 픽셀이 공극인지 또는 입자인지 분류하는 모델이 된다. 인공신경망 분류모델에 의해 얻어진 이진화 공극구조는 Fig. 8e에 나타나 있는데 single threshold 방법에 비해 입자의 접촉부분

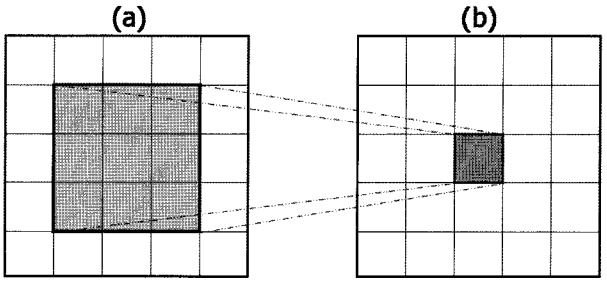

Fig. 10. Schematic diagram for the artificial neural network with 3×3 input pattern and 1×1 output. (a) Input pattern (tomogram). (b) Desired output (binary image).

에서 상당한 개선이 있음을 보여주고, sharpening filter 방법에 비해서도 더 많은 향상이 있음을 확인할 수 있었다.

공극스케일 전산모사를 이용한 물성의 계산

앞에서 smoothing 효과에 대해 알아보고 이를 제거하기 위해 영상처리기법을 사용하여 single threshold 방법으로 얻어진 결과에 비해 가시적으로 향상된 결과를 얻었다. 새롭게 얻어진 공극구조가 물성의 전산모사에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해서 투수율, 전기전도도 그리고 P파속도를 계산하였다. 물성 시뮬레이션에는 200×200×200의 voxel을 갖는 3차원 모델을 이용하였다.

투수율 계산에는 복잡한 공극구조에서 Navier-Stokes 방정식의 해를 구하는 좋은 방법으로 알려진 lattice-Boltzmann 방법을 이용하였다(Keehm *et al.*, 2001; Keehm, 2003). 투수율 계산 결과 smoothing 효과를 제거한 공극구조에서 얻어진 값이 이전에 비해 약 10%정도 낮아졌으며(Table 1), 이는 앞에서 구(sphere)를 이용한 공극구조에서 smoothing 효과로 인한 투수율의 변화양상과 거의 일치한다. 따라서 본 연구에서 사용된 방법은 smoothing 효과를 성공적으로 제거한 것으로 볼 수 있다. 전기전도도 및 속도의 계산에는 유한요소법(finite-element method)을 이용하였다. 상세한 내용은 Roberts and Garboczi (2002)에 의해 제안된 방법을 변형한 Keehm (2003)에서 확인할 수 있다. 전기전도도 계산 결과 smoothing 효과의 제거 전, 후에 거의 차이가 나지 않았다. 전기전도도의 경우에는 공극의 연결성(connectivity)과 공극률에 영향을 받고

Table 1. Estimated permeability, electrical conductivity and P-wave velocity from numerical simulations on pore microstructure by different classification techniques from the X-ray tomogram.

Model	Permeability (Darcy)	Electrical Conductivity ($\sigma_{eff}/\sigma_w=1/F$)	V_p (km/s)	Porosity (%)
Single threshold	13.27	0.0878	4.69	23.1
2D sharpening filter	11.96	0.0883	4.67	23.1
3D sharpening filter	11.60	0.0883	4.66	23.1
Neural network	11.31	0.0907	4.64	23.1

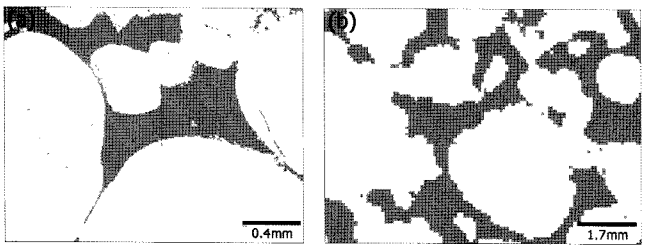

Fig. 11. Comparison between binary images from a thin section (a), and from tomogram (b). Due to the lower resolution of tomogram, the binary image from the tomogram fails to resolve crack-like pores (shown in circles) near grain contacts.

공극의 모양에는 민감하게 반응하지 않는 것으로 나타났던 도식적 모델분석의 결과와 동일하다. 하지만 P파속도의 경우, 영상처리기법을 이용해 smoothing 효과를 제거한 경우가 그렇지 않은 single threshold 방법보다 근소하게 감소하기는 하였지만 거의 차이가 나지 않는 결과를 확인할 수 있었다. 이 결과는 smoothing 효과를 제거한 공극구조가 육안으로도 향상된 이분화 분류를 보이고 투수율도 향상된 사실을 고려하면 매우 의외의 결과로 생각된다. 실제로 본 연구지역에서 얻어진 유사한 공극률을 가진 사암의 실험실측정 P파속도는 3.7 km/s로(Mollema and Antonellini, 1996) 계산된 결과 값은 매우 큰 오차를 보이고 있다. 속도예측의 경우 현재의 공극구조에서 그 영향을 미치는 것이 smoothing 효과뿐 아니라 다른 영향도 있는 것으로 판단된다.

이와 같은 결과가 나타나는 이유를 알아보기 위해 약 2.4 μm의 해상도를 갖는 박편과 약 11 μm의 해상도를 갖는 토모그램의 이분화 자료의 일부분을 확대하여 비교해 보았다(Fig. 11). 탄성파 속도를 좌우하는 입자의 접촉부분에는 그림과 같은 크랙(crack) 모양의 공극이 흔히 관찰되는데, 사용된 샘플의 경우 그 두께가 매우 작아 현재 주어진 토모그램의 해상도로는 smoothing 효과를 충분히 제거해도 정확한 입자의 접촉부분을 표현하기 힘들 것으로 생각된다. 따라서 정확한 탄성파 속도를 공극구조 시뮬레이션을 이용해 예측할 때는 고해상도를 갖는 토모그램의 획득이 필수적이며, 이때 해상도에 대한 충분한 고려가 선행되어야 한다. 해상도와 공극스케일 물성시뮬레이션의 정확도와의 상관관계에 대한 정량적이고 체계적인 분석은 연구 자료가 부족한 실정이나 Keehm and Mukerji (2004)는 투수율 및 상대투수율을 정확하게 예측하기 위하여 필요한 공극구조의 해상도에 대한 연구 결과를 발표한 바 있다. 그 결과를 요약하면 평균적인 광물입자의 크기에 20 ~ 30개의 격자가 존재하는 해상도를 권고하고 있는데, 본 연구에 사용된 아즈텍 사암의 경우 평균입도가 약 250 ~ 300 μm이며 해상도가 11 μm이므로 이 조건을 충족시키고 있다. 하지만 속도의 경우에는 이 보다 훨씬 높은 해상도가 요구되며 박편영상의 해상도에 따른 접촉면적의 변화를 살펴 본 결과 토모그램의 해상도는 약 4 μm 정도는 되어야 할 것으로 분석되었다. 따라서 공극스케일 전산모사를 이용하여 정확한 속도의 예측을 위해서는 현재 보다 세 배 이상 높은 해상도와 smoothing 효과가 제거된 공극구조를 이용하여야 할 것으로 판단된다.

토의 및 결론

본 연구에서는 고해상도 공극구조의 획득에 사용되는 X선 토모그래피 방법에서 발생되는 smoothing 효과를 고찰하였다. 그리고 이 효과로 인하여 발생되는 공극구조의 왜곡이 물성 시뮬레이션을 이용한 암석물성의 예측에 미치는 영향에 대해

연구하였다. 도식적 모델을 이용한 분석의 결과 smoothing 효과는 투수율의 경우 약 10% 정도의 오차를, 전기전도도의 경우에는 거의 오차를 발생시키지 않았다. 하지만 속도의 경우는 그 오차가 상당히 크게 나타났으며 정확한 속도의 예측을 위해 smoothing 효과를 제거하는 두 가지의 영상처리기법을 이용하여 향상된 공극구조를 생성할 수 있었다. Sharpening filter를 이용한 방법과 인공신경망 분류방법의 경우 기존의 single threshold 방법에 비해 육안으로 향상된 이분화 결과를 보여 주었으며 두 방법 중에서는 인공신경망 분류방법이 보다 나은 결과를 나타냈다. 새롭게 얻어진 공극구조를 이용한 물성전산모사의 결과 계산된 투수율은 예측한 바와 같이 약 10% 정도의 향상을 보여주었고, 전기전도도의 경우에는 도식적 모델에서 예측한 결과와 동일하게 거의 변화가 없는 결과를 보여 주었다. 이로부터 본 연구에서 제시된 smoothing 효과를 제거하는 기법은 공극스케일 시뮬레이션을 이용한 물성예측에 효과가 있으며 보다 정확한 공극구조 생성에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

하지만 P파속도의 경우 그 향상이 매우 미미했으며 이는 토모그램의 해상도에 의한 영향으로 판단된다. 고해상도 박편과의 비교분석결과 현재의 토모그램의 해상도는 아즈텍 사암의 입자 간 접촉부분을 정확히 표현하기에는 다소 낮았다. 따라서 smoothing 효과가 성공적으로 제거되었음에도 속도 계산값의 신뢰도는 크게 높아지지 않은 것으로 보인다. 본 연구에서는 Keehm and Mukerji (2004)가 제시한 정확한 투수율의 예측에 필요한 토모그램 해상도인 약 11 μm를 사용하였는데 정확한 속도예측을 위해서는 이보다 약 3배 이상 높은 해상도가 요구될 것으로 보인다. 이러한 해상도가 충족되면 본 연구에서 개발된 smoothing 효과를 제거하는 방법들을 적용하여 공극스케일 전산모사를 통한 정확한 속도예측이 가능할 것으로 기대된다. 또한 이를 통하여 속도(탄성파자료)로부터 저류물성인 투수율 또는 공극률을 예측할 수 있는 정량적 상관관계의 규명에도 기여할 수 있다.

사 사

본 연구는 서울대학교 국가지정연구실사업(과제번호: ROA-2007-000-20120-1)의 지원으로 수행되었다. 그리고 본 논문의 완성도를 높일 수 있게 귀중한 의견을 주신 익명의 심사자에게 감사드린다.

참고문헌

김대수, 2005, 신경망 이론과 응용 1, 진한엠엔비.

Arns, C. H., Knackstedt, M. A., and Pinczewski, W. V., 2002, Computation of linear elastic properties from microtomographic images: Methodology and agreement between theory and experiment, *Geophysics*, **67**, 1396-1405.

Cnudde, V., Masschaele, B., Dierick, M., Vlassenbroeck, J., Hoorebeke, L. V., and Jacobs, P., 2006, Recent progress in X-ray CT as a geosciences tool, *Applied Geochemistry*, **21**, 826-832.

Du Bernard, X., Eichhubl, P., and Aydin, A., 2002, Dilation bands: A new form of localized failure in granular media, *Geophy. Res. Lett.*, **29**, 2176.

Haralick R. and Shapiro, L. G., 1992, *Computer and Robot Vision*, Addison-Wesley Publishing Company.

Keehm, Y. and Mukerji T., 2004, Permeability and relative permeability from digital rocks: Issues on grid resolution and representative elementary volume, 2004, *SEG Expanded Abstracts*, **23**, 1654.

Keehm, Y., 2003, *Computational Rock Physics: Transport Properties in Porous Media and Applications*, Ph.D. Dissertation, Stanford University.

Keehm, Y., Mukerji, T., and Nur, A., 2001, Computational rock physics at the pore scale: Transport properties and diagenesis in realistic pore geometries, *The Leading Edge*, **20**, 180-183.

Keehm, Y., Sternlof, K., and Mukerji, T., 2006, Computational estimation of compaction band permeability in sandstone, *Geosciences Journal*, **10**, 499-505.

Ketcham, R. A. and Carlson, W. D., 2001, Acquisition, optimization and interpertation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences, *Computers and Geosciences*, **27**, 381-400.

Mollema, P. N. and Antonellini, M. A., 1996, Compaction bands: a structural analog for anti-mod I cracks in eolian sandstone, *Tectonophysics*, **267**, 209-228.

Prokopiev, O. and Sevostianov, I., 2007, Modeling of porous rock: Digitization and finite elements versus approximate schemes accounting for pore shapes, *Int'l J. Fracture*, **143**, 369-375.

Roberts, A. P. and Garboczi, E. J., 2002, Elastic properties of model random three-dimensional open-cell solids, *J. Mech. Phys. Solids*, **50**, 33-55.