

X-ray micro-CT 이미지 내 패임 및 동심원상 화상결함 제거를 위한 이미지 보정 기법

Image Calibration Techniques for Removing Cupping and Ring Artifacts in X-ray Micro-CT Images

정 연 종¹ Jung, Yeon Jong 윤 태 섭² Yun, Tae Sup
김 광 염³ Kim, Kwang Yeom 주 진 현⁴ Choo, Jinhyun

Abstract

High quality X-ray computed microtomography (micro-CT) imaging of internal microstructures and pore space in geomaterials is often hampered by some inherent noises embedded in the images. In this paper, we introduce image calibration techniques for removing the most common noises in X-ray micro-CT, cupping (brightness difference between the periphery and central regions) and ring artifacts (consecutive concentric circles emanating from the origin). The artifacts removal sequentially applies coordinate transformation, normalization, and low-pass filtering in 2D Fourier spectrum to raw CT-images. The applicability and performance of the techniques are showcased by describing extraction of 3D pore structures from micro-CT images of porous basalt using artifacts reductions, binarization, and volume stacking. Comparisons between calibrated and raw images indicate that the artifacts removal allows us to avoid the overestimation of porosity of imaged materials, and proper calibration of the artifacts plays a crucial role in using X-ray CT for geomaterials.

요 지

X-ray micro-CT를 이용한 지반재료 내부 미세구조 및 공극구조의 정밀한 이미지 처리는 종종 이미지 내에 원천적으로 포함되는 화상결함으로 인해 제약된다. 본 논문에서는 X-ray micro-CT 이미지에 가장 일반적으로 나타나는 화상결함인 패임(영상 외곽과 중심부의 명암 차이) 및 동심원상(영상 중심으로부터 방사방향으로 연속적으로 나타나는 원)을 제거할 수 있는 이미지 보정 기법을 제시한다. 결함 제거는 좌표 변환법, 정규화 및 2차원 푸리에 변환에 의한 저역 통과 필터링 기법의 순차적 적용을 통해 이루어진다. 이미지 처리 기법의 효과를 다공성 현무암의 CT 이미지에서 화상결함들을 제거하고 이진화 후 적층하여 3차원 공극 구조를 추출하는 과정을 통해 설명하였다. 패임 및 동심원상 결함을 제거한 이미지와 원본 이미지의 비교 결과 결함 제거는 대상 재료 공극률의 과대평가를 방지할 수 있으며, 따라서 화상결함의 적절한 보정은 X-ray CT의 지반재료 적용 시 필수적인 과정으로 판단된다.

Keywords : Cupping artifacts, Image processing, Pore space, Ring artifacts, X-ray micro-CT

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.)

3 정희원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology, kimky@kict.re.kr, 교신저자)

4 정희원, 한국건설기술연구원 전임연구원 (Research Specialist, Korea Institute of Construction Technology)

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

1. 서론

X-ray computed tomography (CT)는 재료의 내부 구조를 3차원으로 관찰할 수 있는 비파괴검사(nondestructive testing) 기술로 탄성과 혹은 전자기파를 이용한 다른 비파괴검사 기법에 비해 대상 재료를 구성하는 물질의 공간적 분포 및 특성의 보다 정밀한 이미지 획득이 가능하다. 최근 마이크로(micron, 10^{-4} m) 단위의 미소한 픽셀의 촬영이 가능한 micro-CT 기술이 발전함에 따라, 고해상도 이미지를 활용한 지반재료 내부의 미세구조 분석 및 재료의 특성 및 거동 평가 연구가 활발히 진행 중이다. X-ray micro-CT를 활용한 연구는 단순한 재료 내부의 3차원 이미지 획득 뿐 아니라, 정적 상태에서 재료의 공극률(혹은 간극비) 및 상호 연결도 등 공극 구조의 정량화, 동적 상태에서 재료의 변형 및 내부구조 변화 평가, 수치해석 기법을 사용한 유체 흐름 등 재료 내부에서의 다양한 물리 역학적 거동 모사, 개별요소법 등 미시 역학 기반의 구성모델 검증 등 현재 지반역학 분야의 관심 대상인 많은 분야에 적용이 가능하다(Choi 등, 2011; Hall 등, 2010; Keehm 등, 2006; Lenoir 등, 2007; Narsilio 등, 2009; Sun 등, 2011).

X-ray CT는 X-ray 발생기(source)를 통해 방사선에 에너지를 일정한 회전 운동을 하는 재료 내부에 연속적으로 투사하고 시험편을 통과하면서 이미지 수집장치(detector)에 검출되는 방사선의 양을 투과영상으로 재구성(reconstruction)함으로써 촬영한다. 이 때 물질의 고유 특성인 감쇠계수(attenuation coefficient)에 따라 X-ray의 산란 및 흡수에 의한 감쇠 정도가 다르기 때문에, 수집기에 검출된 방사선의 공간적 분포를 분석하면 재료의 내부 물질이 구별된 CT 이미지를 획득할 수 있다. 재료의 감쇠계수는 재료의 밀도와 원자번호에 비례하며, 재구성 과정은 X-ray가 재료를 통과하는 다양한 경로의 투과정보에 따라 발생하는 수많은 연립 방정식의 해를 구하여 이루어진다. 그러나 감쇠계수에 따른 투과정보를 수학적 방법으로 재구성함에 있어 X-ray 발생장치, 수집장치, 재구성 알고리즘에 따라 다양한 형태의 화상결함(artifact)이 이미지에 포함된다. 이를 보정하기 위해 X-ray CT 장비의 기하학적 배열을 정확히 정렬하는 장비 표준화 과정을 거치며, 방사선 에너지 빔의 투과 정도에 따라 발생하는 결함 등을 해결하기 위해 필터링을 수행한다. 그러나 이러한 장비 보정 및 최적화 과정을 충분히 거치더라도 원본 이미지에 포함되는 원천

적인 화상결함은 완벽히 제거되지 않는데, 이는 일반적으로 수집장치 내 요소들이 가지는 민감도의 비선형성과 이미지를 재구성할 때 회전축이 완전히 일치하지 않기 때문이다(Bernard과 Chirazi, 2006; Hiriyannaiah, 1997).

X-ray micro-CT 촬영 후 2차원 이미지로 재구성하는 과정에서 발생하는 결함 중 가장 일반적으로 발생하는 현상은 빔하드닝(beam hardening)에 의한 패임 결함(cupping artifacts)과 동심원상 결함(ring artifacts)이다. 빔하드닝은 X-ray 발생기에서 조사시 발생하는 낮은 에너지(저주파수) 영역의 X-ray가 고에너지(고주파수) X-ray에 비해 흡수율이 높기 때문에 발생하는 현상이다. 저주파수의 X-ray 빔이 시료표면에 흡수되면 실제 시료 내부 정보와 다르게 주변부에서는 밀도가 높게(밝은색) 나타나고 중심부에서는 밀도가 낮게(어두운색) 나타나게 되며, 외곽에 밝은 부분이 컵자국과 같이 나타나기 때문에 이를 cupping이라 한다. 동심원상 결함은 이미지 중심으로부터 밝은 원이 방사방향으로 연속적으로 나타나는 현상으로 주로 평판 수집장치(flat panel detector) 사용 시 발생하며, 수집장치의 각 픽셀의 민감도가 균일하지 않기 때문에 X-ray 빔의 중첩시 시료의 회전축을 중심으로 원형태의 형상이 나타나게 된다. 따라서 이러한 패임 및 동심원상 화상결함은 재료 내부 구조의 정밀한 이미지 처리를 어렵게 한다.

본 논문은 CT 이미지에 포함된 패임 및 동심원상 화상결함을 효과적으로 제거할 수 있는 보정 기법을 제시한다. X-ray micro-CT로 획득한 다공성 현무암 시편 이미지에 포함된 화상결함을 좌표 변환, 정규화, 푸리에 변환의 순차적 사용을 통해 제거하고 이진화 후 3차원으로 적층(stack)하여 촬영 시편의 내부 구조를 정량화 하기 위한 단계별 이미지 처리 기법 및 효과를 평가하였다.

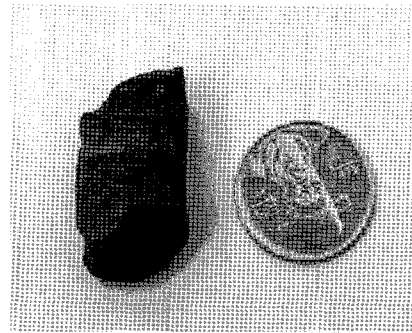
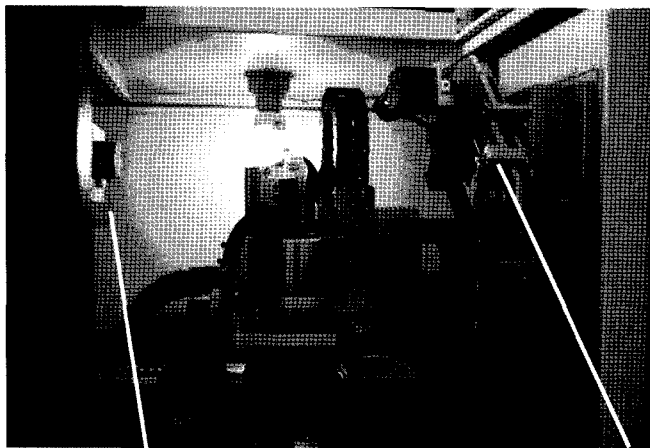
2. 다공성 암석의 X-ray micro-CT 이미지

2.1. X-ray micro-CT 촬영 장비 및 이미지 획득

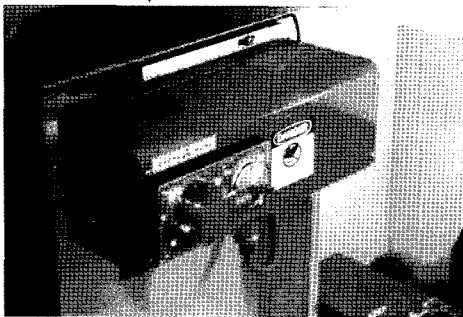
본 연구에서 사용한 X-ray micro-CT 촬영 장비는 최대 90 keV의 관전압 출력이 가능한 3세대 시스템이며, 최소 스팟크기(spot size)가 5마이크론으로 0.005 mm 입자를 구별할 수 있는 고해상도 영상을 획득할 수 있다. 수집장치는 5 cm × 5 cm 크기로 48 마이크로미터의 픽셀피치(pixel pitch)를 갖는다. CT 촬영 대상 시편이 위치하

표 1. X-ray micro-CT 촬영 시스템 제원

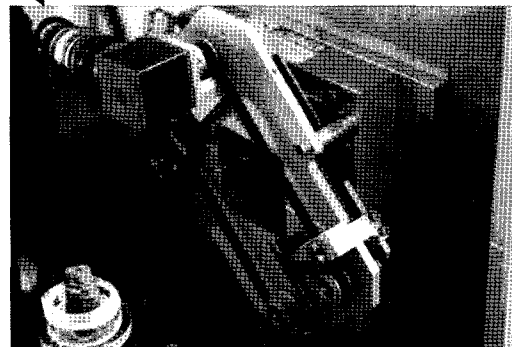
X-ray Source Tube	제조사	Hamamatsu
	관전압 범위	0 kV to 90kV
	전류 범위	0 μ A to 250 μ A
	Focal spot size	5 microns (at 4W)
영상수집장치 (Detector)	Type	Flat panel detector
	Size	2" \times 2"
	Large Sensing area	49.2 mm x 49.2 mm
	Pixel pitch	48 μ m
	Limiting Resolution	10 Lp/mm
구동축 (Manipulator)	거리/이동속도(X 축)	300 mm / 0.2 to 1.0 m/min
	거리/이동속도(Y 축)	50 mm / 0.2 to 0.9 m/min
	거리/이동속도(Z 축)	50 mm / 0.1 to 0.45 m/min
	거리/이동속도(rotation)	360° / 0.3 to 5 rpm
	회전해상도	Wobble : 약 0.01 mm Resolution of rotation : 2.5/1000°



(c) 현무암 시편



(a) X-ray 소스



(b) 영상수집장치(detector)

그림 1. X-ray micro-CT 장비 및 현무암 시편

고 회전하게 되는 구동축(manipulator)은 회전하면서 시편의 흔들림에 의한 모션결함(blurring by motion)이 발생하지 않을 만큼 정밀한 제어가 가능해야 하며, 본 시스템에 적용된 구동축은 0.01 mm의 흔들림 오차와 0.0025°의 회전 정밀도를 갖는다. 표 1에 시스템의 상세

제원을 정리하였다.

그림 1은 본 연구에서 사용된 시스템과 촬영한 다공성 현무암 시편이다. 시편은 직경이 20 mm, 높이가 30 mm이며, 총 1024장의 16비트 2차원 이미지를 0.0332 mm 간격으로 획득하였다. 각 2차원 이미지는 1024 \times 1024개의

픽셀을 포함하며, 각 픽셀은 0.0357 mm의 크기로 mm당 약 28개의 픽셀 해상도를 갖는다.

2.2. 이미지 내 화상결함

그림 2는 X-ray micro-CT 장비로 16비트 원본 이미지를 8비트로 변환시킨 후 이미지 내의 최대값을 기준으로 정규화한 이미지이다. 이미지에서 흰색에 가까운 밝은 회색은 고체상의 암색으로 8비트 픽셀값 중 255에 가까운 값을 가지며, 검은색 혹은 짙은 회색 부분은 암석 내부의 공극으로 0에 가까운 값을 갖는다. 원본 이미지로부터 외곽과 중심부의 명암이 다르게 나타나는 패임 결함과, 중심부로부터 밝은 띠 형태가 규칙적으로 존재하는 동심원상 결함을 확인할 수 있는데, 이와 같은 결함들은 픽셀값을 통한 재료 내부의 고체상과 공극의 명확한 구분을 어렵게 한다는 것을 알 수 있다.

CT 이미지로부터 재료 내부의 공극을 추출하기 위해서는 8비트 이미지에 일정한 한계값(threshold value)을 설정하여 주어진 한계값 보다 작은 값을 갖는 픽셀은 공극으로, 큰 값은 고체상으로 분리하는 이진화(binazation) 처

리 과정이 필수적이다. 그림 2의 히스토그램에 각각 점들로 표시된 한계값들(125, 150, 175, 200)을 기준으로 원본 이미지에 이진화를 적용하면 그림 3과 같은 이미지가 얻어진다. 이 때 한계값을 작게 설정할 경우 8비트 원본 이미지 내 대부분의 픽셀을 고체로 인식하므로 0에 가까운 일부 어두운 색의 픽셀만 공극으로 변환되며 (한계값 125의 경우), 한계값을 크게 설정하면 내부 공극이 과도하게 평가된다(한계값 200의 경우). 한계값이 150과 175인 경우에서 나타나듯이 원본 이미지 내 패임 결함으로 인해 외곽보다 중심부에 더 많은 픽셀이 공극으로 평가되는 오차가 발생하며, 동심원상 결함으로 인해 실제 공극이 아닌 픽셀이 공극으로 변환되는 오차가 발생한다. 이와 같이 이미지 내 화상결함은 전체 공극 부피를 판단하고 추가적인 해석을 실시함에 있어 오차를 발생시키고 공극간 연결도를 평가함에 있어 왜곡된 정보를 제공하기 때문에, 정확한 내부 공극 정보 추출을 위해서는 이진화 전 단계에서 이미지의 명암을 중심부에서 외곽까지 일정하게 처리하고 규칙적으로 존재하는 동심원을 제거하는 보정 과정이 필수적이다.

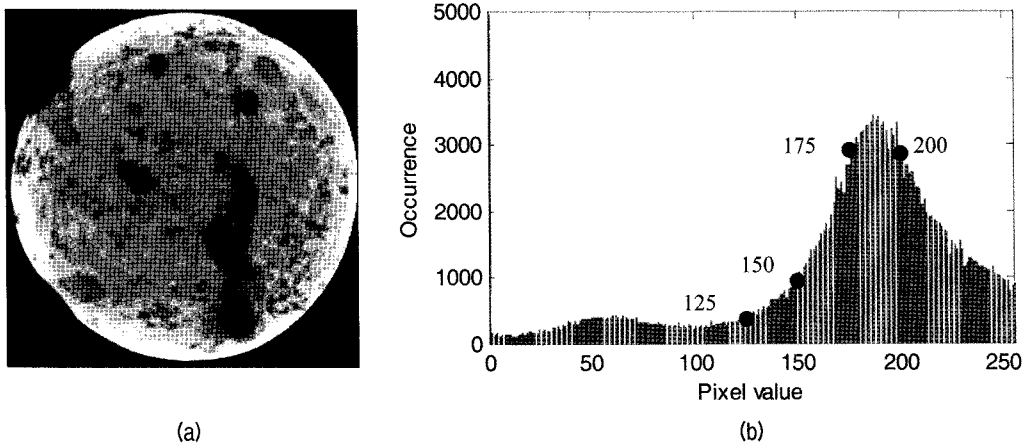


그림 2. (a) 화상결함이 포함된 2차원 시편 이미지 및 (b) 8비트 픽셀값의 분포

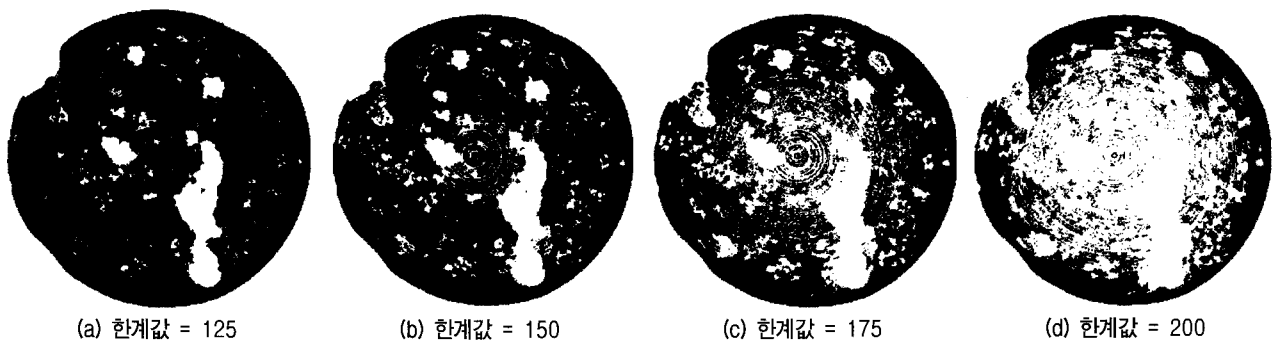


그림 3. 한계값에 따라 이진화된 시편 이미지 내 공극 분포 양상

2.3. 화상결함 제거 알고리즘

일반적으로 동심원상 화상결함 제거를 위해 사용하는 플랫폼 보정(flat-field correction)은 물체가 없는 빈 공간에 X-ray를 투과시켜 빔 자체의 불균일성과 수집장치의 응답 정보를 사용하여 원본 영상을 보정하지만, 응답 정보에 영향을 미치는 다른 비선형 함수의 영향으로 인해 효과적이지 못하다(Seibert 등, 1998). 기계적인 방법으로 영상을 보정하는 방법으로는 센서 픽셀의 평균값을 사용하는 시간차 적분법(time-delay integration method)이 있으나 센서나 물체를 이동시키기 위해서는 특별한 기계적 장치가 필요하다는 단점이 존재한다(Davis과 Elliott, 1997). 이러한 기계적 방법이 아닌 수집장치에서 얻은 영상 정보를 바탕으로 한 동심원상 화상결함 제거 방법으로는 X-ray CT에서 획득한 사이노그램(sinogram)에서 재구성 전에 사이노그램 영역(domain)에서 선형으로 나타나는 화상결함을 스무딩(smoothing)시켜 원본 이미지와의 관계를 이용하여 보정하거나(Boin과 Haibel, 2006), 사이노그램의 선형 결함에 푸리에 변환(Fourier transform)을 적용함으로써 제거가 가능하다(Raven, 1998). 사이노그램에서 이미지가 재구성된 이후에는 이미지에 존재하는 동심원상 화상결함을 직교 좌표계나 극 좌표계에서 중간값 필터(median filter)를 이용해 화상결함을 검출하고 이에 평균 필터(mean filter)를 적용하는 방법으로 제거가 가능하다(Prell 등, 2009). 이러한 기법은 좌표 변환과 푸리에 역변환(inverse Fourier transform)을 거쳐야 하는 불편함이 있으나 동심원상 화상결함을 제거하는데 효과적이다.

기존의 기법이 일반 사용자의 접근이 곤란한 사이노그램상에서 선형 노이즈를 제거하거나 좌표변환 후 중간값 필터를 사용하여 화상결함을 최소화시킨 반면, 제안된 기법은 패임 및 동심원상 화상결함을 제거하기 위해 8비트 CT 이미지를 토대로 좌표변환을 실시하여 방사형으로 존재하는 화상 결함을 선형으로 변환시키고

최대값 보정 및 푸리에 스펙트럼 보정을 순차적으로 적용하여 패임과 동심원상 화상 결함을 동시에 제거할 수 있는 기법을 표 2와 같이 제시하였다. 각 단계별 세부 적용 기법은 다음과 같다.

- ① 극좌표 변환: 원본 이미지는 직교좌표(cartesian coordinate) 형태로 표현된 반면 패임에 의한 명암 및 동심원상 결함들은 중심부로부터 외곽 방향으로 발달해 있으므로 픽셀 위치 정보를 극좌표(polar coordinate) 형태로 변환시켜 동심원상 정보를 수직 노이즈(strip noise)로 표현한다. x축은 극좌표의 반지름 r (직교좌표 이미지 크기의 반)을 나타내며 원본 이미지의 중심부터 외곽방향의 정보와 일치한다. y축은 라디안(radian) 값에 해당하는 θ 이다. 따라서 극좌표상의 θ 를 격자화(discretization)할 경우 직교좌표상의 $2\pi r$ 은 y축의 이미지 정보수와 일치하게 된다.
- ② 최대값 보정: 원본 이미지에서의 패임 결함은 극좌표상에서 볼 때 오른쪽에서 왼쪽으로 어두워지는 현상과 동일하다. 따라서 각 열(column)을 기준으로 횡방향의 평균값 분포를 3차 함수로 나타내고 각 행의 최대값을 기준으로 3차 함수와의 차이만큼을 보정하면 상대적 명암이 고르게 분포하게 되어 패임 현상이 최소화 된다. 극좌표 변환과 정규화 과정을 거친 이미지는 그림 4a에 보여진 바와 같다.
- ③ 2차원 푸리에 변환(Fourier transform): 2차원 푸리에 변환은 극좌표 이미지 내의 주파수 성분을 보여준다. 그림 4a의 수직 노이즈는 x축 방향으로 규칙적으로 반복되며 고주파 성분으로 나타나지만 신호의 개수가 다소 부족하여 푸리에 변환시 주파수 왜곡이 발생할 수 있다. 이를 보정하기 위해 극좌표 이미지를 N개의 행(row)과 M개 열(column)의 픽셀을 갖는 매트릭스 I라 할 때 새로이 구성된 극좌표 이미지 I_0 는 식 (1)과 같다.

표 2. 화상결함 제거를 위한 이미지 보정 순서

이미지 처리 작업	효과 및 결과
1. 직교좌표 원본 이미지의 극좌표 변환	동심원상 노이즈의 수직화
2. 최대값 보정	X-ray 에너지 손실에 따른 명암 차이 보정(패임 현상의 최소화)
3. 2차원 푸리에 변환	2차원 푸리에 스펙트럼 획득
4. 저역 통과 필터링	고주파 수직 성분 제거(동심원상 화상 결함 최소화)
5. 푸리에 역변환	수직 성분 제거된 극좌표 이미지
6. 극좌표 이미지의 직교좌표 변환	패임 및 동심원상 화상결함이 제거된 이미지

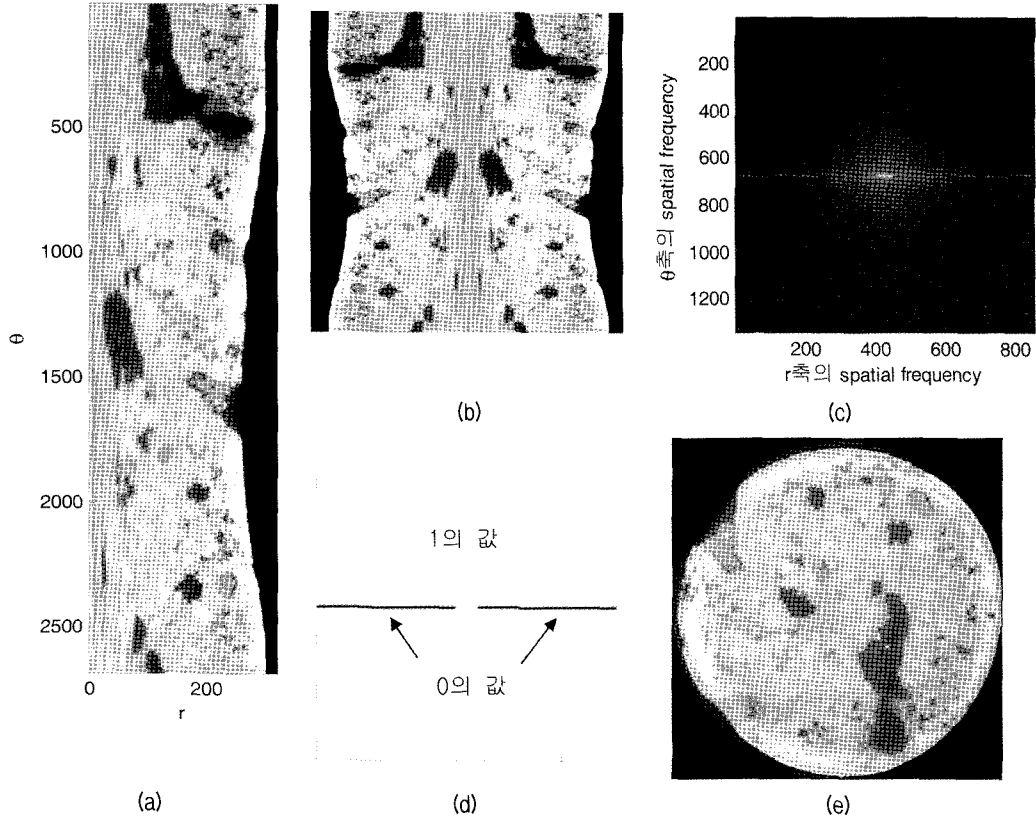


그림 4. (a) 직교좌표 변환 및 최대값 보정된 이미지 (b) 새롭게 구성된 직교좌표 이미지 (c) 2차원 푸리에 스펙트럼 (d) 가우시안 노치 필터 (e) 패임 및 동심원상 화상결함이 제거된 이미지

$$I_{u(=N/2, 2M)} = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^{N/2} [I_{2i, M-k} \ I_{2i-1, k}] \quad (1)$$

즉, 짝수행 픽셀정보의 좌우를 바꾸고 홀수행 픽셀 벡터에 붙이는 과정을 통해 그림 4b와 같은 유사 대칭성 이미지가 만들어진다. 이를 통해 x축 방향의 신호정보를 2배로 늘려 푸리에 변환 시 보다 정확한 주파수 정보의 추출이 가능해진다(Chen과 Duan, 2009). 그림 4b에 2차원 푸리에 변환을 적용하고 저주파 성분을 중심에 위치하게 표현하면 그림 4c와 같게 된다. 중심점에 저주파 성분이 존재하며 x축 방향으로 밝게 보이는 부분이 고주파 성분, 즉 수직 노이즈를 나타낸다.

- ④ 저역 통과 필터링(low-pass filtering) 및 푸리에 역변환(inverse Fourier transform): 중심부의 저주파 성분을 제외한 나머지 주파수를 제거하기 위하여, 그림 4d와 같이 가우시안 노치 필터(Gaussian notch filter)를 적용한다. 푸리에 스펙트럼과 같은 크기를 갖는 노치 필터는 제거하고자 하는 주파수 성분에 0의 값을, 나머지 값은 1을 갖고 파문현

상(ringing)을 방지하기 위해 1과 0의 값을 갖는 픽셀 경계면에 가우시안 분포를 적용하여 주파수 성분이 급격하게 제거되는 것을 방지하였다. 식 (2)에서 가우시안 노치 필터를 Mask라고 할 경우 고주파 성분이 제거되고 이에 푸리에 역변환을 실시하면 수직 성분이 제거된 새로운 직교좌표 영상이 만들어진다.

$$\bar{I} = \text{Re} [\text{IFFT} [\text{FFT} (I_u) \cdot \text{Mask}]] \quad (2)$$

- ⑤ 직교좌표 변환: 푸리에 변환 및 가우시안 노치 필터가 적용된 이미지를 다시 직교좌표로 변환하면 그림 4e와 같다. 이를 그림 2a와 비교하면 원본 이미지 내에 포함되어 있던 결함들이 제거되어 보다 명확한 내부 구조 평가가 가능해짐을 알 수 있다.

동심원상 노이즈의 제거를 위해 사용된 노치 필터의 크기는 해당 필터를 사용하여 최종적으로 획득된 이미지 내에 존재하는 노이즈를 가시적으로 확인하여 조절하였다. 대칭성을 갖는 노치 필터는 250×10 픽셀 범위



그림 5. 부적절한 노치 필터 적용으로 인한 이미지 뭉개짐

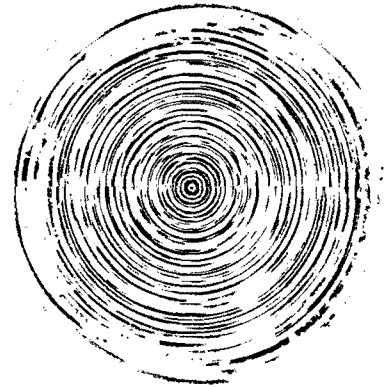
가 0으로 지정되어 그림 4d와 같이 양쪽에 각각 적용되었고, 가우시안 분포는 11×11 픽셀 범위 내에 표준편차 100을 사용하였다. 노치 필터의 폭을 줄일수록, 즉 그림 4d의 중심부분이 넓어질수록 제거되는 고주파 성분이 줄어들어 동심원상 화상결합이 완전히 제거되지 못하는 반면, 필터 폭과 높이가 클 경우 저주파 성분까지 제거됨에 따라 그림 5와 같이 기존에 존재하지 않던 노이즈가 추가적으로 발생하고 불필요한 뭉개짐(blurring) 효과가 발생한다. 노치 필터의 크기 및 가우시안 분포의 범위에 대한 명확한 기준은 기존에 제시된 바 없기 때문에, 원본 이미지에서 가시적으로 명확하게 존재하는 공극 구조 평가가 가능하고 특히 중심점 근처에 잔여 화상결합이 남아있는지에 따라 적용되는 필터의 크기를 결정하여야 한다.

3. 이미지 보정 결과 및 3차원 공극 분포 정량화에 대한 영향 평가

보정이 완료된 8비트 이미지에서 공극을 분할하기 위해서는 한계값을 적용하여 주어진 한계값보다 클 경우 공극으로 인식하는 이진화 과정이 필요하다. 전술한 바와 같이 한계값은 고체상과 공극을 구분하는 데 있어 매우 중요한 영향인자이기 때문에 가시적인 판단에 의해 임의값을 정하는 대신 통계학적 기법인 Otsu의 방법(Otsu, 1979)을 적용하였으며, 결과적으로 각 2차원 이미지가 가진 8비트 정보의 분포에 따라 각기 다른 한계값이 적용되었다. 그림 6a는 Otsu 방법에 의해 결정된 한계값 144를 적용시 산출된 공극 분포로 패임과 동심원상 화상결합 효과에 의한 공극 분포 왜곡이 최소화되었다. 이를 그림 2a와 비교하면, 본 논문에서 제시한



(a)



(b)

그림 6. (a) 패임 및 동심원상 화상결합이 제거된 공극의 이진화 이미지. (b) 이미지 보정 기법에 따라 제거된 동심원상 화상결합

기법에 의해 원본 이미지에서 공극 정보의 손실없이 패임과 동심원상 결합만이 효과적으로 제거되었음을 확인할 수 있다. 그림 6b는 원본과 보정된 이미지의 픽셀 값 차이로 중심부터 외곽까지 균질하게 분포했던 동심원상 화상결합을 보여준다.

그림 7은 화상결합이 제거된 2차원 원본 이미지를 3차원으로 구성한 것으로, 본 연구에 사용된 현무암 시편의 다공성을 명확히 보여주고 있으며 제안된 이미지 보정 기법을 통해 공극 구조를 추출할 경우 내부 공극 분포의 3차원 영상 획득이 가능함을 알 수 있다. 공극이 외부 배경과 연결되어 있을 경우 배경과 공극이 모두 같은 이진화 정보, 즉 0의 값을 갖기 때문에 시편 내부의 일정 부피 내에 해당하는 공극만을 분석해야만 정확한 값을 산출할 수 있다. 그림 7b의 공극 분포는 전체 이미지 가운데 시편 내부 약 65%의 부피를 분석한 이미지로 내부 공극률(공극부피/전체부피)은 0.103이다. 반면, 패임과 동심원상 화상결합을 제거하지 않고 공극률을 산출할 경우는 0.136을 나타낸다.

패임 결합은 이미지가 중심부로 갈수록 어두워지게

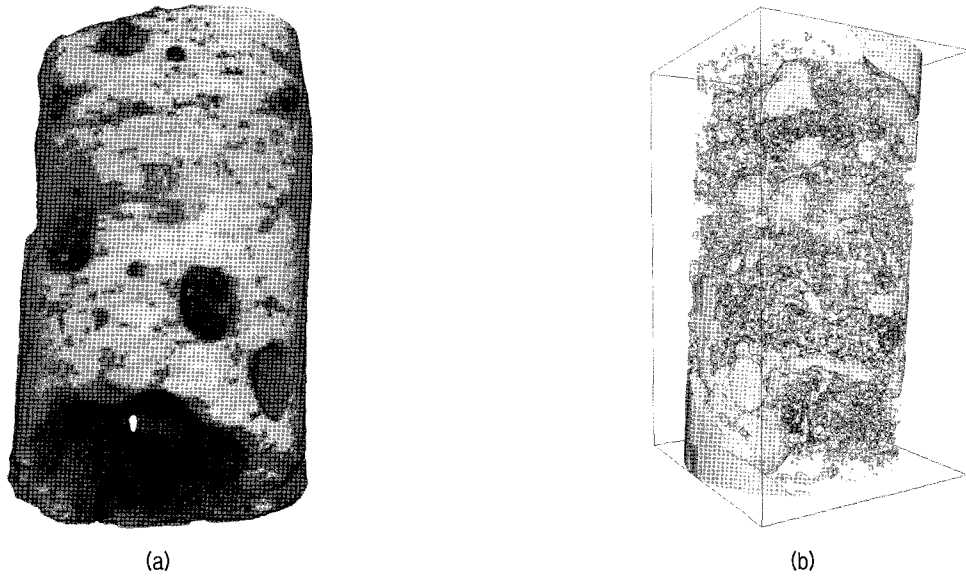


그림 7. (a) 현무암 시편의 3차원 구조 및 (b) 내부 공극 구조

만들기 때문에 외곽에 위치한 공극의 픽셀값이 중심에 가까운 부분에 위치한 공극의 픽셀값보다 크게 되고, 따라서 일정한 한계값 적용 시 외부 공극이 추출되지 않아 전체 공극률을 작게 평가하게 되는 반면 내부의 공극은 그림 3과 같이 과대 평가된다. 또한 동심원상 결합은 고체상(solid phase)의 일부를 공극으로 인식되어 실제보다 공극률을 크게 평가하게 되므로 패임과 동심원상 결합은 실제 공극 부피를 과대 평가하는 경향이 있다. 일정한 한계값을 적용하지 않고 통계적인 기법에 의해 각 2차원 이미지마다 통계적 기법에 의한 다른 한계값을 설정할 경우 보정이 되지 않은 원본 이미지와 보정된 이미지간의 픽셀값 분포가 다르므로 공극으로 인식되는 부분이 달라진다. 이러한 효과들로 인해 본 연구에서 분석한 현무암 이미지의 경우 보정 후 약 30%가량 작은 공극률을 보이는 것으로 나타났다. 하지만 이진화에 필요한 한계값 설정은 동일한 시편이라 할지라도 이미지내 픽셀값의 상대적 분포에 따라 달라질 수 있으며 공극의 정확한 부피가 알려진 재료로 보정을 하지 않았으므로 본 연구에서 결과로 도출한 공극률의 차이는 원본 이미지의 성격에 따라 달리 적용되어야 한다. 단, 이미지상에 나타난 공극의 존재는 해상도에 따라 달라지므로 미세 공극을 포함하고 있는 시편의 경우, 물리적으로 측정된 공극률을 맞추기 위해 한계값을 인위적으로 보정하면 실제 공극 분포를 왜곡할 가능성이 있으므로 주의를 요한다.

공극의 3차원 분포에 기반하여 재료의 파괴거동, 유

체의 흐름 등을 모사할 경우 이진화된 이미지를 수치해석 기법에 직접 적용하는데, 이 때 개별 공극의 크기 보다는 공극간 연결도(connectivity) 및 굴곡(tortuosity)이 해석 결과에 더 큰 영향을 미친다(Adler, 1992; Keehm 등, 2006; Narsilio 등, 2009; Sun 등, 2011). 따라서 패임 및 동심원상 화상결합 제거는 전체 공극률의 평가뿐만 아니라 물리적 거동의 적절히 모사하는데 있어 반드시 수행해야 한다. 또한 화상결합은 암석의 내부 균열 발생, 사질토와 점성토에서의 전단면 발달 등 불연속면의 형상 분석 시에도 파괴면과 공극의 경계를 모호하게 하여 물리 역학적 거동 해석에 오류를 발생시킬 수 있다. 따라서 CT를 통한 지반재료 내부구조 및 공극구조 활용 시 원본 이미지에 포함된 화상결합의 처리는 필수적인 것으로 판단된다.

4. 결론

X-ray micro-CT 시스템은 재료의 파괴없이 내부의 미세구조를 측정할 수 있는 혁신적인 장점을 갖고 있음에도 불구하고, 시편 촬영 및 이미지 처리 과정에서 발생하는 다양한 오류들에 대한 효과적인 보정 방법의 부족으로 그 동안 활용이 제한되어 왔다. 본 논문에서는 X-ray micro-CT 이미지에 가장 일반적으로 나타나는 화상결합인 패임 및 동심원상을 제거할 수 있는 이미지 보정 기법을 제시한다. 결합 제거는 좌표 변환법, 최대값 보정 및 2차원 푸리에 변환에 의한 저역 통과 필터링

기법의 순차적 적용을 통해 이루어진다. 제시한 보정 기법의 적용성과 단계 별 효과를 확인하기 위하여 X-ray CT로 다공성 현무암을 촬영하고, 화상결합 처리 전후의 이미지를 비교하였다. 2차원 단면 이미지의 비교를 통해 제시한 보정 기법이 원본 이미지의 공극을 유지하면서 화상 결합만을 효과적으로 제거할 수 있음을 확인하였다. 또한 통계학적 방법을 통해 설정한 한계값을 적용하여 이진화 처리 후 적층하여 시편의 3차원 공극 구조를 추출하였다. 패임 및 동심원상 결합을 제거한 이미지와 원본 이미지를 이용하여 산정한 공극률 값을 비교한 결과, 결합 보정은 대상 재료 공극률의 과대평가를 방지할 수 있는 것으로 판단된다. X-ray micro-CT 이미지는 본 연구에서 사용한 현무암 시편과 같이 무질서하고 불균질한 다공성 지반재료 내 3차원 공극 구조를 공극 셀과 공극 채널로 정량화하는데 유용하며, 따라서 제시한 보정 기법은 내부 공극 구조에 대한 보다 정확한 평가를 가능하게 함으로써 CT 이미지를 활용한 지반재료 특성 평가 및 수치해석의 신뢰성 향상을 위한 필수적인 과정으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2011-0005593), 한국지질자원연구원(No. 2011-8-0261) 및 한국건설기술연구원의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Adler, P.M., (1992), Porous Media: Geometry and Transport. Butterworth-Heinemann Series of Chemical Engineering. Stoneham, Massachusetts: Butterworth-Heinemann.
2. Bernard, D. and Chirazi, A., Numerically enhanced microtomographic imaging method using a novel ring artifact filter, in Advances in X-ray tomography for geomaterials, J. Desrues, G. Viggini, and P. Besuelle, Editors. 2006.
3. Boin, M. and Haibel, A., (2006), "Compensation of ring artefacts in synchrotron tomographic images", Optics Express, 14(25), pp.12071-12075.

4. Chen, Y.-W. and Duan, G., (2009), "Independent component analysis based ring artifact reduction in cone-beam CT images", International conference on image processing. Cairo, Egypt. pp.4189-4192.
5. Choi, J.-H., Seol, Y., Boswell, R., and Juanes, R., (2011), "X-ray computed-tomography imaging of gas migration in water-saturated sediments: From capillary invasion to conduit opening", Geophys. Res. Lett., 38(17), pp.L17310.
6. Davis, G. R. and Elliott, J. C., (1997), "X-ray microtomography scanner using time-delay integration for elimination of ring artifact in the reconstructed image", Nuclear instruments and Methods in Physics Research A, 394 pp.157-162.
7. Hall, S. A., Bornert, M., Desrues, J., Pannier, Y., Lenoir, N., Viggiani, G., and BeSulle, P., (2010), "Discrete and continuum analysis of localised deformation in sand using X-ray μ CT and volumetric digital image correlation", Geotechnique, 60(5), pp.315-322.
8. Hiriyannaiah, H. P., (1997), "X-ray computed tomography for medical imaging", Signal Processing Magazine, IEEE, 14(2), pp.42-59.
9. Keehm, Y., Sternjof, K., and Mukerji, T., (2006), "Computational estimation of compaction band permeability in sandstone", Geosciences Journal, 10(4), pp.499-505.
10. Lenoir, N., Bornert, M., Desrues, J., Bésuelle, P., and Viggiani, G., (2007), "Volumetric Digital Image Correlation Applied to X-ray Microtomography Images from Triaxial Compression Tests on Argillaceous Rock", Strain, 43(3), pp.193-205.
11. Narsilio, G. A., 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(7), pp.1200-1206.
12. Otsu, N., (1979), "A threshold selection method from gray-level histogram", IEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9, pp.62-66.
13. Prell, D., Kyriakou, Y., and Kalender, W. A., (2009), "Comparison of ring artifact correction methods for flat-detector CT", Physics in Medicine and Biology, 54, pp.3881-3895.
14. Raven, C., (1998), "Numerical removal of ring artifacts in microtomography", Review of Scientific Instruments, 69(8), pp.2978-2980.
15. Seibert, J. A., Boone, J. M., and Kindfors, K. K., (1998), Flat-field correction technique for digital detectors, in SPIE Conference on Physics of Medical Imaging, San Diego, CA, USA, p.348-354.
16. Sun, W., Andrade, J. E., Rudnicki, J. W., and Eichhubl, P., (2011), "Connecting microstructural attributes and permeability from 3D tomographic images of in situ shear-enhanced compaction bands using multiscale computations", Geophys. Res. Lett., 38(10), pp.L10302.

(접수일자 2011. 9. 28, 심사완료일 2011. 11. 17)