X-ray CT 스캔을 이용한 사질토 간극비 측정

Estimation of Void Ratio of Sandy Soil Using X-ray CT Scan

김 광 엽¹ Kim, Kwang-Yeom

신 휴 성² Shin, Hyu-Seong

허 성 준³ Heo, Seong-Jun

임 성 빈⁴ Yim, Sung-Bin

권 영 철⁵ Kwon, Young-Cheul

김 홍 택⁶ Kim, Hong-Taek

Abstract

In this study, a new methodology by using the X-ray CT scan is proposed for estimating void ratio of sandy soil. The general problems in high resolution X-ray CT scan such as beam hardening and ring artifact had been successfully settled up using thin metal plate filter and some calibration process. In order to calculate the void ratio of sand from its CT image, the procedures and algorithm for CT image processing are developed. CT scan tests for Joomunjin sand are carried out to verify its applicability to void ratio testing.

요 지

본 연구에서는 산업 전분야에 걸쳐 다양하게 활용되고 있는 X-ray CT의 지반분야 적용을 위해 X-ray CT를 이용한 사질토의 간극비 측정에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 고분해능 X-ray CT 시스템의 적용에 문제가 되는 빔 하드닝(Beam hardening) 및 동심원상 화상결함(Ring artifact) 등에 대한 문제점 지적 및 해결방안을 제시하였다. 또한 X-ray CT를 이용한 간극비 산정을 위한 알고리즘 및 프로그램을 개발하였으며, 이를 이용하여 주문진 표준사의 간극비를 측정하여 신뢰성을 검토하였다.

Keywords : Sandy soil, Void ratio, X-ray CT

1. 서 론

지반재료의 간극비는 재료의 변형량 및 응력의 변형량 등의 역학적 성질과 직·간접적으로 연관된 중요한 물리적 특성치이다. 따라서 간극비를 정확하게 측정하는 일은 매우 중요한 일이다. 현재 간극비를 측정하는 일반적인 방법은 4°C의 증류수를 기준으로 산정된 토립자의 부피와 무게를 이용하여 토립자만의 비중을 결정

하고, 건조된 흙에서 토립자의 무게를 측정하여 미리 결정된 토립자의 비중으로부터 부피를 추정하고 전체 부피에서 토립자와 간극의 부피를 구분해 산정하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 증류수가 온도에 대해 부피변화가 매우 민감하기 때문에, 위의 과정에서 물의 온도에 대한 보정은 용이한 일이 아니다. 또한 시험과정 중 공기의 혼입 등의 영향으로, 산정된 간극비가 타당한 값인지에 대한 검토가 필요함에도 불구하고 이에

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Eng. & Tunnelling Research Div., KICT)

2 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원 (Member, Research Fellow, Geotechnical Eng. & Tunnelling Research Div., KICT, hyushin@kict.re.kr, 교신저자)

3 학생회원, 홍익대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Hong-ik Univ.)

4 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원 (Senior Researcher, Geotechnical Eng. & Tunnelling Research Div., KICT)

5 정회원, 한국사이버대학교 소방방재학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Fire & Disaster Prevention, Korea Cyber Univ.)

6 정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hong-ik Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

대한 기술적 대안이 부재하므로 관행적으로 사용되고 있는 측면이 강하다. 그리고 현장 시료의 성형과정에서도 단면부의 교란으로 체적과 밀도에 영향을 주며, 시료 내부에 포함된 유기질토, 균열, 이물질 등으로 인하여 흙 자체만의 부피가 아닌 이물질을 포함한 부피가 측정되므로 간극비에 큰 영향을 준다. 이는 결국 부피라는 물리량을 얼마나 정확하게 측정해 낼 수 있는 지로 귀결되는 문제이다.

상기의 문제점을 해결하기 위하여 X-ray CT를 이용한 다양한 연구가 수행되고 있다. X-ray CT는 물체의 내부를 3차원으로 관찰할 수 있는 비파괴 기술로써, 1973년에 Hounsfield에 의해 처음으로 의학분야에 사용되었으며, 현재는 산업 전분야에 걸쳐 다양하게 적용범위를 넓혀가고 있다. 지반분야에서는 초기에 Peyton 등(1992)과 Zeng 등(1996)에 의해 교란되지 않은 흙 시편의 미세한 간극크기 평가와 CT데이터의 정해석과 이미지 처리 분석을 토대로 한 시편의 체적밀도 측정에 활용되었다. 그리고 Anderson과 Hopmans(1994)과 Otani 등(2002)은 이원화의 이미지 처리 기법을 이용하여 흙 시편에서 공기가 차지하는 분포를 평가했다. 또한 Desrues 등(1996), Wong(2000), Otani 등(2000), Otani 등(2002), Alshibli 등(2003) 등은 잔류응력이 존재하는 암석에서 균열의 전파와 흙의 밀도변화를 평가하면서 발생하는 간극구조의 변화를 연구하였다. 그러나 이런 수많은 연구 성과에도 불구하고 아직까지 3차원 영상을 이용한 간극비 실측 데이터를 구하는 알고리즘이나 메커니즘은 미비한 실정이었다. 이에 3차원 알고리즘 개발에 대한 필요성을 인식하면서 Nielsen 과 Mokwa(2004)는 조립토의 다양한 입자 크기를 이용하여 3차원으로 간극의 크기 및 분포를 파악 하였으나 오차에 대한 기술적인

보정이 이루어 지지 않았고, 한계값의 선정에 있어서도 명암비에 따른 이원화 과정을 이용하는 등 한계점을 드러냈다. 이후 Riyadh와 Khalid(2005)는 다공성매체에 대한 경계조건을 Cube, Cone, Cylinder, Irregular로 설정하여 간극비를 산출하는 알고리즘을 개발하는 등 다양한 시도가 이루어지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 Micro X-ray CT를 이용하여 사질토의 간극비를 측정하기 위하여 고분해능 X-ray CT 시스템의 적용에 문제가 되는 빔 하드닝(beam hardening) 및 동심원상 화상결함(ring artifact) 등에 대한 문제점 지적 및 해결방안을 제시하였으며, 간극비 산정을 위한 알고리즘 및 프로그램을 개발하였다. 또한 X-ray CT를 이용하여 주문진 표준사의 간극비를 측정하여 신뢰성을 평가하였다.

2. CT의 원리 및 장비

2.1 CT의 원리

CT(Computed Tomography)는 비 침습적인 방법으로 내부의 단층영상을 재구성하는 비파괴검사의 한 방법이다. 물질을 투과하는 방사선을 통해 획득한 투과영상을 이용하는데, 방사선과 획득하는 검출기의 움직임을 활용해서 물질내의 다양한 위치의 정보를 획득하고 수학적으로 연산하는 과정을 거친다. 일반적인 X-선 영상시스템은 그림 1과 같이 엑스선 발생기(source)와 검출기(detector)가 한 쌍으로 구성되며, CT 시스템은 X-선 영상시스템에서 피검사체의 회전을 가능하게 하는 회전시스템 혹은 엑스선영상시스템을 회전시켜주는 gantry로 구성된다.

Fig. 1. Composition and diagram of X-ray CT

X-선 영상시스템과 CT 시스템 두 방법 모두 피검사체 내부를 지나는 다양한 경로의 투과정보를 제공하며, 이는 그림 2와 같이 수많은 연립방정식을 만들게 된다. 이 연립방정식의 해가 피검사체 내부의 고유한 물질 정보인 선형감쇠계수(linear attenuation coefficient)가 된다. 그림 2의 경우와 같이 간단한 문제는 대수적인 접근으로 해결할 수 있지만, 실제 피검사체는 보다 많고 작은 크기의 픽셀들로 구성되어 대수적으로 접근하기에는 어려움이 따른다. 가장 기초적인 단층영상재구성으로 역투사(back-projection)방법이 있다. CT 시스템의 기하학적 조건 및 시스템 특성상 역 투사를 하면 균일하지 못한 샘플링에 의해 회전 중심부분이 흐려져 정확한 분석이 어려우며, 수학적 모델링을 통해 전달함수의 역함수를 이용하여 흐려짐을 제거할 수 있다. 이러한 역함수를 역 투사 이전에 투과 영상에서 취하는 영상 재구성이여과 후 역투사(filtered back-projection)법이다. 현재는 이차원 검출기가 개발되어 원추형 엑스선을 이용해 한번에 투과영상을 획득할 수 있다.

Fig. 2. Concept of CT Reconstruction Algorithm

2.2 Micro X-ray CT 장비

X-ray 장비는 일반적으로 X-ray를 발생시키는 X-ray 관 또는 소스(source), 물체를 투과한 X-ray를 검출하는 카메라(detector), 물체를 이동시키고 회전시킬 수 있는 구동축(manipulator) 등 3부분으로 구성된다. 그림 3은 현재 한국건설기술연구원에서 보유하고 있는 Micro X-ray CT 장비이다. X-ray 발생장치(X-ray source)와 X-ray 영상 수집 장치(X-ray detector) 사이에 촬영 물체를 올려 놓고 물체를 360도 회전하여 촬영 영상을 역투사하며, CT 재구성 알고리즘으로 재구성하여 내부 구조를 분석할 수 있는 단층 영상을 얻는다. 본 연구에 사용한 Micro X-ray CT 장비의 부분별 성능은 표 1과 같다.

3. 표준화와 보정

3.1 지그 표준화

Micro X-ray CT의 촬영 조건과 활용에 있어서 적합한 규격을 설정하고, 동시에 기반재료의 특성을 고려하

Table 1. Performance of Micro X-ray CT equipment

Source	<ul style="list-style-type: none"> Maximum power : 0kV to 90kV Maximum visibility : 5microns (at 4W)
Detector (Camera)	<ul style="list-style-type: none"> Maximum picture size : 49.2mm × 49.2mm Limit resolution : 10Lp/mm
Manipulator	<ul style="list-style-type: none"> Rotation resolution : 2.5/1000deg Wobble : about 0.01mm

Fig. 3. Micro X-ray CT equipment for this study

Fig. 4. Zig for X-ray CT of soil

여 시료의 교란에 대한 영향을 최소화하기 위해 지그 (jig)를 제작하였다. 지그는 촬영시 시료를 구동축에 고정 및 자랍시키는데 필요하다. 지그 재료는 시료의 CT 촬영 영상에 최소한의 영향만을 미치며, 시료의 채취 및 유지를 위해 일정한 강도를 지녀야 한다는 점을 감안하여 아크릴로 선정하였다. 지그 형태와 규격은 시료의 특성을 고려하여 그림 4의 형태로 최종 결정하였으며, 세부적인 제원은 표 2와 같다.

(a) Air-Profile under removal of a cap

(b) Air-Profile under keeping a cap

Fig. 5. The effect of acrylic resin thickness on a sample

(a) Air-Profile under removal of a O-ring

(b) Air-Profile under keeping a O-ring

Fig. 6. The effect of O-ring on a sample

Table 2. Dimensions of the jig

	Inside diameter	Outside diameter	Thickness of acrylic resin	Thickness of sample
Dimension(mm)	32	40	4	20

지그는 아크릴 두께에 대한 영향과 함수비 유지를 위한 오링의 영향 등을 분석하여 사용 적정성을 평가하였다. 먼저 아크릴 두께에 대한 영향은 지그의 메인틀에 뚜껑을 결합했을 때와 제거했을 때 내부 공기에 대한 그레이 스케일(gray scale)값의 비교를 통해 검토하였다. 그림 5(a)는 메인틀로 뚜껑을 제거했을 때 촬영한 프로파일이며, 공기에 대한 그레이 스케일값은 3,190~3,270까지의 분포를 보이고 있다. 뚜껑을 결합하여 아크릴의 두께를 증가시켜 촬영한 결과는 그림 5(b)와 같이 3,190~3,290의 범위에 분포한다. 두 값은 약간의 차이는 보이지만 그 영향 정도는 미미하여, 아크릴 두께에 대한 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 그림 5(b)의 아크릴과 공기의 경계부를 살펴보면, 공기의 그레이 스케일값이 평균보다 높게 나타난다. 이러한 현상을 컵핑 에러(cupping error)로 인한 경계면 왜곡현상이라고 하며, 해당 영역을 벗어난 공기의 내부에서는 뚜껑을 제거한 공기의 프로파일과 유사한 분포를 보인다.

CT 촬영 시 함수비 유지에 대한 오링의 영향을 평가하기 위해 오링이 공기에 미치는 영향을 분석하였다. 오링을 제거한 상태와 결합한 상태에서의 공기의 그레이 스케일은 그림 6과 같이 각각 3,200~3,250과 3,200~3,260의 범위를 나타낸다. 이는 그림 5의 범위에 포함되는 값이며, 따라서 오링이 공기에 미치는 영향 정도는 낮아서 시료에 미치는 영향은 매우 미미할 것으로 판단된다.

3.2 장비보정

Micro X-ray CT와 같이 5 μ m의 정밀한 측정을 필요로 하는 장비에서의 보정은 화면의 해상도나 결과의 정확도에 큰 영향을 준다. 또한 소스(source), 디텍터(detector), 구동축(manipulator)의 3부분으로 구성된 장비의 조립조건과 설치장소, 환경조건에 따라서 보정 방법이 상이하기 때문에 실험 수행 전 각각의 장비만의 특성을 고려한 보정 작업은 매우 중요하다. X-ray CT에서의 기하학적 영상은 정확한 배열을 가정하고 있으므로 장비의 잘못된 정렬은 재구성 영상의 화질 저하를 초래할 수 있으며, 보정을 통해 정확한 정렬 오차를 획득함과 동시에 영상의 재구성시 소프트웨어적 보정과정을 거침으로써 영상의 품질을 높일 수 있다.

따라서 본 연구에서는 실험에 앞서 장비에 대한 보정을 실시하였다. 장비의 기하학적 오차 측정 결과는 표 3과 같다. 측정 결과에 의하면, 촬영의 기준이 되는 수직선

Table 3. Geometric Errors of X-ray CT equipment

Parameter		Specification	Measured data
Camera	Pixel (mm)	0.048	0.048
	Width (mm)	1024	824
	Height (mm)	1024	824
Offset	Perpendicular (pixel)	0	+38.1133
	Horizontal (pixel)	0	+1.1659
	slop (°)	0	-0.0029
Geometrical Structure	SDD (mm)	343.5	358.2094
	SOD (mm)	241.1	272.3499

Fig. 7. X-ray CT images: (a) Clay image before calibration, (b) Sand image before calibration, (c) Granite Soil image before calibration, (d) Clay image after calibration, (e) Sand image after calibration, (f) Granite Soil image after calibration

과 수평선이 다소 틀어져 있었다. 또한 디텍터가 0.0029° 기울어져 있었으며, 소스와 디텍터 간의 거리를 의미하는 SDD(Source to Detector Distance)와 소스와 물체 사이의 거리를 의미하는 SOD(Source to Object Distance) 역시 상당한 차이를 보이고 있는 상태였다. 이에 하드웨어 및 소프트웨어의 보정을 수행하였다. 보정 전과 보정 후의 점토, 모래, 화강풍화토를 촬영 영상은 그림 7과 같으며, 보정에 의한 영상의 품질 향상이 뚜렷함을 알 수 있다.

3.3 빔 하드닝 보정

빔 하드닝이란 X-ray 소스에서 나오는 저에너지 대역의 제동방사선 양을 줄이고 고에너지를 가진 선질 및 특성방사선을 사용하는 것을 말한다. 대부분의 물체들은 CT 스캐닝 중 빔 하드닝이 일어나며 물체의 모서리 부분이 중심 부분보다 더 밝게 나타나는 현상이 발생한다. 화상결합(artifact)은 평균 X-ray 에너지의 증가 또는

물체를 통과하는 X-ray 빔의 경화 현상이다. 낮은 X-ray 에너지는 높은 X-ray 에너지 보다 더 많이 감소하게 되고 물체를 통과하는 다양한 에너지빔은 스펙트럼의 낮은 에너지 부분부터 우선적으로 상실되게 된다. 결과적으로 입사된 빔보다 높은 평균 에너지를 갖게 되고 물체의 유효 감쇠계수를 감소시키게 된다. 그러므로 단파의 경로를 장파의 경로와 비례하여 보다 더 감쇠하도록 만들어야 한다. 충분히 감쇠된 물질의 X-ray CT 영상은 일반적으로 장파경로의 중심에서 어둡게 나타나며, 모서리 근처에서는 밝게 나타난다. 원형단면의 물체에서 이 과정은 물체의 내부 보다 바깥 부분이 밝게 나타난다. 그러나 형상이 고르지 못한 물체는 빔 하드닝과 실제 물체 변화를 구분하기 어렵다.

빔 하드닝을 데이터 처리 과정에서 완화하는 것은 매우 어려운 작업이다. 시료와 데이터를 처리하기 위한 스캐닝 준비의 영역에서 빔 하드닝에 대한 처리방법은 무시해도 될 정도의 X-ray를 사용하는 방법, X-ray 빔이 물체를 통과하기 전에 필터를 이용하여 미리 제거하는 방법, 촬영 물체와 비슷한 감쇠력을 가진 물체를 이용하여 빼기보정 하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 지반 재료의 불균질한 특성을 고려하여 필터를 이용한 보정법을 선택하였다. 필터는 대개 구리, 황동, 알루미늄과 같은 재료의 판상 형태이다. 필터 방법의 문제점은 모든

에너지에서 X-ray 신호가 다소 분산된다는 것이며, 필터를 제대로 사용하지 않으면 훨씬 많은 이미지의 왜곡을 가져올 수도 있다. 따라서 필터의 재료와 규격의 선택은 매우 중요한 문제이다.

공학적으로 빔 하드닝의 영향을 최소화 할 수 있는 필터를 선정하기 위하여 재질과 두께를 다르게 하는 다양한 필터를 제작하였다. 장비의 소스 크기와 최대 출력을 감안하여 30mm×35mm 크기로 제작하였으며, 재질은 알루미늄과 구리로 하였다(그림 8). 알루미늄 필터는 두께를 0.3mm 부터 0.1mm 씩 증가하여 1.0mm 까지 총 8개, 구리 필터는 0.1mm부터 0.5mm 까지 총 5개를 제작하였다. 각각의 필터를 소스에 부착하여 증류수에 대한 그레이 스케일을 측정하였으며, CT Number의 ROI(Region Of Interest)를 이용하여 평균값과 표준편차에 대한 변화를 살펴보았다. 실험 결과 각각의 평균은 큰 차이가 없으며, 빔 하드닝에 대한 영향 평가의 지표로 활용될 표준편차는 필터의 종류와 두께에 따라 그림 9와 같은 분포를 보인다. 결과적으로 가장 낮은 표준편차를 보이는 0.6mm 두께의 알루미늄 필터가 최적인 것으로 확인되었다.

(a) Aluminum filters

(b) Copper filters

Fig. 8. Filters for evaluation test of beam hardening influences

Fig. 9. Standard deviation with filter and its thickness

Fig. 10. Concept of threshold setting process (Kobayashi et al., 2009)

Fig. 11. Imaging process of real image (Kobayashi et al., 2009)

3.4 한계값 설정

일반적으로 흙은 입자, 공기, 물의 삼상체계를 이루고 있으며, 간극비는 입자와 간극의 부피의 비이다. 이를 X-ray CT에 적용시키면 간극비는 특성이 다른 매질의 분류로 정의될 수 있으며, 결국 한계값의 합리적인 결정의 문제로 귀결된다. 한계값 설정에 따라 결과에 미치는 영향은 매우 크며, Nielsen and Mokwa(2004)는 한계값 설정에 있어서 2^8 의 그레이 스케일을 이용하여 입자를 0에 가까운 백색으로 나타내고 간극을 256에 가까운 흑색으로 표현하여 매질을 분류하였다. 이후 Kobayashi 등(2009)은 그림 10과 같이 믹셀(mixed pixel)의 개념을 도입하여 순수한 입자 영역, 순수한 간극 영역, 두 가지가 혼재한 믹셀에 대한 표준분포곡선을 이용하여 한계값을 설정하였으며, 본 연구에서는 Kobayashi 등(2009)의 방법을 차용하였다. 그림 10은 두 가지 매질의 히스토그램을 세 가지 영역으로 분리하는 방법을 나타낸 것이며, class 1은 공기의 영역, class 2는 입자의 영역, class 3은 믹셀의 영역이 된다. 믹셀의 곡선에서 최빈치를 나타낼 때의 그레이 스케일값이 한계값이 되며, 본 연구에서의 측정 한계값은 466이다. 그림 11은 픽셀에 위치하는 입자의 상태를 나타내고 있다.

3.5 정밀도 분석을 위한 오차량 산정

Micro X-ray CT가 내재하고 있는 오차에 대해서 일정 수준의 보정 작업을 거치더라도 그 외의 영향인자로 인해 오차가 발생하게 된다. 따라서 한계값의 정밀도와 오차를 분석하기 위한 실험을 수행하였으며, 이를 위해 면적비를 산출할 수 있는 계인(gain) 보정용 지그를 이용하였다. 실험에 사용된 계인 보정용 지그는 그림 12(a)와

Fig. 12. The jig for gain calibration

같이 내경이 10mm, 두께가 4mm 이며, Micro X-ray CT로 촬영한 단면은 그림 12(b)와 같다. 계인 보정용 지그의 간극비는 내경의 면적에 지그의 면적을 나누어 구할 수 있으며, 계산에 의해 산정된 간극비는 1.042이다. X-ray CT 촬영에 의해 측정된 간극비는 1.129로 두 값에 대한 오차율은 8.3%임을 알 수 있다. 여기서 지그의 면적을 입자로 판단하고 내경을 간극으로 판단하여 간극비를 산출한 이유는 Micro X-ray CT의 촬영시 근접촬영을 위해 물체를 소스 쪽으로 이동하면 카메라에는 확대가 되는 효과가 발생하게 되지만, 간극비로 이를 산출하면 지그와 간극의 확대비는 같아지므로 그 값에는 영향을 주지 않기 때문이다.

4. Micro X-ray CT를 이용한 간극비 산정

4.1 간극비 평가 알고리즘

일반적으로 조립토는 통일분류법에서 0.05mm이상의

Fig. 13. Transform algorithm for coarse-grained soil

입자 크기를 가지고 있다. 조립토의 경우에는 Micro X-ray CT의 최소 분해능인 $5\mu\text{m}$ 보다 훨씬 크게 된다. 따라서 그림 13과 같이 2차원 영상에서 토립자로 산정되는 부분에서는 해당 픽셀이 온전하게 토립자 만을 투과한 X-ray량을 바탕으로 감지된다. 물론 입자의 경계부에서는 픽셀의 일부에만 토립자가 위치하게 되고 결국 온전히 토립자를 통과한 X-ray량과 공기를 통과한 X-ray량의 중간 범위 중 어느 값에 해당하는 X-ray 투과량을 얻게 된다.

보통 X-ray 투과량은 $0 \sim 2^{14}$ 그레이 스케일의 형태로 원자료(raw data) 파일에 저장되며, 데이터의 표준화를 위해 보통 X-ray 투과량을 그레이 스케일의 원자료 보다는 CT number의 형태로 변환하여 사용한다. CT number는 공기를 -1000, 물을 0으로 고정시켰을 때의 1차식으로 변환한 값을 의미한다(Ketcham & Carlson, 2001). 예를 들어 표준사를 이용한 X-ray CT 촬영 결과 공기로 판단되는 픽셀(pixel)에서는 -1000, 토립자로 100% 채워진 픽셀에서는 1000 정도의 CT number를 얻는 경우에 한계값을 CT number 0으로 정하게 된다. 여기서 한 픽셀에 50% 이상이 토립자로 채워지게 되면 해당 픽셀을 토립자로 취급하며, 50% 미만인 경우에는 간극으로 처리하는 방법으로 이미지 프로세싱을 실시하게 된다. 물론 한계값을 합리적으로 결정하는 것이 간극비의 신뢰성을 높게 평가하는데 매우 중요하다(Kobayashi 등., 2009). 향후 이를 위한 별도의 산정 방법에 대한 연구 개발도 필요한 부분으로 판단된다.

상기와 같은 처리과정을 거치게 되면 간극비는 토립자로 판단되는 픽셀의 개수와 간극으로 판단되는 픽셀의 개수의 비로 정의된다. 이러한 작업을 수많은 슬라이스(slice)에 반복 적용하는 방법으로 각 슬라이스에서 얻은 면적을 전체의 슬라이스 면적의 합으로 확장하면 부피가 된다. 즉, 미분을 통해 면적을 구하고 적분을 통해 부피를 산정하는 것이다. 이상과 같은 간극비 산정 흐름도는 그림 14와 같이 정리될 수 있다. 이와 같은 접근법

Fig. 14. Flow chart for calculating of void ratio

을 활용하면 특정 간극비를 갖는 모래에서는 특정 CT number를 갖게 되며, 이 두 관계는 일대일 대응을 하게 된다. 따라서 해당 모래 지반에서 이 두 물리량의 관계를 얻을 수 있다면 X-ray CT 촬영을 통해 얻어지는 CT number 만을 통해서도 토질 재료의 간극비를 쉽게 측정할 수 있다.

본 연구에서 사용한 X-ray CT의 최소 분해능은 $5\mu\text{m}$ 이기 때문에, 상기 알고리즘을 이용한 간극비 측정의 적용범위는 이론적으로 최소 분해능 이상의 입자 크기를 가지는 흙에 한정되며, 점토 등과 같은 최소 분해능 크기 이하의 입자 크기를 가지는 흙에 대해서는 별도의 간극비 산정 알고리즘이 필요하다.

4.2 간극비 산정 프로그램

한 시료를 구성하는 슬라이스는 촬영자의 조작에 따라 수천장의 슬라이스로 구성될 수 있다. 슬라이스 수가 많아질수록 데이터의 정확도는 증가하지만, 그에 따른 데이터 처리 시간 역시 증가한다. 본 연구에서는 수 백장 또는 수 천장의 슬라이스 데이터를 처리하기 위하여 LabView Professional ver. 8.2를 이용하여 자료 처리 프로그램을 개발하였으며, 변수가 되는 한계값을 설정하고 결과값을 출력하는 형태이다. 엑셀 형태의 슬라이스

데이터를 입력 자료로 하며, 각 셀에 대한 CT Number를 기준이 되는 한계값을 통해 0과 1로 구분하여 0이 되는 셀과 1이 되는 셀의 총합을 계산하게 된다. 간극을 나타내는 0의 총합과 입자를 나타내는 1의 총합의 비를 구하면 한 슬라이스 면적비를 계산할 수 있으며, 이 작업을 전체 슬라이스에 걸쳐 수행하면 시료의 간극비를 계산할 수 있다.

4.3 측정 결과 및 분석

상기 절에서 언급한 간극비 산정 프로그램을 이용하여 주문진 표준사에 대한 간극비를 측정하기 위하여 X-ray CT 촬영을 수행하였다. 주문진 표준사는 입도분포가 균일한 모래로서 촬영을 실시하였을 때 입자의 구별이 명확하며, 간극과 입자간의 구별도 가능하였다. 그림 15는 주문진 표준사의 단면 촬영 결과를 나타낸 것으로 지그와 시료의 커핑 에러에 대한 영향을 없애기 위하여 커핑 에러 영역을 벗어난 일부분을 선택하여 이미지 처리를 실시한 것이다. 그림 15 하단부의 히스토그램의 형상을 살펴보면 쌍봉형의 형상을 확인 할 수 있으며,

Fig. 15. X-ray CT images of Joomunjin standard sand

Fig. 16. Enlarged X-ray CT image of the sand particle (1.1mm)

Table 4. Physical Properties of Joomunjin standard sand

Volume (cm ³)	Weight (g)	Water Content (%)	Specific gravity
19.439	31.074	0	2.59

이 값은 아직 CT Number로서 표준화를 시키지 않는 값이지만 수치적으로 간극과 입자의 구별이 가능함을 나타내고 있다. 일정 부분을 확대하면 그림 16과 같이 입자의 구별이 명확하며, 입자의 표면상태도 확인 가능하다. 그러나 입자와 입자가 서로 연결되어 있는 부분이 확인되는데, 이는 점성을 갖지 않는 모래의 특성을 감안하면 입자간의 커핑 에러 또는 다른 오류로 인한 것으로 판단된다.

X-ray CT를 이용한 간극비 측정 결과의 신뢰성 검토를 위해 기존 실내시험 방법에 의하여 주문진 표준사의 간극비를 측정하였다. 이를 위해 먼저 주문진 표준사의 기본 물성치를 측정하였으며, 그 결과는 표 4와 같다. 기본 물성치를 식 (1)에 대입하여 간극비를 계산하면, $e = 0.62$ 로 계산된다.

$$e = \frac{(1+w)G_s\gamma_w}{\gamma} - 1 \quad (1)$$

여기서, G_s 는 흙의 비중, w 는 함수비, γ_w 는 물의 단위중량, γ 는 흙의 단위중량이다.

X-ray CT를 이용한 주문진 표준사의 간극비 산정에 있어서 지그와 시료의 경계부를 제외시키기 위해서 그림 17과 같이 영역을 설정하여 간극비를 산정하였으며, 이는 양질의 데이터를 선택하기 위함이다. 한계값은 Kobayashi 등(2009)의 방법을 적용하여 466(그레이스케일 값)을 얻을 수 있었다. 이 한계값을 본 연구를 통해 개발된 간극비 산정 프로그램에 반영하여 도출된 각 슬라이스별 간극비는 그림 18과 같으며, 따라서 평균 간극비는 0.654

Fig. 17. Area determination for calculation of void ratio

Fig. 18. Calculation of void ratio using X-ray CT

가 된다. 여기서 오차율 8.3%를 적용하면 최종 간극비는 0.6이 된다. 이 값은 기존의 일반적인 실내시험 방법에 의해 계산된 0.62와 거의 일치하는 결과를 보이며, 이는 X-ray CT를 이용한 사질토의 간극비 산정 방법이 상당한 신뢰성을 가진다는 것을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 물체의 내부를 3차원으로 관찰할 수 있는 비파괴 기술인 X-ray CT를 암반 및 지반 분야에 활용하기 위한 기초 연구의 일환으로, X-ray CT를 이용한 사질토의 간극비 측정에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 고분해능 X-ray CT 시스템의 적용에 문제가 되는 빔 하드닝 및 동심원상 화상결함 등에 대한 문제점 지적 및 해결방안을 제시하였다. 또한 X-ray CT를 이용한 간극비 산정을 위한 알고리즘 및 프로그램을 개발하였으며, 이를 이용하여 주문진 표준사의 간극비를 측정하여 신뢰성을 검토하였다. 연구내용에 대한 세부적인 결과는 다음과 같다.

- (1) 영상의 해상도와 정확도를 높여 X-ray CT 이미지의 품질을 높이기 위하여 Micro X-ray CT를 구성하는 소스, 디텍터, 구동축에 대한 장비의 기하학적 보정을 수행하였으며, 보정 전과 후의 이미지 비교를 통해 보정 결과를 평가하였다. 또한 영상 왜곡의 주요한 원인 중 하나인 빔 하드닝을 보정하기 위하여 필

터를 이용한 보정법을 적용하였으며, 다양한 규격의 구리 및 알루미늄 필터에 대한 빔 하드닝 영향도를 분석하여 0.6mm 두께의 알루미늄 필터를 빔 하드닝에 대한 영향을 최소화 시킬 수 있는 최적의 필터로 결정하였다.

- (2) X-ray CT 영상에서의 간극의 판정 기준이 되는 한계값 설정을 위하여 이미지 상의 픽셀을 순수한 입자영역, 순수한 간극영역, 두 가지가 혼재한 믹셀 영역으로 구분하였으며, 믹셀 영역에서의 최대 빈도를 나타내는 수치를 한계값으로 설정하여 간극비 측정의 신뢰성을 높였다. 또한 Micro X-ray CT의 기하학적 보정 이외의 영향인자에 대한 오차를 평가하기 위하여 한계값의 정밀도와 오차율을 분석하기 위한 실험을 수행하였으며, 그 결과 오차율은 8.3%로 확인되었다.
- (3) X-ray CT의 슬라이스 이미지 상에서 토립자로 판단되는 픽셀의 개수와 간극으로 판단되는 픽셀의 개수를 간극비를 정의하고, 이러한 과정을 수많은 슬라이스에 반복 적용하여 지반재료의 부피를 고려하는 간극비 산정 알고리즘을 제시하였으며, 이를 기반으로 하는 간극비 산정 프로그램을 개발하였다.
- (4) 주문진 표준사에 대하여 본 연구에서 제안한 X-ray CT를 이용한 간극비 측정 방법을 통해 간극비를 측정한 결과 $e=0.6$ 의 결과를 도출하였다. 이는 기존 실내시험 방법에 의해 측정된 0.62와 거의 일치하며, 따라서 X-ray CT를 이용한 간극비 측정 방법의 신뢰성은 매우 높은 것으로 확인되었다.
- (5) 본 연구를 통해 개발된 간극비 산정 기법은 통일분류법 기준으로 0.05mm 이상의 입자 크기를 가지는 조립토를 대상으로 개발되었으며, 이론적으로는 Micro X-ray CT 장비의 최소 분해능(5 μ m) 이상의 입자 크기를 가진 흙만을 대상으로 적용할 수 있다. 따라서 향후 점토 등과 같은 최소 분해능 크기 이하의 입자를 가지는 흙의 간극비 측정을 위한 별도의 알고리즘이 개발되어야 하며, 또한 조립토와 세립토가 혼합된 흙의 간극비 측정 기법에 대한 연구가 수행되어야 한다. 나아가 지반분야에서의 Micro X-ray CT 장비의 활용 분야 확장을 위한 다양한 시도와 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. Alshibli, K. A., Batiste, S. and Sture, S. (2003), "Strain Localization

- in Sand: Plane Strain versus Triaxial Compression”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.129, No.6, pp.483-494.
2. Anderson, S. H. and Hopmans, J. W. (1994), “Tomography of soil-water-root processes”, SSSA, special Publication No.36.
 3. Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M. and Mazerolle, F. (1996), “Void Ratio Evolution Inside Shear Bands in Triaxial Sand Specimens Studied by Computed Tomography”, *Geotechnique*, Vol.46, No.3, pp.529-546.
 4. Ketcham, R. A. and Carlson, W. D. (2001), “Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery : applications to the geosciences”, *Computers & Geosciences*, Vol.27, pp.381-400.
 5. Kobayashi, Y., Kawasaki, S., Kato, M. Toshifumi Mukunoki, T. and Kaneko (2009), “Applicability of a Method for Evaluation of Porosity to BiogROUTED Geomaterials”, *Journal of MMLJ*, Vol.125, No.10, 11, pp.540-546.
 6. Nielsen, B. D. and Mokwa R. L. (2004), *Non-Destructive Soil testing using X-ray Computed Tomography*, A report to the Western Transportation Institute, Montana State University, Montana.
 7. Otani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y. (2002), “Characterization of failure in sand under triaxial compression using a industrial X-ray CT scanner”, *International Journal of Physical Modeling in Geotechnics*, Vol.1, pp.15-22.
 8. Otani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y. (2000), “Application of X-ray CT Method for Characterization of Failure in Soils”, *Soils & Foundations the Japanese Geotechnical Society*, Vol.40, No.2, pp.113-120.
 9. Peyton, R. L., Haefner, B. A., Anderson, S. H. and Ganzer, C. J. (1992), “Applying X-ray CT to measure micropore diameters in undisturbed soil cores”, *Geoderma*, Vol.53, pp.329-340.
 10. Riyadh, A. R. and Khalid A. A. (2005), “Distribution of local void ratio in porous media systems from 3D X-ray microtomography images”, *Physica A*, Vol.361, pp.441-456.
 11. Wong, R. C. K. (2000), “Shear Deformation of locked Sand in Triaxial Compression”, *Geotechnical Tesiong Journal*, Vol.23, No.2, pp.158-170.
 12. Zeng, Y., Ganzer, C. J., Peyton, R. L. and Anderson, S. H. (1996), “Fractal Dimension and Lacunarity of Bulk Density Determined with X-ray Computed Tomography”, *Soil Science America Journal*, Vol.60, pp.1718-1724.

(접수일자 2010. 11. 19, 심사완료일 2010. 12. 20)