

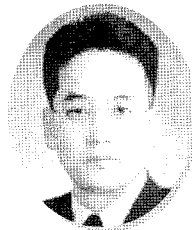
X-ray CT 기술의 지반공학적 활용



신 휴 성
한국건설기술연구원
연구위원
(hyushin@kict.re.kr)



김 광 영
한국건설기술연구원
수석 연구원
(kimky@kict.re.kr)



권 영 철
한국사이버대학교
소방방재학과 교수
(kyc@mail.kcu.ac)



허 성 준
홍익대학교 대학원
석사과정
(joogizi@naver.com)

1. 개 요

X-ray Computed Tomography(CT)는 내부의 단층 영상을 재구성하는 비파괴검사의 한 방법으로 물질을 투과하는 방사선을 이용해서 획득한 투과영상을 통해 물질 내의 다양한 위치의 정보를 획득하고 수학적으로 연산하는 과정을 거쳐 피사체 내부의 투과 정보를 얻는 기술이다. 원래 이 기술은 의료용으로 개발되어 현재도 이러한 목적으로 가장 활발하게 사용되고 있지만 기술발전과 더불어 다양한 학문분야에 적용되기 시작하였으며, 다양한 재료의 내부 영상을 비파괴 상태에서 관찰할 수 있는 기술로 발전해 왔다.

지반 재료를 대상으로 한 연구는 1990년대 중후반을 기점으로 프랑스 등 유럽과 일본의 연구 그룹이 중심이 되어 시작되었으며, 본격적인 연구가 시작된지 십수년이 지나지 않은 최신의 학문 분야이다. X-ray CT 기술을 지반공학 분야에 적용하고자하는 노력은 첫 번째로 그림 1과 같이 현미경과 같은 미세한 거동을 가시화하여 재료 특성을

평가하는 방법과 시각적 가시화를 넘어 재료 및 공학적 특성을 정량적으로 평가하거나 모델링하는 방법 개발이라는 두 가지 측면으로 진행되어 왔다.

현재까지의 연구개발 수준은 strain localization 등 CT 이미지의 가시화 자체에 집중되어, 처리된 이미지의 정성적인 분석이 주를 이루고 있으며, 실제 설계정수의 정량적 평가라는 최종적 목표에 이르기 위해서는 연구개발의 여

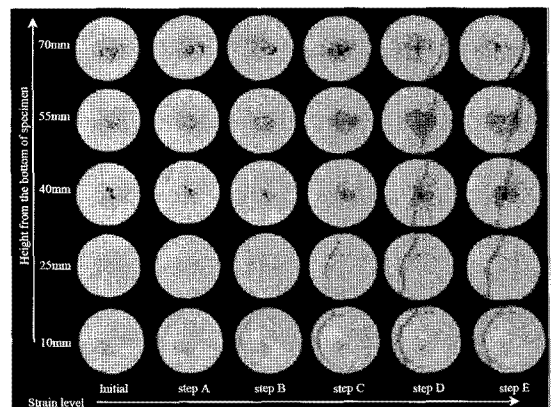


그림 1. X-ray CT를 이용한 흙 시료의 파괴과정 가시화(Otani, 2003)

지가 남아있는 것으로 판단된다. 본고에서는 X-ray CT의 기본적인 개념을 소개하고 최근까지 수행된 지반공학 관련 분야에서의 X-ray CT 기술의 적용 사례와 국내외 연구 개발 상황 등 X-ray CT 기술의 지반공학 분야에서 의 활용에 대해 개괄하고자 한다.

2. X-ray CT의 기본원리

X-ray CT 촬영을 위해서는 먼저 그림 2에 표현한 바와 같이 광원으로부터 조사된 X-ray beam이 동일한 간격으로 회전하는 테이블 위에 놓인 시료를 통과하게 된다. 이때 시료를 통과하여 나온 X-ray beam이 산란과 흡수에 의해 감쇠함으로써 시료의 3차원 내부 구조를 재구성할 수 있게 한다(Mitsuhiro Y., 2007; Hodaka K., 2008). 투영된 이미지는 전통적인 비디오 기술에 의해 수집되고, 이미지 프로세싱 시스템에 의해 2차원 디지털 배열로 전환된다. 최종적으로 획득한 투영 이미지에 의해 3차원 이미지로 재구성된다. 단층 화상에서 주로 백색은 밀도가 높은 물질을 나타내며, 검은 색은 주로 밀도가 낮은 물질을 나타낸다. 또한 CT 값은 시료를 통과하는 X-ray의 투과량에 의한 산출식으로 X-ray와 샘플간의 거리 및 샘플의 두께에 영향을 받는다. 촬영 시 얻어지는 CT 값은 설정해 주는 bit 값에 따라 다르게 나타난다. 16 bit의 경우에는 -8192 ~ 8191 범위의 값을 갖게 되며, CT 값은 아래의 값

은 역산방식으로 얻어진다.

일반적으로 X-ray 강도는 Beer's law에 의해 나타낸다.

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (1)$$

식 (1)에서 I_0 는 X-ray 광원에서 나오는 X-ray 강도, I 는 물체를 통과하고 난 후의 X-ray 강도, μ 는 선형감쇠계수, t 는 시료의 두께를 나타낸다. 선형감쇠계수 μ 는 물질의 밀도와 원자번호에 비례한다. 그림 2와 같이 광원에서의 X-ray 강도는 시료의 두께와 감쇠계수에 의해 p 로 나타낸다. 위의 식으로부터 투영도 p 는 다음 식과 같이 정의된다.

$$p = \ln \left(\frac{i_0}{i} \right) = \int \mu ds \quad (2)$$

X-ray의 흡수계수는 식 (2)에 의해 계산하며, 아래 식에 의해 CT number로 전환된다.

$$CT_{number} = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} \times K \quad (3)$$

식 (3)에서 μ_t 는 스캐닝 지점에서의 흡수계수, μ_w 는 물에 대한 X-ray 흡수계수, K 는 상수이다. 일반적인 X-ray CT의 경우 K 값은 1000, 물은 0, 공기는 -1000이다.

일반적인 디지털 이미지는 픽셀이라고 하는 2차원 단위에 의해 표현되지만, CT 이미지는 2차원 이미지에 의하여

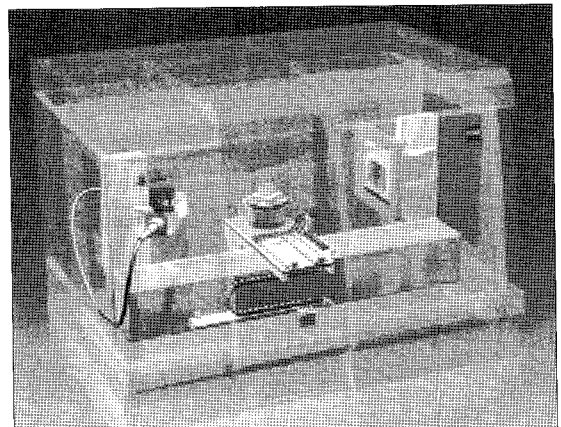
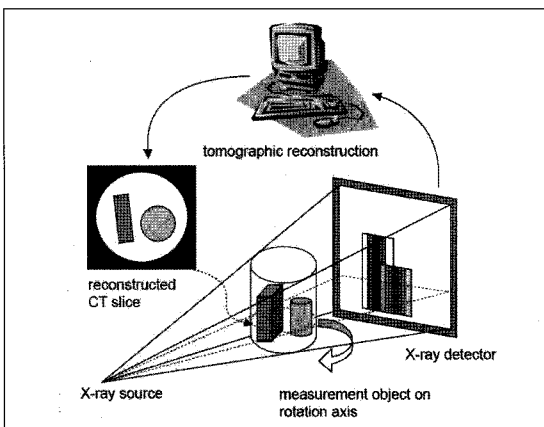


그림 2. Micro X-ray CT의 기본 원리 및 구성

3차원으로 재구성되기 때문에 두께를 가진 복셀(voxel)로 표현된다. 그림 4는 $n \times n$ 복셀로 이루어진 CT 스캔 슬라이스를 나타낸다.

CT 이미지는 256 레벨인 회색의 농담으로 표현되는데, 물질의 밀도가 높은 경우에는 밝은 색, 밀도가 낮은 경우에는 어두운 색으로 표현되며 광물시료에 대한 스캔 화상으로 밝은 색 부분은 아연에 해당되는 광물을 의미하며 어두운 부분은 맥석광물에 해당된다(그림 5).

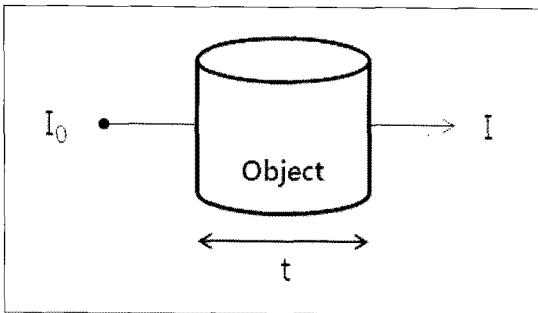


그림 3. X-ray beam의 일차원적 감쇠

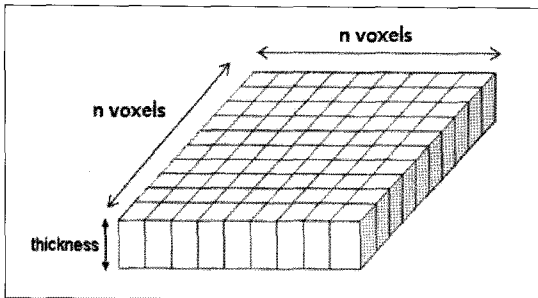


그림 4. X-ray CT 슬라이스 화상의 구성

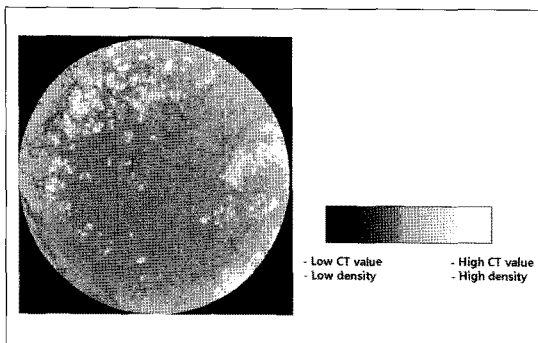


그림 5. X-ray CT 화상촬영 예

3. 일본 쿠마모토 대학의 X-Earth center와 국제 워크샵 GeoX

쿠마모토대학 지반연구그룹은 大谷 順(Otani Jun) 교수를 중심으로 모래 등 토질재료를 대상으로 X-ray CT 기술적용에 관한 연구를 수행 중에 있으며, 말뚝기초의 연직 및 수평 지지력 특성 연구와 터널 기술 고도화를 위한 터널 막장 붕괴 현상의 가시화 분야로 X-ray CT기술의 적용 범위를 넓히고 있는 실정이다. 이와 별도로 쿠마모토 대학 지하공간공학 연구그룹은 尾原祐三(Obara Yuzo) 교수를 중심으로 터널, 암반사면, 지하발전소 동공 등 암반구조물의 설계와 시공 시에 발생하는 다양한 공학적 문제에 대한 연구를 주요한 연구테마로 하고 있다.

특히, 쿠마모토대학은 X-ray CT와 관련된 세계 각국의 연구자와 학생들의 연구 및 신기술을 공유하기 위해 2008년에 X-Earth(X-ray for Eco, Aqua and Re-sources Technology) center라는 독립기구를 설립/운영 중이다(<http://www.civil.kumamoto-u.ac.jp/x-earth/English>). X-Earth center는 생태, 물, 자원 등 지구 규모의 환경 문제로부터 기계 등의 공학기술에의 응용까지 폭넓은 연구/교육활동에 공헌할 수 있는 정책을 수립하고 있다.

지반공학 분야와 관련해서는 8개국 16개의 대학/연구소와 연구 교류를 위한 네트워크가 형성되어 있으며 일본 국내에는 북해도대학을 비롯하여 총 12개소의 대학 및 기업 연구소가 네트워크를 이루고 있다고 한다(그림 6).

현재 尾原祐三교수가 센터장을 맡고 있으며, X-Earth

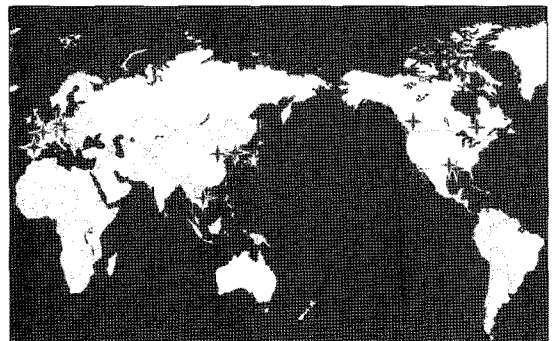


그림 6. X-Earth center의 국제 연구네트워크



그림 7. X-Earth center 보유 산업용 CT 장비



그림 8. X-Earth center 방문(2009년 12월 9일, 대谷 교수와 尾原 교수)

center에서 운영 중인 X-ray CT 스캐너는 최대 출력 300kV의 대형 장비를 사용하고 있다. 이 장비는 도시바에서 제작한 산업용 스캐너이며 최대 분해능은 72마이크로미터, 최대시료는 높이 600mm, 길이 400mm까지를 촬영할 수 있다(그림 7, 표 1). 올해에는 최대출력 90kV와 디텍터의 사이즈가 40cm×40cm인 마이크로 X-ray CT 장비가 도입되어 높은 해상도의 단층 데이터의 획득이 가능하게 되었다.

변형이나 파괴 등 지반 재료의 역학적 성질에 대한 비파괴 검사법인 X-ray CT 촬영법에 대한 심도 깊은 논의를 위해 2003년 11월 6일부터 7일까지 지반재료에 대한 X-ray CT 기술의 국제 워크샵인 GeoX2003이 일본 쿠마모

표 1. 장비규격

Radiographic Field of Vision	• 150 mm or 400 mm, height 600 mm
Number of display pixels	• 512 x 512, 1024 x 1024, 2048 x 2048
Resolution	• 0.1 mm minimum
Scanning Time	• 2.5, 5 and 10 min.
X-ray beam thickness	• 0.3 / 0.5 / 1.0 / 2.0 / 3.0 / 4.0 mm
Power of X-ray	• 300 kV (2 mA) or 200 kV (3 mA) or 150 kV (4 mA)
Maximum sample weight	• 981 N
Scanning Operation	• Translate/rotate system
X-ray beam form	• Sector (spread 30 angle)
Detectors	• 176 channels

토에서 개최되었다. 지반재료에 대한 X-ray CT법의 적용에 대한 연구 성과발표회로서는 세계 처음으로 열린 것이다. 회의 자료는 Balkema에 의해 출판되었으며 흙이나 암반 콘크리트 등 지질학 공학 등의 분야에 대한 연구 결과가 정리되었다. 이후 4년에 한 번씩 개최된 GeoX는 GeoX2006(Grenoble & Aussois, France)을 거쳐 올해 GeoX2010(New Orleans, Louisiana, USA)이 개최되었다(GeoX2010 HP <http://www.cee.lsu.edu/geox2010/workshop/default.htm>).

4. 한국건설기술연구원 X-ray CT 장비 및 연구 수행 현황

4.1 X-ray CT 장비 개요

한국건설기술연구원에서는 X-ray CT 기술을 지반분야에 활용할 수 있도록 국내 기술 개발과 향후 연구개발을 위한 기초연구를 수행하기 위하여 국산 X-ray CT 장비를 개조하여 인프라를 구축하였으며(그림 9), 현재는 지반 재료의 간극비 측정에 대한 연구 과제를 수행하고 있다. 한국건설기술연구원에서 운영 중인 X-ray CT 장비는 그림 9와 같으며, 소스, 디텍터, 구동축의 재원은 표 2~4에 정리된 바와 같다.

표 2. 소스의 재원

제조사	• HAMAMATSU
Voltage range	• 0 kV to 90kV
Current range	• 0 μ A to 250 μ A
Focal spot size	• 5microns (at 4W)

표 3. 카메라의 재원

제조사	• Rad - icon
Flat Panel Detector	• 2' x 2'
Large Senging area	• 49,2mm x 49,2mm
Pixel pitch	• 48 μ m
Limiting Resolution	• 10 Lp/mm

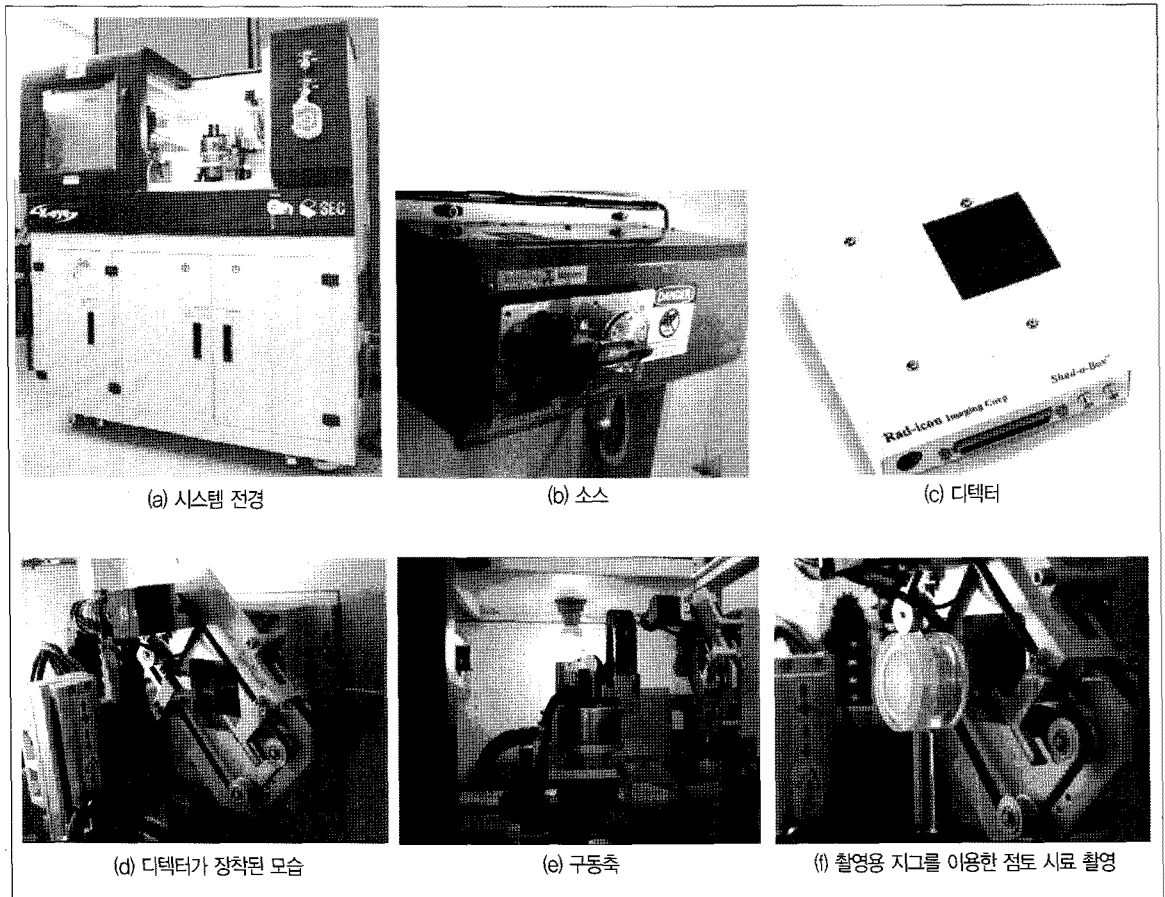


그림 9. 한국건설기술연구원의 X-ray CT 장비

표 4. 구동축의 재원

	거리	이동속도
X축	300mm	0.2 to 1.0 m/min
Y축	50mm	0.2 to 0.9m/min
Z축	50mm	0.1 to 0.45m/min
Rotation	360°	0.3 to 5 rpm
회전해상도	• Wobble : 약0.01mm • Resolution of rotation : 2.5/1000deg	

4.2 지반 재료에 대한 촬영 영상

① 점토

점토는 입자의 크기가 매우 작아 Micro X-ray CT장비의 분해능으로 입자들을 구별해 낼 수는 없었다. 그림 10 과 같이 전체적으로 입자와 간극은 명확한 구별이 되지 않고 전체적인 형상만 확인 할 수 있으며, 히스토그램 분포를 보면 하나의 피크를 형성하여 간극과 입자들 간의 구분이 불명확함을 보여주고 있다.

② 표준사

표준사는 입도분포가 균일한 모래로서 촬영을 실시하였을 때 그림 11과 같은 형상을 얻을 수 있었으며, 표준사는 점토와는 달리 입자의 구별이 명확하였으며 간극과 입자간의 구별도 가능하였다. 또한 히스토그램의 형상을 보면 쌍봉형의 형상을 확인 할 수 있다. 이는 수치적으로 간극과 입자의 구별이 가능함을 나타내고 있다.

③ 풍화토

풍화토는 입도분포가 고른 일반적인 흙으로서 자갈, 모래, 점토, 실트 등이 모두 포함되어 있다. 그래서 입자의 크기가 다소 큰 입자는 구별이 가능 하였지만 세립질의 입자는 명확하게 구분하기 어려운 모습을 그림 12를 통해 확인할 수 있다. 또한 아래의 히스토그램의 분포를 보면 표준사와 달리 하나의 봉우리만 형성됨을 알 수 있으며, 이는 풍화토에 섞여 있는 가는 입자들 때문에 간극과 입자의 구분이 명확하지 않음을 의미하는 것이다.

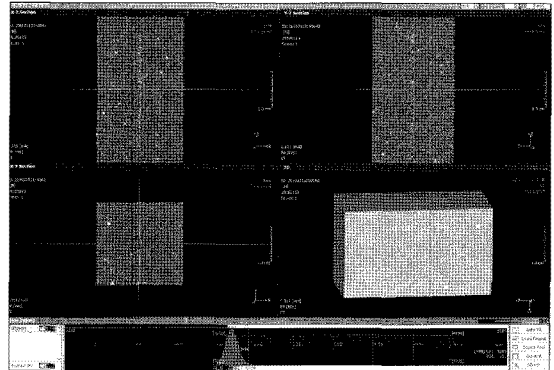


그림 10. Reconstruction 후 점토의 촬영 영상

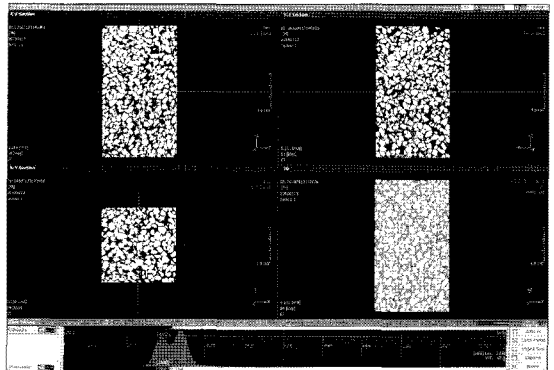


그림 11. Reconstruction 후 표준사의 촬영 영상

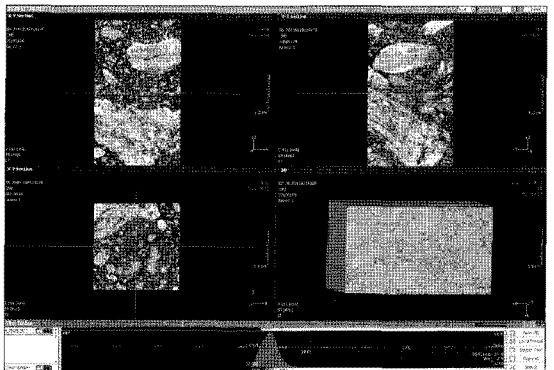


그림 12. Reconstruction 후 풍화토의 촬영 영상

4.3 이미지 처리에 의한 간극비 산정 프로그램 개발

한 시료를 구성하는 슬라이스는 촬영자의 조작에 따라 수천 장의 슬라이스로 구성될 수 있다. 슬라이스 수가 많

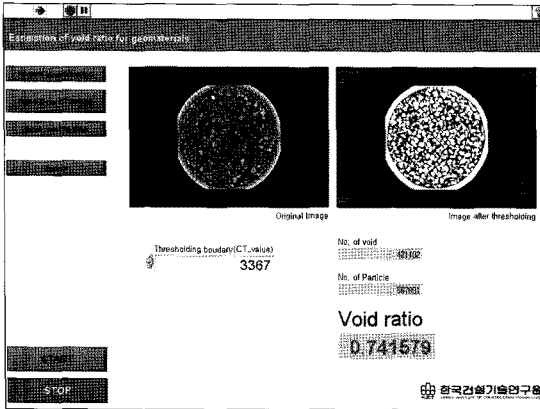


그림 13. 이미지 처리에 의한 간극비 산정 프로그램

아질수록 데이터의 정확도는 증가하겠지만 그에 대한 데이터 처리 시간은 증가할 것이다. 또한 슬라이스를 구성하는 한 pixel의 선명도에 대해서도 최대 1024×1024까지 데이터를 표현할 수 있다. 그러므로 수백 장 혹은 수천 장의 슬라이스 데이터를 처리하기 위해서는 이미지 처리 프로그램이 필요하다. 이를 위해 그림 13과 같이 LabView Professional V8.2를 기반으로 한 간극비 산정 프로그램이 개발되었으며, 이 프로그램에서는 변수가 되는 thresholding 값을 설정하고 결과값을 출력 받을 수 있다.

5. 맺음말

X-ray CT 기술을 지반공학 분야에 활용하기 위한 국내 외 연구그룹의 관심이 높아지고 있으며, 이 결과로 구체적인 연구 성과들이 도출되는 단계에 이르고 있다. 그러나 관련 기술의 적용 타당성에 대한 논의 및 한계점에 대한 지적도 다양하게 제시하는 등 현 단계에서는 아직 보편적인 기술수준까지 연구개발이 진행된 것은 아니라고 판단된다.

X-ray CT를 지반공학 분야에 적용하고자 하는 궁극적인 목표는 물리적 성질 뿐만 아니라 복잡한 지반 재료의 역학적 특성을 직접 측정 혹은 추정해 낼 수 있는 기술의 개발이다. GeoX2010 워크샵을 통해 파악된 선진각국의 현재 기술수준은 이미지 가시화화 물리적 특성 파악을 넘어 간극비와 응력-변형거동과의 상관관계 실험과 동시에 실

시간 계측을 수행하여 역학거동을 파악하는 연구나 image-based modeling and analysis 등의 수준까지 도달해 있는 것으로 판단된다. 그러나 관련 연구 분야에 대한 국내의 연구 개발 수준은 아직 초기 단계에 머물고 있다고 할 수 있다. 따라서 대형 국가 R&D 및 주요사업 지원을 위한 구조물 내부 영상촬영 및 고부가가치 지반 정수 산정 분야의 특화 핵심과제 발굴, 파악된 다양한 응용 가능 분야별 애로사항 및 해결방향을 기반으로 핵심 연구개발, 고정밀 주요 지반 설계정수 산정을 위한 표준화 사업 등 촬영기술의 고도화 및 표준화와 함께 적용범위의 확대를 목표로 향후 연구 개발이 추진되어야 할 것으로 판단하고 있다.

참 고 문 헌

1. Desrues, J. Viggiani, G. and Besuelle, P. (2006) Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, Proceedings of GeoX2006 conference, ISTE.
2. Hodaka K. (2008) A 3-D calibration method for the micro-focused X-ray CT by image processing, Master Eng. Thesis, Hokkaido University at Sapporo, Japan.
3. 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
4. Mitsuhiro, Y. (2007) Fracture Patterns of Rock Induced by High-voltage Pulse Cruching, Master Eng. Thesis, Hokkaido University at Sapporo, Japan.
5. Otani, J and Obara, Y. (2003) X-ray CT for Geomaterials -soils, concrete and rocks, Proceedings of International Workshop on X-ray CT for Geomaterials, Balkema.
6. Otani, J. (2003) X-ray Computed Tomography for Geotechnical Engineering, Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, pp. 95-115.