

[기술보고]

미소 촛점 X선 CT를 이용한 암석 내 공극의 분포 및 공극률 분석

정교철^{1*} · Manabu Takahashi²

¹안동대학교 지구환경과학과

²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Japan

[Technical Report]

Analysis of Porosity and Distribution of Pores in Rocks by Micro Focus X-Ray CT

Gyo-Cheol Jeong^{1*} and Manabu Takahashi²

¹Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Korea

²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST), Japan

암석에서의 풍화 및 투수성은 방사성폐기물 지하동굴처분 및 암반구조물의 안정성 확보 및 장기적 관리측면에서 매우 중요한 역할을 한다. 이들 암석의 풍화 및 투수성은 암석의 내부구조 특성에 따라 크게 영향을 받는다. 즉 암석 내부의 공극, 미소 크랙 등의 양적 정도에 의해 풍화가 빨리 진행되기도 한다. 또한 암석 내부구조의 양적 평가는 그 암석의 풍화 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 수단이 되기도 한다. 따라서 암석의 내부구조를 3차원적으로 정확하게 파악한다는 것은 암반구조물의 장기적 관리 측면에서 매우 중요하다고 하겠다. 이 연구는 국내 신선한 화강암과 풍화된 화강암을 대상으로 X선 CT촬영을 실시하여 3차원적으로 공극의 분포를 분석하였다. 분석 결과는 암석 내부의 공극의 분포와 공극률을 잘 표현하고 있다.

주요어 : 미소 촛점 X선 CT, 공극의 분포, 공극률, 풍화, 투수성

Weathering and permeability in rocks play a very important role in underground disposal of radioactive waste and their long-term management as well as stability security of rock structures. Weathering and permeability of rocks are largely controlled by the characters of inner structures of rocks. In other words, weathering rate can be accelerated depending on the quantity of pore and microcrack in rocks. Quantitative evaluation of inner structures of rocks can serve as a tool that can assess the degree of weathering of rocks. Therefore it can be said that the understanding of three dimensional distribution of the inner structure of rocks is important for long-term management of rock structures. This study was performed to analyze three dimensional distribution of pore in rocks using Micro Focus X-ray CT on fresh granite and weathered granite from Korea. Results of the analysis clearly show distribution of pore and porosity of the inner rock.

Key words : Micro Focus X-ray CT, distribution of pore, porosity, weathering, permeability

서 언

암석의 역학적 특성과 관련한 풍화 및 수리학적 특성은 암석의 내부구조, 특히 공극 및 크랙 구조에 크게 의존한다. 암석의 내부구조를 비파괴로 정밀하게 파악하는 것이 가능하다면 적은 양의 코어로 물성 측정을 연속적으로 계속

할 수 있어 효과적으로 유용한 물성 측정이 가능하게 된다. 암석 등의 복합재료의 비파괴 내부구조 분석에 X선 CT를 이용하는 것과 보다 정확한 내부구조 관찰로 미소 촛점 X선 CT가 활용된 연구는 암석, 콘크리트 등의 내부구조를 관찰한 Otani and Obara (2003), 구속압하에서 암석의 내부구조를 분석한 Takahashi et al. (2002, 2004),

*Corresponding author: jeong@andong.ac.kr

지반재료에 비파괴 특징을 적용한 연구(Mees et al., 2003; Desrues et al., 2006) 등이 있다.

최근 방사성폐기물 지하동굴처분장, 도로/철도 터널 및 유류비축기지 등 암반구조물의 안정성 확보 및 장기적 관리측면에서 암석의 내부구조를 풍화 특성과 관련하여 3차원적으로 정확하게 파악하는 연구가 선진국에서는 매우 중요하게 연구되고 있다.

이 연구는 국내 신선화 화강암과 심하게 풍화된 화강암을 대상으로 X선 CT촬영을 실시하여 3차원적으로 내부구조를 분석하여 암반구조물의 관리 기준 및 고준위 방사성폐기물 처분을 위한 기초자료로서의 저투수성 분석을 위한 기초자료로써 풍화 및 풍화성 투수특성을 정량적으로 파악하는 것에 목적이 있다.

X선 CT장치 및 원리

X선 CT (Computerized Tomography)는 다양한 광도로 입사하여 투과시킨 X선의 강도를 측정하고, 시료내부의 X선 선흡수계수의 공간분포를 나타내는 화상을 계산기로 재구성하는 장치이다. 비파괴로 내부의 구조관찰이 가능하기 때문에 주로 의료 현장에서 사용되지만 퇴적물 및 암석 등의 지질매체에서의 사용도 최근 많아지고 있다 (Petrovic et al., 1982). 또한 최근 의료용 X선 CT를 이용하여 암석 및 다공질 매체의 투수현상을 해석하는 연구도 수행되고 있다.

X선은 고속도의 전자가 목표물에 부딪쳐 급격히 감속할 때 발생한다. 이 때 전자의 흐름(관전류)은 발생하는 X선의 강도에 비례하고 전자를 가속시키는 전압(관전압)은 X선의 파장에 관계한다. 관전압이 높을수록 X선의 파장은 짧아지고 물질에서의 투과능력은 커진다. 가속전압이 어느 임계치(가속전자의 충돌에 의해 내각전자가 방출될 때의 전압)보다 작을 경우 발생하는 X선은 넓은 파장을 갖는 연속 스펙트럼으로 나타난다. 이 X선 발생과정에 있어서 가속된 전자빔을 단속함에 의해 전자빔과 목표물의 충돌 범위가 좁아지게 된다. 이 좁은 충돌범위로부터 X선이 시료를 투과하여 검출기상에 투영될 때 넓은 충돌범위로부터 나오는 X선의 경우와 비교하여 이 X선의 포켓이 작다. 따라서 이 전자빔의 단속에 의해 보다 고해상도의 X선 화상을 얻을 수 있다. 이 점이 종래의 의료용 X선 CT장치와 크게 다른 점이다. 또한 물질을 투과한 후의 X선의 검출은 영상 증폭장치(Image Intensifier (II))가 사용된다. X선상의 해상도는 X선원과 시료 및 II와의 위치관계에도 의존한다. 시료를 X선원에 가까이하면 확대율(X선원

과 II의거리/X선원과 시료의 거리)을 크게 하면 X선상의 해상도도 증가한다.

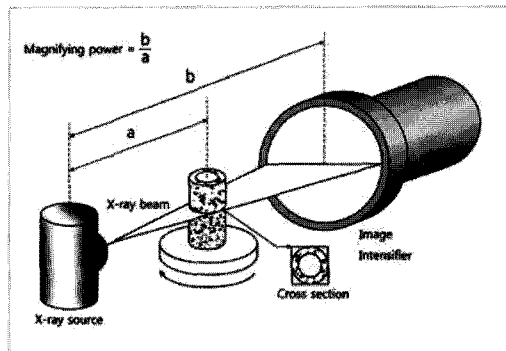
미소초점 X선 CT장치(microfocus X-ray CT system)의 기본적인 구성은 X선원, 피사체, II등이다. X선원으로부터 X선이 피사체에 조사되어 피사체를 투과한 X선상이 II에 접사되어 컴퓨터 처리에 의해 X선 CT상으로서 재구성된다. 또한 피사체는 높은 정밀도의 자동조정장치(manipulator)에서 회전하면서 각 단면에서의 X선상을 II에서 받아 II전면에 확대된 2차원 화상정보는 CCD카메라에서 12 bit/A/D 변환된다.

확대율은 X선원으로부터 피사체까지의 거리에 대한 X선원으로부터 II까지의 거리의 비로서 나타낸다(Fig. 1). 따라서 피사체를 X선원에 근접시킬수록 확대율은 증가한다.

이 연구에 사용된 미소 초점 X선 CT 장치는 HMX225이며, 촬영 원리는 Fig 1과 같다. 미소 초점 X선 CT 장치를 이용한 X선은 고속도의 전자를 금속 타겟에 부딪히면서 전자가 급격히 감속할 때 발생하는 X선을 이용한 장치이다. 이 때 전자를 가속시키는 전압을 관전압, 가속된 전자의 흐름을 관전류라 한다. 관전류를 높이면 발생하는 X선량은 증가하고, 관전압을 높이면 발생하는 X선의 파장은 짧게 되어 결과적으로 공시체에 대한 X선의 투과능력을 향상시키게 된다. 이번 연구에 이용된 미소 초점



(a) Photograph of Micro Focus X-ray CT System



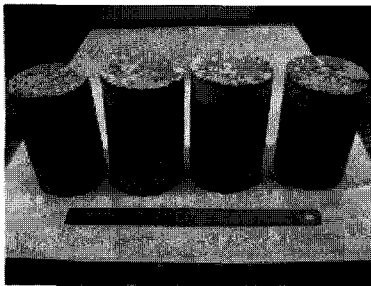
(b) photographic principle of Micro Focus X-ray CT

Fig. 1. Photograph and photographic principle of Micro Focus X-ray CT.

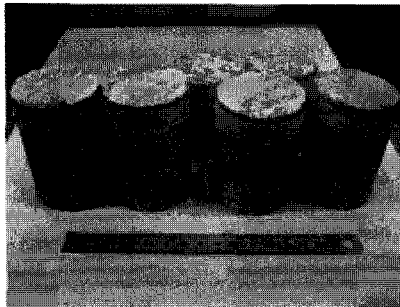
X선 CT 장치와 종래의 X선 CT 장치와의 차이점은 X선을 발생시키는 전자빔의 직경을 좁히는 기능이 장착되어 있다는 것이다. 전자빔의 직경을 좁혀 금속타겟의 X선 발생 영역을 한정하기 위해 미소 촛점 X선 CT 장치의 촛점 거리는 2~50 μm 로 극히 작다. 이와 비교하여 일반적인 X선 CT 장치의 촛점거리는 약 2 mm이다.

공시체 제작

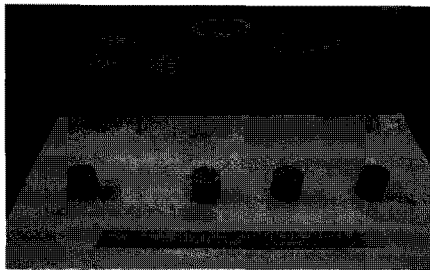
공시체는 ISRM 기준 NX코어의 국내 신선한 화강암(F)과 풍화된 화강암(HW)을 대상으로 직경 10 mm크기로 오버 코어링하여 사용하였다. Fig. 2의 (a)와 (b)는 시추 시



(a) core sample (Fresh, F)



(b) core sample (Highly weatgered, HW)



(c) Diameter 10 mm specimens

Fig. 2. Preparation of specimens.

채취된 NX 코어이고 (c)는 X선 CT촬영을 위해 직경 10 mm크기로 오버 코어링한 것이다.

분석 결과

Fig. 3은 신선한 화강암(F)과 풍화된 화강암(HW)의 X선 CT 영상과 내부구조 공극 및 크랙을 추출한 영상이다. 이 들 영상으로서 암석 내부 3차원적 공극 및 크랙의 분포, 크기 특성 및 연결성을 분석할 수 있다. 분석한 결과는 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다.

화강암 공시체에서의 유효공극의 크기 분포는 동일 암종에서 풍화정도에 따라 12 μm 에서 100 μm 까지 분포한다. 이 연구에서 사용한 화강암의 신선한 암(F)과 심하게 풍화된 암(HW)와 비교하면, 신선한 암에서의 유효공극의 크기 분포는 12 μm -70 μm 의 범위로써 가장 빈도가 높은 공극의 크기는 25 μm -35 μm 로 나타난다. 반면 심하게 풍화된 암에서는 유효공극의 크기 분포가 13 μm -100 μm 정도로, 그리고 가장 빈도가 높은 유효공극의 크기는 20 μm -30 μm 정도이지만 그 빈도의 차이는 3배 이상으로 나타난다. 이는 동일 암종에서 풍화의 정도에 따라 공극의 크기가 커지고 그 빈도도 증가함을 나타낸다.

또한 동일 암종에서 풍화에 정도에 따라 공극의 연결

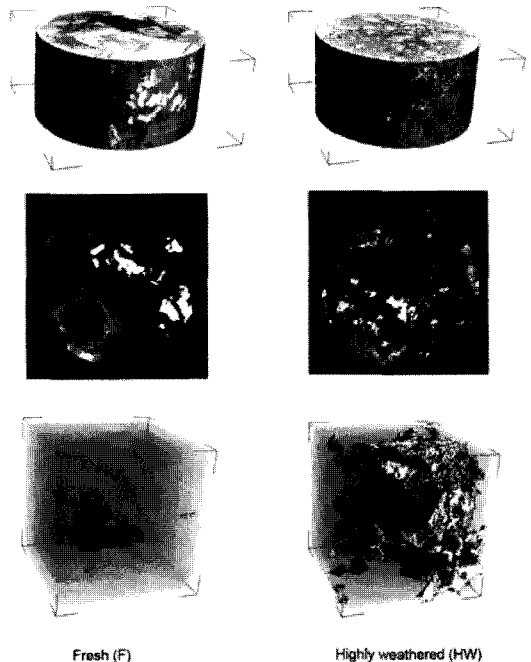


Fig. 3. Three dimensional image and distribution of pores by the Micro Focus X-ray CT.

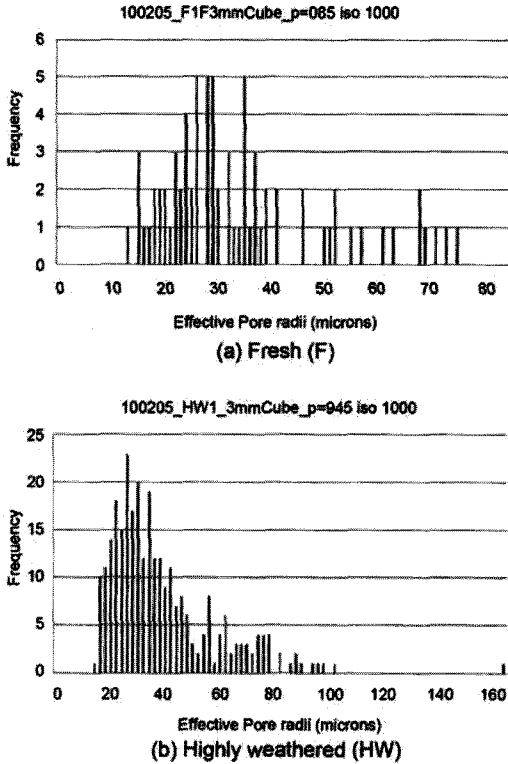


Fig. 4. Distribution of effective pore in rock specimens.

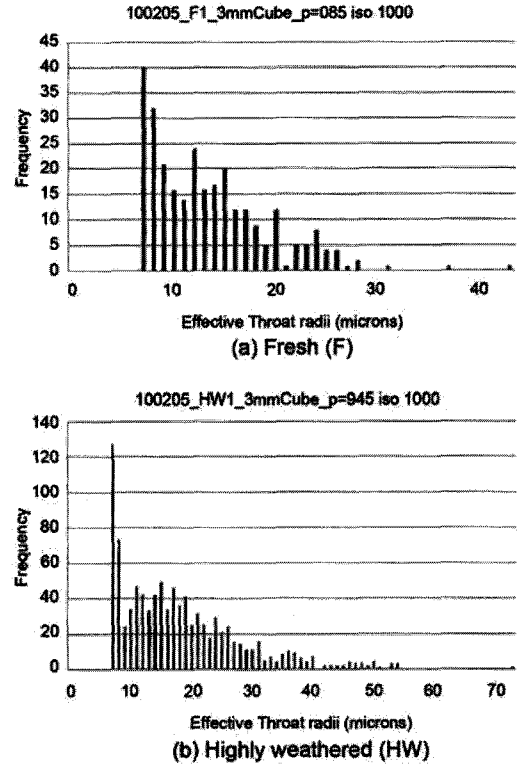


Fig. 5. Distribution of effective throat in rock specimens.

성도 크게 다르리라는 생각으로 공극과 공극을 연결하는 통로(throat)의 크기 및 빈도를 분석해 보았다. 이 통로의 크기 및 빈도는 결국 암반에서의 저투수성의 특성을 나타내는 것으로 생각할 수 있다. Fig 5는 신선한 암과 심하게 풍화된 암에서 각각의 다른 공극을 연결하는 통로의 크기 및 빈도를 분석한 그림이다. 신선한 암에서의 통로의 크기 분포는 6 μm ~27 μm 로, 대부분 10 μm 를 전후하여 크게 분포하지만, 심하게 풍화 받은 암에서는 최대 55 μm 로 최빈값은 15 μm ~20 μm 정도의 크기를 보여주고 있다. 이는 공극을 연결하는 통로도 풍화 정도에 따라 크게 증가하는 것을 보여주고 있다

지하수에 의한 핵종의 이동, 확산을 고려한 지하수 시나리오는 고준위방사성폐기물의 지층처분에 의해 가장 중요함과 동시에 예측 정밀도를 향상시키지 않으면 안되는 연구 중의 하나이다. 이를 위하여는 퇴적물, 암석층의 이행경로의 확인과 유동속도(투수계수, 확산계수, 저류계수 등)의 평가 등 2개의 축으로 연구개발을 촉진시킬 필요가 있다. 유동경로의 추정에 있어서는 퇴적물, 암석내의 간극구조의 가시화와 정량적 평가가 연구되고 있다. 여기에는 의료용

X선 CT장치 및 공촛점 레이저 현미경, 원자간력현미경이 주로 이용되어 왔다. 공촛점 레이저현미경과 원자간력현미경에서는 시료의 정형 및 형광수지의 혼입 등 전처리 등의 준비가 필요하지만, X선 CT장치에서는 전처리의 준비가 거의 필요없음과 동시에 비파괴로서 3차원 구조를 관찰하는 것이 가능하다. 다만 의료용의 X선 CT장치에서는 공간 분해능이 0.1 mm 정도이기 때문에 마이크로레벨에서는 관찰이 어렵다. 고해상도에서의 관찰은 거의 방사광을 이용하는 것으로 되어 있지만, 이 경우 고에너지 가속기라고 하는 특수한 장비가 필요하게 된다. 시료의 크기도 수 mm 정도로 제한된다. 그러나 최근 반도체칩 등의 공업부품의 비파괴 관찰을 위해서 미소촛점 X선 CT장치(microfocus X-ray CT system)를 개발하여 Fig 3과 같이 고해상도의 비파괴관찰 및 분석이 가능하게 되었다.

결 언

암석의 풍화 및 투수성은 암석의 내부구조, 즉 공극의 특성에 따라 크게 영향을 받는다. 따라서 암석의 내부구조

를 3차원적으로 정확하게 파악한다는 것은 암반구조물의 장기적 관리 면에서 매우 중요하다고 하겠다.

국내 신선한 화강암과 심하게 풍화된 화강암을 대상으로 X선 CT촬영을 실시하여 3차원적으로 내부구조를 촬영 및 분석하였다. 분석 결과는 암석 내부의 공극 및 크랙의 분포와 투수성을 분석할 수 있는 공극의 연결성을 정량적으로 잘 표현하고 있다.

이 연구는 방사성폐기물 지하동굴처분장, 도로/철도 터널 및 유류비축기지 등 암반구조물의 안정성 확보 및 장기적 관리 측면에서 관리기준 설정을 위한 풍화 및 풍화성 투수특성을 정량화 하는데 기초자료로 매우 중요하게 활용될 것이다.

사 사

이 연구는 2008년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-C00929).

참고문헌

- Desrues, J., Viggiani, G. and Besuelle, P., 2006, Advances in X-ray tomography for geomaterials, ISTE Ltd. 452p.
- Mees, F., Swennen, R., Van, G. M. and Jacobs, P., 2003, Application of X-ray computed tomography in the geosciences, The Geological Society, 243p.
- Otani, J. and Obara, Y., 2003, X-ray CT for Geomaterials, Soils, Concrete, Rocks. A.A. Balkema Publishers, Lisse. 343p.

Petrovic, A. M., Siebert, J. R., and Rieke, P. E., 1982, Soil bulk density analysis in three dimensions by computer tomography imaging, J. Petrol. Sci. Engin., 4, 155-168.

Takahashi, M., Lin, W., Hirono, T. and Yamamoto, Y., 2002, On visualization of inner microstructure in rocks by micro focus X-ray CT., Engineering Geology, Vol. 43, No. 4, 234-238.

Takahashi, M., Takemura, T. and Kato, M., 2004, Microscopic visualization in rocks under confining pressure by means of micro focus X-ray CT., Engineering Geology, Vol. 45, No. 4, 192-196.

2010년 12월 7일 원고접수, 2010년 12월 24일 게재승인

정교철

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-822-5467
E-mail: jeong@andong.ac.kr

Manabu Takahashi

National Institute of Advanced Industrial
Science and Technology(AIST), Japan
Tel: 029-861-3809
Fax: 029-861-3578
E-mail: takahashi-gonsuke@aist.go.jp