CLSM을 이용한 동결/융해 실험 후 화강암 시료의 표면 및 물성변화 분석

정종택^{1,2} · 최정해^{1*} · 채병곤¹ · 장보안²

¹한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ²강원대학교 지구물리학과

CLSM Analysis of Change in Roughness and Physical Properties of Granite after Freeze-Thaw Experiments

Jongtaek Jeong^{1,2}, Junghae Choi^{1*}, Byung-gon Chae¹, and Bo-an Jang²

¹Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Department of Geophysics, Kangwon National University

본 연구에서는 임기광산과 일광광산의 시료를 활용하여 동결/융해 실험을 진행하고 시료의 물성변화 및 표면 거칠기의 변화를 관찰하여 풍화양상을 분석하였다. 본 연구에서 사용된 동결/융해 실험의 온도 범위는 우리나라의 여름과 겨울철의 온도를 고려하여 -20°C ~ +40°C로 설정하고 각각 설정한 온도까지 도달하는데 각 1시간, 목표온도를 유지하는데 1시간으로 총 4시간을 1 주기(cycle)로 하여 매 20 주기마다 풍화양상을 관찰하였다. 그 결과 동결/융해 시험의 반복횟수가 증가하면서 시료의 측정된 물성 값 중 공극률(porosity)은 두 개의 지역에서 0.05%와 0.15%의 차이를 보이며 증가하였고, 입자의 부피와 건조질량, 포화질량은 비교적 미세하게 감소하는 경향을 보였다. 또한, 다초점 레이저 스캔 현미경을 통해서 측정된 선 거칠기와 면 거칠기 인자의 값들은 시간이 경과함에 있어 일정하게 증가 및 감소하는 경향을 보였으며, 다초점 레이저 스캔 현미경을 통해 촬영한 사진에서도 표면 거칠기가 변하는 것을 확인할 수 있었다.

주요어 :

Freeze-thaw experiments were conducted to evaluate changes in surface roughness and physical properties in samples of granite from Ilgwang and Imki mines, Korea. The temperature range in the experiments was -20°C to 40°C, based on typical summer and winter temperatures in Korea, and the surface was observed every 20 cycles. One cycle comprised 1 hour of heating or cooling of the samples and 1 hour during which the target temperature was maintained. With increasing repetitions of the freeze-thaw experiment, porosity increased by 0.05%-0.15% in the two samples and the dry weight increased, whereas the volume of the soil and saturation weight decreased. Observations by confocal laser scanning microscope (CLSM) revealed that line and surface roughness parameters showed a tendency to increase and decrease, respectively, with elapsed time. Changes in surface roughness were apparent on the CLSM images.

Key words : Freeze-thaw experiment, CLSM, Surface roughness

*Corresponding author: jhchoi@kigam.re.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 언

일반적으로 암석은 여러 가지 요인에 의해 자연 상태에서 풍화가 진행된다. 특히 이러한 풍화작용을 지배하는 요소로서 기후조건(온도 및 강우 등), 지질구조, 암석의 광물조성과 조직, 그리고 시간 등이 있다. 이러한 요인에 의해 풍화가 진행된 암석은 물리 화학적으로 특성변화를 일으켜 공학적으로 매우 불안정하게 된다. 특히 우리나라와 같이 여름과 겨울이 확연히 구분이 되는 기후에서는 온도변화 및 강우량 등이 다른 요인들에 비해 상대적으로 기후변화에 따른 풍화를 많이 진행시킬 수 있다. 본 연구에서는 이러한 국내의 기후조건을 고려하여 암석의 동결/융해에 따른 풍화진행 상황을 분석하기 위해서 동결/융해 실험을 실시하였다. 일반적으로 동결/융해에 의한 손상이 발생하기 위해서는 시료의 수분 포화도가 70%가 넘어야 하고, 동결 시 시료내부의 수분이 이동함에 따라 포화도가 높은 부분부터 파괴가 발생한다고 밝혀졌다(Chen et al., 2004).

지금까지 많은 연구자들에 의해 수행된 연구결과에 따르면 암석의 동결/융해에 따른 풍화현상 연구는 세 가지로 분류된다. 첫째는 동결/융해 시 균열 성장 특성을 시각적 분석을 통해 실시하는 연구이며, 이 연구의 결과는 균열의 성장은 단일 균열이 풍화 현상에 영향을 미치는 것이 아니라 기존 균열의 복합적인 성장과 더불어 암석의 강도 등이 함께 어우러져 풍화 현상을 유발한다고 알려져 있다(Nicholson and Nicholson, 2000). 둘째, 동결/융해를 반복함에 따라 암석의 물성(비중, 공극률, 흡수율, 탄성과 속도, 단축압축강도 등) 변화양상을 분석하는 연구이다. 대부분의 연구에서 동결/융해의 풍화 과정이 진행됨에 따라 공극률, 흡수율 등은 증가하고 강도, 경도, 탄성과 속도 등은 감소하는 경향을 보이고 있다(Park et al., 2003; Altindag et al., 2004; Jang et al., 2004; Mutlutrk et al., 2004; Yavuz et al., 2006; Liu et al., 2008; Takarli et al., 2008; Um and Shin, 2009; Kang et al., 2011; Tan et al., 2011; Yang, 2011; Yavuz, 2011). 이러한 동결/융해에 의한 손상이 발생하기 위해서는 시료의 수분 포화도가 70%가 넘어야 하고, 동결 시 시료내부의 수분이 이동함에 따라 포화도가 높은 부분부터 파괴가 발생한다고 밝혀졌다(Chen et al., 2004). 셋째로는 실험을 통해 물성변화 양상을 연구하고, 실험 결과를 이용하여 회귀식을 제안하는 연구이다(Altindag et al., 2004; Mutlutrk et al., 2004; Yavuz et al., 2006; Liu et al., 2008; Yavuz, 2011).

Fig. 1. Map of the study area.

본 연구에서는 반복된 동결/융해 현상으로 발생하는 암석시료에 대해서 기존의 연구들과 마찬가지로 암석의 물성변화를 측정하고 기존의 연구에서는 활용된 적이 없는 표면에 대한 선 및 면 거칠기 변화를 다초점 레이저 스캔 현미경(Confocal Laser Scanning Microscope, CLSM)을 통해서 분석하고 이를 토대로 암석의 표면 풍화양상을 수치학적으로 파악하는 연구를 수행하였다. 그 결과 풍화가 진행됨에 따른 선 거칠기의 특성을 나타내는 요소들의 일정한 변화를 관찰할 수 있으며 전체 지역에 대한 면 거칠기를 나타내는 요소에 대한 변화 또한 관찰할 수 있었다. 이를 토대로 동결/융해가 진행됨에 따라 암석 표면이 풍화작용을 일으키고 있다는 것을 인지할 수 있었다.

연구방법

암석 시료성형 및 물성 값 측정

부산에 위치한 임기광산과 일광광산 지역(Fig. 1)의 시료를 각각 8개씩 직경 20 mm의 원통형으로 길이는 직경의 약 2배 이상이 되도록 절단한 후 표면 연삭기(KSA500-HA, 유압반자동식)를 이용하여 상하면의 편평도 오차가 0.02 mm 이하가 되도록 연마하여 국제암반역학회(ISRM)에서 규정하는 조건으로 성형을 실시하였다(ISRM, 1981).

임기광산 지역은 백악기의 퇴적암이 소규모 분포하며 안산암 및 안산암질 응회암과 이들을 관입한 여러 종류의 심성암류들이 분포하고 하천과 골짜기 주변으로 제4기에 미고결층인 충적층으로 이루어져 있다. 일광광산 주위에 분포하는 암상은 백악기 경상누층군의 퇴적암과

Table 1. Initial physical properties of Imgi and Ilgwang areas.

Sample (Imgi)	Diameter (mm)	Length (mm)	Dry density (g/cm ³)	Porosity (%)	Sample (Ilgwang)	Diameter (mm)	Length (mm)	Dry density (g/cm ³)	Porosity (%)
IM-1	19.92	41.17	2.61	1.17	IL-1	19.84	42.24	2.60	1.46
IM-2	19.86	41.13	2.61	1.18	IL-2	19.66	42.79	2.63	1.39
IM-4	19.88	41.17	2.60	1.33	IL-3	19.83	42.21	2.62	1.30
IM-5	19.91	41.14	2.61	1.25	IL-4	19.75	41.89	2.63	1.25
IM-6	19.92	41.26	2.61	1.24	IL-6	19.82	41.74	2.61	1.40
IM-7	19.84	41.37	2.61	1.10	IL-7	19.86	42.06	2.62	1.23
IM-8	19.91	42.04	2.61	1.37	IL-8	19.79	42.80	2.63	1.29
IM-9	19.89	42.20	2.60	1.14	IL-10	19.76	42.84	2.63	1.22
Average	19.89	41.43	2.61	1.22	Average	19.79	42.32	2.62	1.32

Fig. 2. Preparation of fully saturated samples (left) and dried samples (right).

이 퇴적층을 관입한 불국사화강암류인 화강암으로 구성 되어 있으며 하천과 골짜기 주변으로 제4기에 미고결층 인 충적층으로 이루어져 있다.

준비된 시료는 버니어캘리퍼스를 이용하여 직경과 길이를 1/100 mm까지 측정하여 부피를 계산한 후 1/100 g의 정밀도를 가진 전자저울로 건조질량과 포화질량을 각각 측정하였다. 동결/융해 실험을 진행하며 실험이 진행되는 동안 매 주기(20cycle)마다 모든 시료에 대한 물성 값을 측정하였다(Fig. 2). 실험이 진행되기 전 초기에 측정된 암석의 물성 값은 아래 Table 1과 같다.

두 지역시료의 평균 초기 물성 값은 임기광산 지역 시료의 경우 건조밀도 2.61 g/cm³, 공극률 1.22%, 입자의 부피 12.72 cm³이고, 일광광산 지역 시료는 건조밀도 2.62 g/cm³, 공극률 1.32%, 입자의 부피 12.84 cm³이다. 두 지역의 시료모두 거의 차이가 없으면 물성 값에서 알 수 있듯이 매우 치밀한 상태의 신선한 암석임을 알 수 있다.

동결/융해 실험

동결/융해 실험은 암석의 균열이나 공극속의 물이 동

결되고 융해되면서 발생하는 응력의 변화에 의해서 암석이 풍화되는 현상을 관찰 할 수 있는 실험이다. 따라서 본 실험을 실시할 때는 암석시료가 물로 완전히 포화되어 있어야 효과적인 실험이 진행될 수 있다. 이는 공극이나 균열 내에 물이 충분하지 않을 경우 동결/융해에 의한 효과를 볼 수 없기 때문에 정확한 실험이 진행 되지 않을 수 도 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 차단하기 위해서 시료를 데시케이터를 활용하여 완전히 포화시켰다. 먼저 데시케이터 안에 증류수를 채운 후 시료들이 완전히 포화될 수 있도록 진공상태를 만들어 72시간 동안 유지하고 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 시료는 매 주기(20 cycle)가 끝나고 다시 실험이 진행될 때 반드시 시료를 72시간 동안 완전히 포화시킨 다음 실험을 수행하였다. 동결/융해 실험에 적용된 온도는 우리나라의 여름철과 겨울철 기온을 고려하여 -20°C ~ +40°C로 설정하고 VISION사의 VS-9111H-0를 사용하여 동결/융해 실험을 실시하였다. 본 연구에 사용된 동결/융해 실험 장치는 1~100개의 온도상승 및 하강, 온도 유지형태를 임의로 설정할 수 있고, 온도는 -100~200°C 범위 내에서 설정이 가능하다. 설정된 패턴

Fig. 3. Freeze-thaw apparatus (top) and cycle setting pattern (bottom).

주기는 총 999주기 까지 설정이 가능하다. 동결/융해 실험은 완전건조-완전포화-동결-융해의 순서로 실시하였다. 동결/융해 주기는 Fig. 3와 같다. 1시간 동안 -20°C 까지 온도를 낮춘 후 1시간동안 -20°C 를 유지시켜주고, 다시 1시간동안 40°C 까지 올린 후 1시간 유지하는 것을 한 주기로 설정하였다. 시료의 직경이 20 mm로 상대적으로 작은 직경이기 때문에 1시간 동안에 충분히 내부까지 가열되고, 냉각된다는 가정 하에 실험을 실시하였다. 20, 40, 60, 80 그리고 100 주기를 설정하여 동결/융해가 진행됨에 따라 각 주기 별로 시료 물성 값의 변화를 측정하였다.

다초점 레이저 스캔 현미경(Confocal Laser Scanning Microscope, CLSM) 분석

본 CLSM 시스템은 일본 올림푸사에서 제작한 OLS4000 모델로써 일반 현미경에서는 구현이 불가능한 108배~17,280배의 고배율의 측정이 가능하다. 이러한 분해능은 현재 시판되고 있는 레이저 현미경 가운데 가장 높은 분해능이며, 선명한 3차원 영상구현이 가능하다. 또한 면에 직접 접촉하지 않는 비접촉 거칠기(roughness)를 측정할 수 있는 기능을 포함하고 있다. OLS4000은 매

Fig. 4. Schematic diagram of the CLSM.

우 짧은 파장의 405 nm의 레이저와 듀얼 컨포컬을 채택 함으로써 매우 선명한 이미지 구현이 가능하다(Fig. 4).

일반적으로 현미경에서 고배율 관찰을 할 경우, 초점 심도가 낮아서 초점이 맞더라도 원하는 이미지를 취득하기 힘든 경우가 많다. 그러나 다초점 레이저 스캔 현미경을 사용하면 기존과는 차원이 다른 3차원 영상을 손쉽게 취득할 수 있다. 또한 기존의 다초점 레이저 스캔 현미경에서 불가능하였던 넓은 영역의 조도 측정을 실현하였으며, 곡면과 좁은 영역은 물론, 최대 100 mm의 긴 길이의 조도에 대한 측정을 실시할 수 있다. 그리고 일반적인 접촉식 조도계의 경우 탐침(stylus)의 직경이 $2\mu\text{m}$ 로서 그 이하의 미세한 관찰은 사실상 힘들다. 그러나 OLS4000의 경우 스팟(spot) 크기는 매우 작은 $0.2\mu\text{m}$ 의 폭을 가지고 있어 매우 정밀한 조도측정이 가능하다.

본 연구에서는 임기광산 지역과 일광광산 지역에서 총 16개의 샘플을 준비하고 각 지역의 샘플 1개씩을 지정해 주기별로 선 및 표면 거칠기를 측정하였다. 직경 약 20 mm의 샘플 표면 모두를 스티칭 기능을 사용하여 9×9 의 범위로 나누어 촬영하여 총 81장을 찍어 각각을 선명하게 붙여 디지털 자료를 획득하였다. CLSM을 이용하여 측정된 자료를 통해 임의의 10개 지점에 대한 평균 거칠기(R_{zjs}), 평균 길이(R_{sm}), 최대 정상부 거리(R_p), 최대 계곡부 거리(R_v)에 대한 정보 획득으로 선 거칠기 변화를 분석하였고 면 거칠기의 분석을 위해서

Fig. 5. Change in physical properties after the freeze-thaw experiment.

첨도 (Kurtosis, S_{ku}), 수치학적 평균 높이 (S_a), 줄어드는 정상부(peak part)와 중심부(core part) 사이를 구분하기 위한 가압부분의 비(SMr_1), 줄어든 계곡부(valley part)와 중심부 사이를 구분하기 위한 가압부분의 비(SMr_2)를 분석하여 실험이 진행되는 동안의 면 거칠기에 대한 분석을 실시하였다. 자세한 인자에 대한 설명은 분석결과에서 언급하도록 하겠다.

분석 결과

물성변화

포화된 암석시료의 동결/융해가 반복됨으로 암석 내

에서는 물리적 풍화가 진행된다. 본 연구에서의 실험주기는 약 80시간에 걸쳐 20주기에 대한 실험을 실시하고 실험이 진행된 이후 72시간 포화 및 72시간 건조과정을 거쳐 암석의 물성 값을 측정하였다. 기본적으로 암석의 물성 값 가운데 건조질량, 포화질량, 공극률, 밀도, 입자의 부피를 각각 측정하였다. 모든 실험은 ISRM의 암석 실험에 대한 규정을 따라 실시하였으며(ISRM, 1981) 각 물성 값들의 변화에 대한 결과 값은 Fig. 5와 같다.

위의 결과에 따르면 매 20주기 이후 측정된 시료의 물성 값들이 미세하게 변화한다는 것을 알 수 있다. 특히 공극률의 경우 동결/융해 실험이 진행됨에 따라 미세하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 일광 광산지역의

Fig. 6. Cross-sectional line used in the line roughness analysis.

Fig. 7. Area used in the surface roughness analysis (yellow region, 8.52 × 8.52 mm).

$$R_{ijs} = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 (Z_{pj} + Z_{vj})$$

$$R_{sm}$$

$$R_p$$

$$R_v$$

Fig. 8. Schematic meaning of the line roughness factors.

샘플의 경우 초기 값과 최종 값의 차이는 0.05%의 차이를 보이고 입기 광산지역의 샘플의 경우 초기 값과 최종 값의 차이는 0.15%의 차이를 보였다. 이는 실험이 진행됨에 따라 각 암석 샘플이 동결/융해의 결과로 풍

화가 가속되었다는 것을 의미하며 비록 미세한 차이를 보이고 있으나 이는 풍화가속의 영향에 의한 차이라는 것은 명백하다. 또한, 입자 부피는 실험이 진행되는 동안 미세하게 감소하고 건조단위 질량은 초기 값과 최종

Fig. 9. Schematic meaning of the surface roughness factors.

값의 변화가 실험이 진행되는 동안 매우 미세하게 증가한다는 것을 확인하였다.

CLSM분석

CLSM을 활용하여 시료의 표면을 촬영하게 되면 시료의 표면에 대한 정확한 디지털 자료를 확보할 수 있다. 이를 활용하여 분석면의 선 거칠기에 대한 분석(Fig. 6)과 면 거칠기에 대한 분석(Fig. 7)을 실시하였다.

선 거칠기에 대한 인자로는 Fig. 8에서 보듯이 평균 거칠기(Rzjs), 최대 정상부 거리(Rp), 최대 계곡부 거리(Rv), 평균 길이(Rsm)의 값이 존재한다. 그리고 면 거칠기로는 그림 Fig. 9에서 나타나있듯이 첨도(Kurtosis, Sku), 수치학적 평균 높이(Sa), 줄어드는 정상부(reduced peak part)와 중심부(core part) 사이를 구분하기 위한 가압부분(load part)의 비(SMr1), 줄어드는 계곡부(reduced valley part)와 중심부 사이를 구분하기 위한 가압부분의 비(SMr2)의 인자를 분석하였다.

위에서 설명한 선 및 면의 거칠기 인자를 주기별로 동일한 시료에 대해서 6개의 선과 하나의 면에 대해 계산한 결과는 Fig. 10과 Fig. 11에 나타나있다. 결과에서 알 수 있듯이 선 거칠기 인자에 있어서는 시간이 경과함에 따라 Rp, Rv, Rzjs의 값은 감소하는 경향을 보이고 이와 반대로 Rsm의 값을 시간이 경과함에 따라 증

Fig. 10. Change in line roughness factors according to elapsed time (top, Imki sample; bottom, Ilgwang sample).

가하는 경향을 보인다. 이는 동결/융해 실험이 진행되는 동안 거칠기의 정도는 시간이 경과함에 따라 약해지는

Fig. 11. Change in surface roughness factors according to elapsed time.

것을 알 수 있으며 거칠기를 의미하는 파장간의 거리는 시간이 경과함에 따라 증가한다는 사실을 보여준다. 풍화가 진행됨에 따라 표면이 풍화를 받는다는 사실을 잘 설명하고 있다. 다시 말해 동결/융해 실험이 진행되는 동안 표면의 가장 높은 정상부(peak part)는 풍화의 영향으로 인해 융해 현상 또는 어떤 물리적인 현상에 의해서 낮아지고 계곡부(valley part)는 높은 부분에서 융해된 물질 혹은 물리적인 요인에 의해서 떨어져 나온

입자들이 채워짐으로 인해서 깊이가 감소한다는 사실을 보여준다. 그리고 풍화에 의해서 표면의 입자들이 융해되거나 떨어져 나와 파장의 폭은 넓어진다는 것을 알 수 있다.

먼 거칠기에 있어서는 시간이 경과함에 따라 선 거칠기 인자와 마찬가지로 평균 정상부의 높이를 나타내는 Sa값은 낮아진다는 것을 알 수 있다. 그리고 첨도를 나타내는 Sku값은 시간이 경과함에 따라서 낮아진다는 것

Fig. 12. CLSM image showing surface deformation of the sample after the freeze-thaw experiment (top, Imki sample; bottom, Ilgwang sample).

을 알 수 있다. 이는 시간이 경과됨에 따라 정상부의 표면이 융해 또는 어떤 물리적인 현상에 의해 등글게 바뀌고 있다는 것을 의미하고 이는 선 거칠기에 있어 파장의 폭이 넓어지는 것과 같은 결과를 할 수 있다. 또한 정상부의 10% 이내에 존재하는 감소된 정상부(reduced peak part)의 값은 시간이 경과됨에 따라 낮아지는 경향을 보인다. 이는 Fig. 9에서 알 수 있듯이 전체의 10% 이내의 정상부가 시간이 경과됨에 따라 풍화작용에 의해 낮아진다는 것을 의미한다. 10% 이내에 존재하는 감소된 계곡부의 값은 시간이 경과됨에 따라 정상부에서 흘러들어온 물질로 인해 값은 증가한다는 것을 알 수 있다. 즉 다시 말해 시간이 경과됨에 따라 Fig. 9에서 설명한 SMr1과 SMr2 값은 중심부를 향해서 줄어들게 된다. 따라서 SMr1의 값은 시간이 경과됨에 따라서 줄어들게 되고 SMr2의 값은 시간이 경과됨에 따라서 커지게 되는 경향을 보이게 된다. 이는 암석 표면이 풍화작용으로 인해서 면에 대한 거칠기의 변화를 보이고 있다는 것을 의미한다.

Fig. 12은 실험의 초기조건의 표면 상태에 대한 CLSM 사진과 실험이 종료된 이후의 CLSM 사진을 보여준다. 사진의 위쪽은 임기광산 시료의 사진이고 아래쪽은 일광광산 시료의 사진이다. 좌측은 모두 실험 초기의 표면 사진을 나타내고 있으며, 우측은 100 cycle이 지난 후의 시료표면의 사진이다. 이 사진에서 알 수 있듯이 원내의 부분에서 좌측 초기상태의 조건과 실험이 종료된 이후에 원 안의 표면 거칠기가 더 완만하고 낮아진 것을 확인 할 수 있다. 이는 동결융해가 반복됨에 따라서 표면의 변화가 관찰되는 것으로 생각되며 시료의 전체적인 면에 걸쳐서 나타나고 있다.

결론 및 고찰

본 연구는 임기광산과 일광광산에 분포하는 시료를 활용하여 동결/융해실험을 실시하였다. 동결온도는 -20°C 이고 융해온도는 40°C 로 설정하여 실험을 100 cycle 동안 실시하였다. 이는 우리나라의 기후조건에 맞는 온도

를 설정하여 현장에서의 동결/융해에 따른 풍화현상을 관찰하기 위함이다. 본 실험에서 사용된 분석 방법은 기본적인 암석의 물성 값을 실험전/후에 측정하고 시료에 대한 표면의 거칠기 변화를 관찰하기 위해서 CLSM을 활용하여 전체면적에 대한 거칠기 변화를 관찰하였다. 본 연구내용에 대한 결과로부터 실험전/후에 대한 물성 값의 변화는 큰 변화를 보이고 있지 않으나 공극률의 경우 실험이 진행됨에 따라 미세하게 증가하는 경향을 보인다. 일광 광산지역 경우 초기 값과 최종 값의 차이는 0.05%의 차이를 보이고 임기 광산지역의 경우 0.15%의 차이를 보인다. 이는 실험이 진행됨에 따라 각 암석 샘플이 동결/융해의 결과로 풍화가 가속되었다는 것을 의미하며 비록 미세한 차이를 보이고 있으나 물성 값의 변화를 보이고 있다. 또한 미세한 변화이지만 입자 부피와 건조단위 질량은 실험이 진행되는 동안 감소한다는 것을 확인하였다.

각 단계별 시료에 대해서 표면의 거칠기를 확인하기 위해 CLSM 분석을 실시하였다. 거칠기의 변화는 선 및 면 거칠기를 모두 촬영하였으며, 선 거칠기에 대한 측정 은 표면에 대해서 가로방향 3개와 세로방향 3개의 단면 (cross section)에 대해서 분석을 실시하였다. 이를 통해서 선 거칠기를 나타내는 요소의 변화를 분석하였다. 또한 약 8.52 mm × 8.52 mm의 면적에 대해서 단계별 면 거칠기의 변화를 관찰하고, 6개의 구간을 설정하여 선 거칠기에 대한 시간에 따른 변화양상을 분석 실시하였다. 그 결과 선 거칠기에 대한 인자가운데 정상부와 계곡부의 깊이에 대한 인자는 시간이 지남에 따라 값이 줄어드는 경향을 보였고, 파장의 넓이에 대한 인자 값은 시간이 지남에 따라 커지는 것을 알 수 있다. 이는 시간이 지남에 따라 표면의 거칠기가 줄어드는 경향을 보이고 파장의 간격은 넓어진다는 것을 의미한다. 즉 다시 말해 동결/융해 실험에 의해서 표면의 물리적인 변화가 나타난다는 것을 확인 할 수 있었다. 면 거칠기 인자에서도 시간이 경과함에 따라 선 거칠기 인자와 마찬가지로 평균 정상부의 높이를 나타내는 Sa값과 첨도를 나타내는 Sku값은 시간이 경과함에 따라서 낮아진다는 것을 알 수 있다. 이는 시간이 경과됨에 따라 정상부의 표면이 융해되어 둥글게 바뀌고 있다는 것을 의미하고 이는 선 거칠기에 있어 파장의 폭이 넓어지는 것과 같은 결과라 할 수 있다. 또한 정상부의 10% 이내에 존재하는 감소된 정상부의 값은 시간이 경과됨에 따라 낮아지는 경향을 보인다. 10% 이내에 존재하는 감소된 계곡부의 값은 시간이 경과됨에 따라 정상부에서 흘러들어온 물

질로 인해 값은 증가한다는 것을 확인하였다. 이는 암석 표면이 동결/융해작용으로 인해서 풍화가 급속하게 진행 되고 선과 면에 대한 거칠기의 변화를 나타내고 있는 것으로 분석된다. 본 연구에서는 물리적인 분석만을 실시하였으며 화학적인 풍화의 양상을 분석하지는 못했다. 그러나 현재 계획 중인 차기연구에서는 암석의 분말을 활용하여 실험이 진행되는 동안의 화학적 풍화현상과 원 주형 시료를 통한 암석의 물리적 풍화양상을 모두 측정 할 계획에 있다. 이를 활용한다면 동결/융해에 따른 암석의 풍화에 대한 영향을 보다 정확하게 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 “광산개발에 따른 지질환경재해 확산 제어기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Altindag, R., Alyildiz, I. S., and Onargan, T., 2004, Mechanical property degradation of ignimbrite subjected to recurrent freeze-thaw cycles, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41(6), 1023-1028.
- Chen, T. C., Yeung, M. R., and Mori, N., 2004, Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action, *Cold Regions Science and Technology*, 38(2-3), 127-136.
- ISRM, 1981, Rock characterization testing & monitoring (ISRM suggested method), Brown, E. T., ed., Pergamon Press, 211p.
- Jang, H. S., Jang, B. A., and Lee, J. S., 2004, Variations of engineering geological characteristics of the cretaceous shale from the pungam sedimentary basin in Kangwon-do due to freezing-thawing, *The Journal of Engineering Geology*, 14(4), 401-416. (In Korean with English abstract)
- Kang, S. S., Kim, J. T., Obara, Y., and Hirata, A., 2011, Estimation of weathering characteristics of sandstone and andesite by freeze-thaw test, *Tunnel & Underground Space (Journal of Korean Society for Rock Mechanics)*, 21(2), 145-150. (In Korean with English abstract)
- Liu, Q. S., Xu, G. M., and Liu, X. Y., 2008, Experimental and theoretical study on freeze-thawing damage propagation of saturated rocks, *International Journal of Modern Physics B*, 22, 1853-1858.
- Mutlutürk, M., Altindag, R., and Türk, G., 2004, A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling, *International Journal of Rock*

- Mechanics & Mining Sciences, 41(2), 237-244.
- Nicholson, D. T. and Nicholson, F. H., 2000, Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering, *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(12), 1295-1307.
- Park, Y. J., You, K. H., Yang, K. Y., Woo, I., Park C., and Song, W. K., 2003, Weathering characteristics of granite by freeze-thaw cyclic test, *Tunnel & Underground Space (Journal of Korean Society for Rock Mechanics)*, 13(3), 215-224. (In Korean with English abstract)
- Takarli, M., Prince, W., and Siddique, R., 2008, Damage in granite under heating/cooling cycles and water freeze-thaw condition, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 45(7), 1164-1175.
- Tan, X. J., Chen, W. Z., Yang, J. P., and Cao, J. J., 2011, Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles, *Cold Regions Science and Technology*, 68(3), 130-138.
- Um, J. G. and Shin M. K., 2009, Variations of physico-mechanical properties of the cretaceous mudstone in Haman, Gyeongnam due to freeze-thaw weathering, *Tunnel & Underground Space (Journal of Korean Society for Rock Mechanics)*, 19(2), 146-157. (In Korean with English abstract)
- Yang, J. H., 2011, The effect of a freeze-thaw cycle on rock weathering: laboratory experiments, *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 18(3), 21-36. (In Korean with English abstract)
- Yavuz, H., Altindag, R., Sarac, S., Ugur, I., and Sengun, N., 2006, Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43(5), 767-775.
- Yavuz, H., 2011, Effect of freeze-thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70(2), 187-192.

정종택

한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지질재해연구실
대전광역시 유성구 가정동 과학로 124
Tel : 042-868-3944
E-mail : newestjeong@nate.com

최정해

한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지질재해연구실
대전광역시 유성구 가정동 과학로 124
Tel : 042-868-3944
E-mail : jhchoi@kigam.re.kr

채병곤

한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지질재해연구실
대전광역시 유성구 가정동 과학로 124
Tel : 042-868-3052
E-mail : bgchae@kigam.re.kr

장보안

강원대학교 지구물리학과
200-701 강원도 춘천시 효자동 192
Tel : 033-250-8583
E-mail : bajang@kangwon.ac.kr

원고접수일 : 2013년 8월 23일

수정본채택 : 2013년 9월 10일

게재확정일 : 2013년 9월 13일