토노(Tono) 화강암의 변형 및 파괴거동에 관한 실험적 연구

최정해* · 채병곤

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Experimental Study on the Deformation and Failure Behavior of Tono Granite

Junghae Choi* and Byung-gon Chae

Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

본 연구에서는 응력완화실험을 통한 포화상태에서의 토노(Tono) 화강암의 표면변형에 대한 연구를 수행하였다. 본 실험을 위해서 실험이 진행되는 동안 실시간으로 다초점 레이저 스캔 현미경(Confocal Laser Scanning Microscope, CLSM)으로 관찰이 가능하고 변위 및 응력에 대한 데이터 취득이 가능한 장치를 고안하였다. 광물내의 변형 및 광물경계부에서의 변형은 유한요소해석 방법을 사용하여 계산하였다. 그 결과 응력완화실험 중에는 광물 내부와 광물 경계부 모두에서 활발한 변형을 보이는 것이 관찰되었으며 이는 가해지는 응력이 높아질수록 더욱 커진다는 사실을 확인하였다. 또한 유한요소 해석의 결과는 광물내의 변화보다는 압축력에 의해서 발생하는 광물경계부에서의 변화가 더욱 크다는 것을 설명한다. 이를 도식화시켜 표현해보면 화강암 내부에서 광물 경계부의 변형이 광물 내부의 변형보다 크게 나타난다는 것을 쉽게 관찰 할 수 있다. 이는 흑운모와 석영의 물리화학적 특성에 기인된다고 사료된다. 즉 석영은 안정된 구체를 보이는 반면에 흑운모는 층상형태로 약한 결합구조를 보이고 있기 때문으로 판단된다.

주요어 : CLSM, 광물내 변형, 광물 경계부 변형, 응력완화실험

The nature of surface deformation of Tono granite was investigated using a confocal laser scanning microscope (CLSM) under water-saturated stress relaxation conditions. A new apparatus was developed for this experiment, enabling continuous measurements of stress-strain and simultaneous observations of surface deformation by CLSM. The amounts of grain contact deformation and intra-granular surface deformation were calculated using a finite element method. The results reveal that intense grain contact deformation and intra-granular surface deformation occurred during the period of stress relaxation, and that the intensity of this deformation increased with increasing applied stress. Finite element method (FEM) results show that the strain of grain boundary was greater than strain of inter-granular surface. Contour maps of these local strains were compiled for individual grains and their boundaries, revealing intense deformation at the boundaries between biotite and quartz under compressional stress. This result was a consequence of the mechano-chemical effect of biotite and quartz minerals. Biotite in granite has a layered structure of iron-magnesium-aluminum silicate sheets that are weakly bonded together by layers of potassium ions. In contrast, quartz occurs as stable spherical grains.

Key words : CLSM, intra-granular surface deformation, contact boundary deformation, relaxation test

서 언

고준위 방사성폐기물 처분 및 CO₂ 지중저장과 관련된 시설물은 일반적으로 지표보다는 장기적인 지각 응

기 및 해수면 변화를 고려하여 지하 심부에 위치하게 되며 오랜 기간 동안 안정성을 유지해야만 한다. 이러한 관점에서 최근에는 심부에 위치한 암반의 초 장기간에 걸친 거동을 분석하는 것이 매우 중요한 일로 인식되어

*Corresponding author: jhchoi@kigam.re.kr

지고 있다(Passchier and Trouw, 1996). 일반적으로 암반을 구성하는 암석은 일정한 압축응력 하에 놓일 경우 크립(creep)변형을 발생시키고 반면에 일정한 변위 하에서는 응력 완화현상(relaxation)을 보여주는 것으로 잘 알려져 있다(Seo, 1999; Seo et al., 1999). 이러한 크립변형과 응력완화현상은 시간의존적 변형현상이며 이러한 시간의존적 변형에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해서 거시적 관점의 변형 및 파괴현상을 기록하고 분석하는 연구가 수행되었다(서용석, 2000; Balke and Hosson, 2001; Brinck et al., 2001; Vinogradove et al., 2001; Man et al., 2002; Chandrasekaran and Nygard, 2003). 그러나 최근에는 광학현미경을 비롯한 다양한 용도의 현미경 개발 및 발달로 인해서 물질의 변형 혹은 파괴거동을 미시적인 관점에서 가시화 시키는 것이 가능해져 새로운 방식의 연구방법이 제시되고 있다. 이러한 다양한 연구방법 가운데 본 연구에서는 다초점 레이저 스캔 현미경(Confocal laser scanning microscope, CLSM)을 활용하여 암석시료의 장기간에 걸친 변형을 관찰하고 이를 활용하여 암석의 파괴거동에 대한 새로운 분석 및 해석 방법을 제시하였다. 본 연구에서 활용된 CLSM은 암석표면의 2차원적 표면 거동뿐만 아니라 3차원적 거동에 있어서의 분석이 가능하고 시료 표면의 수치 정보를 획득함으로써 매우 다양한 분석을 실시할 수 있다(Fredrich, 1999; Choi et al., 2008). 예를 들면, 암석 시료 표면의 거칠기를 마이크로(μm) 단위까지 분해하여 표시할 수 있으며 모든 위치의 프로파일 정보를 제공하고 3차원 표면 영상을 제시 해 줄 수 있다. 이러한 수치 정보는 시료 표면의 변화를 관찰하고 분석 및 해석하는데 있어서 정량적인 접근이 가능하다. 또한 시료를 관찰하는 과정에서 얻게 되는 디지털 사진은 크기에 따른 화소(pixel)정보를 보유하고 있어 그래픽 툴을 사용하여 각 지점에 대한 화소 좌표를 손쉽게 얻을 수 있다.

본 연구에서는 CLSM을 활용하여 얻은 수치 정보 및 사진에 대한 화소 좌표 데이터를 그래픽 프로그램을 이용하여 각 화소에 대한 좌표 정보를 얻고 이 좌표를 입력인자로 하는 유한요소해석법(Finite Element Method, FEM)의 을 이용하여 좌표에 대한 변화량을 계산하였다. 이렇게 계산된 좌표의 변화에 대한 정보를 활용하여 시료위의 각 절점(node)의 변위를 계산하였다. 각 절점에 대해 계산된 변위는 시간이 경과됨에 따른 변위의 량을 계산하고 이를 바탕으로 시료의 변화에 영향을 주는 변위의 크기 및 주응력에 대한 분석을 실시하였다.

Fig. 1. Location of samples (base map from Google maps).

실험 재료 및 실험 방법

암석 시료

본 연구에서 사용된 암석시료는 일본의 중부지방에 위치한 토노(Tono) 지역의 암석 시료로써 미즈나미(Mizunami) 시에 건설되고 있는 심지층처분연구시설의 부지에서 확보된 Tono 화강암 시료이다. 실험에 사용된 시료는 현장의 심도 155.0 m-155.12 m에 존재하는 A2 시료와 심도 663.88 m-664 m에 존재하는 A1 시료 두 가지를 활용하여 실험을 진행하였다. 시료 채취위치와 시료성형에 대한 설명은 Fig. 1~3에 나타나 있다. 각 시료의 크기는 가로 40 mm, 폭 20 mm, 높이 5 mm로 제작을 하였으며 천공에서 나온 원주형 시료(직경 80 mm)를 사각기둥 모양으로 성형하고 이를 다시 실험에 사용될 판형의 시료로 성형을 하였다. 압축이 가해지는 양쪽면의 편평도는 1/1000의 정밀도를 가지고 있으며 관찰면은 레이저 현미경 관찰이 용이하게 하기위해서 정밀한 연마 과정을 거쳤다. 실험이 진행되는 동안 암석시료의 변위를 관찰하고 측정하기 위해서 시료의 선단부에 가압 방향의 수직 방향 및 수평 방향으로 스트레인게이지(strain gauge)를 부착하여 표면의 관찰에 방해가 되지 않으면서 실험중의 시료에 대한 변위를 측정할 수 있도록 하였다.

Confocal Laser Scanning Microscope (CLSM)

시료의 표면변화를 관찰하기 위한 다초점 레이저 스캔 현미경(CLSM)은 일본의 올림푸사에서 제작한

Fig. 2. Schematic figures and photographs of the specimen.

Fig. 3. Schematic figure of the specimen and observation area.

OLS1000 모델로서 Ar 레이저를 활용한 레이저 현미경이다. OLS1000은 핀홀이 장착되어 있어 핀홀의 위치를 조절하면서 초점을 맞추도록 설계되어 있다. 따라서 높이에 따른 각각의 화상정보를 취득하고 이를 취합된 각각의 영상을 하나의 화면에 3차원으로 표현하는 것이 가능한 다초점 레이저 스캔 현미경이다. 이 현미경

은 매우 파장이 짧은 레이저를 활용하기 때문에 미세한 크기의 시료 표면을 촬영하여 미세한 표면변화(수 μm)에 대한 화상정보를 얻을 수 있고, 다양한 렌즈를 통해서 일반 조건의 촬영과 물속에서의 촬영 등 다양한 조건에서의 촬영이 가능하다. 파장이 짧다는 것은 그만큼 많은 에너지를 가진다는 것을 의미하게되고 이는 곧 높은 에너지를 활용하여 대상을 관찰하는 해상도를 높이는 것이 된다. 이번 실험에서는 증류수로 포화된 시료의 변형에 대한 연구를 실시하였고 이를 촬영하기 위해서 특수 제작된 수중촬영용 렌즈를 사용하여 화상을 획득하였다. 대략적인 실험 시스템에 대한 설명은 그림은 Fig. 4에 나타나있다. Fig. 4에 나타나 있듯이 실험 시스템은 크게 세부부분으로 구분이 되며 관

Fig. 4. Schematic figure of the CLSM system and experimental setup.

Fig. 5. Schematic figure of the loading system.

찰을 실시하는 관찰시스템(observing system)과 가압을 할 수 있는 가압시스템(loading system) 그리고 변위 및 응력값을 측정하고 저장하는 응력-변위 저장 시스템(stress-strain data recording system)으로 구성되어 있다.

가압 시료챔버 장치

압력이 주어진 상태에서 광물사이의 경계부 및 광물 내부의 변형을 관찰하기 위해서 시료에 압력을 가할 수 있는 장비를 제작하여 일정한 변위를 고정한 조건 하에서 광물 및 광물경계의 변형을 관찰한다. Fig. 5와 Fig. 6은 실험을 수행하기 위해서 제작된 시료챔버로서 일정한 압력을 실험기간동안 가하거나 일정한 변위를 고정할 수 있도록 설계되었다. 이번에 고안된 장치는 암석의 장기간에 걸친 변형을 관찰하기 위하여 암석 내에서 발생하는 미세균열의 발달과 절리의 발생 및 성장을 레이저 현미경 혹은 광학현미경으로 관찰할 수 있도록 하는 시료챔버이다. 이 장치는 암석에 가해지는 압력과 함수비 등을 조절할 수 있으며 각 조건하에서의 암석의 변형에 대하여 현미경을 활용한 관찰이 용이한 것이 특징이다.

시료챔버의 재질은 탄소강으로서 충분한 압력을 견딜 수 있는 재질로 고안되었으며, 내부에 압력을 측정할 수 있는 판형 로드셀(loadcell)을 위치시키고 시료는 로드셀과 T-형 가압바(bar) 사이에 위치시킨다. T-형 가압바는 압축력이 가해질 때 움직임을 제어하기 위하여 밀면이 없는 □자형 덮개를 설치하여 좌우이동만 가능하고 상하이동은 되지 않도록 하였다.

시료에 압력을 가하는 순서는 외부로부터 가해지는 압축력(최대 300 MPa)이 압력바에 작용하고 다시 압력

Fig. 6. Loading system.

바는 T-형 가압바에 압축력을 전달하게 된다. 최종적으로 T-형 가압바는 시료에 압축력을 작용시키고 이 값은 시료와 접촉하고 있는 로드셀을 통해서 계산한다. 이 장치는 암석에 대한 압력고정(creep test) 실험과 변위고정 실험(relaxation test)을 수행할 수 있으며 실험이 진행되는 동안에 현미경으로 실시간 관찰이 가능하도록 설계되었다. 이 연구에서처럼 변형을 고정시킨 상태에서의 압력완화에 대한 실험을 수행 할 때는 먼저 챔버 내부에 위치한 고정나사를 이용하여 일정한 압력이 가해진 상태에서의 암석시료에 대한 변형을 고정한다. 그리고 가해진 압력을 완전히 제거한 후에 시료에 가해진 초기 압력이 어떻게 완화되는지에 대한 결과를 로드셀을 통해서 계산한다. 이 가압 시료챔버 장치는 고준위방사성 폐기물 처분시설 및 CO₂ 지중 저장시설이 위치할 지하 심부의 여러 물리화학적 자연조건을 고려한 실험이 가능하기 때문에 지중시설물을 건설해야 하는 다양한 연구 분야에 접목하여 활용할 수 있다.

실험 방법

본 연구의 목적은 토노 지역의 화강암을 대상으로 응력완화실험을 통해서 광물과 광물경계부의 변위를 관찰하고 변형 메커니즘을 규명하는 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 각 시료는 40 mm×20 mm×5 mm의 모양을 가지는 판형의 시료로 성형을 한다. 그리고 관찰하는 면은 매우 정교한 연마 작업을 거쳐 레이저 현미경에 사용되는 Ar 레이저의 반사율을 높여 선명한 이미지를 얻을 수 있도록 한다. 이렇게 성형된 시료는 3일간 물에 포화시켜 완전 포화된 상태가 유지되도록 한다. 이후 완전 포화된 시료는 가압 시료챔버에 위치시킨다. 이때 시료의 선단부에 판형 로드셀을 부착시켜 가해지는 압력의 변화 및 가압 후 완화되는 압력의 변화를 기록하도록 한다. 시료의 표면에는 실험이 진행되는 동안 일어나는 변형에 관한 정보를 파악하기 위해서 가압 방향과 교차하는 방향으로 각 선단부에 두 개의 스트레인게이지를 부착시킨다. 위치시킨 시료에 최초 0.1 MPa 이하의 압력을 가하여 시료가 정확한 위치에 고정되도록 초기압을 가한다. 이후 압력값을 초기화 시키고 일축압축 응력값을 넘어서지 않는 범위내의 일정한 압력이 될 때까지 서서히 압력을 가한다. 일정한 압력에 도달하면 가압 시료챔버에 위치한 고정나사(stopper)를 사용하여 시료의 변위를 고정하는 작업을 실시한다. 이때는 스트레인게이지의 값을 확인하면서 값의 변화가 없을 때까지 변위를 고정하는 작업을 수행한다. 이렇게 변위가 고정된 작업을 마치면 마지막으로 가압 시료 챔버에 물을 채워 넣고 시료를 포화시킨다. 그리고 가해진 압력은 제거하여 응력완화조건에 도달하도록 실험을 진행한다.

결과 및 고찰

일축 압축 강도실험

응력완화 실험을 수행하기에 앞서 각 시료들은 실험에 적용될 초기응력값을 계산하기 위해서 일축압축 응력실험을 실시하였다. 실험에 사용될 샘플(A1과 A2 시료)에 대해서 각 3개 시료의 일축압축 응력실험을 수행하였다. 일축압축 응력실험의 결과는 다음의 Fig. 7에 나타나있다.

일축압축 강도값은 고심도의 샘플인 A1의 경우 전체적으로 평균 165 MPa 정도의 높은 값을 보이는 반면에 저심도의 샘플인 A2의 경우 평균 143 MPa 정도의 값을 보여 고심도에서 취득한 암석이 저심도에서 취득한 암석에 비해서 일축압축 강도값이 약 22 MPa 정도 높

Fig. 7. Results of uniaxial strength tests.

Fig. 8. Relationship between stress and elapsed time for Tono granite.

은 것으로 나타났다. 따라서 이번 연구에서 수행된 응력완화실험에서는 앞서 도출된 일축압축 강도값의 약 40-60% 정도의 값을 초기값으로 설정하여 실험을 수행하였다.

응력완화 실험

시료에 초기 응력값(일축압축 강도값의 40-60%)을 적용시킨 후 시료의 변위를 시료 가압 챔버에 있는 고정나사를 이용해서 고정시켰다(Fig. 5 참조). 시료의 변형을 고정시킨 후 시료에 가해지는 응력을 완전히 제거한 후부터 로드셀을 통한 완화응력값을 측정하여 응력변화를 관찰하였다. 그 결과는 Fig. 8에 나타나있다.

그림에서 보이는 점선은 실험이 진행되는 동안의 완화된 응력값을 나타내는 것이다. 모든 실험에서 응력의 완화를 관찰할 수 있으며 샘플에 따라서 완화되는 응력의 시간이 매우 짧은 경우(A2-2, A1-1, A1-3)도 있으며

이와 반대로 서서히 응력이 완화되는 경우(A2-3, A1-2, A2-1)도 관찰 할 수 있다. 또한 완화된 응력은 초기 응력의 약 5-10% 정도의 값을 나타내는 것으로 나타났다. 전체적으로 완화되는 응력은 초기 응력을 가한 후 약 5 시간 이내에 거의 평형의 값을 가진다는 사실을 확인하였다. 응력완화 실험은 변위가 고정되어있는 실험이기 때문에 초기응력이 해방된 이후 응력이 수렴되는 경향을 보이는 것은 시료 전체의 변위에 대한 차이는 발생하지 않고 광물자체나 광물의 경계에 대한 변형이 완료되어 일정한 응력에서 대한 수렴되는 값을 보이는 것으로 판단된다. 이러한 응력의 완화 경향은 시료의 심도에 따른 특별한 특성은 보이지 않는 것으로 본 연구에서 나타났다. 본 연구의 목적은 시료 내의 광물 및 광물경계의 변형에 대한 연구를 수행하기 위함이므로 심도에 따른 응력완화의 특성을 분석하기 위해서는 더 많은 시료에 대한 특성 분석을 차후 연구에서 실시하여야 된다.

광물 및 광물경계부의 변형

시료에 대한 광물 및 광물경계부의 미세변형에 대한 관찰을 위해서 본 연구에서는 앞서 설명한 OLS1000 (CLSM)을 활용하여 시료에 대한 디지털 화상정보를 확보하고 이를 활용하여 미세변형에 대한 해석 및 응력장에 대한 연구를 실시하였다. 응력장 연구에서는 유한요소해석법을 활용하여 각 절점에 대한 변위량을 계산한 후 계산된 변위량과 응력에 대한 관계를 활용하여 응력장을 계산하였다.

본 연구에서는 토노 화강암내의 석영(Q)과 흑운모(B)를 대상으로 각 광물 및 광물경계부에서의 미세변형을 관찰하였다. OLS1000을 통한 디지털 화상사진은 가압을 실시하는 초기의 사진과 실험이 종료되는 시점의 사진을 촬영하여 그래픽 프로그램을 이용하여 각 절점의 좌표를 계산하고 각 좌표의 변화된 양상을 이용하여 변위를 계산하였다. 연구에서 얻어진 디지털 화상사진은 다음 Figs. 9~10에 나타나있다. Fig. 9와 Fig. 10에 나타나 있는 절점과 격자(mesh)는 실험 후의 사진으로서 압축방향(화살표)에 따른 기준이 되는 절점과 격자의 위치를 나타내고 있다. 각 격자에 나타나 있는 숫자는 분석에 사용된 격자의 번호이다.

각 사진에 대한 격자는 실험초기와 실험종료시점에서의 사진을 활용하여 같은 기준점이 존재할 경우에 그 기준점을 한 샘플의 절점(node)으로 설정하여 격자를 구성하였다. 즉 설정된 절점은 실험이 진행되는 동안 사라

Fig. 9. Digital photomicrograph of specimen A1-2.

Fig. 10. Digital photomicrograph of specimen A2-1.

지는 점이 아니라 종료된 이후에도 확인할 수 있는 부분을 절점으로 설정을 하였다. 각 절점에 대한 변위(ϵ)를 해석하기 위해서 본 연구에서는 유한요소해석 방법을 사용하였다. 평균변위와 편차변위를 구하기 위해서 본 연구에서는 다음과 같은 평균변위 및 편차변위를 구하는 식 (1)~(5)와 각 변위의 크기(norm)를 계산하는 식을 활용하여 각각의 격자에 대한 변위 크기를 계산하였다(Ichikawa, 1990).

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & 0 \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{3}(\varepsilon_{kk} \delta_{ij}) = \frac{1}{3}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \delta_{ij}, \quad \varepsilon_{33} = 0 \quad (2)$$

$$\bar{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon - \bar{\varepsilon} \quad (4)$$

$$\varepsilon' = \begin{pmatrix} \frac{1}{3}(2\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}) & \varepsilon_{12} & 0 \\ \varepsilon_{21} & \frac{1}{3}(-\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3}(-\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}) \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서, ε_{11} 은 x방향의 변위를 나타내고 ε_{22} 는 y방향의 변위 그리고 ε_{12} 는 xy방향으로의 변위를 나타내고 있다. 또한 δ_{ij} 는 크로넬커 델타(kronecker delta)로서 i와 j가 일치할때만 1이라는 값을 가진다. $\bar{\varepsilon}$ 는 평균변위를 나타내고 ε' 은 편차변위를 나타낸다.

평균변위의 크기 $\|\bar{\varepsilon}\|$ 와 편차변위의 크기 $\|\varepsilon'\|$ 는 다음의 식 (6)과 식 (7)로 정의된다.

$$\|\bar{\varepsilon}\| = (\bar{\varepsilon}_{11}^2 + \bar{\varepsilon}_{22}^2 + \bar{\varepsilon}_{33}^2)^{1/2} \quad (6)$$

Fig. 11. Contour maps of the mean strain distribution in granite sample A1-2 (left: biotite grain (B); middle: B-Q boundary; right: quartz grain (Q)).

Fig. 12. Contour maps of the deviation strain distribution in granite sample A1-2 (left: biotite grain (B); middle: B-Q boundary; right: quartz grain (Q)).

$$\|\varepsilon'\| = (\varepsilon_{11}'^2 + \varepsilon_{22}'^2 + \varepsilon_{33}'^2 + \gamma_{12}^2)^{1/2}, \quad \gamma_{12} = 2\varepsilon_{12} \quad (7)$$

여기서 γ_{12} 는 $2\varepsilon_{12}$ 이다.

위 식들을 사용하여 구해진 두 개의 접촉 광물에 대한 각각의 평균변위와 편차변위의 크기는 각 격자에 표현되었다. (Figs. 11~14)

Fig. 11과 Fig. 13은 평균변위에 대해서 광물내와 광물 접촉부에서의 크기를 표현한 그림이다. Fig. 12와 Fig. 14는 편차변위에 대해서 같은 방법으로 크기를 표현한 그림이다. 이 결과에 따르면 토노화강암의 광물내부 및 광물 접촉부 변형에 영향을 미치는 주요 원인은 큰 값의 변화를 보이는 평균변위에 의한 영향이 가장 크

다는 것을 알 수 있다. 즉 평균변위는 식 (3)에서 알 수 있듯이 압축에 의한 변형을 의미하므로 전체적으로 압축력에 의한 변형이 주 원인이 된다는 것을 알 수 있다. Fig. 14에서는 경계부에서 일부 큰 편차변위를 보여주는 부분이 관찰 되고 있다. 그러나 이 크기는 Fig. 13에서 보는 바와 같이 평균변위의 크기에 비해서 월등히 적은 부분에 대한 값을 보이고 있다. 이는 경계부 또한 화강암의 경우에는 평균변위(압축력)가 편차변위(전단력)보다 크게 작용한다는 것을 말하고 있다. 본 연구에서는 화강암 내의 여러 광물 중에서 석영과 흑운모의 경계부를 관찰한 결과이다. 따라서 전단력에 의한 변형보다 압축력에 의한 변형이 크게 나타나는 것은 흑운모의 결정형태에 영향을 받은 것으로 사료된다. 즉 전단력

Fig. 13. Contour maps of the mean strain distribution in granite sample A2-1 (left: biotite grain (B); middle: B-Q boundary; right: quartz grain (Q)).

에 의한 뒤틀림 변형을 일으킬 수 있는 석영이 충분한 강도를 가지지 못하는 흑운모와 접촉된 상태에서 압축력을 받을 때 뒤틀림 변형보다는 상대적으로 강도가 약한 흑운모의 압축변형을 유발시키는 원인이 되어 뒤틀림에 의한 편차변위보다는 압축력에 의한 평균변위가 주를 이루는 것으로 사료된다.

결 론

본 연구에서는 물에 포화된 화강암 시료에 대한 시간 의존적 파괴거동을 다초점 레이저 스캔 현미경을 이용하여 관찰하면서 응력완화 조건하에서 암석에 대한 변형실험을 실시하였다. 이 실험의 목적은 실험이 진행되

는 동안에 연속적으로 데이터를 취합하여 변형 거동을 해석하는데 있다. 일본의 토노 지역에 분포하고 있는 화강암을 활용하여 시료를 제작하고 흑운모와 석영의 경계부를 찾아서 높은 현미경 배율 하에서 실험이 진행되는 동안 실시간으로 변위자료를 취득하고 이를 해석하였다. 그리고 이렇게 획득된 자료는 유한요소해석법을 활용하여 분석을 실시하였다. 그 결과 흑운모와 석영의 경계부에 있어서의 변형에 대한 주요 원인은 압축력에 의한 평균변위가 주를 이루고 있으며 이는 광물 내부와 광물 경계부 모두에서 관찰된다. 이는 상대적으로 강도가 약한 흑운모가 뒤틀림에 의한 변형을 일으키기 전에 압축에 의한 압축변위를 일으켜 나타나는 현상으로 사료된다. 또한 광물내와 광물 경계부를 비교한 결과 변형

Fig. 14. Contour maps of the deviation strain distribution in granite sample A2-1 (left: biotite grain (B); middle: B-Q boundary; right: quartz grain (Q)).

은 광물 내부 보다는 공극이 존재하는 광물경계부가 더 크게 나타나는 것으로 관찰되었다.

본 연구는 장기간에 걸친 암석의 변형을 해석하는데 있어서 매우 중요한 기초자료를 제공할 수 있으며 암석 변형을 일으키는 주요 원인에 대한 연구를 수행하는데 있어서 큰 기여를 할 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 “광산개발에 따른 지질환경재해 확산제어 기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다. 또한 심사를 해주신 서용석 교수님을 비롯한 익명의 두 분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 서용석, 2000, 화강암의 응력완화현상에 관한 수침삼축 시험, 지질공학, 10, 217-223.
- Balke, P., De Hosson, J.Th.M., 2001, Orientation imaging microscopic observations of in situ deformed ultra low carbon steel, Scripta Materialia, 44, 461-466.
- Brinck, A., Engelke, C., Kopmann, W., and Neuhauser, H., 2001, Structure and development of slip lines during plastic deformation of the intermetallic phases Fe3Al and CuZn, Materials Science and Engineering, A239-240, 180-187.
- Chandrasekaran, D., and Nygard, M., 2003, A study of the surface deformation behaviour at grain boundaries in an ultra-low-carbon steel, Acta Materialia, 51, 5375-5384.

- Choi, J.H., Anwar, A.H.M.F., and Ichikawa, Y., 2008, Observation of time-dependent local deformation of crystalline rocks using a confocal laser scanning microscope, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 45, 431-441.
- Fredrich, J.T., 1999, 3D imaging of porous media using laser scanning confocal microscopy with application to microscale transport processes. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 24(7), 551-561.
- Ichikawa, Y., 1990, Introductions of finite element method in geomechanics, *Nikka-Giren Pub*, 18-145 [in Japanese].
- Man, J., Obrtlik, K., Blochwitz, C., and Polak, J., 2002, Atomic force microscopy of surface relief in individual grains of fatigued 316L austenitic stainless steel, *Acta Materialia*, 50(15), 3767-3780.
- Passchier, C.W., and Trouw, R.A.J., 1996, *Microtectonics*, Heidelberg, Berlin, Springer, 92-110.
- Seo, Y., 1999, Damage process in granite: experimental observation, molecular dynamics simulation and its homogenization analysis, PhD thesis, Department of Geotech and Environ Eng. Nagoya University, Japan, pp. 147.
- Seo, Y., Seiki, T., and Ichikawa, Y., 1999, Crack generation and propagation during stress relaxation of crystalline rock under water-saturated uniaxial condition, *Journal of the Society of Materials Science Japan*, 48(11), 1255-1262 [in Japanese].
- Vinogradov, A., Hashimoto, S., Patlan, V., and Kitagawa, K., 2001, Atomic force microscopic study on surface morphology of ultra-fine grained materials after tensile testing, *Materials Science and Engineering*, A319-321, 862-866.

원고접수일 : 2012년 3월 19일

수정본채택 : 2012년 4월 20일

게재확정일 : 2012년 4월 24일

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