

## 일축압축하 결정질암석 공시체에서의 응력분포 및 파괴에 대한 연구

정 교 철

### A Study of Stress Distribution and Subsequent Failure in Crystalline Rock Specimens Under Uniaxial Compression

Gyo-Cheol Jeong

**ABSTRACT** : In rock, there are many microscopic structures which influence the mechanical behavior of rock. Many microstructures interact with each other, and furthermore, material constants vary discontinuously within rock, as most rocks are composed of several minerals. Taking into account this feature, it may be possible to contemplate a microstructure of rock as a unit cell by which the rock is constituted periodically. If this idealization is acceptable, the homogenization method can be applied. In this research, various microcracks on rock specimens were observed through a stereoscopic microscope under uniaxial compression. On the other hand, local stress distribution in the periodic-micro structure was calculated by the homogenization method. Then it is shown that there is a possibility to establish a relation between the behavior of microcrack and macroscopic load quantitatively by the linear fracture mechanics.

#### 서 언

암석내에는 암석의 취성거동을 야기하는 많은 미세한 구조적 특징이 존재한다. 그 특징은 광물입자 및 결정입자의 종류 및 방향성, 미세공극 및 미시적 균열등으로 들 수 있다. 암석에 응력이 작용한 경우의 취성거동에 대하여 검토할 경우 이들중에 특히 문제가 되는 것은 균열의 존재이다. 따라서 이들 균열의 미시적 구조에 대하여 관찰하는 것과 응력하 균열구조의 변화와 응력의 역할을 규명하는 것은 매우 중요하다. 그러나 균열의 구조적 성질과 응력 성질을 관련시키는 것은 그리 쉽지 않다.

균열구조의 변화와 응력과의 관계를 규명하기 위해서는 일반적으로 파괴역학을 적용하는 것으로 되어 있지만 그 적용방법은 간단하지 않다. 암석중에는 많은 균열이 존재하고 각 구조적 성질을 가지면서 각각의 균열들이 복잡하게 서로 간섭하고 있기 때문이다. 특히 균열 주변의 응력분포등이 해석결과로서 주어지는 바와 같이 비교적 단순한 형태의 균열은 많지 않고 더구나 본 연구의 대상

이 되는 화강암의 경우 많은 암석은 여러종류의 광물결정으로부터 구성되어 있어 물성치가 암석내에서 불연속으로 변화한다.

이와같은 무질서한 구조를 가지고 있는 암석이라 하지만 실제로는 통계학적 방향성이 존재하고, 그것은 미시적 균열의 방향성과 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다. 이들은 암석이 생성에서부터 현재에 이르기까지 받은 응력 이력등의 영향에 의한 것이기 때문이다. 그 특징을 이용하여 암석을 어떤 미시적 규모로 모델화하여 전체적으로 주기적인 구조로 생각할 수 있다. 암석을 이와같이 미시적 주기구조의 집합체로 취급한다면 수학적 균질화모델을 적용하므로써 구조를 반영하는 국소적 응력분포를 구할 수 있다.

본 연구에서는 일축압축응력하에서 암석공시체내에서의 파괴과정을 실험현미경하에서 연속적으로 관찰, 기록하고, 그 구조적 성질을 고려하면서 미시적 주기구조로써 모델화 하여 균열주변의 응력분포를 평가하였다. 다음으로 그 결과를 선형탄성파괴역학에 적용하여 거시적으로 작용하는 응력과 미시적인 균열의 거동을 정량적으로 관련시켜 보았다. 암석의 균열을 이용한 균질화해석과 선형탄성파괴역학을 적용하여 암석내부의 미시적 균열의 거

\* 안동대학교 지구환경과학과 (Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea), E-mail: jeong@anu.andong.ac.kr

등을 평가하는 것이 본 논문의 목적이다.

### 파괴역학 이론

파괴역학은 균열의 진전에 의해 발생하는 파괴와 관련된 공학적 문제를 해결하는 분야이다. 파괴역학의 대부분은 Griffith의 취성파괴이론으로부터 도입된 것으로 생각되지만, 지금까지의 연구는 주로 Irwin (1960)의 연구를 이용하고 있다. 현재까지 많은 종류의 물질에 관련한 이론적 및 실험적 연구가 수행되어 왔지만 암석역학에서 선형탄성파괴역학 분야에 있어서의 적용에는 그리 많지 않다.

### 크랙선단의 응력상태

대상물질 대부분의 균열선단에는 비탄성효과가 나타나고, 또한 탄성거동으로 나타난다 하더라도 응력이 극히 큰 영역에서는 비선형 탄성으로 나타나는 것은 지금까지의 연구에 의해 잘 알려져 있다. 그러나 균열선단 부근에 관한 실제의 해석은 편의적으로 고전적인 선형 탄성이론에 기초하여 수행한적이 많다. 선형 탄성파괴역학은 대상으로 하는 물체에 있어서 비선형거동이 일어나는 영역이 균열길이와 물체의 규모와 비교해서 무시할 수 있을 정도로 작다면 적용가능하다. 본 연구에서도 화강암중의 미시적 균열에 그 가정을 적용하여 선형탄성파괴역학을 이용하였다.

균열선단 부근의 응력분포를 해석하기 위하여 그 부근의 변형에 관한 3종류의 기본적인 모-드를 생각할 수 있다. Fig. 1에서 보여주는 모-드는 직선상의 균열 선단에 수직인 기준면에 관하여 정의하였다. 모-드I은 균열면에서의 변위가 균열면에 수직인 형태이고, 모-드II는 균열면상의 변위가 균열면을 따라 발생하며 방향은 균열선단과 수직인 면내변형 모-드이다. 모-드III은 균열면상의 변위가 균열면을 따라 발생하며 방향은 균열선단과 평행한 면의 변형모-드이다.

3종류의 기본 모-드에 있어서 균열선단 부근의 응력상태는 일정한 외력의 결과로 생기는 변형으로 구해진다.

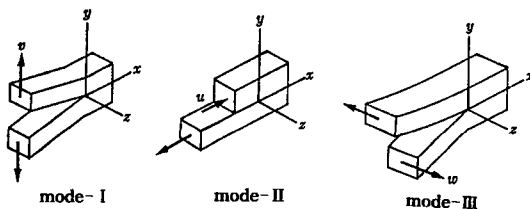


Fig. 1. Three principal modes of crack loading.

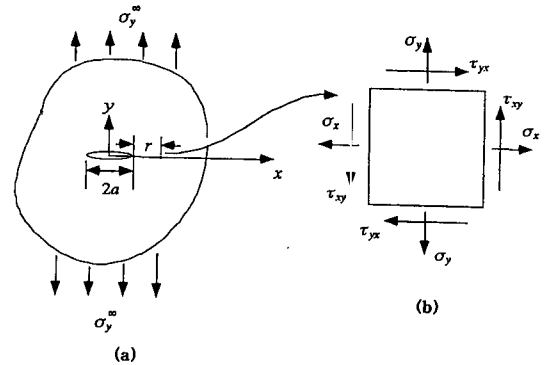


Fig. 2. Crack under geomechanics stress conditions: (a) stress configuration; (b) crack line reduced stress system.

Fig. 2와 같이 무한한 판에 길이 2a의 균열이 존재하고, 균열에 수직인 방향으로 일정한 인장응력  $\sigma_y^\infty$ 가 작용하는 경우를 고려하면 모-드I로서의 응력분포는 다음의 식 (1)과 같이 된다.

$$\frac{(\sigma_y)_{y=0}}{\sigma_y^\infty} = \frac{a+r}{\sqrt{r(r+2a)}} \quad (1)$$

이 식을  $r/a \ll 1$ 로서 급수전개하면 다음과 같이 전개된다.

$$\frac{(\sigma_y)_{y=0}}{\sigma_y^\infty} = \sqrt{\frac{a}{2r}} + \frac{3}{4}\sqrt{\frac{r}{2a}} - \frac{5}{32}\left(\sqrt{\frac{r}{2a}}\right)^3 + \dots$$

균열선단 부근 ( $r/a \ll 1$ )에서는 제 1항만을 고려한다고 하면 응력은 균열선단으로부터 이루어지는 거리의 제곱근에 반비례함을 알 수 있다.

또한 일반적으로 응력성분은 3개의 변형모-드에서  $r^{1/2}$ 의 급수로 전개할 수 있어 균열선단 부근에서는 제 1항만으로 근사적으로 응력성분을 구할 수 있다. 이 경우 각각의 응력성분은 주어진 응력의 실제값과 관계가 없는 공간상의 분포함수로서 주어진 응력 및 균열 길이만으로 관련되는 계수와외의 곱으로 표현할 수 있다. 모-드 각각의 응력성분에는 같은 계수가 적용되며 이것이 응력확대계수가 된다. 응력확대계수는 각각  $K_I, K_{II}, K_{III}$  등으로 표현된다. 이들 응력확대계수를 이용하면 식 (2)는 균열선단 부근에 있어서 다음과 같이 된다.

$$(\sigma_y)_{y=0} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}, \quad K_I = \sigma_y^\infty \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

이 식에서 계수  $1/\sqrt{2\pi r}$ 은 x축상 균열 연장선상의 분포함수이고,  $K_I = \sigma_y^\infty \sqrt{\pi a}$ 는 응력확대계수이다.

탄성거동은 선형특성을 가지기 때문에 균열선단 부근에서의 응력분포는 Fig. 1과 같은 3개의 기본 모-드의 조

함으로 나타낼 수 있다. 3차원 문제에 있어서도 탄성적인 응력분포는 앞에서 정의한 3개의 응력확대계수를 이용하여 구할 수 있다.

**균열진전의 조건**

균열의 진전 여부를 알려고 할 때는 균열선단에 작용하는 응력의 크기를 구할 필요가 있다. 앞에서의 해석에 의해 공시체에 재하가 작용하는 경우 균열선단 부근에서의 역학적 상황을 응력확대계수와 기본변형 양식을 이용하여 표현할 수 있다.

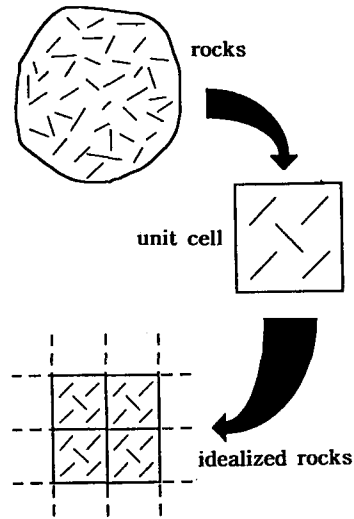
다음으로 외력이 증가할 때 균열선단 부근에서는 어떤 조건에 의해 균열이 진전하기 시작할까라는 문제가 있다. 이문제의 해로서는 균열선단에 충분히 큰 영역에 있어서 응력이 어떤 한계치를 넘었을 때 균열이 진전하기 시작한다는 것이다. 다시말하면 균열선단의 응력은 응력확대계수에 의해 평가되기 때문에 균열진전은 응력확대계수에 의해 구해지는 균열선단에서의 재하크기가 어떤 한계치를 넘었을 때 시작한다는 의미이다. 이때의 응력확대계수는 한계응력확대계수 혹은 파괴인성이 된다. 이 계수는 물질의 종류 및 입자크기 및 변형을 경화등의 물리적 조건 및 온도, 압력상태에 관계하는 물질고유의 변수이다.

균열선단에 있어서 임계재하를 기초로한 이 방법은 균열선단에서의 실제 응력상태를 알지 못해도 계산가능하기 때문에 유리한 방법이라 할 수 있다. 그러나 균열이 물리적으로 동일하다면 균열선단에서 일어나는 국소적 항복 및 비선형탄성등은 실험적으로 결정되는 한계응력확대계수에 포함되는 것으로 된다. 즉, 국부적 재하조건하에서 균질한 물질은 특이점 (singularity)의 성질 및 비선형성이 같은 정도로 되기 때문에 외부하중 및 공시체의 종류가 다르다고 하여도 균열선단의 국소적 상태는 유사하게 된다.

**균질화모델에 의한 미시적 구조 내부의 응력 해석**

선형파괴역학에서 선재균열의 진전을 고려할 경우, 파괴기준으로서 응력확대계수가 중요한 역할을 하게 된다. 이 응력확대계수의 평가 방법에 대하여는 많은 수학적 모델이 제안되어 있지만, 암석과 같은 복잡한 미시적 구조를 갖는 물체에 대하여 정확한 응력확대계수를 평가하는 것은 곤란하였다.

암석에 대한 균질화모델의 적용가능성을 Fig. 3과 같이 설명할 수 있다. 앞에서도 언급한 바와 같이 암석내의 균열은 무질서한 구조를 가지고 있다. 균질화모델을 이용하



**Fig. 3.** Applications of homogenization model to rock with cracks.

기 위해서는 이들 무질서한 구조로부터 Fig. 3과 같이 주기구조로 이상화 시키지 않으면 안된다. 따라서 암석이 기본구조단위의 주기성을 가지는 것으로 이상화 함으로써 균질화모델을 적용할 수 있다.

미시적 균열의 구조적 성질로서는 균열의 길이, 방향, 결합성, 간극, 점착력, 균열면에서의 마찰계수 및 단위체적에서의 균열의 수 등으로 들 수 있다.

**응력분포**

균열선단 부근에서의 응력은 균열선단으로부터 거리의 제곱근에 반비례하고 균열선단이 특이점이 된다는 것은 알려져 있는 사실이다. 그러나 유한요소법에 의한 균열선단 부근의 응력분포를 구하는 방법은 통상 이용되는 요소에 의해 해석하면 특이성을 표현할 수가 없다. 이 때문에 균열선단 부근에서는 응력 및 변형률의 정확한 분포는 그다지 기대할 수 없다. 따라서 구해지는 응력확대계수의 정확성도 일반적으로 좋은 결과를 얻을 수 없다. 균질화모델에 있어서도 미분방정식을 유한요소법에 의해 풀기 때문에 이 점에 있어서는 본질적으로 차이가 없다고 보여진다.

Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 가늘고 긴 개구된 균열 (aspect ratio=0.01)를 갖는 기본구조단위로부터 만들어지는 전체구조가 선재균열과 직교하는 방향으로 인장을 받는 경우를 고려한다. 우선 기본구조단위로부터 균질화탄성계수를 구하여 이것을 전체해석의 물성치로 대입한다. 그 다음 전체해석으로부터 구해진 변위 및 변형률을 이용하여 국소적 응력해석을 하고 균열선단 부근의 응력

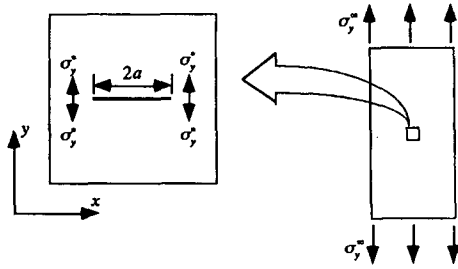


Fig. 4. Stress conditions in unit cell including mode-I.

$\sigma_y^*$ 를 구한다. 여기에서는 모-드의 균열에 주목하여 응력으로서  $y$ 방향성분  $\sigma_y^*$ 를 이용한다. 식 (3)으로부터 균열연장선상의 응력  $\sigma_y$ 와  $K_I$ 는 균열선단 부근에서 식 (4)와 같이 구해진다.

$$K_I = \sigma_y \sqrt{2\pi r} \tag{4}$$

이 식에서  $r$ 은 균열선단으로부터의 거리이다. 이 관계에서  $\sigma_y^*$ 를 이용하여 모-드의 응력확대계수 ( $K_I^*$ )를 구한다.

균열선단 부근의 응력 분포에 대하여 균열로부터 무한히 떨어져서 외력으로 작용하는 인장응력 ( $\sigma_y^\infty$ )을 15 kgf/mm<sup>2</sup>로 하여 해석한 결과를 Fig. 5에 표시하였다. 이 조건에서 앞의 방법에 의한 균열선단 부근의 각 점에서 구한 응력확대계수  $K_I^*$ 의 평균치 ( $K_I^*_{ave}$ )는 12.37 kgf·mm<sup>-1.5</sup>로 된다. Fig. 5에서 파선은 ( $K_I^*_{ave}$ )를 이용하여 식 (3)으로부터 구한  $\sigma_y$ 이다. 또한 비교를 위하여 식 (1)에 의해 구한  $\sigma_y$ 는 실선으로 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이  $r/a=0.2$ 의 영역에서 응력이 급격히 변화하고 있다.

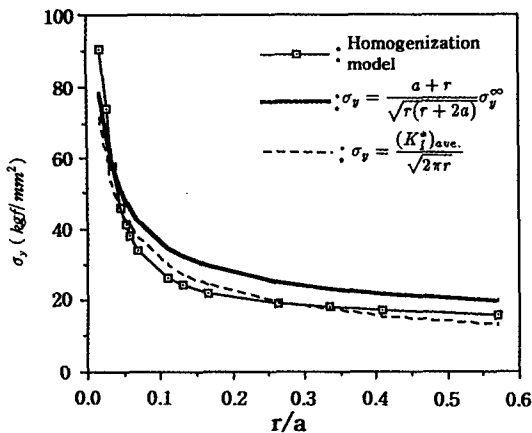


Fig. 5. Stress distributions calculated by homogenization model at the crack tip.

이 영역에서 요소분할을 상세히 함으로서 균질화모델에 의해서  $r^{-1/2}$ 특이성을 표현할 수 있다.

응력확대계수의 평가에 대한 정호도의 향상에 관해서는 일반적으로 유한요소법의 경우와 마찬가지로 균열선단의 특이성을 나타내기 위해서는 표현가능한 특이요소를 이용하는 것으로 생각된다.

### 일축압축하에서의 미세적 구조의 변화

공시체에서의 균열발생 및 진전을 평면내에서 관찰하기 위하여 크기가 40×20×5 mm인 각주형태의 공시체를 이용하였다. 공시체 단면의 직각도 및 평행도는 4/1000 mm 이내로 하였다. 또한 균열의 발생 및 진전을 현미경하에서 쉽게 관찰하기 위하여 공시체 표면은 1000메쉬(mesh) 이상 연마가공하였다. 공시체 뒷면에는 축응력에 대한 변형율을 측정하기 위한 변형률게이지를 부착하였다.

실체현미경하 스테이지위에 부착하여 균열의 발생 및

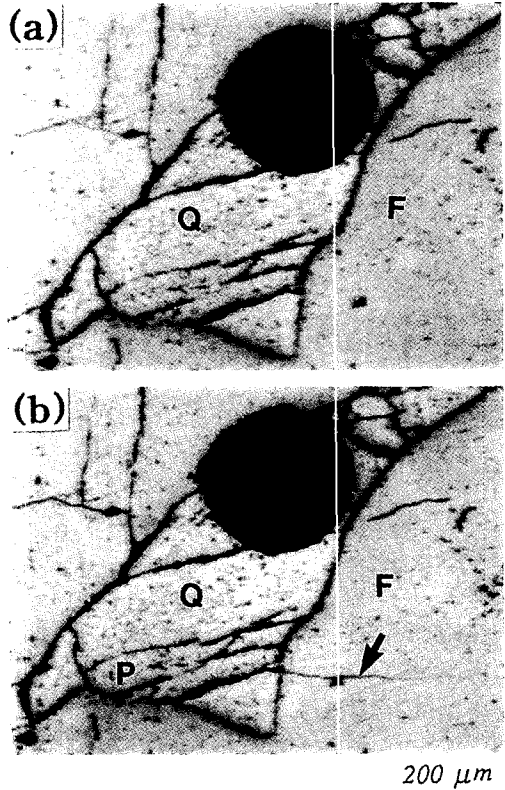


Fig. 6. Geometrical relationships between pre-existing microcracks and stress-induced microcracks with increasing axial stress in the contact portion of quartz(Q) and feldspar(F): (a) axial stress=0 kgf/cm<sup>2</sup>; (b) axial stress=600 kgf/cm<sup>2</sup>. Axial stress direction is horizontal.

진전을 직접 관찰할 수 있도록 일축압축시험기를 새로이 제작하였다 (Jeong *et al.*, 1994). 축응력은 횡방향으로 수동식 유압 펌프로 주게 되어 있다. 균열의 발생 및 진전의 관찰은 CCD카메라 및 8 mm 비데오로 연속 기록하였다.

압축응력이 Fig. 6과 같이 석영-장석의 경우에는 600 kgf/cm<sup>2</sup>정도, Fig. 7과 같이 운모-장석의 경우에는 450 kgf/cm<sup>2</sup>정도에서 응력-변형률 곡선은 거의 선형거동을 보이는 것으로 나타난다. 두 경우에 있어서 결과적으로 압축응력 900 kgf/cm<sup>2</sup>정도 이하에서는 선형거동을 보이는데 이것은 주로 광물입자와 균열의 탄성변형에 의한 것으로 생각된다. 그러나 본 연구에서는 선형거동에서 재하축 방향으로 균열이 진전하는 것이 확인되었다. 미시적 균열의 진전은 거시적인 탄성영역으로부터 이미 발생된다고 생각된다. 이들 균열들은 주어진 응력에서 안정적으로 존재하고 공시체의 파괴에는 직접적으로 연결되지 않는다.

응력을 증가시켜 900 kgf/cm<sup>2</sup> <  $\sigma_{axial}$  < 1500 kgf/cm<sup>2</sup>에

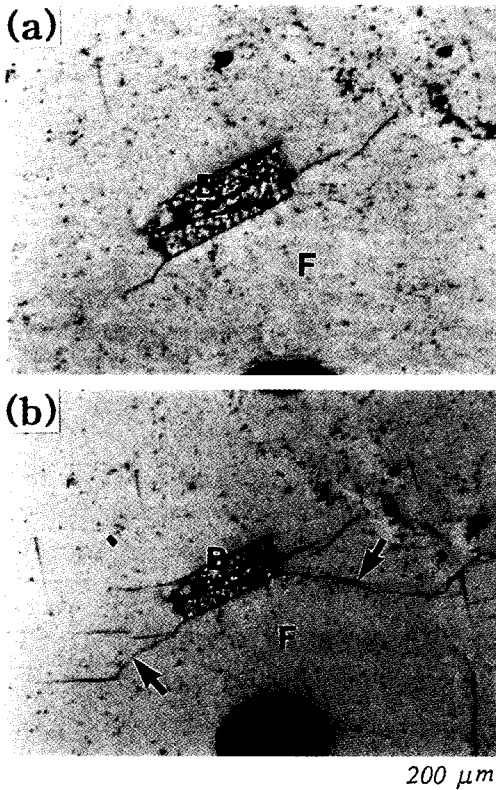


Fig. 7. Geometrical relationships between pre-existing microcracks and stress-induced microcracks with increasing axial stress in the contact portion of feldspar(F) and biotite(B): (a) axial stress=0 kgf/cm<sup>2</sup>; (b) axial stress=45 kgf/cm<sup>2</sup>. Axial stress direction is horizontal.

서는 응력-변형률관계가 탄성거동을 벗어나 미시적 균열의 진전이 현저하게 나타나고 그 수도 증가한다. 또한 국소적인 응력집중도 뚜렷하게 되어 결정입자가 움직이는 모양도 관찰된다.

압축응력  $\sigma_{axial}$ 가 1500 kgf/cm<sup>2</sup> 이상일때는 공시체의 역학거동은 불안정하게 되어 돌연 파괴로 연결된다. Fig. 6, 7의 크랙진전을 기본구조모델로 하여 응력해석을 실시하였다. 재하속도의 영향등도 고려되어야 하지만 본 연구에서는 응력분포 및 집중에 따른 파괴의 역학적 규명에 목적을 두었으므로 생략하였다.

### 미시적 구조내부의 응력해석

압축방향과 직교방향으로 놓여있는 균열은 압축응력에 의해 닫혀진다는 것은 일반적으로 알려져 있는 사실이다. 균열의 발생 및 진전은 모드II 혹은 모드III의 형식에 의한 것으로 생각된다. 모드II 혹은 모드III의 거동을 하려면 전단응력이 작용하여야 하므로 직접적인 전단응력이 작용하는 경우와 거시적으로 작용하는 응력과 어느정도 각도를 이루고 있는 균열면에서 수직응력보다 전단응력이 클 때 작용하는 경우로 들 수 있다. 이 경우 균열의 발생 및 진전 방향은 균열면에 수직으로 시작하게 되므로 그 메카니즘을 모드I로 볼 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 초기의 크랙을 대상으로 하여 외부하중과 크랙진전과의 관계를 단순화 시키기 위하여 모드I의 크랙에 주목하였다.

화강암은 주로 3종류의 광물로 이루어져 있고, 각각 다른 물성치를 가지고 있다. 따라서 각 광물들의 경계에서는 광물들의 배열 및 구조 특성에 의해 특징적인 응력분포 및 파괴형태가 나타난다고 생각된다. 응력해석에 이용한 광물의 물성치는 Skinner (1961)에 의해 측정된 압축율과 포아송비로서 계산된 것으로서 Table 1과 같다.

### 장석내부에 석영이 포함된 경우

화강암을 구성하는 3종류의 광물중에 석영이 가장 변형되기 어렵다 (Skinner, 1961). 이 때문에 석영내에서는

Table 1. Physical properties of major minerals of granite (from Skinner, 1961).

Minerals	Young's modulus	Poisson's ratio
Quartz	8932 kgf/mm <sup>2</sup>	0.109
Feldspar	7103 kgf/mm <sup>2</sup>	0.299
Biotite	7820 kgf/mm <sup>2</sup>	0.200

주위의 광물에 끌려지는 형으로 변형이 일어나 광물입자 내부 혹은 입자 경계에서 선재 균열이 개구하거나 새로운 균열이 발생한다. 이와 같은 이유에 의해 재하시 석영에서의 선재 균열이 먼저 변화한다. 역으로 석영을 둘러싸고 있는 광물에서는 석영과의 접촉면에서 변형을 구속하는 형으로 되어 균열은 발생되기 어렵다. 그러나 석영입자내에 균열이 일단 발생하면 그 부분에서 석영이 국소적으로 인장에 저항할 수 없게 되어 석영입자내 균열과 입자 경계를 걸쳐 반대측 부분에 인장응력이 집중하고, 외부 광물에도 균열이 진전한다고 생각된다.

장석과 석영의 접촉부에 있어서 실제로 균열의 진전이

관찰된 부분을 기본구조단위로 하여 응력을 해석하였다. 요소의 영향을 최소한으로 하기 위하여 요소의 두께는 모델 단면 길이의 1/180으로 하였다.

재하를 시작한 직후 선재 균열은 진전하지 않고, 석영이 주위의 장석과 일체가 되어 거동하는 경우를 고려하였다 (Fig. 8). 그 결과 재하축 방향과 직교하는 방향으로 최대 재하응력의 24%정도의 인장응력이 입자경계 부근에서 국소적으로 작용하는 것을 알 수 있었다. 앞에서 언급한 바와 같이 석영이 상대적으로 경계부 변형이 큰 장석으로부터 강제로 변형을 받았기 때문에 인장응력이 석영내에 발생한다고 생각된다. 또한 이와같은 응력

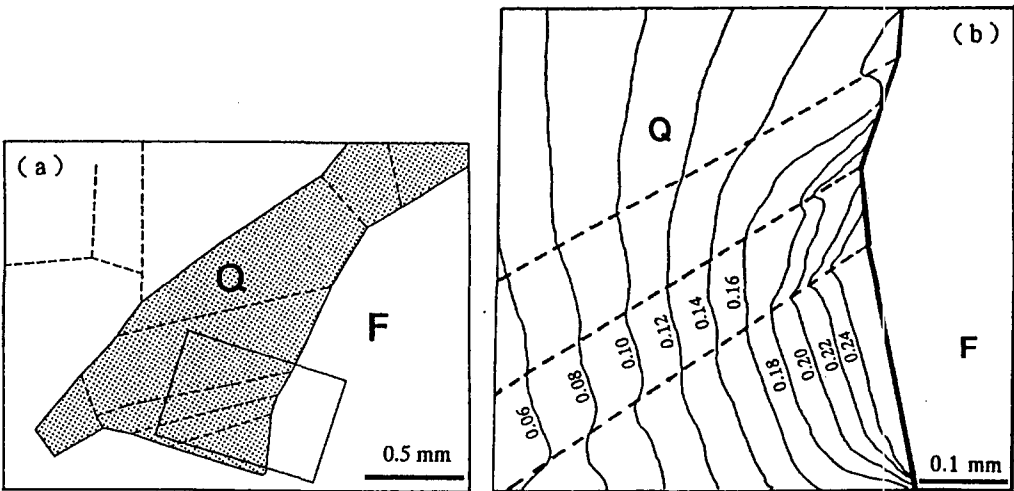


Fig. 8. Calculated contour map view of the tensile stress normalized to axial stress in the contact portion of quartz(Q) and feldspar(F) without pre-existing microcracks(dotted line): (a) unit cell; (b) stress distribution map.

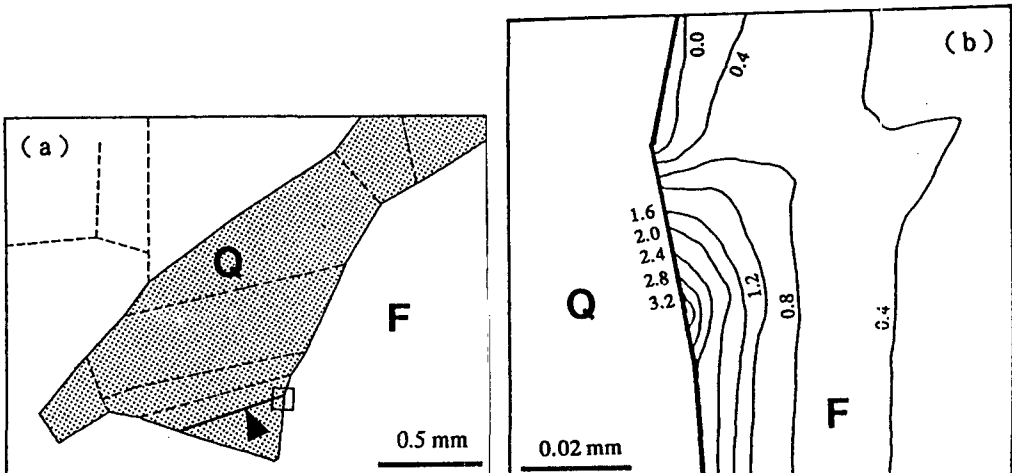


Fig. 9. Calculated contour map view of the tensile stress normalized to axial stress in the contact portion of quartz(Q) with one opened microcrack(marked solid line) and feldspar(F): (a) unit cell; (b) stress distribution map.

집중이 나타나는 것은 석영의 형상에 의한 효과가 크고, 응력집중 부분에서 실제로 균열이 진전하는 것이 관찰되었다.

다음으로 선재 균열이 개구한 경우를 고려하였다. 앞의 해석에서 인장응력이 집중한 장소에서 가장 가까운 균열이 개구하고 인장에 대하여 저항할 수 없게 된 것을 고려하였다. 해석의 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 개구한 균열 선단 부근에서의 장석에 국소적으로 인장응력이 집중하고 있고, 크기는 최대재하응력의 3.2배 정도가 되었다. 이것은 석영과 접촉하고 있는 부분에서 장석의 변형이 구속되어 균열선단부에 전체변형의 영향이 집중하기 때문으로 생각된다. 이러한 집중응력으로부터 장석내에서도 재하축방향으로 균열이 진전할 가능성이 야기된다.

장석측에서 균열진전의 발생가능성은 응력확대계수에 의해 평가된다. Fig. 9에서 구한 균열선단에서의 응력분포  $\sigma_y/\alpha\sigma_c = 3.2$ 를 가지고 균열선단으로부터의 거리를 기초로 하여 식 (4)에 의해 균열선단 부근에서의 응력확대계수  $K_I$ 을 계산한 결과 재하응력  $\alpha\sigma_c$ 와  $K_I$ 의 관계는 다음과 같게 된다.

$$K_I = 0.1185\alpha\sigma_c \quad (5)$$

장석에서 모-드I의 한계응력확대계수  $K_{Ic}$ 는 Zhang et al. (1990)에 의하면  $31.6 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-1.5}$ 로 계산되었다. 이것을 식 (5)에 이용하여 장석내에서 균열이 진전하는 재하응력을 구해보면  $266.7 \text{ kgf/cm}^2$ 이 된다. 이 값은 실제

로 균열이 진전하는 재하응력과 비교해서 작다. 그 이유는 실제의 경우에는 처음부터 석영내의 균열이 개구해 있지 않기 때문에 초기 재하응력의 에너지가 석영내 선재 균열의 변화에 소비되기 때문으로 생각된다. 여기에서 해석 대상으로 되어 있는 석영내 선재 균열의 변화에 대해서는 현미경관찰하에서는 보여지지 않았기 때문에 석영 입자내의 선재 균열에 변화를 발생시키는 재하응력에 대해서는 현시점에서 명확하게 밝히지는 못하였지만, 그러나 일단 석영내의 선재 균열이 인장에 대하여 저항력이 없어진 다음에는 즉시 장석내에서 균열을 진전시키는 것으로 생각된다. 이것은 거시적인 탄성영역에서도 미시적 균열의 진전이 관찰된 실험결과와 일치하고 있다.

**장석중에 흑운모가 포함된 경우**

흑운모 실질부분의 탄성계수는 장석보다도 크다. 포아송비는 장석의 2/3정도이다. 또한 흑운모에는 벽개면이 발달하고 있고, 이 벽개면은 인장에 대해서 거의 저항할 수 없다. 흑운모에서 벽개에 의한 이방성을 고려하지 않으면 앞에서 언급한 석영의 경우와 마찬가지로 내부에서 재하축과 직교하는 방향으로 인장이 발생하는 것으로 생각된다. 이 때문에 벽개면이 재하축과 평행하거나 이와 근사한 경우 재하의 초기 단계에서 변화를 나타낸다. 실제로 균열의 진전이 확인된 부분을 기본구조단위로 하여 흑운모 부분의 응력분포를 해석하였다.

기본구조단위의 모델은 Fig. 10(a)과 같다. 재하초기단

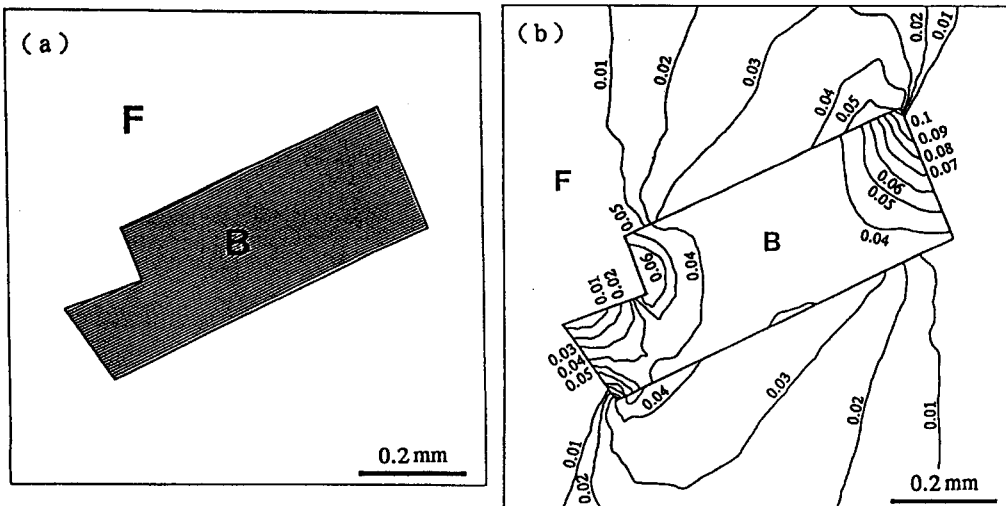


Fig. 10. Calculated contour map view of the normalized tensile stress in the contact portion of biotite(B) and feldspar(F): (a) unit cell; (b) stress distribution map.

계에서는 장석과 흑운모내의 선재 균열이 닫혀지는 것으로 해석하였다. 그 결과는 Fig. 10(b)에 나타내었다.

흑운모의 우각부에 최대재하응력의 약 10%의 인장응력이 재하축과 직교방향으로 작용하고 있다. 석영에서의 해석결과와 다른 것은 흑운모 주위의 장석내에서도 인장응력이 집중하는 것이 나타난다는 것이다. 이 차이는 광물의 형상에 의한 것으로 생각되지만, 흑운모는 벽개면 발달에 의한 각형에 근사한 형상을 나타내기 때문에 우각부에 응력집중이 발생하는 것으로 생각된다.

## 결 언

본 연구에서는 암석을 일축압축상태하에서의 균열발생 및 성장을 관찰하기 위하여 시험기를 제작하고 그에 맞게 공시체를 만들어 사용하였다. 시험결과를 가지고 기본구조단위를 설정하고 그 구조를 모델화 하여 균질화해석에 의해 응력분포 및 그에 따른 파괴역학 해석을 하였다.

1. 광물입자내 및 경계에서의 국소적 응력집중 및 그에 따른 균열진전이 실제 실험적 현상을 표현할 수 있는 것으로 생각된다.

2. 기본구조단위에서 균질화모델에 의한 응력해석 결과는 거시적 탄성영역에서 뿐만아니라 미시적 균열의 탄성 거동에 있어서도 응력확대계수를 계산할 수 있음을 보여 주며, 균질화모델에 의한 응력확대계수 계산은 미시적 구조에서의 파괴를 정량적으로 해석할 수 있음을 보여준다.

3. 암석공시체에서의 재하응력으로서의 거시적인 힘을 미시적 구조내에서 분포하는 힘으로 관련지을 수 있음을 제안할 수 있다.

4. 이들 결과로부터 고준위방사성폐기물 대심도 동굴처분을 위한 굴착뿐만아니라 산업 및 생활쓰레기의 지하 처분을 위한 암반굴착에서 발생하는 균열진전 그리고 그에 따른 암반손상 및 붕괴를 정량적으로 평가할 수 있음을

시사한다.

## 사 사

본 연구는 한국학술진흥재단 (과제번호: 997-003-D 00211)의 지원에 의해 이루어 졌음을 경기하며 이에 깊이 감사를 드린다. 아울러 심사과정에서 중요한 내용에 대하여 지적과 수정을 해 주신 서울대학교 박형동교수님과 익명의 심사위원에게 심심한 사의를 표합니다.

## 참고문헌

- Guedes, J.M. and Kikuchi, N., (1990) Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 83, p. 143-198.
- Irwin, G.R., (1960) *Structural mechanics*, Pergamon Press, Proc. 1st Symp. New York, p. 557-591.
- Jeong, G.C., (1994) Mechanics of micro-damage at contact portion of two grains. *The J. of Engineering Geology*, v. 4, p. 231-243.
- Rice, J.R., (1975) *Mechanics and mechanisms of crack growth*, Edited by J. May, British Steel Corporation Physical Metallurgy Centre Publication, p.14.
- Shiratori M., T. Miyoshi and Matsushita, H., (1980) *Computational fracture mechanics*, J. S. Press, Tokyo, 265p.
- Shiratori M., and Miyoshi, T., (1979) *Fracture mechanics of ductile and tough materials and its application to energy related structures*, Joint U.S.A.-Japan Seminar, Hayama, p.13-14.
- Skinner, J.B., (1961) In *Handbook of Physical Constants*, ed Clark, S. P., Mem. Geol. Soc. Am. p.71-78.
- Zhang, J., Wong, T.-F., and Davis, D.M., (1990) *Micro-mechanics of pressure-induced grain crushing in porous rocks*, J. of Geophysical Research, v. 95, p. 341-352.

1998년 11월 16일 원고접수, 1999년 1월 6일 게재승인.