

## 반복하중 시험 시 발생하는 암석의 미소파괴음 특성과 손상도 평가

장현식<sup>1</sup> · 마연실<sup>2</sup> · 장보안<sup>1</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지구물리학과

<sup>2</sup>주식회사 지오이엔지

### Acoustic Emission Property and Damage Estimation of Rock Due to Cyclic Loading

Hyun Shic Jang<sup>1</sup>, Yon Sil Ma<sup>2</sup>, and Bo An Jang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Geophysics, Kangwon National University

<sup>2</sup>Geoeng Co.Ltd.

한국원자력연구소 내에서 시추된 화강암 코어시료를 대상으로 1550회의 반복하중을 가할 때 미세균열의 발달 정도를 미소파괴음(AE)을 이용하여 연구하였다. 반복하중 조건에서 미소파괴음은 반복횟수에 따라 두 가지 type의 발생 특성을 보였다. 첫 번째 type은 반복횟수가 적었을 때 나타나는 특성으로 낮은 에너지와 분산된 주파수가 특징이며, 두 번째 type은 반복횟수가 많았을 때 나타나는 특성으로 높은 에너지와 일정한 주파수가 특징적이다. Type 1은 시료내의 공극이나 미세균열이 닫히거나 성장하는 과정에서 발생하는 미소파괴음의 특성을 나타내는 반면에, type 2는 하중을 가할 때에는 미세균열이 전단되거나 닫혔다가 하중이 제거될 때에는 전단으로부터 회복하거나 미세균열이 열리면서 발생하는 미소파괴음의 특성으로 판단된다. 또한 반복횟수 50, 150, 350, 750, 1550회 때 탄성파(P파) 속도와 Felicity 비를 측정하였다. 측정결과 탄성파속도는 반복횟수가 증가하여도 변화가 없었으나 Felicity 비의 경우 반복횟수가 증가함에 따라 점점 감소하여 시료가 반복하중에 의해 손상을 받고 있음을 지시하였다. 따라서 암석의 손상정도를 판단하는데 있어서 미소파괴음 측정을 통한 Felicity 비가 탄성파속도보다 더 효과적으로 판단된다.

**주요어** : 미소파괴음, 미세균열, 반복하중, Felicity 비

Granite cores were sampled within Korea Atomic Energy Research Institute and cyclic loadings up to 1550 cycles were applied. Microcrack development in samples due to cyclic loading was estimated using Acoustic Emission(AE) method. AE showed two different types depending on numbers of cycle. Type 1 appeared at low cycles and had low energy and diverse frequencies, while type 2 appeared at high cycles and had high energy and uniform frequency. AE property of type 1 indicates voids and pre-existing microcracks in samples may close or propagate up to certain length. Microcracks may be sheared or closed during loading and are recovered from shear or opened during unloading when AE of type 2 were measured. P wave velocities and Felicity ratios were measured at 50, 150, 350, 750, 1550 cycles. P wave velocities were almost the same regardless of number of cycles applied. However, Felicity ratios were much lower than 0.9, indicating that microcracks were developed within samples. This result indicates that Felicity ratio is a better tool than P wave velocity to estimate the damage of rock.

**Key words** : AE, microcrack, cyclic loading, Felicity ratio

## 서 론

최근 지하 암반은 기초 지반으로서만 아니라 액화가

스의 지하저장소 또는 핵폐기물 지하처분 시설, 매립지 등으로 사용되어 안정성에 대한 중요성이 더욱 강조되고 있다. 그러나 지하 암반은 터널 굴착, 지하자원의 심

\*Corresponding author: bajang@kangwon.ac.kr

부개발 등의 인위적인 원인과 지진 같은 자연적인 원인에 의해 교란·약화되어 안정성이 저하되고 붕괴 위험성도 증가하게 된다. 특히 응력을 받음으로 인하여 발생하는 미세균열이 지하 암반을 약화시키는데 큰 영향을 미치는 것으로 알려짐에 따라 암석 시료의 미세균열 발생과 전파에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다.

일반적으로 암석의 파괴는 미세균열의 급속한 발달과 전파에 의해서 발생되며, 이러한 현상은 암석에 가해진 응력이 암석의 강도보다 클 경우에 일어나게 된다. 그러나 암석의 강도보다 낮은 수준의 응력이라도 지속적이거나, 반복적으로 가해지면 암석에는 연구변형이 발생하고 궁극적으로 파괴가 발생하게 된다. 암석이 반복하중을 받게 되면 암석 내에는 미세균열이 서서히 발달하게 되는데, 이때 암석에 발달한 미세균열의 양 및 특성은 암석의 물리적, 역학적 특성 및 공학적으로 중요한 영향을 미친다(Burdine, 1963). 암석 내의 미세균열은 암석의 체적변화계수(Walsh, 1965), 전기 비저항(Brace *et al.*, 1965), 전기 전도도(Walsh and Decker, 1966) 및 탄성파 속도(Walsh, 1966) 등의 물리적 특성을 변화시키며, 암석의 탄성계수 및 강도 등의 역학적 특성에도 상당한 영향을 미친다(O'Connell and Budiansky, 1974). 또한 방사성 폐기물 지하처분장과 같은 지하구조물에서의 미세균열은 핵종의 이동 통로가 되기도 하며, 석재에 발달한 미세균열은 석재의 질적 특성 및 내구성과 상당한 관련이 있다. 따라서 암석이 응력을 받을 때, 특히 반복하중을 받을 때 일어나는 암석의 거동과 반복하중에 의해 생성되는 미세균열의 특성 파악은 상당히 중요한 문제이다.

반복피로에 의해 암석 내에 발달한 미세균열은 차분변형을 분석, 초음파 속도 측정, 현미경을 통한 직접 관찰 등의 방법으로 연구되어 왔으나(장보안 외, 1994; 장보안과 김재동, 1995; 김영화 외, 1997; 김영화 외, 1997), 최근에는 미소파괴음(Acoustic Emission)을 이용한 미세균열에 대한 연구가 이루어지고 있다. 미소파괴음이란 고체내부에 국부적으로 형성된 변형에너지가 급격히 해소되면서 발생하는 탄성파로, 미소파괴음을 이용하여 미소파괴음을 발생시키는 발생원에 대한 위치 추적, 암석이 장기적으로 선행 응력을 받았을 경우 그 이하의 하중에서는 미소파괴음이 발생하지 않는다는 Kaiser 효과(Kaiser, 1950)와 재차 가압시 이전에 가한 최대 응력에 도달하지 못해도 미소파괴음이 발생한다는 Felicity 효과를 이용한 암석의 응력 이력과 손상도 및 초기 응력 측정에 관한 연구가 이루어져 왔다(Li and

Nordlund, 1993). 그러나 Seto *et al.*(1995)은 암석 내에서 발생하는 미소파괴음은 암석 내의 미세균열 발생과 직접적인 관계가 있으므로, 암석에 응력이 가해질 때 발생하는 미소파괴음을 분석하면 미세균열의 특성을 분석할 수 있다고 발표하였다.

따라서 본 연구에서는 화강암에 반복하중이 가해질 때 암석 내에 발달하는 미세균열의 특성과 암석의 손상정도를 미소파괴음의 측정을 통하여 규명하기 위하여, 한국원자력 연구소 내에서 시추된 복운모 화강암 코어에 대하여 파괴강도의 10-20% 수준의 반복하중을 1550 회 가하며 시료의 영구변형률, 미소파괴음 방출 특성, 탄성파 P파 속도를 측정하였고, 미소파괴음의 방출 특성에 따른 미세균열의 발달 특성과, 미소파괴음의 Felicity 비와 탄성파 P파 속도를 이용하여 암석의 손상정도를 규명하였다.

## 기초 이론

### 미소파괴음

암석 내에서 여러 가지 원인에 의하여 발생하여 센서에 전달된 미소파괴음 신호는 검출한계(threshold)를 초과하면서부터 자료획득이 시작된다. 검출한계를 초과하는 미소파괴음 하나의 신호를 타격음(hit)이라고 하며, 타격음 세기에 따라 측정되는 자료의 양이 좌우된다. 미소파괴음 신호는 물체에서 발생하는 에너지 방출에 따라 불연속적인 돌발형 신호와 일정한 연속형 신호로 구분된다.

획득된 미소파괴음 파형(wave)으로부터 자료처리를 통해 방출횟수(count), 에너지(energy), 진폭(amplitude), 지속시간(duration), 오름시간(rise time) 등의 미소파괴음 변수를 얻을 수 있다(Fig. 1). 방출횟수는 하나의 미소파괴음 파형에서 검출한계를 초과한 횟수이고, 에너지는 한 파형에 의해 방출되는 탄성에너지이다. 진폭은 최대 진폭 값으로 여러 가지 감쇠요소들로 인해 감쇠되어질 수 있으며, 감쇠요소들을 줄이기 위하여 동일한 증폭수준과 동일 형태의 센서를 사용하는 것이 좋다. 지속시간은 미소파괴음 신호가 처음 검출한계를 초과하여 측정되기 시작한 후 마지막으로 검출한계를 초과할 때까지의 시간으로 잡음 필터링에 유용하다. 오름시간은 신호가 검출한계를 초과한 후에 가장 큰 진폭까지 도달하는 시간으로, 음원과 센서 사이의 파 전파과정에 의해 제어되기 때문에 미소파괴음 신호를 전자기적 잡음으로부터 분리하기 위한 목적으로 많이 사용된다.

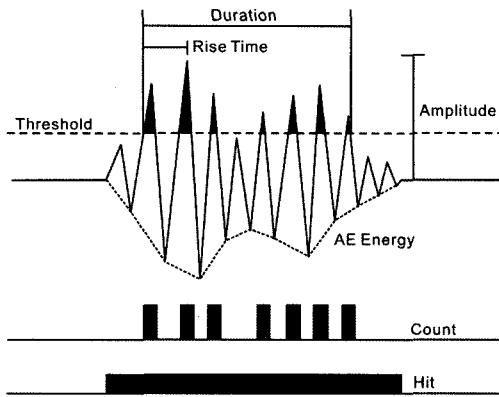


Fig. 1. Acoustic Emission parameters

### Kaiser 효과와 Felicity 효과

물체가 탄성 영역에서 변형되었을 경우에는 Kaiser 효과가 나타나므로 이를 이용하여 암반이 받았던 현지응력을 추정하거나, 기존에 설치된 콘크리트 구조물의 응력이력을 추정할 수 있다. 그러나 암반이 많은 시간이 흐른 뒤에도 응력을 기억하고 있느냐와 미소파괴음으로 측정된 현지응력이 정확한 현지응력을 나타내느냐에 관한 문제점이 제기되고 있다(Lavrov, 2003).

Kaiser 효과와 대조적으로 기존에 받았던 응력에 도달하기 전에 미소파괴음이 발생하는 경우를 Felicity 효과라 한다. 발생한 균열이 불안정한 상태일 때 기존에 받았던 응력보다 낮은 응력 하에서도 미소파괴음 신호가 발생될 수 있으며, 응력의 작용방향이 변화하거나, 환경요인에 의해 균열선단의 상태가 열화되었을 경우에도 Felicity 효과가 나타날 수 있다. 암석의 경우 비탄성이기 때문에 기존에 받았던 응력 하에서 불안정한 균열들이 발생되어 손상이 가해졌다면 기존에 받았던 응력보다 낮은 응력 하에서도 미소파괴음이 발생되어 Felicity

효과가 나타날 수 있다(Li and Nordlund, 1993).

Felicity 효과는 Kaiser 효과의 제한을 보완하며, Felicity 비 개념을 사용하여 물체의 손상도를 정량적으로 파악할 수 있다. Felicity 비는 응력을 가하면서 미소파괴음이 발생한 응력과 이전에 받았던 최대 응력의 비로 나타낸다.

## 연구 방법

### 시료

본 연구에 사용된 암석시료는 한국원자력연구소 내에서 시추된 것으로, 암반의 상태와 단열대의 분포를 파악하기 위해 시추되었다. 한국원자력연구소가 위치한 지역은 선캄브리아 변성암, 옥천계의 변성퇴적암, 중생대 화강암, 관입된 맥으로 구성되어 있으며 대부분 지역이 화강암으로 구성되어 있으며, 시추공이 위치한 지역은 복운모 화강암이 넓게 분포하는 지역으로 페그마타이트가 관입되어 있다. 복운모 화강암 결정의 크기는 중립질 내지 세립질이며, 구성광물은 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모, 피사이트가 주를 이루며 소량의 백운모와 저어콘, 루틸 등을 포함한다. 일반적으로 복운모 화강암에는 흑운모가 백운모에 비해 상대적으로 많이 포함되어 있으나 페그마타이트가 관입된 곳은 백운모의 함량이 증가되었으며, 중립질 결정으로 구성되어 있다(박희인 외, 1977).

시추된 암석코어의 직경은 4.73~4.77 cm 정도였으며 길이가 직경의 2배가 되도록 절단한 후 위·아래 면을 편평도가 0.02 mm 이내가 되도록 연마하였다. 성형이 완성된 시료를 이용해서 비중, 흡수율, 공극률을 측정하였고 건조기에서 완전 건조를 시킨 후 탄성파속도측정기(SA-2008 Seismic Analyzer)를 이용하여 측 방향의 P파와 S파 속도를 측정하였다. Table 1은 각 시료에 대

Table 1. Physical properties of rock specimen for cyclic loading test

Sample No.	Specific Gravity	Porosity (%)	Absorption (%)	P-wave Velocity (m/s)	S-wave Velocity (m/s)	UCS (MPa)	E (GPa)	$\nu$
YS-1-2	2.64	0.006	0.215	3980	2301	215	43.3	0.33
YS-4-2	2.64	0.006	0.218	3816	2619	111	46.3	0.18
YS-4-3	2.63	0.006	0.223	2756	1776	197	56.2	0.31
YS-4-4	2.68	0.004	0.167	3696	2356	127	49.3	0.29
YS-7-1	2.65	0.008	0.289	3484	2069	130	40.4	0.17
YS-7-2	2.63	0.006	0.244	3118	2233	140	45.8	0.20
YS-7-3	2.64	0.005	0.173	4749	3523	135	43.1	0.23

UCS = Uniaxial Compressive Strength, E = Young's modulus,  $\nu$  = Poisson's ratio

한 물성 및 역학시험 결과를 정리한 것이다. 시료의 비중은 2.63~2.68 정도이며 공극률은 0.008% 이하로 공극이 비교적 적은 상태임을 알 수 있다. 탄성과 속도(P파)의 경우 YS-4-3 시료를 제외한 모든 시료가 3000 m/s 이상으로 비교적 풍화를 받지 않은 상태임을 나타낸다. 물성시험이 완료된 후 같은 심도의 시료 중 측정된 물성 값이 비슷한 시료를 2개씩 선택하여 하나는 일축압축강도와 변형률 특성을 측정하였고 다른 하나는 반복하중시험용으로 사용하였다. 일축압축시험결과 강도의 경우 모든 시료가 100 MPa 이상으로 경암에 속하였고 탄성계수는 40.4~56.2 GPa 정도로 시료들 간의 편차가 적었으나 포아송 비의 경우 0.17~0.33 정도로 다소 편차가 있었다. 그러나 이러한 편차범위는 화강암의 일반적인 포아송 비 범위에서 벗어나지는 않은 것으로 판단된다.

**시험방법**

본 연구에서는 먼저 반복하중의 시험 범위를 결정하기 위하여 같은 심도에서 물성이 비슷한 시료 2개 중 하나의 시료에 대해 일축압축시험을 실시하였다. 일축압축시험 시 부착된 변형률 게이지를 통해 측정된 축 변형률( $\epsilon_a$ )과 횡 변형률( $\epsilon_r$ )을 식 (1)에 넣어 체적변형률을 구하였다.

$$\frac{\Delta V}{V} = \epsilon_a + 2\epsilon_r \tag{1}$$

일반적으로 암석의 체적변형률 곡선은 4구간으로 구분된다(Fig. 2). I구간은 체적변형률 곡선 초기의 비선형 구간으로, 기존의 미세균열이나 공극이 닫히며 초기균열

밀도와 공극밀도에 따라 변형률이 결정된다. II구간은 암석이 탄성적으로 변형하는 선형구간으로 체적변형률 곡선의 직선구간에 속하며, 암석의 탄성계수나 포아송 비를 이 구간에서 측정할 수 있다. III구간은 II구간에서 비선형을 띄기 시작하는 구간으로 이 구간에서는 하중의 증가를 중지하면 더 이상 균열이 발생하거나 전파하지 않는 안정한 미세균열이 생성되며, 암석의 체적 팽창이 시작하는 구간이다. 마지막으로 IV구간은 체적변형률이 감소하는 구간으로 가해지는 응력이 제거되어도 계속 균열이 발생·전파되는 불안정한 미세균열이 발생되며 본격적인 체적 팽창이 이루어지는 구간이다. I구간과 II구간, 즉 기존에 생성되었던 균열과 공극이 닫히는 구간, 탄성거동을 보이는 구간에서는 암석 내 균열 생성과 전파에 따른 암석의 손상 및 파괴에 큰 영향을 미치는 구간이 아닌 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 I구간과 II구간 내에서 반복하중 시험의 하중범위로 결정하여 이 구간 내에서 반복하중이 가해질 때 암석의 미세균열 발달거동을 변형률과 미소파괴음 측정으로 연구하였다. 모든 시료의 체적변형률 곡선으로부터 얻어진 II구간과 III구간의 경계 응력 값을 측정한 결과 일축압축강도의 약 40~50% 정도로 측정됨에 따라 일축압축강도의 20% 이하에서 반복하중 시험 범위를 결정하였다.

반복하중시험은 경도정밀사에서 제작한 servo control 이 가능한 압축시험기를 이용하였고, 미소파괴음은 미국 Physical Acoustics Corporation(PAC)사의  $\mu$ DISP 시스템을 사용하여 측정하였다. 암석의 변형률 측정은 일본 Kyowa사에서 제작된 길이 5mm의 변형률 게이지를 사용하였으며, 획득된 변형률은 일본 Kyowa사에서 제작된 sensor interface, PCD-300A와 PCD-320A를 통해 연결된 컴퓨터에 기록·저장된다. 본 연구에서 사용한 시험장비의 모식도는 Fig. 3과 같다.

시험에 앞서 각 시료는 암석의 손상도 평가를 위해 일축압축강도의 40% 정도의 응력으로 선행응력(pre-stress)을 각인시켰다. 반복하중 시험은 5 MPa/sec의 하중속도로 1550회의 반복 하중을 가하였으며, 반복하중이 가해지는 동안 암석의 변형률과 암석 내에서 발생하는 미소파괴음을 측정하였다. 또한 반복하중을 가하는 도중에 50회, 150회, 350회, 750회, 1550회에서 반복하중 시험을 멈추고 0.5 MPa/sec의 하중속도로 일축압축강도의 약 45%까지 일축압축응력을 가하여 미소파괴음을 측정하고 Felicity 비를 계산하였다(Fig. 4). 또한 탄성과 속도(P파 속도)를 측정하여 Felicity 비에 의한 암석의 손상도 평가와 비교하였다. Table 2는 반복하중 시

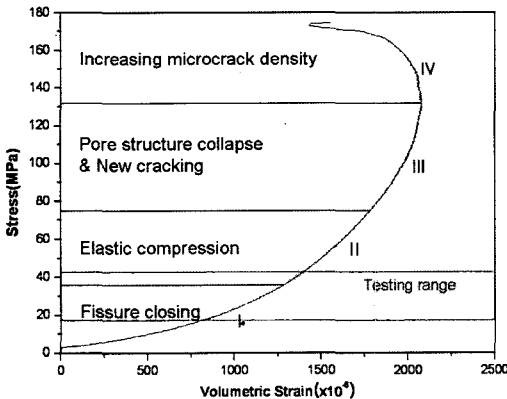


Fig. 2. The stress - volumetric strain curve.

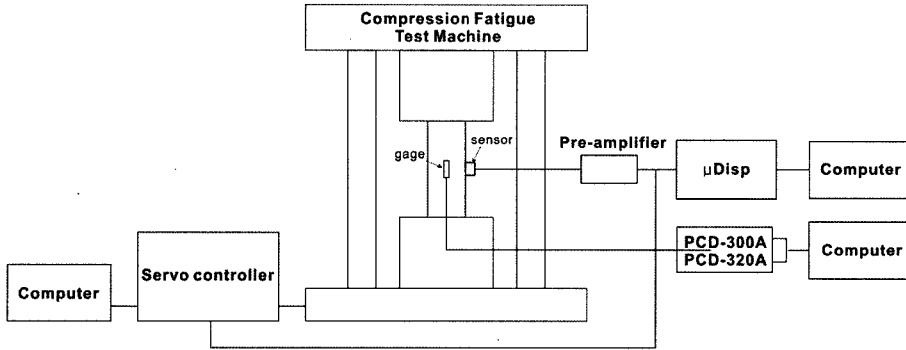


Fig. 3. A schematic diagram of measuring system.

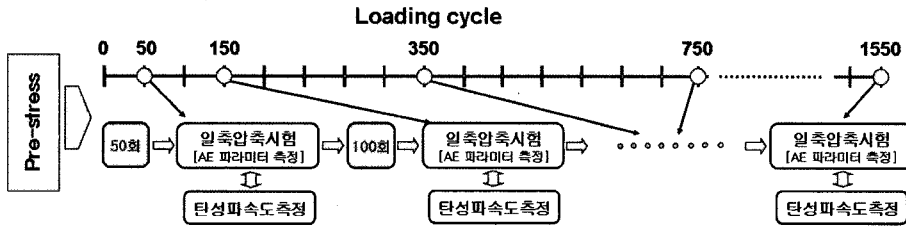


Fig. 4. Flow of cyclic loading test.

Table 2. Parameters of cyclic loading test.

Sample No.	UCS (MPa)	Pre-Stress (MPa)	Stress range of cyclic loading (MPa)	Frequency (Hz)
YS-1-2	215	86	21.5~43.0	0.223
YS-4-2	111	44	11.1~22.2	0.445
YS-4-3	197	79	19.7~39.4	0.248
YS-4-4	127	51	12.7~25.4	0.406
YS-7-1	130	52	13.0~26.0	0.406
YS-7-2	140	56	14.0~28.0	0.352
YS-7-3	135	54	13.5~27.0	0.358

험을 위해 각 시료에 적용된 선행응력과 반복하중 시험 범위, 주파수를 정리한 것이다.

### 결과 및 고찰

#### 반복하중 시험 하에서의 암석의 변형거동

본 연구에서는 반복하중 시험 하에서 측정된 축 방향 변형률의 변화만을 관찰하여 암석의 변형거동을 유추하였으며, 반복하중 범위 내에서 획득된 변형률 중 최대응력에서의 1회와 마지막 반복횟수에서의 변형률만을 측정하여 반복횟수에 따라 그래프에 도시하였다(Fig. 5). 반복하중을 가하는 동안 설정된 하중범위 내에서 반복

횟수가 증가할수록 축 방향 변형률이 계속적으로 증가하는 형태를 보이고 있고 하중을 제거하였을 때도 이전의 변형률로 회복되지 않는 것을 알 수 있다. 반복하중에 의한 시료의 축 방향 변형률 특성을 분석하기 위하여 식 (2)을 이용하여 영구 축 방향 변형률(permanent axial strain)을 계산하고 Fig. 6과 같이 영구 축 방향 변형률과 반복하중횟수의 관계 그래프를 도시하여 하였다.

$$\epsilon_{\text{permanent}} = \epsilon_{\text{axial2}} - \epsilon_{\text{axial1}} \quad (2)$$

Fig. 6은 모든 시료에서 반복횟수가 증가할수록 영구 축 방향 변형률이 증가하는 양상을 보여준다. 특히, 대

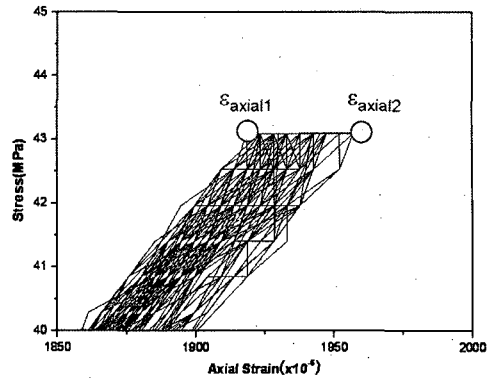
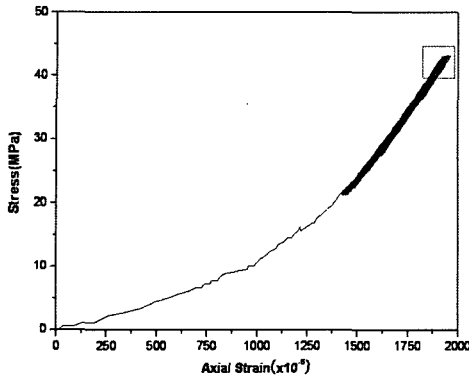


Fig. 5. Stress - axial strain curve in cyclic loading test.

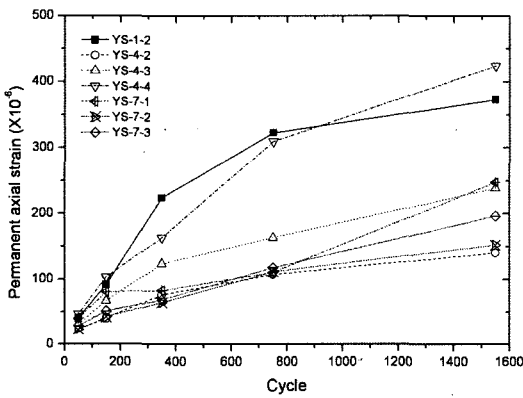


Fig. 6. Cycle - permanent axial strain curve in cyclic loading test

부분의 시료에서 반복횟수가 400회 이하인 구간에서는 영구 축 방향 변형률이 비교적 큰 폭으로 증가하다가 400회 이상인 부분부터는 증가 폭이 다소 감소하는 형태를 보였다. 그러나 YS-1-2와 YS-4-4 시료의 경우 800회까지 영구 축방향 변형률이 큰 폭으로 증가하였고 다른 시료들에 비해 변형률의 크기도 약 두 배 정도 크

게 발생되었다. 이같이 영구 축 방향 변형률이 증가하는 것은 암석 내에 미세균열의 발달이 계속적으로 발생하고 있다는 것을 지시하며 일축압축시험에서 측정된 체적변형률 곡선의 I단계와 II단계 구간에서도 반복하중을 가하면 미세균열이 발달함을 확인해 준다. Table 3은 각 시료에서의 영구 축 방향 변형률을 정리한 것으로 반복하중이 가해지는 동안 YS-4-4 시료에서 가장 큰 424  $\mu\epsilon$  정도의 영구변형이 발생하였고, YS-4-2 시료의 경우 140  $\mu\epsilon$  정도로 가장 적은 영구변형이 발생되었다.

**반복하중 시험 하에서의 암석의 미소파괴음 특성**

1550회의 반복하중을 가하면서 미소파괴음을 측정할 결과 반복하중 시험동안 지속적으로 미소파괴음이 발생하였고, 미소파괴음의 방출횟수, 에너지, 진폭, 평균주파수 등의 미소파괴음 파라미터를 분석한 결과 전반적으로 2가지의 분포 특성을 보였다.

Fig. 7은 YS-1-2시료에 50회의 반복하중을 가하는 동안 측정된 미소파괴음 변수의 분포 특성을 나타낸다. 미소파괴음 방출횟수는 900회 이하의 범위에서, 에너지는 150 이하의 범위에서 매우 분산된 형태를 보인다. 진폭

Table 3. Axial strain difference in cyclic loading test.

Specimen No.	Permanent axial strain ( $\mu\epsilon$ )				
	50	150	350	750	1550
YS-1-2	41	91	223	322	373
YS-4-2	25	41	76	107	140
YS-4-3	32	67	123	163	238
YS-4-4	47	103	163	309	424
YS-7-1	41	80	82	110	247
YS-7-2	23	43	64	111	152
YS-7-3	30	51	68	117	196

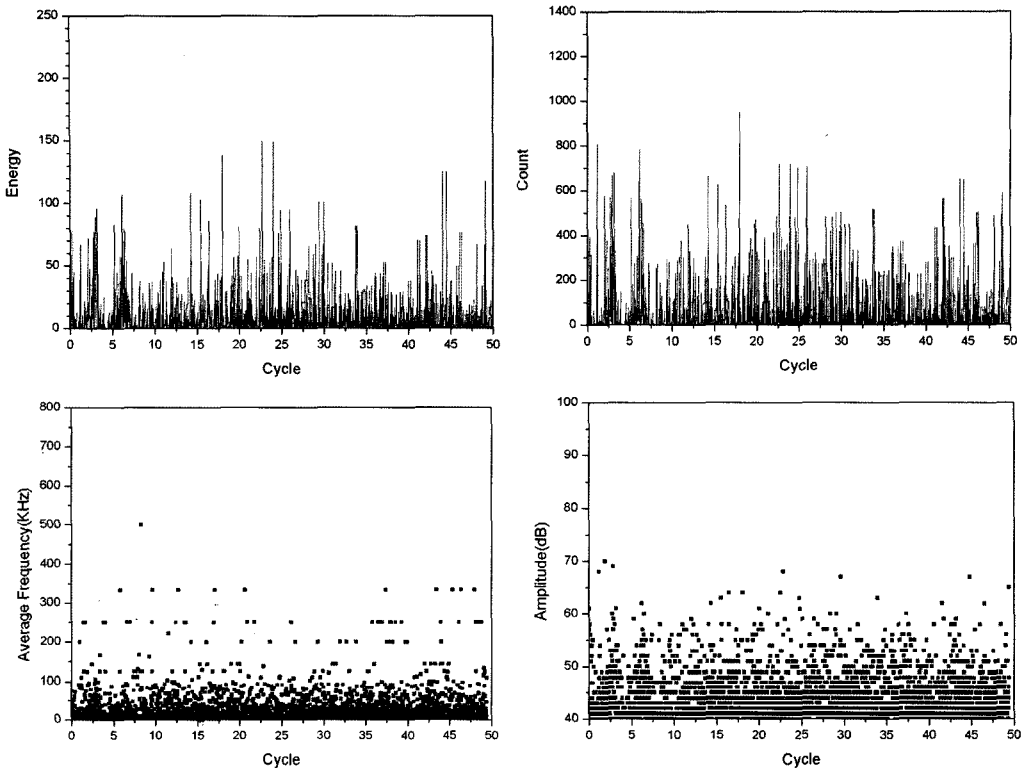


Fig. 7. Acoustic emission parameters measured during 50 cycles of loading.

은 40~70 dB 범위를 보이나 대부분 40~50 dB 범위에 분포하고 있으며, 평균주파수는 0~500 kHz의 넓은 범위에 분산되어 있으나 주로 100 kHz 이하에서 분포한다. 이렇게 낮은 에너지와 분산된 주파수 특성을 보이는 미소파괴음 방출 형태를 type 1이라 구분하였고, 대부분의 시료에서 낮은 반복횟수에서 나타나지만 시료에 따라 750회까지도 나타난다.

Fig. 8은 YS-1-2 시료에 150회에서 350회의 반복하중을 가할 때 측정된 미소파괴음 변수로, 방출횟수, 에너지, 진폭, 평균주파수가 일정한 구간 내에 분포하고 있다. 이 시료의 방출횟수는 2000~6000회의 범위에서, 에너지는 1200~3000의 범위에서, 진폭은 40~60 dB의 범위에서, 평균주파수는 80~130 kHz의 범위에서 집중적으로 분포하고 있어서 type 1과 상당히 다른 형태를 보인다. 이러한 미소파괴음 분포 특성을 type 2로 구분하였으며, 모든 시료에서 높은 반복횟수에서 나타난다.

Type 1의 경우 응력이 가해질 때에는 미소파괴음이 방출되지만 응력이 제거될 때에는 미소파괴음이 방출되지 않으나 type 2에서는 응력이 가해질 때에는 아주 많

은 미소파괴음이 방출되고(약 6000회), 응력이 제거될 때에도 많은 미소파괴음이 방출되어(약 2000회) 지속적인 미세균열의 변위가 발생하고 있음을 의미한다. Rice and Johnson(1970)은 길이가 작은 미세균열은 낮은 에너지와 높은 주파수를 가진 미소파괴음을 방출하고, 길이가 긴 미세균열은 높은 에너지와 낮은 주파수의 미소파괴음을 방출한다고 보고하였다. Type 1의 미소파괴음은 낮은 에너지와 다양한 주파수의 특성을 보여(Fig. 9(A)), type 1의 미소파괴음은 다양한 길이를 가진 미세균열에서 발생한 미소파괴음으로 판단된다. 그러나 type 2의 미소파괴음은 높은 에너지와 일정한 주파수 특성을 보여 type 2의 미소파괴음은 길이가 길며, 일정한 길이를 가진 미세균열들이 발생하는 미소파괴음으로 판단된다(Fig. 9(B)).

이 연구에서 가해진 반복하중은 파괴응력의 10~20%로 매우 낮은 응력수준이다. 이러한 응력 수준은 미세균열이 일정한 길이까지 성장한 후 성장을 멈추는 안정적 성장(stable crack growth)을 하는 구간이므로 새로운 미세균열이 발생하기보다는 기존의 미세균열들이 닫히

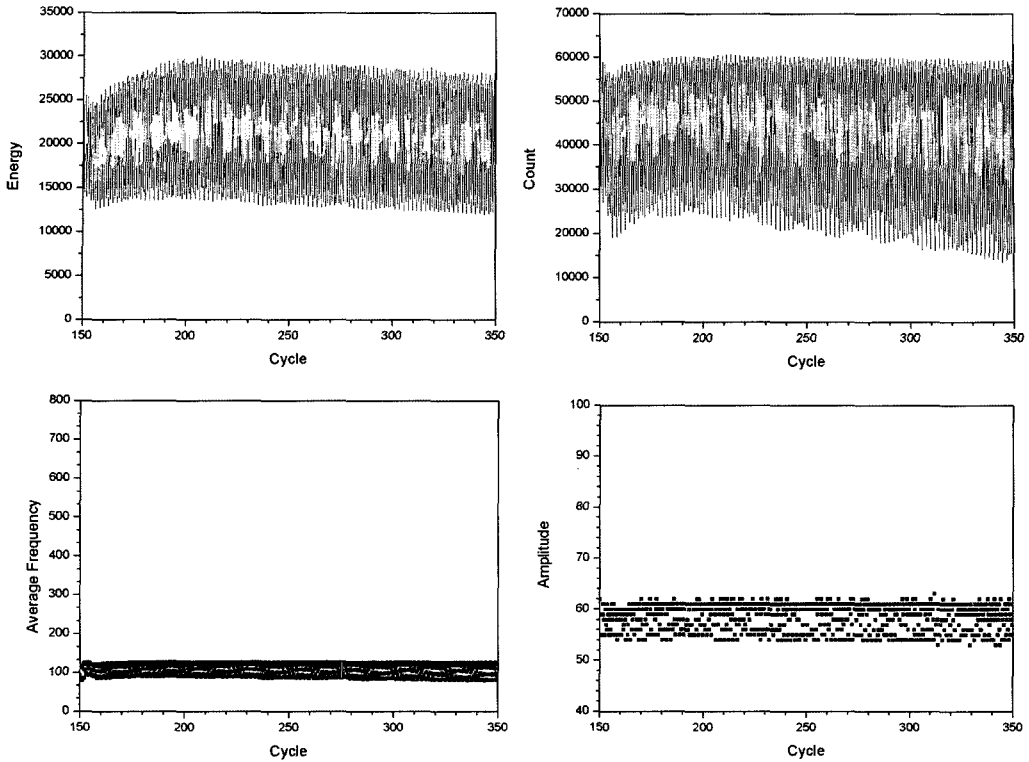


Fig. 8. Acoustic emission parameters measured during 150 - 350 cycles of loading.

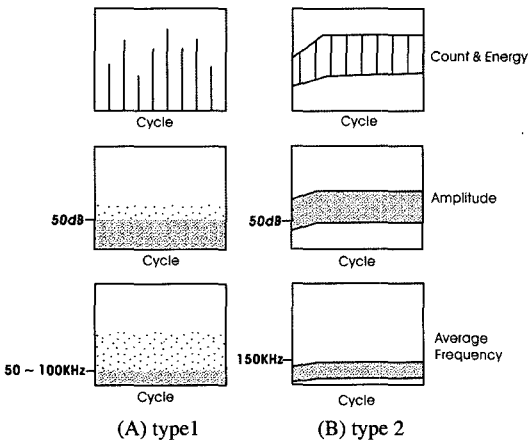


Fig. 9. A schematic diagram of acoustic emission properties in cyclic loading test.

거나, 혹은 미세균열의 선단에서 미세균열들의 길이가 길어질 것으로 판단된다. 그러므로 type 1의 미소파괴음은 모든 시료에서 초기 반복횟수동안 나타나 시료 내의 공극 혹은 기존의 미세균열이 닫히거나, 짧은 미세균열

의 선단에서 미세균열이 전파하여 거의 일정한 길이까지 성장하면서 발생하는 특성을 보여주고 있는 것으로 사료된다. 또한 type 1의 미소파괴음이 발생하는 동안 모든 미세균열은 안정된 길이까지 성장하였으므로 더 이상의 반복하중이 가하여져도 시료 내에서는 미세균열이 발생하거나 성장하지는 않을 것이다. 그러므로 type 2의 미소파괴음은 이미 성장을 완료한 미세균열들이 반복하중에 의하여 전단변위나, 미세균열들이 닫힌 후 열리는 변형을 보이며 발생하는 특성을 보여주는 것으로 사료된다.

**미소파괴음을 이용한 반복하중 하에서의 압축의 손상도 평가**

응력을 받은 물체에 대한 손상도 평가를 위해 여러 가지 방법이 적용되어져 왔고 최근에는 비파괴시험인 미소파괴음 측정을 통한 손상도 평가가 연구되어 지고 있다. 미소파괴음 이론에 따르면 압축이 손상을 받지 않았을 경우 재차 응력이 가해질 때 이전에 받았던 응력 이상에서 미소파괴음이 발생되어 Kaiser 효과가 나타나고



손상을 받았을 경우 이전에 받았던 응력에 도달하기 전에 미소파괴음이 발생되어 Felicity 효과가 나타난다. 암석의 경우 비탄성이기 때문에 기존에 받았던 응력 하에서 불안정한 균열이 발생되어 손상을 입었다면 기존에 받았던 응력보다 낮은 응력 하에서 미소파괴음이 발생되어 Felicity 효과를 나타낼 수 있다. 일반적으로 Kaiser 효과와 Felicity 효과를 정량적으로 나타내기 위해 식 (3)과 같은 Felicity 비를 이용한다.

$$\text{Felicity ratio} = \frac{\text{미소파괴음이 발생한 응력}}{\text{시료가 이전에 받았던 최대 응력}} \quad (3)$$

암석의 경우 0.9 이상의 Felicity 비를 나타내면 Kaiser 효과로, 0.9 미만의 값을 나타내면 Felicity 효과로 판단한다(심현진, 1999).

본 연구에서는 반복하중 시험 중 단계별로 시험을 중단하고 일축압축강도의 45%까지 하중속도 0.5 MPa/sec로 일축압축 응력을 가하면서 미소파괴음이 급격하게 발생하는 응력 값을 측정 후 Felicity 비를 계산하였다. 또한 탄성과 속도(P파 속도)를 측정하여 미소파괴음으로 판단된 손상도와 비교하였다.

Fig. 10은 반복하중횟수에 따른 Felicity 비 및 탄성과 속도의 변화를 보여준다. 모든 시료에서 반복하중이 진행되어도 P파 속도는 거의 감소하거나 증가하지 않음을 알 수 있다. 이는 반복하중시험을 통해서도 탄성과 속도나 강도에 영향을 미치는 큰 규모의 균열이 발달하지 않았음을 지시하며, 탄성과 속도의 경우 미세균열의 발달에 의해 암석의 손상 정도를 지시하는데 효과적이지 못함을 알 수 있다. 그러나 각 시료별로 계산된 Felicity 비를 보면, YS-4-4 시료와 YS-7-3 시료의 경우 50회까

지, YS-4-2 시료의 경우는 150회의 반복하중을 가하였을 때까지 Felicity 비는 0.9 이상을 보여 Kaiser 효과를 나타내고, 그 이후의 반복횟수에서는 Felicity 비가 0.9 이하를 보여 Felicity 효과가 나타남을 알 수 있다. 그 외 4개의 시료에서는 반복횟수 50회에서부터 Felicity 비가 0.18~0.49를 나타내고 있으며 1550회의 반복하중을 받은 후에는 0.09~0.35의 Felicity 비를 보여 시료가 상당히 손상되었음을 지시한다. 위의 결과를 통해 볼 때 반복하중을 받는 암석 시료의 경우 하중의 크기와 반복횟수 시료의 물리적, 역학적 특성에 따라 약간의 차이는 있을 수 있으나, 대부분의 시료에서 많은 수의 미세균열이 발생하였음을 지시한다. 특히 암석 내에 대규모의 균열 발달 없이 미세균열만 발달하는 경우에는 탄성과 속도는 암석의 손상정도를 지시하지 못하는 반면에 미소파괴음을 이용한 Felicity 비는 암석내의 미세균열의 발달정도를 매우 잘 지시하는 것으로 사료된다.

### 결론

화강암에 반복하중이 가해질 때 암석 내에 발달하는 미세균열의 특성과 암석의 손상정도를 미소파괴음의 측정을 통하여 규명하였다. 암석의 파괴강도의 40%를 선행응력으로 가한 후 파괴강도의 10~20%의 반복하중을 1550회까지 가하며 시료의 변형률을 분석한 결과 모든 시료에서 반복하중이 진행됨에 따라 영구 축 방향 변형률이 증가하였고 최종적으로 140~425  $\mu\epsilon$  정도의 영구 축 방향 변형률이 발생한 것으로 나타났다. 또한 미소파괴음을 측정된 결과 낮은 에너지와 분산된 주파수 특성을 보이는 미소파괴음 방출 형태와(type 1) 높은 에너지와 일정한 주파수를 보이는 미소파괴음 방출형태가(type 2) 측정되었다. Type 1의 미소파괴음 방출형태는 모든 시료에서 초기 반복횟수동안 나타나 시료 내의 공극 혹은 기존의 미세균열이 닫히거나, 짧은 미세균열의 선단에서 미세균열이 전파하여 거의 일정한 길이까지 성장하면서 발생하는 특성을 보여주고 있는 것으로 사료되고, type 2의 미소파괴음은 이미 성장을 완료한 미세균열들이 반복하중에 의하여 전단변위나, 미세균열들이 닫힌 후 열리는 변형을 보이며 발생하는 특성을 보여주는 것으로 사료된다.

반복횟수 50회, 150회, 350회, 750회, 1550회에서 반복하중 시험을 멈추고 시료의 P파 속도와 0.5 MPa/sec의 하중속도로 일축압축강도의 약 45%까지 일축압축응력을 가하여 미소파괴음을 측정된 결과, 모든 시료에서

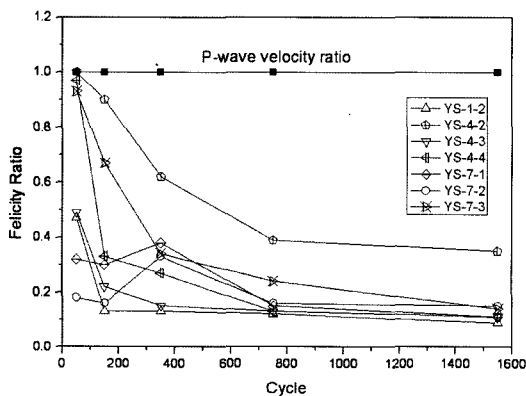


Fig. 10. Felicity ratios in cyclic loading test.

P파 속도는 거의 변화가 없었고 미소파괴음 측정을 통해 계산된 Felicity 비의 경우 반복횟수가 증가함에 점차적으로 감소하였다. 따라서 암석 내에 대규모의 균열 발달없이 미세균열만 발달하는 경우에 탄성과 P파 속도는 암석의 손상정도를 지시하지 못하는 반면에 미소파괴음을 이용한 Felicity 비는 암석내의 미세균열의 발달정도를 매우 잘 지시하는 것으로 사료된다.

## 사 사

이 연구는 강원대학교 부설 자원개발연구소의 일부 지원으로 수행되었으며, 아울러 시료를 제공해준 한국원자력연구소에도 감사드린다.

## 참 고 문 헌

- 김영화, 장보안, 김재동, 이찬구, 문병관, 1997, 압축피로에 의한 포천화강암의 P파속도 변화특성, *자원환경지질*, 30(3), pp.231-240.
- 김영화, 장보안, 문병관, 1997, 압축피로에 의한 포천화강암의 미세균열 발달과 P파 속도 이방성, *자원환경지질*, 30(4), pp.353-362.
- 심현진, 1999, 암석 및 콘크리트의 압축변형거동과 미소파괴음 측정에 관한 연구, 서울대학교, 석사학위논문, 83p.
- 장보안, 최인선, 김재동, 1994, 피로하중에 의한 화강암류 암석의 미세균열 발달 특성, *지질학회지*, 30(6), pp.613-631.
- 장보안, 김재동, 1995, 압축피로하중에 의한 반려암, 사암 및 대리암에서의 미세균열 발달, 터널과 지하공간, 5(3), pp.240-250.
- 박희인, 이준동, 정지근, 1977, 한국지질도 유성도폭, 자원개발연구소, 21p.
- 허종석, 2000, 삼축 압축 하에서 암석의 미소파괴음 측정과 변형 파괴 특성, 서울대학교, 석사학위논문, 142p.
- Brace, W.F., Paulding, B.W. and Scholz, C.H., 1965, Dilatancy in the fracture of crystalline rocks, *Jour. Geophys. Res.*, 71, pp.3939-3953.
- Burdine N.T., 1963, Rock failure under dynamic loading, *Soc. of Petrol. Engin. Jour. March*, pp.1-8.
- Kaiser J, 1950, Untersuchungen uber das auftreten Gerauschen beim zugversuch(An investigation into the occurrence of noises in tensile tests or a study of acoustic phenomena tensile tests), Ph. D. Thesis Technische Hochschule Munchen, Munich Germany.
- Lavrov, A., 2003, The Kaiser effect in rocks : principles and stress estimation techniques, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 40, pp.151-171.
- Li, C., Nordlund, E., 1993, Assessment of damage in rock using the Kaiser effect of acoustic emission, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 30, pp.943-946.
- O'connel, B.J. and Budiansky, B., 1974, Seismic velocities in dry and cracked solids, *Jour. Geophys. Res.*, 79, pp.5412-5425.
- Rice, J. and Johnson, M., 1970, Inelastic behavior of solid, McGraw Hill, 641p.
- Seto, M., Utagawa, M and Katsuyama, K., 1995, The relation between the variation of AE hypocenters and the Kaiser effect of Shirahama sandstone, *Proceedings of the 8th Int. Cong. on Rock Mechanics*, Tokyo, pp.201-205.
- Walsh, J.B., 1965, The effect of cracks on compressibility of rock, *Jour. Geophys. Res.*, 70, pp.381-389.
- Walsh, J. B., 1966, Seismic wave attenuation in rock due to friction, *Jour. Geophys. Res.*, 71, pp.2591-2599.
- Walsh, J.B. and Decker, E.R., 1966, Effect of pressure and saturating fluid on thermal conductivity of compact rock, *Jour. Geophys. Res.*, 71, pp.3053-3060.

---

2006년 8월 10일 원고접수, 2006년 9월 4일 게재승인

### 장현식

강원대학교 자연과학대학 지구물리학과  
200-701, 강원도 춘천시 효자2동 192번지  
Tel: 033-244-9275  
Fax: 033-244-9276  
E-mail: whitennull@kangwon.ac.kr

### 마연실

(주) 지오이엔지  
135-230, 서울시 강남구 일원동 639-3 금산빌딩 5층  
Tel: 02-3412-0631  
Fax: 02-3412-0633  
E-mail: yonshill@mate.com

### 장보안

강원대학교 자연과학대학 지구물리학과  
200-701, 강원도 춘천시 효자2동 192번지  
Tel: 033-250-8583  
Fax: 033-244-9276  
E-mail: bajang@kangwon.ac.kr