

압축피로하중에 의한 반려암, 사암 및 대리암에서의 미세균열 발달¹⁾

장보안²⁾ · 김재동³⁾

Microcrack Development in Gabbro, Sandstone and Marble due to Fatigue Stress

Bo-An Jang and Jae-Dong Kim

ABSTRACT Microcrack development in the Macheon gabbro, the Sangju sandstone and the Jungsun marble due to fatigue stresses was investigated using differential strain analysis and microscopic observations from fluorescent-dyed thin sections. In the Macheon gabbro, various types of cracks, including grain boundary cracks, cleavage cracks, intragranular cracks and intergranular cracks were developed. However, only grain boundary cracks were produced in the Sangju sandstone and the Jungsun marble due to fatigue stress. Many microcracks were produced due to fatigue stresses in the Macheon gabbro. However, few microcracks were produced in the Sangju sandstone and the Jungsun marble. Fatigue stresses produced new microcracks in the Junngsun marble and the Macheon gabbro, but only pre-existing grain boundary cracks were lengthened in the Sangju sandstone. Most microcracks were produced within a few tens of numbers of cyclic loading, indicating that rocks under fatigue stresses will be damaged at the early stage of cyclic loading.

1. 서 론

반복하중 상태하에서의 암석의 거동은 공학적으로 상당히 중요한 문제중의 하나이다. 특히 댐의 기초나 터널, 지하공동과 같은 지하구조물 뿐만 아니라 원자력 발전소의 기초 등의 토목공사시 발파나 천공 등의 작업에 의하여 주변 암반은 반복되는 하중을 받게 된다. 이러한 반복하중은 암석에 피로현상을 유발하고, 암석내에는 미세균열이 발달하며, 따라서 강도 이하의 하중에서도 파괴가 발생한다.

암석은 일반적으로 파괴강도의 1/2 이상의 하중을 받게 되면 dilatancy가 발생하게 되며 미소균열음이 급격히 증가한다.^{1,2)} 이러한 dilatancy와 미소균열음은 암석내에 미세균열이 생성되기 때문인 것으로 알려져 있다. 따라서 암석에 파괴강도의 1/2 이상의 하중이 반복적으로 가해지면 암석내에는 미세균열이 생성되고, 미세균열의 발달량 및 특성은 암석의 물리적, 역학적 특성에 중요한 영향을 미친다. 암석내의 미세균열은 암석의 체

적변형계수,³⁾ 전기비저항,⁴⁾ 전기전도도⁵⁾ 및 탄성파속도⁶⁾ 등의 물리적 특성 뿐만 아니라 암석의 탄성계수⁷⁾ 및 강도 등의 역학적 특성에 상당한 영향을 미친다. 또한 방사능 폐기물 지하처분장과 같은 지하구조물에서의 미세균열은 핵종의 이동통로가 되기도 하며, 석재에 발달한 미세균열은 석재의 질적 특성 및 내구성과 상당한 관련이 있다.

본 연구에서는 사암, 대리암 및 반려암을 대상으로 반복하중이 가해질 때 암석내에 발달하는 미세균열의 발달량 및 특성을 차분변형률분석(Differential Strain Analysis, 이하 DSA) 및 미세균열 염색에 의한 현미경 관찰을 통하여 규명하였다. 현재까지 이루어진

* 1995년 8월 29일 접수

- 1) 이 논문은 한국학술진흥재단 1991년도 대학부설연구소 지원과제인 "국내산 석재의 물리적, 화학적, 역학적 특성 및 내구성에 관한 연구"의 일부임
- 2) 정회원, 강원대학교 지구물리학과 조교수
- 3) 정회원, 강원대학교 자원공학과 부교수

Table 1. Physical properties of rocks

Properties \ Rock	Sangu Sandstone	Jungsun Marble	Macheon Gabbro
P-wave Velocity (m/sec)	5,625	4,239	2,719
Porosity (%)	0.65	0.75	0.91
Specific Gravity	2.71	2.72	2.83
Compressive Strength (MPa)	175	96	103
Tensile Strength (Mpa)	13.9	6.0	6.5
Poisson's Ratio	0.238	0.227	0.185
Young's Modulus (GPa)	85.15	52.18	47.83

피로하중에 대한 연구는 주로 피로하중에 따른 암석의 거동이나 피로하중수준에 따른 파괴횟수를 지시하는 S-N 곡선의 연구에 주안점이 주어졌으나,^{8,11)} 본 연구에서는 피로하중수준과 피로하중의 반복횟수에 따른 암석의 손상정도를 미세균열의 연구를 통하여 규명하였다.

2. 암석 시료

본 연구에서는 현재 석재로 시판되고 있는 상주 사암(상주석), 정선 대리암(정선석) 및 마천 반려암(마천석)을 대상시료로 이용하였다. 각 암석시료의 지질학적 특성은 현미경 관찰을 통하여 측정하였다. 상주석은 대부분의 구성광물이 1 mm 이하로 존재하는 세립질의 흑색 사암으로 주로 석영(40%), 정장석(14%), 사장석(4%)과 미립의 석영과 장석 입자들로 구성된 기질(36%)로 되어 있고 운모등이 소량 분포한다. 정선석은 구성광물의 입자 크기가 1 mm 이하로 존재하는 세립질의 대리암으로 방해석이 주를 이루고, 열리면을 따라 미립의 석영 입자와 백운모 등이 분포한다. 마천석은 암회색의 중립 내지 조립질 반려암으로, 주구성 광물은 사장석(60%), 휘석(20%) 등이고, 부구성광물로 감람석(8%), 흑운모(4%), 석영(3%), 각섬석(3%)등이 함유되어 있다.

암석의 기본적인 물리적, 역학적 특성은 P파 속도, 공극률, 비중, 압축 및 인장 강도, Young을 및 Poisson비 등의 측정을 통하여 파악하였으며 Table 1에 수록되어 있다.

3. 시험 방법

3.1 압축피로시험

석산에서 채취된 약 30 cm × 30 cm × 30 cm 크기의 블록에서 NX core를 채취한 후, ISRM 표준시험법에

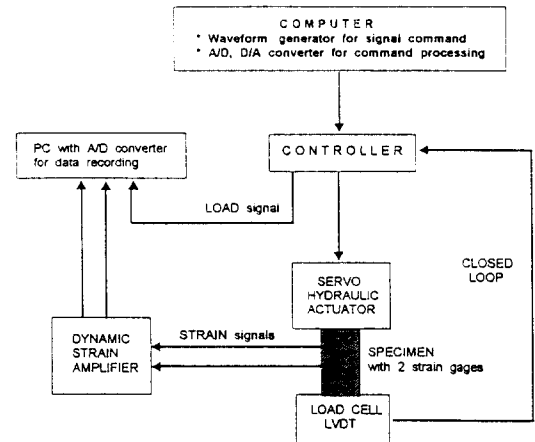


Fig. 1. Block diagram showing the overall setup for the fatigue test.

의거하여 시편을 성형하였다. 성형된 시편에 대하여 압축피로하중에 따른 변형거동을 측정하기 위하여 시편의 측면 중앙부에 종방향 및 횡방향으로 2개의 변형률 게이지를 부착하였다. 하중속도는 암석의 일반적인 공학적 환경으로 볼 때 상당히 가혹한 수준이라 할 수 있는 870 kg/cm²/sec를 피로시험조건으로 설정하였고, 2-4개의 시료에 대하여 동하중강도를 구한 후, 동하중강도의 60%와 80%를 피로상한하중으로 동하중강도의 5%를 피로하한하중으로 설정하였다. 한편 암중에 따라 동하중강도가 다르므로 각 암종별로 피로하중의 주파수를 조정하여 하중속도가 870 kg/cm²/sec로 일정하게 유지될 수 있도록 하였으며, 가압시의 하중파형은 sine파를 이용하였다.

가압용 시험기는 하중속도, 변위 및 변형율의 속도제어가 가능한 Dynamic Servo Test System(미 SBEL사 제품: model 547, 용량 140톤)을 이용하였으며, 하중의 변화에 따른 종방향 및 횡방향 변형율은 변형률증폭기(Sanei, model 6M46-6)를 거친 후 이날로그 디지털 변환장치에 의해 디지털신호로 변환시켜 개인용 컴

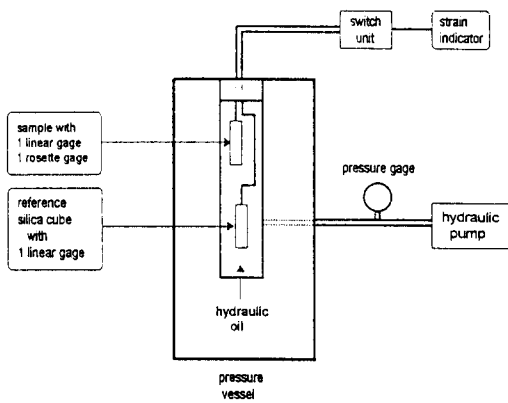


Fig. 2. Block diagram for the differential strain analysis.

퓨터에 자동 기록하였다(Fig. 1).

3.2 차분 변형을 분석

DSA는 Simmons *et al.*(1974)과 Siegfried and Simmons(1978)에 의하여 개발된 방법으로,^{12,13)} 암석 시료 및 실리카 큐브(reference silica cube)의 표면에 변형률계이지를 부착하여 정수압하에서 압력에 따른 변형률을 측정하므로써 암석내에 분포하고 있는 미세 균열의 양, 방향 및 특성(aspect ratio)을 정밀하게 측정할 수 있다. 이 때 암석시료 및 실리카 큐브의 변형률은 동일한 실험 조건하에서 측정하여야 하며 오차는 2×10^{-6} 이내이다. 실리카 큐브는 압력실내의 온도변화나 기타의 환경변화에 따른 오차를 감소시키기 위하여 사용된다(Fig. 2).

DSA용 시료는 먼저 압축피로하중을 받은 NX core에서 하중축에 평행한 방향으로 직경 2.54 cm의 시료를 채취한 후 길이가 2.54 cm 되게 절단하였다. 압축피로하중에 의하여 파괴되지 않은 core의 경우 중앙에서, 파괴된 core에서는 끝부분에서 DSA용 시료를 채취하였다. 채취된 DSA용 시료는 아랫면에는 rosette gage를, 옆면에는 linear gage를 부착하기 위하여 산화 알루미늄을 이용하여 편평하게 연마하였다. 준비된 시료를 진공속에서 24시간 이상 건조한 후, 시료 및 실리카 큐브의 표면에 변형률계이지를 부착하였다. DSA 시험시 압력실내에서 암석시료 및 실리카 큐브내에 유압유가 스며드는 것을 방지하기 위하여 시료 및 실리카 큐브를 미국 Dow Corning사의 Sylgard 186으로 밀봉하였다. 변형률은 압력을 50 MPa까지는 5 MPa씩, 50 MPa 이상에서는 10 MPa-15 MPa씩 증가시키면서 측

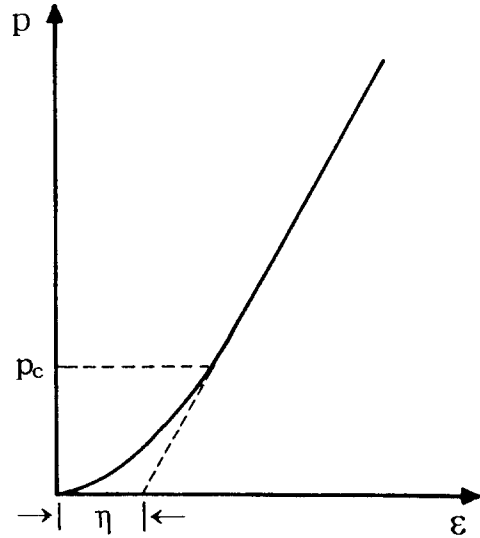


Fig. 3. Schematic pressure-strain behavior.

정하였고, 최대 압력은 250 MPa 이었다. 각 단계의 압력을 증가시킨후 10분 후에 변형률을 측정하여 압력계의 압력과 압력실의 압력이 평형을 이룰 수 있도록 하였다.

3.3 미세균열 염색법

각 압중에서 약 1000회의 압축 피로하중을 받은 시편을 선정하여 미국의 Terratek Inc.에서 형광염료를 이용한 미세균열의 염색을 실시하였다. 염색된 시편에서 박편을 제작하여 자외선 반사현미경하에서 미세균열의 발달특성을 관찰하였다. 자외선 반사현미경으로는 미세균열의 관찰은 가능한 반면에 구성광물의 종류 및 입자의 경계구분은 불가능하다. 따라서 편광현미경으로 박편을 관찰하여 자외선 반사현미경하에서의 미세균열의 관찰과 비교 검토함으로써, 미세균열의 발달 위치 및 광물조성에 따른 미세균열의 발달정도를 분석하였다.

4. DSA의 배경 이론

미세균열이 분포하고 있지 않은 암석의 거동이 선형 탄성적이라고 가정하면, 정수압하에서 암석에 발생하는 변형률은 압력에 대하여 직선의 관계를 보일 것이다. 그러나 암석내에 미세균열이 분포하면, 미세균열은 낮은 압력에서 닫히게 되어 미세균열에 의한 변형률이

Table 2. Numbers of cyclic loading applied to specimens

	60% of Dynamic Strength				80% of Dynamic Strength			
Sangju Sandstone	250	500	1000	2283	15	30	60	138
Jungsun Marble	857	2807	4000	8000	5	10	20	
Macheon Gabbro	391	800	884	1000	2265	5	10	20

발생한다. 따라서 압력-변형을 곡선은 낮은 압력에서 많은 변형율로 인하여 위로 오목한 형태를 보인 후 압력이 증가함에 따라 직선의 형태를 가지게 되며(Fig. 3), 압력과 변형율의 관계식은 아래와 같이 나타나게 된다.

$$\epsilon(p) = \frac{(1-2\nu)}{E} p + \eta(p) \quad (1)$$

- ϵ : 시료에서 측정된 변형율
- ν : 포아송 비
- E : 영률
- p : 정수압
- $\eta(p)$: 균열 변형율

위의 식에서 첫번째 항은 암석의 탄성적인 거동을 나타내며 두번째 항은 미세균열이 닫히며 발생한 균열 변형율(crack strain)을 나타낸다. 또한 미세균열은 그 형태에 따라 닫히는 압력이 다르며, Walsh(1965)는 정수압하에서 미세균열이 닫히는 압력이 미세균열의 단축의 길이/장축의 길이로 표시되는 종횡비(aspect ratio)와 다음의 관계가 있음을 발표하였다.³⁾

$$p = \frac{\pi E \alpha}{4(1-\nu^2)} \quad (2)$$

- p : 정수압
- E : 영률
- ν : 포아송 비
- α : 종횡비

위의 식 (1)과 (2)에서 나타난 바와 같이 균열 변형율은 압력의 함수이다. 그러므로 Fig. 3에서 η 는 암석내의 모든 미세균열이 닫히면서 발생한 균열변형율을 나타낸다.

시료에 정수압 p 가 가해질 때, 그 압력까지 미세균열이 닫히며 발생한 균열변형율은 시료에서 측정된 변형율과 암석의 탄성거동에 의한 변형율과의 차이가 된다.

$$\eta(p) = \epsilon(p) - \epsilon^m(p) \quad (3)$$

$\epsilon(p)$: 시료에서 측정된 변형율

$\epsilon^m(p)$: 암석의 탄성거동에 의한 변형율

암석의 탄성거동에 의한 변형율, ϵ^m 은 Betti의 역이론을 이용하여 계산할 수 있고, Siegfried and Simons(1978)에 의한 계산 결과,¹³⁾ 압력이 p 일 때 그 압력까지 미세균열이 닫히며 발생한 균열변형율, $\zeta(p)$ 는 시료에서 측정된 변형율의 미분값과 압력의 곱으로부터 시료에서 측정된 변형율을 빼준 값으로 나타난다.

$$\zeta(p) = \left(\frac{d\epsilon}{dp} \right) p - \epsilon(p) \quad (4)$$

위의 식에서 $\frac{d\epsilon}{dp}$ 는 압력-변형율 곡선을 그릴 때 압력에서의 기울기이다. 따라서 $\zeta(p)$ 는 압력-변형율 곡선에서 압력 p 에서 그 접선이 변형율 축과 만나는 절편값에 해당한다(Fig. 7 참조). 위의 식 (2)에서 미세균열이 닫히는 압력은 미세균열의 종횡비와 상관관계를 보이므로, 압력이 증가함에 따라 점차 종횡비가 큰 미세균열이 닫히게 되고 균열변형율은 점차 증가하게 된다. 그러므로 $\zeta(p)$ 는 압력 p 이하에서 닫히는 모든 미세균열에 의하여 발생한 누적균열변형율(cumulative crack strain)이다.

압력이 p 에서 $p+\Delta p$ 로 증가할 때 Δp 구간내에서 미세균열이 닫히며 발생하는 균열변형율의 양을 나타내는 균열압축율(crack compressibility), $\nu(p)$ 는 시료에서 측정된 변형율의 2차 미분으로 표시된다.

$$\nu(p) = \left(\frac{d^2 \epsilon}{dp^2} \right) p \quad (5)$$

5. 시험결과 및 고찰

5.1 피로하중

압축피로하중에 의한 미세균열의 발달상태를 파악하기 위하여 26개의 시편에 대하여 반복하중을 가하였으

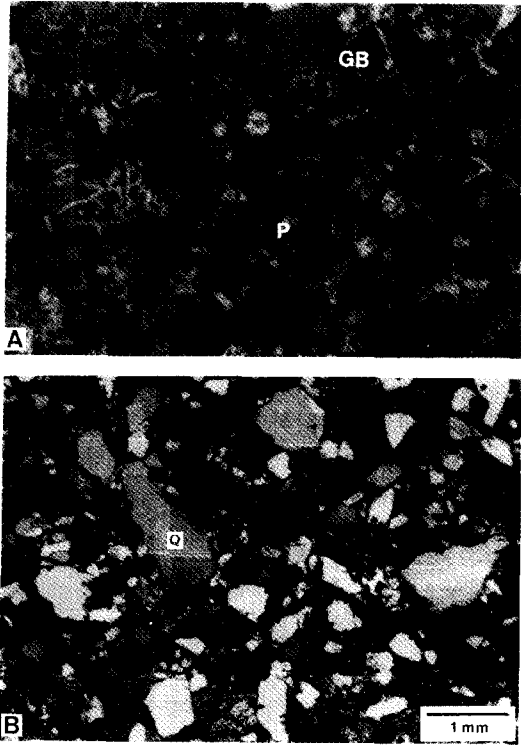


Fig. 4. Photomicrographs of the Sangju sandstone (A) Microscope with ultraviolet light, (B) Optical microscope (crossed polars). Q: quartz, GB: grain boundary crack, P: pores.

며, Table 2는 각 시편에 가해진 반복하중의 수준과 횡수이다. 압축피로하중은 각각의 압중에서 먼저 시편에 파괴가 일어나는 한계피로반복횡수를 구한 후, 한계피로반복횡수를 3-5 구간으로 나누어 가하여 피로횡수에 따라 시료에 발달하는 미세균열이 차이가 나도록 하였다.

60% 하중수준에서 상주석 및 마천석의 한계피로횡수는 2265-2283로 거의 비슷하나 정선석은 약 8000회로 매우 높은 횡수를 보이는 반면에, 80% 하중수준에서는 정선석 및 마천석은 20회로 동일하나 상주석은 138회로 피로하중에 매우 강하였다. 일반적으로 피로강도는 세립의 암석이 조립의 암석보다 크고,¹⁵⁾ 이 실험에서도 세립인 상주석과 정선석이 조립질인 마천석보다 피로강도가 강하였다.

정선석의 경우 60% 하중수준에서는 8000회로 매우 강한 반면에 80%의 경우 조립질인 마천석과 피로강도가 거의 동일하게 약하다. 대리암의 주 구성광물인 방해석이 응력을 받을 때 연성변형이 발생함은 이미 잘

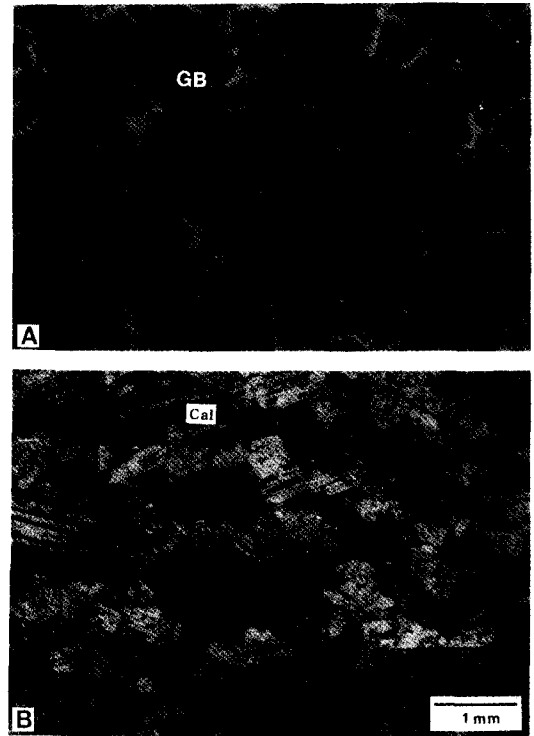


Fig. 5. Photomicrographs of the Jungsun marble (A) Microscope with ultraviolet light, (B) Optical microscope (crossed polars), Cal: Calcite. Almost all grain boundaries were cracked.

알려져 있으며, 또한 응력에 의한 변형은 미세균열의 생성보다는 쌍정(twin)이 생성되면서 해소된다.¹⁵⁾ 그러므로 60% 하중수준의 경우, 정선석내에는 거의 대부분의 입자에 쌍정이 발달해 있으며(Fig. 5), 낮은 응력이 장기간에 걸쳐서 가해졌으므로 연성변형이 발생하여 피로강도가 증가한 것으로 추측된다. 그러나 80% 하중수준에서는 하중수준이 높아서 연성변형보다는 미세균열이 생성되었고(Fig. 9 참조), 피로하중이 작용한 시간이 매우 짧아서 쌍정이 생성되지 못하여 피로강도가 현저히 저하된 것으로 생각된다.

상주석은 60% 하중수준에서는 마천석과 유사한 피로강도를 보이는 반면에 80%에서는 매우 강한 면모를 보인다. 상주석은 대부분이 석영 입자와 극세립의 석영 및 장석의 기질로 구성되어 있다. 석영은 방해석과 달리 거의 연성변형이 일어나지 않으며, 대부분의 미세균열은 기질내에 발달해 있다(Fig. 4 참조). 위의 결과는 기질의 경우 하중수준이 낮으며 오랜 시간에 걸쳐 작용

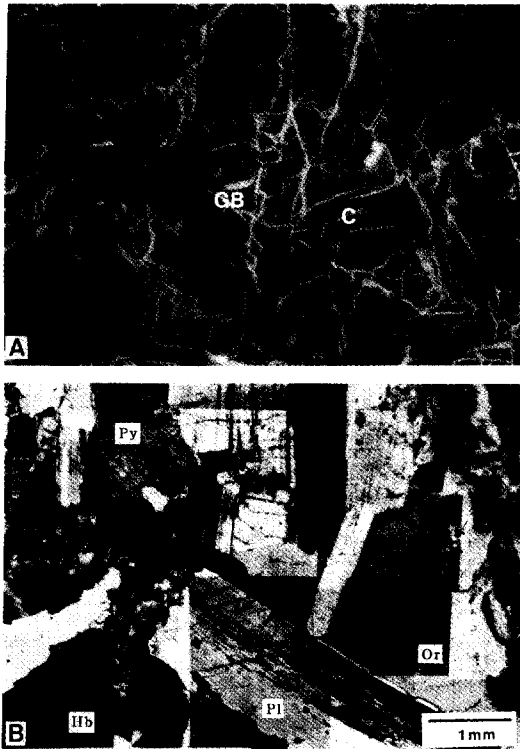


Fig. 6. Photomicrographs of the Macheon gabbro (A) Microscope with ultraviolet light (B) Optical microscope (crossed polars). Pl: plagioclase, Or: orthoclase, Py: pyroxene. C: cleavage cracks, GB: grain boundary cracks.

한 응력에는 약하나 그 반대의 경우에는 강함을 보여 주어 앞으로 좀 더 연구되어야 할 부분으로 사료된다.

5.2 염색에 의한 미세균열의 관찰

Fig. 4는 상주석의 자외선 반사현미경 사진과 편광현미경 사진이다. 상주석내의 미세균열 발달은 매우 미약하여 부분적으로 입자경계균열(grain boundary crack)과 입자관통균열(intergranular crack)이 발달해 있으나 대부분의 입자경계나 입자내에는 미세균열이 생성되어 있지 않다. 기질내에는 많은 공극들이 있으며 부분적으로 미세균열이 발달해 있다.

정선석은 대부분이 결정질 방해석으로 구성되어 있으며, 대부분의 입자경계를 따라 입자경계균열이 발달해 있으나 입자내의 입자내균열(intragranular crack)이나 입자관통균열은 거의 발달해 있지 않다. 발달된 미세균열은 폭이 좁고 길이가 길어서 종횡비는 매우 낮

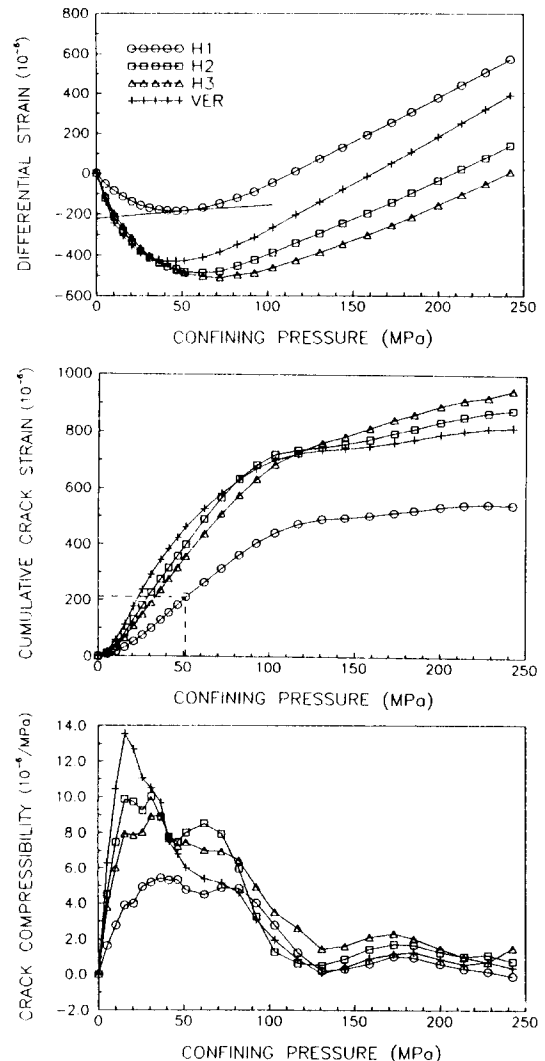


Fig. 7. Differential strain analysis curve for the Macheon gabbro experienced 884 cycles with 60% of dynamic strength. H1, H2 and H3 are three directions perpendicular to the axis of loading, and VER is the direction parallel to the loading axis. The tangent line is drawn at the pressure of 51.2MPa in differential strain curve. The intercept of the tangent line is the cumulative crack strain at that pressure (dashed line).

으며, 대부분의 방해석내에는 쌍정이 발달해 있어서 피로하중에 의하여 많은 쌍정이 생성된 것으로 보인다 (Fig. 5)

마천석에는 대부분의 입자경계를 따라서 입자경계균

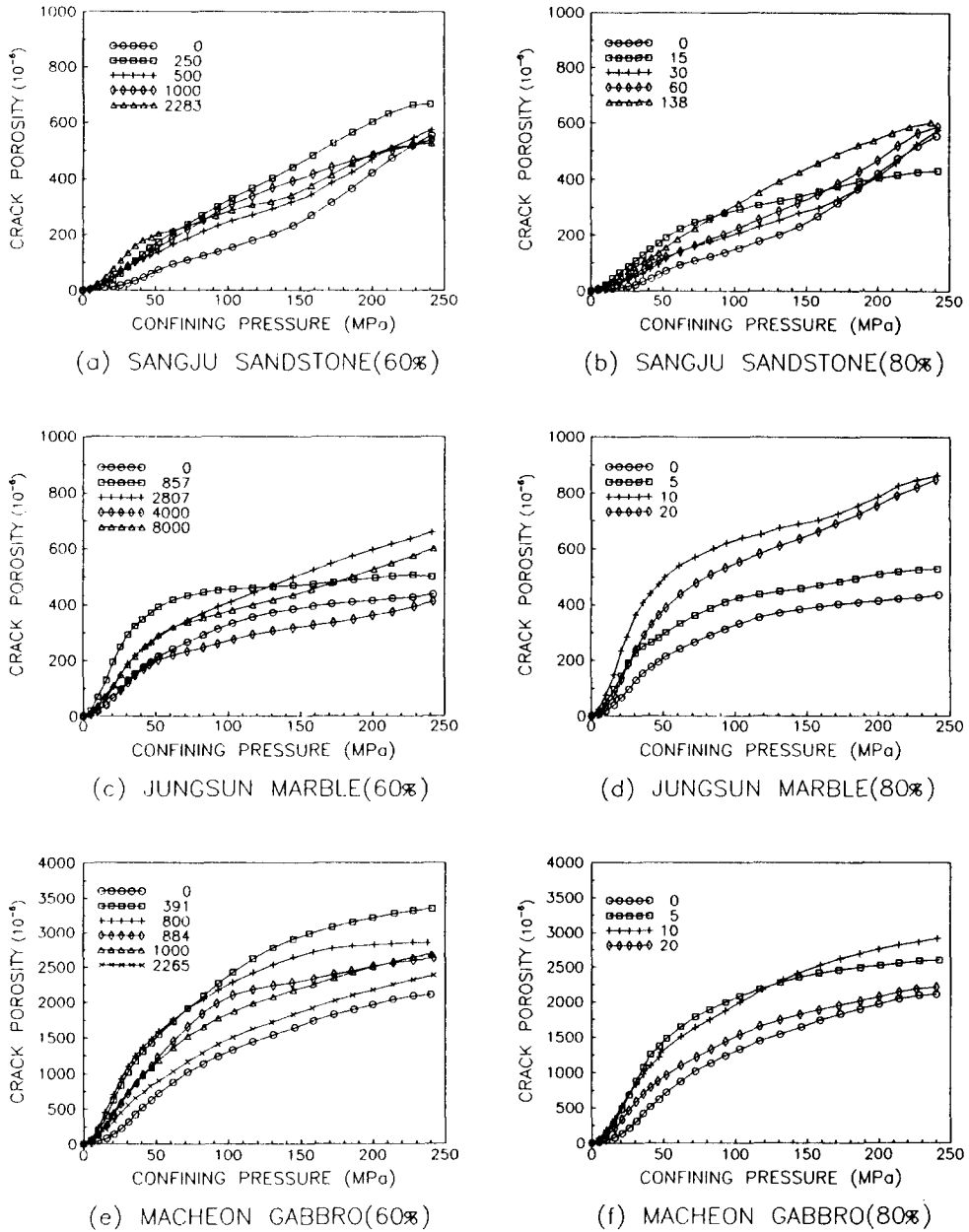


Fig. 8. Microcrack porosities of samples (Numbers represent the number of cyclic loading). 60% and 80% indicate that loading levels were 60% and 80% of dynamic strength of samples, respectively.

열이 발달해 있으며, 사상석, 정장석 및 휘석 입자내에는 상당히 많은 입자내균열과 입자관통균열이 발달해 있으나 감람석 내에는 거의 미세균열이 발달해 있지 않다. 대부분의 입자내에 발달한 미세균열은 벽개면을 따라 한 방향 혹은 두 방향으로 발달해 있으며 폭이 좁고 길이가 길어서 낮은 종횡비를 보인다(Fig. 6).

암석에 하중이 가해지면 기존의 미세균열면이나 입자의 경계면 등의 연약면을 따라 응력이 집중되어 여기서 미세균열이 가장 먼저 생성되므로, 입자경계균열이나 벽개균열 등이 가장 먼저 생성된다. 본 연구에서도 피로하중을 받은 모든 시료에 입자경계균열이 잘 발달해 있으며, 마천석내에는 장석과 휘석의 벽개면을 따라

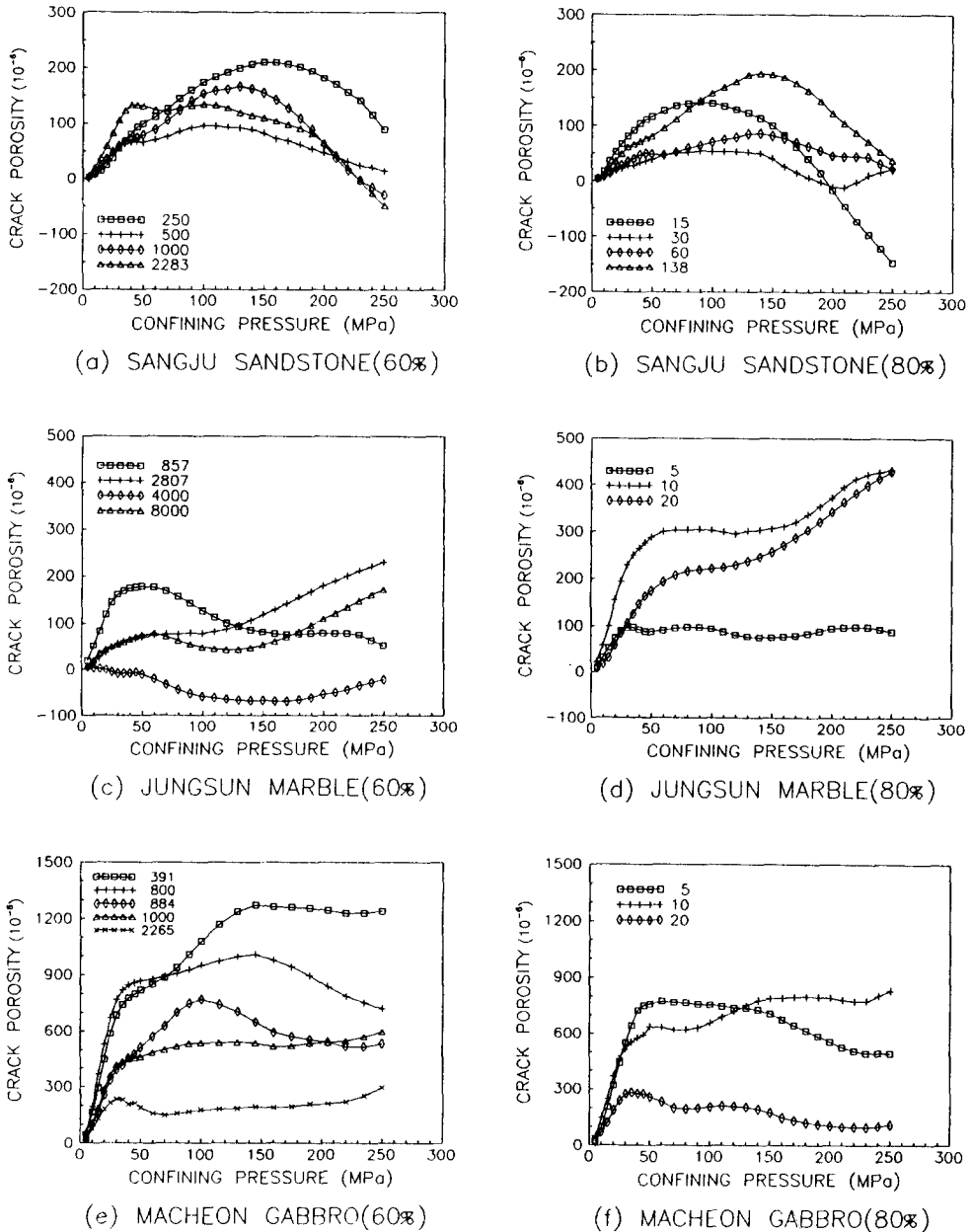


Fig. 9. Microcrack porosities produced due to fatigue stresses. Numbers in the figures represent loading cycles.

한 방향 혹은 두 방향으로 벽개균열이 잘 발달해 있다. 입자내균열과 입자관통균열의 생성은 입자의 크기와 상관관계가 있어서 입자가 입체크기보다 클 때 생성된다.¹⁶⁾ 또한 암석의 구성입자간의 탄성계수가 차이가 날 때 입자간의 응력 집중이 커지게 된다.¹⁷⁾ 상주석은 입자의 크기가 작고 석영입자만으로 구성되어 있어서, 대부분의 미세균열들은 기질내에만 생성되었고 석영 입자

내에는 입자내균열이나 입자관통균열은 거의 생성되지 않았다. 정선석은 방해석이 취성변형보다 연성변형이 잘 일어나고, 또한 변형의 상당부분은 방해석내에 쌓정이 생성되면서 해소되어 입자내균열이 거의 생성되지 않았다. 반면에 마천석은 입자의 크고 구성광물의 탄성계수가 차이가 나서 입자내균열이나 입자관통균열이 잘 발달된 것으로 사료된다.

5.3 DSA 결과

5.3.1 피로하중을 받은 시료에 분포하는 미세균열

시료에 대하여 DSA를 실시하면 압력에 대한 차분변형율, 누적균열변형율 및 균열압축률 등의 자료를 얻게 되며¹⁸⁾(Fig. 7), 암석내에 발달한 미세균열의 양 및 특성은 누적균열변형율에서 가장 잘 나타난다. 누적균열변형율은 차분변형율 곡선의 한 압력에서 접선을 그어 접선이 차분변형율 축과 만나는 점의 값으로, 그 압력까지 미세균열이 닫히면서 발생한 균열변형율이다. 일반적으로 암석내에는 다양한 형태, 즉 다양한 종횡비를 가진 미세균열이 분포하고 있으며 미세균열의 종횡비와 미세균열이 닫히는 압력은 식 (2)에서와 같이 비례의 관계를 보여, 누적균열변형율 곡선의 형태는 암석내에 분포하는 미세균열의 형태를 보여준다.

누적균열변형율은 측정된 각 방향의 균열변형율이므로, 서로 직각인 세 방향에서 측정된 누적균열변형의 합은 전체적인 미세균열의 발달상태를 나타낸다. 이를 균열공극율이라 하며 Fig. 8은 60% 및 80% 피로하중을 받은 시료와 받지 않은 시료에 대한 압력에 따른 균열공극율을 보여준다. 상주석의 균열공극율 곡선은 거의 직선의 형태를 보여 낮은 압력에서 닫히는 낮은 종횡비를 가지는 미세균열에서 높은 압력에서 닫히는 높은 종횡비를 갖는 다양한 형태의 미세균열이 상주석내에 분포하고 있다. 200 MPa의 압력하에서 닫힌 미세균열에 의한 균열 공극율은 0.04%-0.06%로 미세균열의 발달이 매우 미약하다. 정선석의 균열 공극율 곡선은 약 50-100 MPa 이하의 압력에서는 급격히 증가하다가 100 MPa 이상의 압력에서는 기울기가 감소하여 대부분의 미세균열들은 100 MPa 이하에서 닫히는 낮은 종횡비 갖는다. 200 MPa 이하의 압력에서 닫히는 미세균열에 의한 균열공극율은 약 0.035%-0.08%로 미세균열의 발달은 미약하다. 마천석의 균열공극율 곡선은 정선석과 유사하여 대부분의 미세균열은 낮은 종횡비를 가지고 있으며, 200 MPa에서의 균열 공극율은 0.2%-0.32%로 비교적 많은 미세균열들이 분포하고 있다.

5.3.2 피로하중에 의하여 생성된 미세균열

Fig. 8의 균열공극율곡선은 피로하중에 의하여 생성된 미세균열과 피로하중을 받기전에 이미 시료에 내재한 모든 미세균열의 발달량 및 특성을 보여주고 있으며, 전반적으로 피로하중을 받고난 시료의 균열공극율이 피로하중을 받지 않은 시료의 균열공극율보다 큰 값을 보여 피로하중에 의하여 새로운 미세균열이 생성되

었음을 알 수 있다. 피로하중에 의하여 새롭게 생성된 미세균열의 자세한 특성은 피로하중을 받은 후의 시료에서 측정된 균열공극율과 피로하중을 받지 않은 시료의 균열공극율의 차이에서 잘 알 수 있다. 피로하중에 의하여 시료에 생성된 새로운 미세균열에 의한 균열공극율은 Fig. 9과 같다. Fig. 9의 균열공극율곡선은 누적곡선이나 양, 음 혹은 수평의 기울기를 보이고 있다. 양의 기울기를 보이는 부분은 피로하중에 의하여 새로운 미세균열이 생성되었음을, 수평의 기울기는 피로하중에 의하여 새로운 미세균열이 생성되지 않았으나 피로하중을 받기전에 분포한 미세균열은 변화가 없음을 지시하고, 반면에 음의 기울기는 피로하중에 의하여 시료에 내재한 미세균열들이 압착되어 없어지거나, 종횡비가 감소하여 낮은 압력에서 닫히는 미세균열로 변화하였음을 나타낸다.

상주석의 균열공극율은 약 100-150 MPa까지 양의 기울기를 보이며 증가하지만 그 이상의 압력에서는 음의 기울기를 보이며 감소한다. 또한 약 250 MPa 압력에서의 균열공극율은 거의 0에 가까운 값을 보여 피로하중을 받은 시료와 받지 않은 시료의 미세균열의 분포가 거의 비슷하다. 위의 결과는 피로하중에 의하여 미세균열의 특성이 변화하였음을, 즉 피로하중에 의하여 높은 압력에서 닫히는 높은 종횡비를 가진 미세균열이 낮은 압력에서 닫히는 낮은 종횡비의 미세균열로 변화하였음을 보여준다. 균열공극율의 값은 약 0.005%-0.025%의 낮은 값을 보여 미세균열의 생성이 매우 미약하며, 60%와 80%의 하중수준에서도 별 차이가 없어, 하중수준과 미세균열의 발달과의 상관관계가 미약하다.

정선석의 균열공극율은 50-100 MPa의 압력까지는 급격히 증가하다가 그 이상의 압력에서는 거의 수평의 기울기를 보인다. 그러므로 정선석에는 약 50-100 MPa 이하에서 닫히는 낮은 종횡비의 미세균열들이 집중적으로 생성되었으며, 100 MPa 이상의 압력에서 닫히는 미세균열들은 피로하중을 받기 전과 거의 동일함을 나타낸다. 균열공극율의 값은 정선석의 경우 0-0.045%로 미약하나 80% 하중수준을 받은 시료에서 60% 하중수준을 받은 시료보다 높은 균열 공극율을 보여, 하중수준이 높을 경우 많은 미세균열이 생성될 것으로 보인다.

마천석 또한 약 50 MPa까지는 균열공극율이 급격히 증가하다가 50 MPa 이상의 압력에서는 거의 수평의

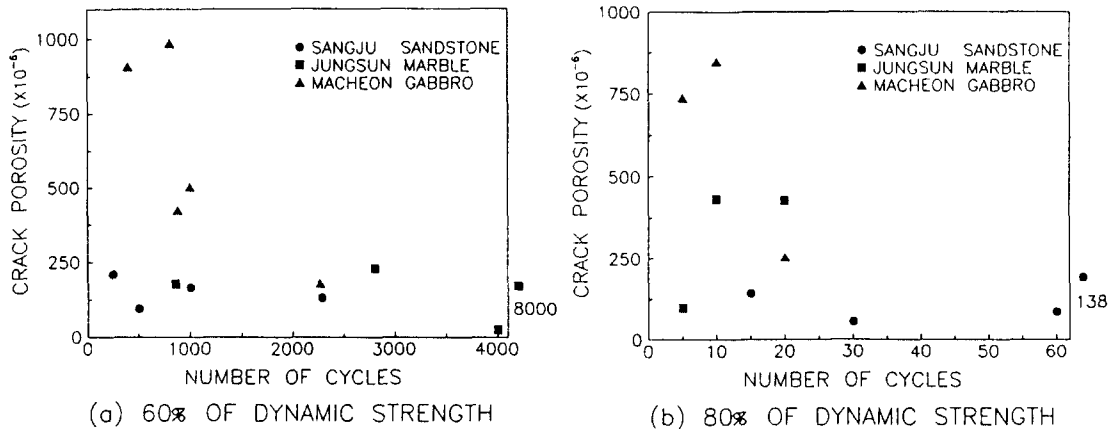


Fig. 10. Relationship between microcrack porosities and number of loading cycles in samples after fatigue.

기울기를 보여 대부분의 미세균열이 낮은 중형비를 가지고 있다. 균열공극율은 0.02-0.12%를 보여 상당히 많은 미세균열이 생성되었으며, 60%에서 높은 균열공극율을 보여 낮은 하중수준이 장기적으로 지속될 때 보다 많은 미세균열이 생성될 것임을 보여준다.

5.4 피로반복횟수와 미세균열의 발달

Fig. 10은 피로반복횟수에 따른 미세균열의 발달량의 관계를 보여준다. 상주석과 정선석은 피로반복횟수에 관계없이 거의 일정한 균열공극율을 나타내 피로 반복의 초기 수회~수십회에서 대부분의 미세균열이 생성되었음을 알 수 있다. 특히 80% 하중수준에서 5회의 피로반복을 받은 정선석은 약 97×10^6 의 균열공극율을 보이나, 10회 및 20회의 피로반복을 받은 시료는 약 430×10^6 의 일정한 균열공극율을 보여 대부분의 미세균열이 5회~10회 사이에서 생성되었으며 10회 이후 20회까지는 거의 미세균열 생성되지 않고 있다. 그러나 피로반복횟수에 따른 마천석의 균열공극율은 피로반복 초기에는 높은 균열공극율을 보이는 반면에 횟수가 증가하면 감소하는 경향을 보인다. 60% 하중수준에서 2265회와 80% 하중수준에서 20회의 피로반복을 받은 시료는 압축피로시험중 시편이 파단되어 DSA시료를 압축피로시험편의 중단부에서 채취하였으므로 균열공극율이 낮은 것으로 사료된다. 그러나 60% 하중수준에서 884회와 1000회의 피로반복을 받은 시료가 391회와 800회의 피로반복을 받은 시료보다 낮은 균열공극율을 보여 1) 391 및 800회의 피로반복을 받은 시료에는 피로 반복을 받기전에 이미 많은 미세균열이 발달해 있

었거나, 2) 피로반복 횟수가 증가함에 따라 초기 수회 내지 수십회의 피로반복에서 생성된 미세균열이 압착되어 없어졌을 가능성을 제시한다. 이러한 현상은 전복 익산군의 황등석 시료에서도 나타나¹⁸⁾ 앞으로 자세한 연구가 필요한 부분이다.

6. 결 론

상주 사암, 정선 대리암 및 마천 반려암에 대하여 반복하중을 가할 때 암석의 피로강도 및 암석내에 생성되는 미세균열의 특성을 DSA 및 염색에 의한 현미경 관찰을 통하여 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 60% 하중수준에서의 한계피로횟수는 상주석과 마천석이 약 2200회로 낮은 반면에 정선석은 8000회로 아주 높고, 80% 하중수준에서는 마천석과 정선석은 20회로 동일하나 상주석은 138로 매우 강하였다. 정선석은 낮은 하중수준에서 연성변형과 쌍정의 생성등으로 변형을 흡수하여 피로강도가 높으며, 상주석의 경우 기질의 특성으로 인하여 피로강도에 강한 것으로 추측된다. 따라서 연성변형이 잘 일어나는 방해석으로 구성된 암석은 하중수준이 낮으면서 장기간에 걸친 피로하중에 강하고, 단일광물과 기질로 구성된 사암 종류는 하중수준이 높고 단기간에 걸친 하중에 내구성이 강할 것으로 사료된다.

2. 상주석 및 정선석내에는 피로하중에 의하여 단지 입자경계균열 만이 생성되었으나 마천석내에는 입자경계균열을 비롯하여 벽개면을 따라 벽개균열, 입자내균열, 입자관통균열 등 많은 미세균열이 생성되었다. 상주

석 및 정선석은 입자의 크기가 작고, 탄성계수가 거의 비슷한 입자로 구성되어 있어서 입자내균열이나 입자관통균열이 거의 생성되지 못하였으나, 마천석내에는 장석이나 휘석내에 많은 벽개면이 분포하고 있었으며, 입자의 크기가 크고, 구성광물의 탄성계수가 차이가 나서 입자내균열이나 입자관통균열이 잘 발달되었다.

3. 상주석에는 피로하중에 의한 새로운 미세균열의 생성은 거의 없으며, 기존의 높은 종횡비를 보이는 미세균열들이 전파되어서 낮은 종횡비의 미세균열로 변화하였다. 그러나 정선석 및 마천석에는 피로하중에 의하여 약 50 MPa 이하에서 달하는 낮은 종횡비의 새로운 미세균열들이 생성되었다.

4. 피로하중에 의한 미세균열의 발달량은 마천석에서 가장 많으며, 상주석과 정선석은 미약하였다. 또한 상주석과 정선석은 피로반복의 초기 수회 내지 수십회에서 대부분의 미세균열이 생성된 후 피로반복횟수가 증가하여도 거의 일정한 균열공극율을 보인다. 따라서 석재의 내구성이나 토목공사시 초기의 반복하중이 암석의 미세균열 발달에 미치는 영향이 큰 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) Brace, W.F., Paulding, B.W. Jr., and Scholz, C. H., 1965, Dilatancy in the fracture of crystalline rocks, *Jour. Geophy. Res.*, 71, 3939-3953.
- 2) Scholz, C.H., 1968, Mechanism of creep in brittle rock, *Jour. Geophy. Res.*, 73, 3295-33022.
- 3) Walsh, J.B., 1965, The effect of cracks on compressibility of rock, *Jour. Geophy. Res.*, 70, 381-389.
- 4) Brace, W.F., Orange, A.S. and Madden, T.R., 1965, The effect of pressure on electrical resistivity of water saturated crystalline rocks, *Jour. Geophy. Res.*, 70, 5669-5678.
- 5) Walsh, J.B. and Decker, E.R., 1966, Effect of pressure and saturating fluid on thermal conductivity of compact rock, *Jour. Geophy. Res.*, 71, 3053-3060.
- 6) Walsh, J.B., 1966, Seismic wave attenuation in rock due to friction, *Jour. Geophy. Res.*, 71, 2591-2599.
- 7) O'connel, B.J. and Budiansky, B., 1974, Seismic veocities in dry and cracked solids, *Jour. Geophy. Res.*, 79, 5412-5425.
- 8) Haimson, B.C. and Kim, K.C., 1971, Mechanical behavior of rock under cyclic fatigue, *Proc. 13th Symposium on Rock Mechaincs, ASCE*, 845-863.
- 9) Haimson, B.C., 1978, Effect of cyclic loading on rock, in *dynamic geotechnical tesing*, *Am. Soc. Testing and Materials, Special Technical Publication* 645. 228-245.
- 10) Attewell, P.B. and Farmer, I.W., 1973, Fatigue behaviour of rock, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 10, 1-9.
- 11) Tao Z. and Mo, H., 1990, An experimental study and analysis of the behaviour of rock under cyclic loading, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 27, 51-56.
- 12) Simmons, G., Siegfried, R. and Feves, M., 1974, Differential strain analysis : A new method of examining cracks in rocks, *Jour. Geophy. Res.*, 79, 4383-4385.
- 13) Siegfried, R. and Simmons, G., 1978, Characterization of oriented cracks with differential strain analysis, *Jour. Geophy. Res.*, 83, 1269-1277.
- 14) Burdine, N.T., 1963, Rock failure under dynamic loading conditions, *J. Soc. Petrol. Engrs*, 3, 1-8.
- 15) Tullis, T., 1980, The use of mechanical twinning in materials as a measure of shear stress magnitudes. *J. Geophy. Res.* 85, 6263-6268.
- 16) Fu, Y. and Evans, A.G., 1985, Some effects of microcracks on the mechanical properties of brittle solids-I. Stress, strain relations, *Acta Metall*, 33, 1515-1523.
- 17) Plumb, R., Engelder, T. and Yale, D., 1984, Near-surface in situ stress : 3. Correlation with microcrack fabric within the New Hampshire granite, *Jour. Geophy. Res.*, 89, 9250-9364.
- 18) 장보안, 최인선, 김재동, 1994, 피로하중에 의한 화강암류 암석의 미세균열 발달특성, *지질학회지*, 30, 613-631.