

피로하중에 의한 포천화강암의 미세균열 발달특성

Microcrack Development in the Pocheon Granite due to Cyclic Loading

장 보 안 (Bo-An Jang)
김 영 화 (Yeonghwa Kim)
김 재 동 (Jaedong Kim)
이 찬 구 (Changoo Rhee)

강원대학교 지구물리학과
강원대학교 지구물리학과
강원대학교 자원공학과
한국원자력환경기술연구원

요약/ABSTRACT

포천 화강암에 피로하중을 가할 때 암석의 변형 거동과 피로하중에 의해서 생성되는 미세균열의 발달특성을 초음파 속도측정 및 차분변형을 분석을 통하여 연구하였다. 미세균열은 피로하중이 가해지는 방향과 평행하게 생성되며, 피로하중이 가해지는 초기에는 기존의 미세균열이 전파되면서 생성된다. 새로운 미세균열은 피로파괴횟수의 약 1/8-1/6 이상의 지난 후 생성되기 시작한다. 초음파 속도 측정, 차분변형을 분석 및 영구변형 측정은 암석내의 미세균열 발달을 잘 지시한다. 그러나 각 방법에 의하여 규명된 미세균열의 발달상태는 약간의 차이를 보여, 미세균열의 발달을 정량적으로 규명하기 위해서는 각 방법에 의하여 측정된 결과를 종합하여 해석하여야 할 것으로 판단된다. 80% 피로하중 수준에서 초기에 발달하는 미세균열은 70% 하중수준에 비하여 2배 정도로 높아서 하중수준이 커질수록 초기에 발달하는 미세균열의 양은 많아질 것으로 판단된다. 그러나 파괴 직전의 시료에 발달한 미세균열의 양은 암석 부피의 약 0.3% 정도로, 포천 화강암의 경우 부피의 0.3% 정도의 미세균열이 발달하면 암석이 파괴에 도달하는 것으로 판단된다.

주요어 : 포천화강암, 피로하중, 미세균열, 초음파속도 측정, 차분변형률분석

Deformation behavior and microcrack development due to uniaxial compressive cyclic loading in the Pocheon granite were investigated using the ultrasonic velocity measurements and the differential strain analysis(DSA). Most microcracks were developed along the direction parallel to the loading axis. Microcracks developed at the early stage of cyclic loading were formed by propagation of pre-existing cracks. Ultrasonic velocity measurement, DSA and measurement of permanent deformation are good

tools to represent microcrack development in rock. Since results from each method are slightly different, microcrack development should be interpreted from all three methods. The magnitude of microcracks developed at the early stage of cyclic loading under 80% loading level is twice compared with those under 70% loading level. The highest volumetric crack strain is about 3000, indicating that the Pocheon granite will fail with 0.3% occupation of microcrack in volume.

Key Words : Pocheon Granite, Cyclic Loading, Microcrack, Ultrasonic Velocity Measurement, Differential Strain Analysis

서 론

금속이나 암석과 같은 고체재료에 고유의 강도보다 낮은 수준의 응력이 지속적으로나 반복적으로 가해지면 피로에 의한 파괴가 발생한다는 것은 이미 잘 알려진 현상이다. 피로파괴가 발생하지 않는 응력수준인 피로하한 응력수준은 고체 재료의 재질에 따라 달라지게 된다. 일반적으로 피로하한 응력수준은 연성재질이 취성재질보다 낮으며, 금속에 비하여 취성적 거동을 보이는 암석은 정하중강도의 50%~70% 정도로 알려져 있다(Attewell and Farmer, 1973).

화강암은 일반적으로 파괴 강도의 1/2 이상의 하중을 받게되면 체적증가 (dilatancy)가 발생하게 되며 미소균열음이 급격히 증가한다(Brace et al., 1965; Scholz, 1968). 이러한 체적증가와 미소 균열음은 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 체적변화계수 (Walsh, 1965), 전기비저항 (Brace et al., 1965), 전기전도도 (Walsh and Decker, 1966) 및 탄성파속도 (Walsh, 1966) 등의 물리적 특성 뿐만 아니라 암석의 탄성계수 (O'connel and Budiansky, 1974) 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 연구는 화강암에 피로하중이 가해질 때 암석의 거동과 피로하중에 의해 생성되는 미세균열의

발달특성을 연구하고자 한다. 피로하중에 따른 미세균열의 발달특성을 규명하기 위하여 먼저 시료에 내재한 미세균열의 발달상태를 초음파 속도 측정을 통하여 파악하였다. 이 후 동일한 시료에 대하여 파괴강도의 70%와 80% 수준의 피로하중을 가한 후 초음파 속도 측정을 다시 시행하여 피로하중을 받기 전에 측정된 초음파 속도와 비교 분석함으로써 피로하중에 따른 미세균열의 발달상태를 분석하였다. 또한 차분변형을 분석을 통하여 피로하중에 의하여 발달한 미세균열을 정량적으로 측정하여 미세균열의 발달에 따른 초음파 속도의 변화, 미세균열의 발달과 영구변형의 변화를 연구하였다.

시료의 지질 및 기본물성

포천화강암은 육안관찰 결과, 중립 내지 조립질로 유색광물의 양이 적은 중생대 우백질 화강암 (Mesozoic leucocratic granite)으로 분류되었다. 현미경 관찰에 의하면 주구성 광물은 석영, 사장석, 미사장석, 정장석, 흑운모등이며 부구성 광물로는 전기석, 백운모, 녹니석, 인회석, 저어콘 등이 있으나 소량 관찰된다. 석영은 불합상 구조를 보이며 파동소광을 나타내며, 사장석은 알바이트 쌍정, 칼스바드-알바이트 쌍정을 이루고 일부는 뚜렷한 누대구조가 관찰된다. 흑운모는 적갈색 내지 암갈색을 띠고 다색성이 관찰된다. 또한 벽개가 뚜렷하고 부분적으로 녹니석화 되어 있으며 불투명 광물을 자주 수반한다. 전기석은 흑운모 내에 또는 불투명 광물과 함께 소량 관찰되고 백운모는 흑운모와 접하여 판상을 이루거나 석영, 또는 사장석 내에 포획되어 관찰된다. 저어콘과 인회석은 주로 흑운모 내에서 소량 관찰된다. 장석은 미사장석, 퍼사이트 (perthite), 마이크로퍼사이트 (micro-perthite)와 일

부 정상적으로 나타나고 있는데, 퍼사이트로써 변정을 이루는 경우 사장석, 석영, 흑운모등을 흔히 포획하고 있다. 부분적으로 미르메카이트 및 그래피트 조직을 이룬다. 석영, 사장석, K-장석이 공생으로 정출하며 흑운모는 타형으로 이들 광물사이에서 관찰된다.

기본 물성으로는 국제암반역학회 (International Society for Rock Mechanics)의 시험기준에 따라 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성파속도, 쇼아경도, 공극율, 흡수율, 진 비중, 겉보기 체적비중 등을 측정하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다. 시료의 일축압축강도는 약 188MPa, 영률은 47.95 GPa, 포아송 비는 0.242로 전형적인 신선한 화강암에 해당하는 수치를 보이고 있으며, 공극율은 0.797%, 흡수율은 0.306%로 매우 치밀하다.

Table 1. Physical properties of the Pocheon granite.

Properties	Ave. Value
Dynamic Compressive Strength	206±4 MPa
Static Compressive Strength	188±3 MPa
Brazilian Tensile Strength	6.4±4 MPa
Young's Modulus	47.95 GPa
Poisson's Ratio	0.242
Longitudinal Velocity	3015m/sec.
Shear Velocity	1679m/sec.
Apparent Specific Gravity	2.602
True Specific Gravity	2.624
Porosity	0.797%
Absorption	0.306%
Shore Hardness	65±3

시 험 방 법

압축피로시험

압축피로시험용 시험편은 석산현장에서 채취된 한 변의 길이 약 30cm 인 정방형 입방체의 석재용 암석블럭으로 부터 코어 시추기 (coring machine, SS-C-529, Teiyo Corp.)로 시추하여 얻은 암석코어를 성형하여 만들었다. 현장 기술자의 경험적 검증에 의하면 채취된 암석블럭은 두 방향의 결을 포

함하고 있으며, 본 연구에서는 제 1결 (rift plane)의 이방성이 시험결과에 미치는 영향을 배제하고자 제 2결은 무시하고 단지 제 1결에 수직인 방향으로만 시추하여 암석코어를 얻었다. 시험편 규격은 BX 직경(4.323±0.02cm)으로 하였고, 시험편 길이는 직경의 2배로 하였다. 이때, 시험편 양 단면의 편평도는 0.02mm 이내로 유지하였다.

시험기는 미국 SBEL (Structural Behaviour Engineering Laboratories)사의 암석 일축압축시험용 서보시스템 (servo dynamic test system, SBEL, model 547)으로 최대 가압용량은 140톤이다. 시험기는 가압용 프레임, 조정부 (control panel), 유압펌프로 구성된다. 피로시험시 하중파형, 주파수, 응력진폭등의 시험조건을 설정하는 서보프로그램 (servo controller software)과 이들을 입력신호로 만드는 함수발생기 (function generator)는 16비트 개인용 컴퓨터에 별도로 내장되어 있다. 피로횟수의 측정은 조정부에 탑재된 계수기를 이용하였다. 서보시스템은 폐쇄회로로(closed loop system) 구성되어 있어 시험기의 각 부분이 유기적으로 연결되어 있으며, 서보프로그램에서 설정된 시험기준이 함수발생기를 통해 조정부에 탑재된 서보조정기 (servo controller)의 입력신호로 바뀐다. 입력신호와 수압기로 (load cell) 부터의 출력신호는 상호제어되는 폐쇄회로를 구성하게 된다.

일축압축 피로시험은 동하중강도인 약 204MPa의 70%와 80%를 피로상한 하중으로 설정하여 실시되었다. 70% 이하의 피로하중은 미세균열의 발달과 파괴에 너무 많은 시간이 소요되고, 80% 이상의 피로하중은 너무 짧은 피로횟수에 파괴가 발생하기 때문에 70%와 80%의 응력수준을 피로하중으로 선택하였다. 피로시험에 이용된 응력파형 (loading waveform)은 사인곡선율, 응력속도 (stress rate)는 100 MPa/sec이고 응력 진폭은 상한 응력 수준과 하한 응력 수준의 차이로서 동하중강도의 50%로 설정하였다. 일축압축 피로하중 시험은 피로하중의 수준 및 횟수에 따른 미세균열의 발달 상태를 파악하기 위하여 27개의 시료에 대하여 13~14단계의 피로횟수를 달리한 단계적인 피로하중을 실시하였다. 특히 피로하중 횟수의 초기 단계와 파단에 가까워 질 때의 미세균열 발달상태를 정확히 파악하기 위하여 이 구간에 여러 개의 시료를

배정하였으며 각각의 하중단계에서 가해진 피로횟수는 Table 2와 같다.

피로하중은 초기하중으로 인한 충격의 발생을 막기 위해 1 MPa를 서서히 가압한 후 동적피로하중을 가하였다. 시험결과는 먼저, 시험편의 중앙에 축방향 및 횡방향으로 부착시킨 변형을 게이지(Kyowa사 제품, 길이 5mm)를 통해 얻은 측정치를 변형을 증폭기 (signal conditioning amplifier, Measurements Group, model 2310)로 증폭하여 시험편의 변형률을 얻고 시험기에 장착된 수압기 (load cell)를 통해 가해진 하중을 얻은 후, 이렇게 얻은 두 가지 측정치를 디지털 변환장치 (A/D converter, Advantech Co., model Pcl-711)를 통해 16비트 개인용 컴퓨터에 저장하는 방법으로 구하였다.

Table 2. Applied number of loading cycles for ultrasonic velocity measurements and DSA.

Loading Level	Number of Loading Cycles				
70% Dynamic Loading	2	4	8	16	32
	200	400	600	800	1000
	2521	2930	3116		
80% Dynamic loading	2	4	8	16	20
	32	40	60	80	100
	110	121	134		

초음파 속도 측정

초음파 속도 측정은 건조상태에서의 시료에 대하여 1 MHz 주파수의 P파를 사용하여 실시되었다. 시료는 직경이 43mm이고 길이는 직경의 약 2배인 12각주 형태로 성형되었으며, 피로하중 재하를 전후한 2단계로 구분하여 P파 속도가 측정되었다. 먼저 암석의 초기 상태를 알기 위하여 피로하중이 가해지기 전과, 피로하중이 가해진 후의 시료에 P파 속도를 측정함으로써 피로하중에 의한 미세균열의 발달 상태를 추적하는 방법을 사용하였다. 초음파 속도 측정은 축 방향의 한 성분과 30° 간격으로 얻어진 횡 방향의 6 성분으로 합계 7방향에 대하여 이루어졌다. 속도측정을 위하여 압전소자(piezoelectric crystal transducer)를 사용하여 제작된 접촉

형 트랜스듀스(transducer)와 고압신호 발생기 및 오실로스코프(board-on oscilloscope)가 사용되었다. 암석 시료와 발전자 및 수신자 사이의 결합재로는 글리세린을 사용하였고, 속도 측정은 신호 발생기-발전자-암석시료-수진자를 거쳐 오실로스코프 상에 나타난 초음파 파형의 초동값을 읽고 결정된 주시에서 트랜스듀스의 지연시간을 보정한 후 시료의 초음파 속도 값을 유도하는 과정을 거쳤다.

차분 변형을 분석

DSA는 Simmons et al. (1974)과 Siegfried and Simmons (1978)에 의하여 개발된 방법으로, 암석 시료 및 실리카 큐브(reference silica cube)의 표면에 변형을 게이지를 부착하여 정수압하에서 압력에 따른 변형을 측정하므로써 암석내에 분포하고 있는 미세균열의 양, 방향 및 특성(aspect ratio)을 정밀하게 측정할 수 있다. 이 때 암석시료 및 실리카 큐브의 변형율은 동일한 실험 조건하에서 측정하여야 하며 오차는 2×10^{-6} 이내이다. 실리카 큐브는 압력실내의 온도 변화나 기타의 환경 변화에 따른 오차를 감소시키기 위하여 사용된다.

DSA의 시료성형과정 및 시험법은 아래와 같다. 먼저 압축피로하중을 받은 BX 코아에서 하중 축에 평행한 방향으로 직경 2.54cm의 코아를 채취한 후, 길이가 2.54cm되게 절단한다. 이 시료는 아랫면에는 로젯 게이지를 (rosette gage), 옆면에는 단축 게이지를 (linear gage) 부착하기 위하여 산화 알루미늄을 이용하여 편평하게 연마되었다. 이 후 시료를 진공속에서 24시간 이상 건조한 후, 시료 및 실리카 큐브의 표면에 변형을 게이지를 부착하였다. DSA 시험시 압력실 내에서 암석시료 및 실리카 큐브내에 유압유가 스며드는 것을 방지하기 위하여 시료 및 실리카 큐브를 미국 Dow Corning사의 Sylgard 186으로 밀봉하였다. 변형율은 압력을 50MPa 까지는 5MPa씩, 50MPa 이상에서는 10MPa -15MPa 씩 증가시키면서 측정하였고, 최대 압력은 250 MPa 이었다. 각 단계의 압력을 증가시킨 후, 압력계의 압력과 압력실의 압력이 평형을 이룰 수 있는 10분 후에 변형율을 측정하였다.

결 과

초음파 속도

초음파 속도측정은 26개의 시료에 대하여 실시되었다. 피로하중을 가하지 않은 시료에서 측정된 건조 P파 속도는 측정 방향에 따라 다양한 분포를 보여, 최저 3006 m/sec~4014 m/sec의 범위를 보인다. 전체적으로 측 방향을 따라서 측정된 속도가 최저 값을 보여 화강암의 제 1결을 따라 가장 많은 미세균열이 발달하였음을 지시한다.

피로하중을 받고 난 시료에서 측정된 건조 P파 속도는 2404 m/sec~3620 m/sec로 피로하중을 받기 전에 측정된 값에 비하여 속도가 약 10~20% 감소하였다. 피로하중을 받지 않은 시료에서는 측 방향의 속도가 최저 값을 보이는 반면에 피로하중을 받고 난 후의 시료에서는 최저 값이 횡 방향에서 관찰되어, 하중 축과 평행한 미세균열이 발달하였음을 보여준다. 압축피로하중에 의한 포천화강암의 P파속도 변화 특성은 김영화 외(1997)에 자세히 기술되어 있다.

영구변형

암석에 압축하중을 가한 후 제거하면 응력-변형률 곡선은 변형 이력(hysteresis)을 보이게 된다. 이러한 변형 이력은 암석 내에 미세균열이 발생하기 때문이고, 하중을 제거하였을 때 남게되는 변형률이 영구변형에 해당한다. Fig. 1은 포천 화강암에 압축피로하중이 가해졌을 때 나타나는 대표적인 응력-변형률 곡선으로 음의 부분은 하중이 가해지는 방향과 평행하게 부착한 변형률 게이지에서 측정된 변형률이고(축 변형률), 양의 부분은 하중이 가해지는 방향과 직각으로 부착한 변형률 게이지에서 측정된 변형률이다(횡 변형률). 축 변형률은 초기에는 큰 영구변형이 발생하지만, 피로횟수가 증가하여도 영구변형의 증가는 미미하다. 이러한 현상은 하중 축과 수직 방향인 화강암의 제 1결을 따라 분포하는 많은 미세균열들이 초기의 수회의 반복하중에서 대부분 닫힘으로써 발생한다. 반면에 횡 변형률은 초기의 수회의 피로횟수에서 많은 영구변형이 발생하였을 뿐만 아니라, 피로횟수가 증가함에 따라 계속적으로 영구변형이 증가한다(Fig. 2). 이러한 영구변형은 피로하중에 의하여 하중 축과 평행한 미

세균열이 생성됨을 의미하며, 피로횟수가 증가함에 따라 계속적으로 미세균열이 생성됨을 의미한다.

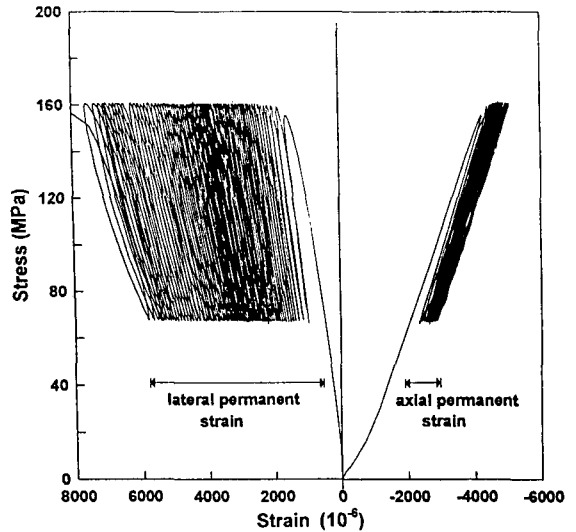


Fig. 1. A typical stress-strain curve for the Pocheon granite under uniaxial cyclic compression.

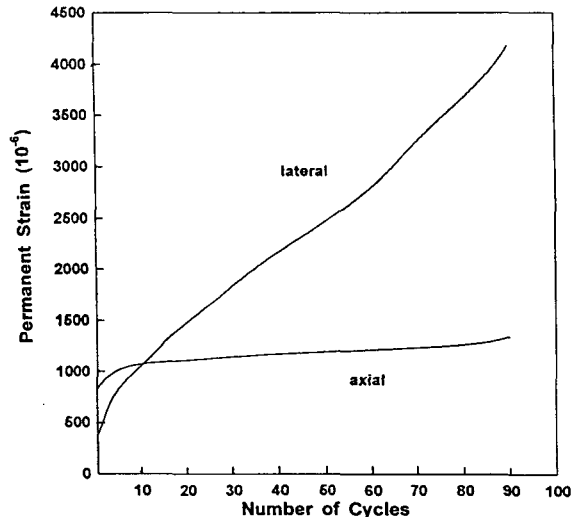


Fig. 2. Permanent strain according to the number of cyclic loading for the Pocheon granite. Permanent strain along axial direction has been occurred within a few cycle. However, permanent strain along lateral direction increased as number of cycles increased.

DSA

시료에 대하여 DSA를 실시하면 차분변형을 곡선 (differential strain curve), 누적 균열변형을 곡선 (cumulative crack strain curve) 및 균열압축을 곡선 (crack compressibility curve) 등의 자료를 얻게되어 암석내에 발달한 미세균열의 발달특성을 파악할 수 있다.

암석의 변형율에서 실리카 큐브의 변형율을 빼주면 차분변형율이 되며 차분변형을 곡선의 한 압력에서 접선을 그릴 때, 접선이 차분변형을 축과 만나는 점의 값은 그 압력까지 발생한 균열변형율 (crack strain : 미세균열이 닫히면서 발생한 변형율)이 되고, 각 압력 단계에서 구한 균열변형율을 모으면 누적 균열변형율이 된다. 또한 누적 균열변형율을 미분하면 균열압축율을 얻게되며, 균열압축율은 압력이 P에서 P+ Δ P로 증가할 때 Δ P의 구간내에서 발생한 균열 변형율의 양을 나타낸다.

DSA는 70%와 80%의 하중수준에서 단계적인 피로반복을 받은 27개의 시료 및 피로하중을 받지 않은 3개의 시료에 대하여 실시되었으며, Fig. 3은 대표적인 시료의 DSA 결과를 보여준다. 모든 시료에서 차분변형율은 음의 값을 보여 시료의 변형율이 실리카 큐브의 변형율보다 큼을 보여주고 있으며, 누적 균열변형율은 약 100 MPa까지는 급한 기울기로 증가하다가 100 MPa 이상의 압력에서는 기울기가 완만하여 대부분의 미세균열이 100 MPa 이하의 압력에서 닫히는 낮은 중횡비 (aspect ratio)를 보이고 있다. 균열압축율은 20~30 MPa 사이에서 최대 값을 보여 이 압력의 구간에서 닫히는 미세균열의 분포가 가장 우세함을 보여준다. 각 방향에 따른 누적 균열변형율은 약간의 차이를 보여, 피로하중을 받지 않은 시료의 경우 하중 축에 수직인 방향의 균열 변형율이 최대 값을 보여 하중 축에 수직인 방향으로 가장 많은 균열이 분포하고 있다. 이러한 현상은 시료 성형시 석재의 제1결을 하중 축에 수직인 방향으로 선정하였고, 제1결을 따라 가장 많은 미세균열이 분포하고 있다는 다른 연구결과와 일치한다 (장보안 외, 1994). 그러나 피로하중을 받고 난 후의 균열 변형율은 하중 축에 수직인 방향이 대체적으로 가장 낮은 값을 보여, 수평의 균열 발생이 가장 낮음을 보여준다. 위의 결과는 피로하중이 가해질 때 대부분의 미세균열은

하중방향과 평행하게 발달함을 지시한다.

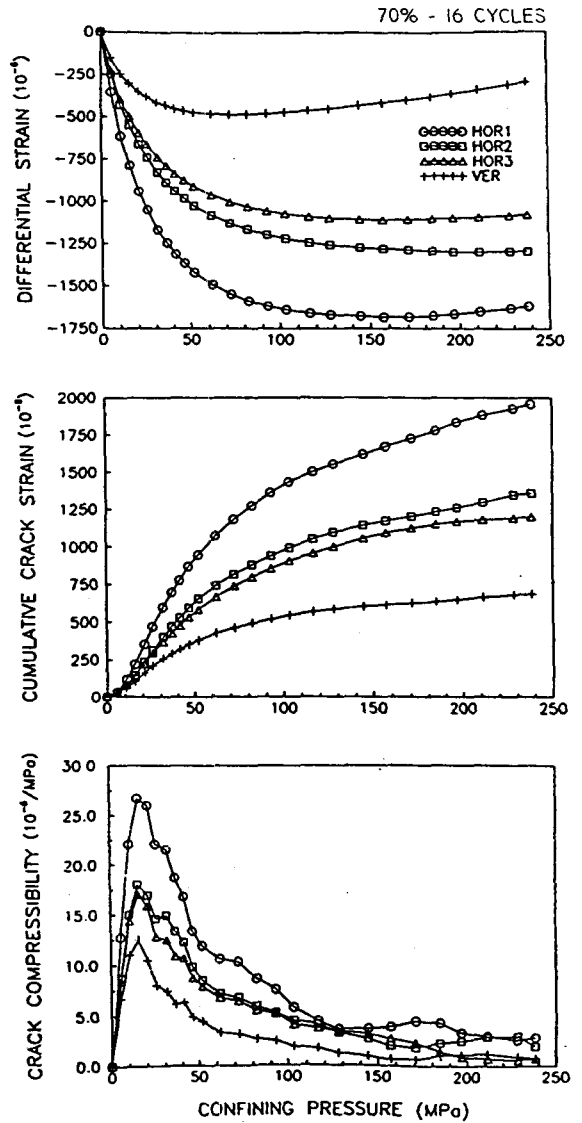


Fig. 3. Results of differential strain analysis for the sample experienced 16 cycles under 70% dynamic strength.

토 의

피로하중에 의한 미세균열 발달

누적 균열변형율은 각 방향의 균열변형율이다.

피로하중에 의한 포천화강암의 미세균열 발달특성

그러므로 서로 직각인 세 방향에서 측정된 누적 균열변형률의 합은 전체적인 미세균열의 발달상태를 나타낸다. 이를 균열공극율(microcrack porosity)이라 하며, Fig. 4는 70% 및 80% 피로하중을 받은 시료와 받지 않은 시료에 대한 압력에 따른 균열공극율을 보여준다. Fig. 4의 균열공극율 곡선은 피로하중에 의하여 생성된 미세균열과 피로하중을 받기 전에 이미 시료에 내재한 모든 미세균열의 발달 양 및 특성을 보여주고 있다. 전체적으로 피로하중을 받고 난 시료의 누적 균열변형률이 피로하중을 받지 않은 시료보다 큰 값을 보여 피로하중에 의하여 미세균열이 생성되었음을 보여준다. 그러나 80%

하중수준에서 4회의 피로반복을 받은 시료의 경우 피로하중을 받지 않은 시료보다 낮은 값을 보여, 시료의 동질성에 문제가 있음을 나타낸다.

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. 5와 같다. Fig. 5의 균열공극율 곡선은 누적곡선이므로 양의 기울기를 보이는 부분은 미세균열이 계속 닫히고 있음을 지시하고, 수평의 기울기는 압력이 증가할 때 닫히는 미세균열이 거

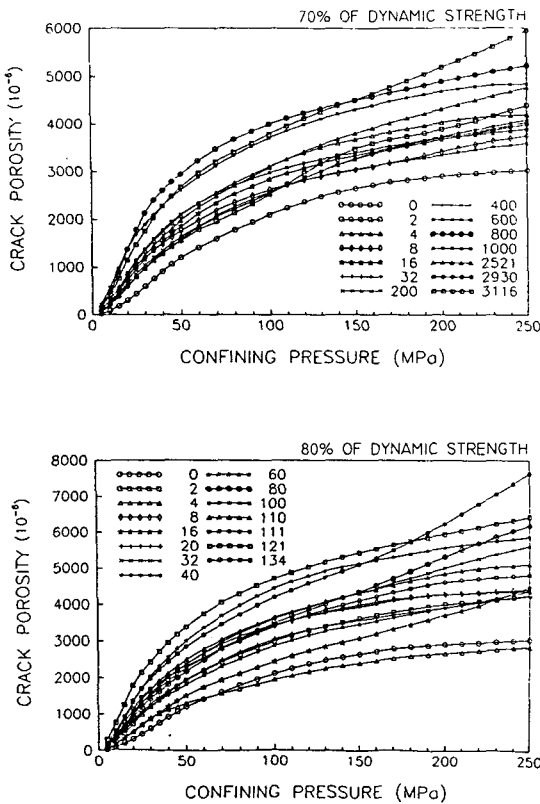


Fig. 4. Crack porosities versus confining pressures for the samples experienced cyclic loadings. These crack porosities include crack porosity due to pre-existing microcracks as well as those produced by cyclic loading.

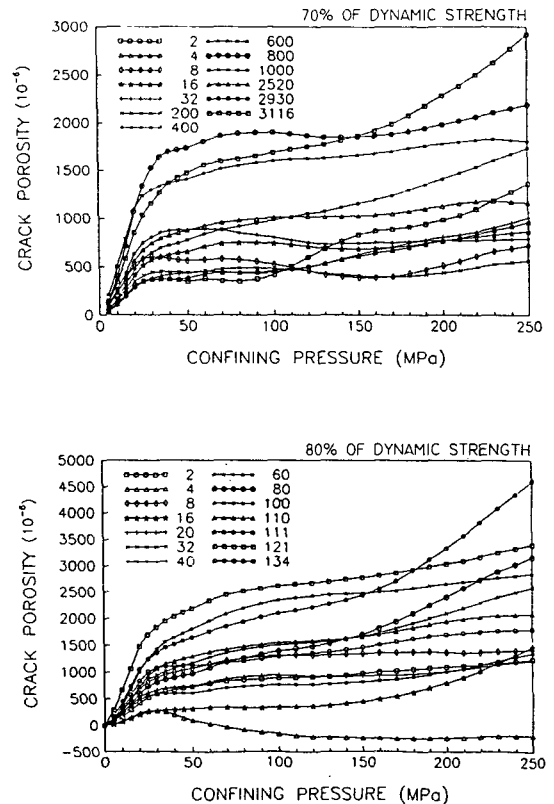


Fig. 5. Microcracks porosities due to new microcracks produced by cyclic loading versus confining pressure. Most microcracks closed at low pressure, indicating very flat cracks.

의 없음을 나타낸다. 피로하중에 의하여 생성된 미세균열은 거의 대부분의 시료에서 약 40 MPa까지는 양의 기울기를 보이다가, 그 이상의 압력에서는 거의 수평의 기울기를 보여 피로하중에 의하여 생성된 미세균열은 매우 낮은 중횡비를 가짐을 알 수 있다. 전반적으로 80% 하중수준에서 생성된 미세균열의 발달 양이 70% 보다 큰 값을 보여 하중수준이 높을수록 미세균열이 많이 생성되고 있음을 시사한다.

피로횟수와 균열공극률

Fig. 6은 피로하중에 의하여 생성된 미세균열의 발달상태와 피로횟수의 관계를 보여준다. 전반적으로 80% 하중수준 하에서의 미세균열 발달이 70% 하중수준에서 보다도 높은 경향을 보이나, 상당히 분산된 양상을 나타낸다.

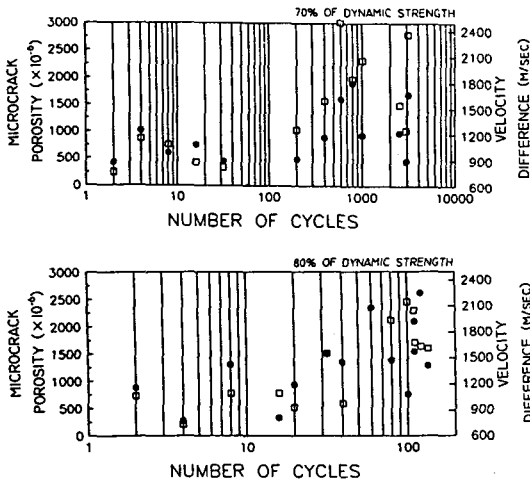


Fig. 6. Microcracks porosities and velocity difference in samples after cyclic loading. Solid circle(●) and open rectangle(□) represent microcrack porosity and velocity difference, respectively.

70% 하중수준에서 미세균열 발달 양은 2회까지는 급격하게 증가한 후, 2회 부터 약 200회까지는 거의 일정한 양을 보여, 초기 수 회의 피로하중에 의하여 많은 미세균열이 생성된 후 약 200회까지는 미세균열의 발달이 거의 없음을 보여준다. 이러한

현상은 시료 내에 이미 내재하고 있던 미세균열에 의하여 생성되는 미세균열들은 초기 수회에서 생성이 완료되고, 이 후에는 새로운 미세균열이 생성되기 위한 에너지를 축적하는 기간으로 생각된다. 그러나 피로횟수가 200회 이상이 되면 피로횟수가 증가함에 따라 미세균열의 양 또한 증가하는 형태를 보여, 이 구간에서는 앞에서 축적된 에너지에 의하여 피로횟수에 따라 미세균열이 계속 생성됨을 나타내며, 시료의 파단에 근접한 2000회 이상의 피로하중을 받은 시료에서는 미세균열의 양이 감소하여 많은 미세균열들이 연합하여 큰 규모의 균열로 진행되었음을 시사한다.

80% 하중수준에서는 초기 수회의 피로횟수에서 70% 하중수준의 약 2배에 해당하는 미세균열이 발달하여, 미소한 하중수준의 증가가 암석에 상당한 손상을 주는 것으로 판단된다. 미세균열은 약 20회까지는 거의 증가하지 않으나, 20회 이 후에는 피로횟수가 증가함에 따라 증가하는 형태를 보인다. 미세균열의 최대 발달 량은 70% 하중수준과 유사하게 2700 με 정도를 보여, 포천 화강암의 경우 부피의 0.3% 정도의 미세균열이 하중에 의하여 생성되면 암석이 파괴에 이르게 됨을 나타낸다.

초음파 속도와 균열공극률

피로횟수에 따른 미세균열의 공극률과 피로하중의 받기 전 후의 시료에서 측정된 초음파속도의 차이는 Fig. 6에서 보여준다. 전반적으로 균열 공극률이 큰 시료에서 초음파 속도 차이도 큰 경향을 보여 미세균열의 발달 형태를 잘 나타내 준다. 그러나 70% 하중수준에서 약 100회까지는 미세균열의 발달이 속도 차이보다 큰 값을 보이나 100회 이상에서는 초음파 속도 차이가 미세균열의 발달 양보다 커진다. 초음파 속도는 균열의 길이에 영향을 받으나 DSA는 균열의 길이에 대한 영향을 적게 받음을 감안하면 100회 이후에서는 미세균열이 연합하는 단계로 사료된다. 80% 하중 수준에서도 비슷한 경향을 보여 약 30회 이전의 피로횟수에서는 균열공극률이 큰 반면에 이후의 피로반복에서는 초음파 속도가 미세균열 공극률보다 큰 값을 보여, 미세균열들이 연합하여 규모가 비교적 큰 균열이 발달하고 있음을 나타낸다.

영구변형과 균열공극률

암석은 반복피로를 받으면 영구변형이 발생한다. 이러한 영구변형은 암석내에 미세균열이 생성되므로 발생한 변형으로 알려져 있다. 암석에 발생한 부피의 변화는 체적증가 (dilatancy)로 표시될 수 있으며, 이는 세 방향의 변형율의 합으로 구해진다.

$$\Delta d = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$$

Fig. 7은 피로횟수에 따른 체적증가와 미세균열의 발달을 보여준다. 70% 하중수준에서 체적증가는 약 1000회까지 거의 일정한 형태를 보이다가 그 이후에는 증가하는 양상을 보여 미세균열의 발달과는 약간 상이한 형태를 보인다. 또한 체적증가는 미세균열의 발달보다 낮은 값을 보여, 낮은 하중수준에서 체적증가는 미세균열의 발달특성과 일치하지 않음을 알 수 있다. 그러나 80% 하중수준에서

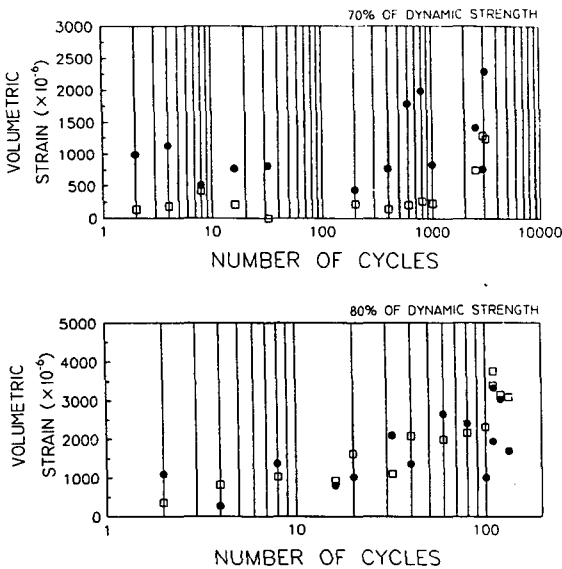


Fig. 7. Microcrack porosities and dilatancies of samples. Solid circle (●) and open rectangle (□) represent microcrack porosity and dilatancy, respectively. The dilatancies are generally lower than microcrack porosities in samples under the loading level of 70% dynamic strength. However, they are almost same in samples under the loading level of 80% dynamic strength.

는 체적증가와 미세균열의 발달이 거의 일치하며 피로횟수가 증가함에 따라 체적증가도 증가하는 양상을 보여, 체적증가가 미세균열의 발달 특성을 잘 반영하는 것으로 해석할 수 있다.

결론

경기도 포천지역에 분포하는 중생대 유라기 화강암에 피로하중을 가하여 피로하중에 따른 암석의 거동과 미세균열의 발달 특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 화강암에 파괴강도의 50% 이상의 피로하중이 가해지면 미세균열이 생성되며, 이때 방향은 피로하중이 가해지는 방향과 평행한 방향으로 주로 발생한다.

2. 미세균열은 피로하중이 가해지는 초기 수십 내지 수십 회에 상당히 많은 양이 생성된 후, 일정한 피로횟수까지는 피로횟수가 증가하여도 미세균열은 거의 생성되지 않는다. 이러한 현상은 기존의 미세균열을 따라 생성되는 새로운 미세균열들은 피로하중을 받는 초기에 생성을 완료하기 때문으로 판단된다.

3. 피로하중에 의한 미세균열의 발달은 피로하중을 받기 전에 이미 시료에 내재한 미세균열의 양이 큰 영향을 미친 것으로 사료되며, 그 원인은 피로하중에 의하여 생성된 대부분의 미세균열이 기존의 미세균열을 따라 전파되거나 생성되기 때문으로 사료된다.

4. 초음파 속도 측정, DSA 및 영구변형 측정은 암석내의 미세균열 발달을 잘 지시한다. 그러나 각 방법에 의하여 규명된 미세균열의 발달상태는 약간의 차이를 보여, 미세균열의 발달을 정량적으로 규명하기 위해서는 각 방법에 의하여 측정된 결과를 종합하여 해석하여야 할 것으로 판단된다.

5. 80% 피로하중 수준에서 초기에 발달하는 미세균열은 70% 하중수준에 비하여 2배 정도로 높아서 하중수준이 커질수록 초기에 발달하는 미세균열의 양은 많아질 것으로 판단된다. 그러나 파괴 직전의 시료에 발달한 미세균열의 양은 암석 부피의 약 0.3% 정도로, 화강암의 경우 부피의 0.3% 정도의 미세균열이 발달하면 암석이 파괴에 도달하는

것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 한국원자력 연구소 부설 원자력 환경 관리센터의 지원과 (과제명 : 방사성 폐기물 지하처분장의 Fracture System 변화의 예측 모델 개발을 위한 연구) 강원대학교 부설 자원개발연구소의 일부 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드린다. 또한 이 논문의 심사를 맡아서 좋은 지적을 해주신 장 태우 교수님과 최 병렬 교수님께 감사드린다.

참 고 문 헌

김영화, 장보안, 김재동, 이찬구, 문병관, 1997, 압축 피로에 의한 포천화강암의 P파속도 변화특성, 30, 231-240.

장보안, 최인선, 김재동, 1994, 피로하중에 의한 화강암류 암석의 미세균열 발달특성, 지질학회지, 30, 613-631.

Attewell, P.B. and Farmer, I.W., 1973, Fatigue behaviour of rock, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 10, 1-9.

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.

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.

O'connel, B.J. and Budiansky, B., 1974, Seismic veolcities in dry and cracked solids, Jour. Geophy. Res., 79, 5412-5425.

Scholz, C.H., 1968, Mechanism of creep in brittle rock, Jour. Geophy. Res., 73, 3295-33022.

Siegfried, R. and Simmons, G., 1978, Characterization of oriented cracks with differential strain analysis, Jour. Geophy. Res., 83, 1269-1277.

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.

Walsh, J.B., 1965, The effect of cracks on compressibility of rock, Jour. Geophy. Res., 70, 381-389.

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.

Walsh, J.B., 1966, Seismic wave attenuation in rock due to friction, Jour. Geophy. Res., 71, 2591-2599.

장 보안, 김 영화
 강원대학교 지구물리학과
 (200-701) 강원도 춘천시 효자동 192-1
 TEL : (0361) 250-8583, 250-8582
 FAX : (0361) 244-8580
 e-mail : bajang@cc.kangwon.ac.kr
 : yhkim@cc.kangwon.ac.kr

김 재동
 강원대학교 공과대학 자원공학과
 (200-701) 강원도 춘천시 효자동 192-1
 TEL : (0361) 250- 6256

이 찬구
 한국 원자력환경기술연구원
 대전광역시 유성우체국 사서함 149
 TEL : (042) 870-0275
 e-mail : cgrhee@dava.kepco.co.kr