터널과 지하공간, 한국암반공학회
Vol. 6, 1996, pp. 144~156

TUNNEL & UNDERGROUND Vol. 6, 1996, pp. 144-156
J. of Korean Society for Rock Mech.

국내화강석재의 피로변형거동에 관한 연구

김재동[1] · 정윤영[2] · 장보안[3]

A Study on the fatigue deformation behavior of granitic stone in Korea

Jaedong Kim, Youn-Young Jeong and Bo-An Jang

ABSTRACT The deformation behaviors under uniaxial compressive cyclic loading were investigated for fresh rocks and freeze-thaw cycled samples. The Pocheon granite which is one of the most popular building stone in Korea was selected for tests. 0.5 Hz and 50% of dynamic strength were used as test conditions for frequency and fatigue span, respectively. For freeze-thaw procedure, samples were frozen for 3 hours under the temperature of -20°C and then followed 3 hours thawing under the temperature of +20°C. Twenty seven samples were used as untreated and seventy three for freeze-thaw samples. No failure occurred up to 15000 cycles at the stress level of 60% dynamic strength, indicating that the lowest stress level for fatigue failure may be around 60% of dynamic strength. Permanent strain and damping capacity curves show that there were three stages when rock behaves like under creep. Young's moduli were increased and Possion's ratios were decreased with the increase of the number of cycles. Possion's ratios varied more rapidly than Young's moduli did with the increase of the number of cycles. This may represent that most microcracks developed by fatigue stress are parallel to the axis of loading. The deformation behavior of freeze-thaw cycled samples were almost the same as that of untreated samples. However, the result of freeze-thaw cycled samples showed lower regression constant, indicating that the physical durability of rock is much lowered because of cyclic temperature variation.

1. 서 론

암석 등과 같은 고체재료에서는 그 고유의 강도보다 낮은 응력수준에서 장기간의 반복하중에 의해 피로파괴가 발생한다는 것은 이미 잘 알려진 현상이다. 피로파괴가 발생하지 않는 응력수준인 피로하한 응력수준(fatigue limit)은 금속재료에 있어서는 연성재질의 경우가 강철이나 합금 등과 같은 취성재질보다 낮으며 일반적으로 금속보다 취성적이라고 알려져있는 암석에 있어서는 정하중강도의 50~70% 범위에 속한다고 알려져 있다.[1]

피로파괴에 대한 연구는 큰 재난을 초래할 수 있는 지진과 관련하여 오래 전부터 시작되었다. 암석의 피로현상에 대한 기초 연구는 파괴에 이르기까지의 피로하한 응력수준, 변형률의 발생특성, 응력조건에 따른 특성 등을 규명하기 위한 부분에 관한 것으로, 균열형성이 시작되는 응력수준에서 피로하중에 의해 시험편내 축적되는 변형률에너지가 임계에너지수준을 초과할 때 피로파괴가 발생함을 논증한 Attell and Farmer (1973)를 비롯하여, 피로시험시 암석내부에서 발생하는 damage와 변형률의 발달정도,[2] 일축 및 삼축응력하에서 반복하중에 의한 암석의 팽창성,[3] 암석의 피로파괴에 대한 피로응력 주파수의 영향[4] 등의 연구가 이루어져 왔다.

국내에서의 연구는 이원규,[5] 김일중[6] 등에 의한 소수

* 1996년 1월 15일 접수
1) 정회원, 강원대학교 자원공학과 부교수
2) 학생회원, 강원대학교 자원공학과 대학원 박사과정
3) 정회원, 강원대학교 지구물리학과 조교수

의 연구결과가 발표된 바 있다. 이 연구들은 피로거동을 탄성계수, 포아송비, 영구변형률 등에서의 변화로서 설명하는 기초 연구의 수준에 머무르고 있다.

본 연구는 이러한 연구동향을 고려하여 암석에 대한 기초적인 피로변형거동을 규명함과 아울러 온도에 의한 영향, 즉 동결융해를 반복적으로 받은 암석에 대한 피로거동을 규명하고자 하였다. 연구결과에 대한 공학적 응용성을 고려하여 시료로는 국내에서 생산되는 석재류중 대부분을 차지하는 화강암류(94%, 1990년)석재인 포천화강암을 채택하였다.

석재는 최근 사용이 급증하고 있는 암석재료로서 강도와 내구성이 우수하고 고유의 미적특징을 갖고 있으며 건축, 토목, 조각 및 공예품 재료로 광범위하게 이용되고 있다. 특히 최근에 들어서는 각종 건물의 내외장재나 구조용 토건재로 활용범위가 확장되는 추세이다. 이러한 석재의 다양한 활용분야를 고려할 때 전술한 동적 반복하중이 석재에 가해질 수 있으므로 피로의 영향을 역학적으로 규명할 필요가 있다. 또한 사계절의 변화가 뚜렷한 우리나라의 경우 온도변화에 따른 동결융해 현상의 반복이 석재의 역학적 내구성에 중요한 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 체계적 연구가 필요하다고 판단된다.

동결융해에 관한 시험조건이나 연구는, 미국과 일본에서 콘크리트에 관하여 규정한 동결융해시험법(ASTM C-666[7], JIS A 6204[8])과, 암석에 대해 일본토질공학회에서 제시한 동결융해시험법9), 및 일부 연구사례가 있을 뿐이다. 이러한 국내외에서의 연구들은 주로 동결융해작용이 암석의 기본적 물성에 미치는 영향에 대한 연구에 집중되어 있으며 피로파괴와 같은 역학적 특성에 관한 부분은 아직 이루어지지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 전술한 바와 같이 암석재료로서 석재의 피로변형거동을 규명함과 아울러 피로거동에 대한 동결융해의 영향을 알아보고자 하였다. 연구목적에 따라 전체 시험편중 일부는 동결융해과정을 거치지 않은채 피로시험을 실시하였고, 나머지 시험편에 대해서는 5단계(8회, 24회, 36회, 72회, 108회)의 동결융해과정을 반복한 후 각 단계별로 피로시험을 실시하였다.

2. 시료, 시험장치 및 방법

2.1 시료 및 시험편 성형

본 연구에서 사용된 시료는 입도상 중립질에 속하는 경기도 포천산 석재용 화강암이다. 시험편은 석산현장에서 채취된 한 변의 길이 약 30 cm인 정방형 입방체의 석재용 암석블럭으로부터 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 포함하고 있지만, 본 연구에서는 결(rift plane)의 이방성이 시험결과에 미치는 영향을 배제하고자 제 2결은 무시하고 단지 주결(primary rift plane)에 수직한 방향으로만 시추하여 암석코어를 얻었다. 시험편 직경은 BX 규격(4.323±0.02 cm)으로 하였고, 시험편 길이는 직경의 2배로 하였다. 이때, 시험편 양단면의 평형도는 0.03 mm 이내로 유지하였다. 기본 물성으로는 국제암반역학회(International Society for Rock Mechanics)의 시험기준에 따라 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성파속도, 쇼아경도, 공극율, 흡수율, 진비중, 겉보기 체적비중 등을 측정하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

2.2 시험장치

시험기는 미국 SBEL(Structural Behavior Engineering Laboratories)사의 암석 일축압축시험용 서보시스템(Servo Dynamic Test System, SBEL, Model 547)으로 최대 가압용량은 100톤이다. 시험기는 가압용 프레임, 조정부(Control Panel), 유압펌프로 구성된다(Fig. 1). 피로시험시 하중파형, 주파수, 응력진폭등의 시험기준을 설정하는 서보프로그램(Servo Controller Software)과 이들을 입력신호로 만드는 함수발생기(Function Generator)는 16비트 개인용 컴퓨터에 별도로 내장되어 있다. 피로횟수의 측정은 조정부에 탑재된 계수기(Event Counter)를 이용하였다.

Table 1. The physical properties of the Pocheon granite

Property	Avg. Value
Uniaxial 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	3015 m/sec
Shear Velocity	1679 m/sec
Apparent Specific Gravity	2.602
True Specific Gravity	2.624
Porosity	0.797%
Absorption	0.306%
Shore Hardness	65±3

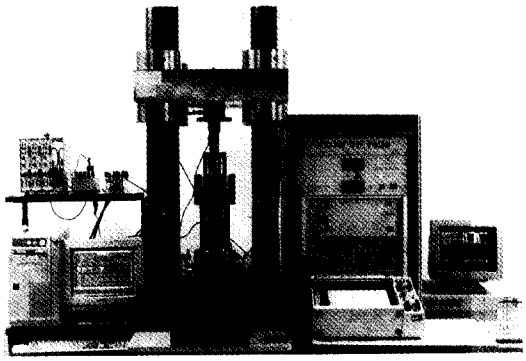

Fig. 1. A view of testing apparatus.

서보시스템은 Closed System으로 시험기의 각부분이 유기적으로 연결되어 있다. 서보프로그램에서 설정된 시험기준이 함수발생기를 통해 조정부에 탑재된 서보조정기(Servo Controller)의 입력신호로 바뀐다. 입력신호와 Load cell로부터의 출력신호는 상호 제어되는 closed loop를 구성하게 된다.

2.3 시험방법

시험방법은 크게 피로하한 응력수준 및 피로에 대한 특성을 규명하기 위한 응력제어 일축압축 피로시험과, 반복적인 동결융해과정이 시험편에 미치는 효과를 얻기 위한 동결융해시험으로 구분된다. 전체 100개의 시험편 중 21개 시험편에 대해서는 본래의 신선한 상태로 피로시험을 실시하였고 6개의 시험편으로 기본물성을 측정하였다. 나머지 73개의 시험편은 일정수의 동결융해과정을 반복한 후 피로시험을 실시하였다. 시험조건은 신선한 상태로 실시된 피로시험과 동일하게 유지하였고, 동결융해과정의 반복수는 5단계(8, 24, 36, 72, 108회)로 설정하였다. 각 동결융해반복 단계별로 피로시험을 수행하였으며 최대 피로횟수는 실험상의 편의상 15,000회로 한정하였다.

2.3.1 피로시험

암석의 피로특성 및 동결융해시험이 피로특성에 미치는 영향을 연구하고자 응력제어 피로시험의 시험방법상 중요한 시험기준들-응력파형(loading waveform), 응력속도(stress rate), 응력진폭(cycle amplitude)-을 Table 2와 같이 설정하였다. 본 연구에서 기준으로 사용한 동하중강도(dynamic peak stress)는 206 MPa이며, 응력속도는 시험기의 가압능력을 고려하고 가혹한 동하중상태를 구현하기 위하여 100 MPa/sec.로 설정하였다. 응력수준(stress level)은 동하중강도를 기준으로 Table 3과 같이 설정하였다. 36회, 108회의 동결융해과정을 거친 시험편에 대해서는 응력수준을 각각 신선한 상태의 동하중강도의 80%, 60%와 80%, 70%, 60%로 제한하였다. 본 시험에서 선택한 응력수준별 시험편 수는 Table 3과 같다. 응력진폭은 상한 응력수준과 하한 응력수준의 차이로서 동하중강도의 50%로 설정하였다.

Table 2. The conditions for dynamic fatigue test

Content	Condition
Loading waveform	haversine
Stress rate	100 MPa/sec
Cycle amplitude	103 MPa
Frequency	0.5 Hz
Dynamic peak stress	206 MPa

Table 3. The specimen numbers for each stress level in the fatigue test

	Ft 0	Ft 8	Ft 24	Ft 36	Ft 72	Ft 108
Dynamic S_c	4	3	3	3	3	3
90%	3	3	3		3	
85%	2	2	2		2	
80%	3	4	4	3	3	3
75%	2	2	2		2	
70%	3	2	2		2	2
65%	2					
60%	2	2	2	3	3	2
total	21	18	18	9	18	10

*Ft: freeze-thaw
*Numbers represent the number of freeze-thaw cycles

피로하중은 초기하중으로 인한 충격의 발생을 막기 위해 1 MPa을 서서히 가압한 후 동적피로하중을 가하였다. 시험결과는 먼저, 시험편에 부착시킨 스트레인 게이지를 통해 얻은 측정치를 변형률 증폭기(Signal Conditioning Amplifier, Measurements Group Inc., Model 2310)로 증폭하여 시험편의 변형률을 얻고 시험기에 장착된 수압기(load cell)를 통해 가해진 하중을 얻은 후, 이렇게 얻은 두 가지 측정치를 디지탈 변환장치(A/D Converter, Advantech Co., Model Pcl-711)를 통해 16비트 개인용 컴퓨터에 저장하는 방법으로 구하였다.

2.3.2 동결융해시험

콘크리트에 관하여 규정된 동결융해 시험법(ASTM C-666, JIS A 6204)은 있지만, 암석에 대해서는 다수

Table 4. The conditions for freeze-thaw tests

	ASTM C-666	ASTM D-560
Object	Concrete	Soil-Cement
Temperature (°C)	+4.4~-17.8	+21~-23
Test subject	Weight Dyn. Young's	Weight Volume
	JIS A 6204	JSSMFE
Object	Concrete	Rock
Temperature (°C)	+5~-18	+20~-20
1 cycle (hour)	3~4	6
Test subject	Weight Dyn. Young's Modulus	Weight, Absorption Shore hardness Specific Gravity Dyn. Young's Modulus

(JSSMFE → the Japan Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering)

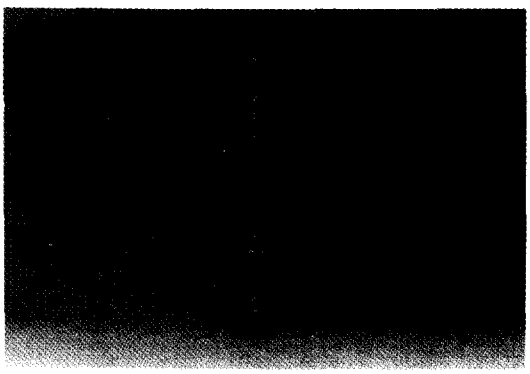

Fig. 2. Instrument for measuring temperature within the specimen.

의 연구사례가 있을 뿐이다. 그러므로 본 시험은 Table 4에 제시된 네 가지 시험법 - ASTM C-666에 규정된 콘크리트 동결융해 시험법, ASTM D-560에 규정된 Soil-Cement 동결융해 시험법, JIS A 6204에 규정된 콘크리트 동결융해 시험법, 일본토질공학회에서 제시한 동결융해 시험법 - 의 시험조건을 고려하여 실시하였다.

동결융해 시험은 먼저 시험편을 물 속에서 24시간 이상 침수시켜 포화시킨다. 포화된 시험편을 -20°C에서 3시간 동결시킨 후 20°C에서 침수상태로 3시간 녹이는 과정을 일정 수만큼 반복한다. 이렇게 소정의 동결융해 과정을 마친 시험편을 완전 건조시킨 후, 24시간 이상 대기 중에 방치한 다음 피로시험용 시험편으로 사용하였다.

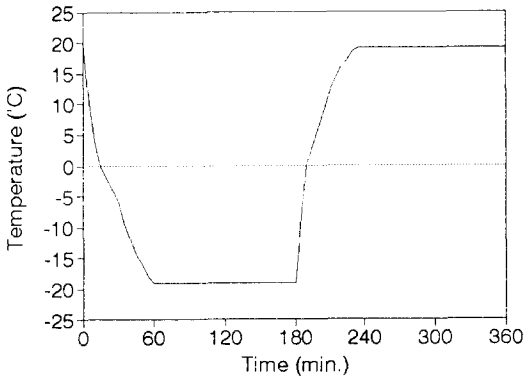

Fig. 3. Temperature variation within the specimen during single freeze-thaw cycle.

동결융해 과정시 시험편 내부의 온도변화를 검증하고자 Fig. 2와 같이 시험편 내부에 직경 1 inch의 hole을 약 4.5 cm의 깊이로 천공한 후 온도계를 삽입하였다. 시험편 내부의 빈 공간은 시료의 암분(200 mesh)을 다져서 채웠다. 온도측정은 1 cycle(6 시간)동안 5분마다 수행하였다. 시험편 내부의 온도는 다른 연구사례에서 적용한 시험조건, 온도범위, 주기가 상이하여 비교할 수 있는 자료는 없지만 Fig. 3을 통해 시험편 내부에서 동결융해 과정이 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

3. 압축피로 시험결과 및 고찰

3.1 정하중-동하중 상태의 비교

일축압축시험에서 정하중 및 동하중 상태는 응력속도에 따라 구분할 수 있다. ISRM 표준 시험법에 명시된 정하중하의 일축압축시험에 대한 시험조건을 살펴보면, NX코어 시험편에 대해 파괴시까지 약 5~10분이 소요되는 것으로 규정하고 있다. 이것을 강도 100~200 MPa인 암석에 적용해 보면 최대 약 1 MPa/sec.까지를 정하중 상태의 응력속도로 생각할 수 있다. 따라서 응력속도를 100 MPa/sec.로 유지하는 일축압축 피로시험은 동하중 상태에서의 시험으로 간주할 수 있다. 정하중 및 동하중 상태의 차이점을 일축압축강도 등의 물성과 일축압축시험에서 얻을 수 있는 응력-변형률 선도를 이용하여 고찰하였다.

동적일축압축시험에서 얻을 수 있는 응력-변형률 선도는 동하중 상태의 시험편의 변형 및 파괴 거동을 나

타내는 것으로 정하중 상태의 일축압축강도 측정시 얻을 수 있는 응력-변형률 선도와는 다른 몇 가지 특징을 나타내었다. 일반적으로 정적일축압축시험에서 가압초기에 나타나는 시험편의 변형은 비선형적인 거동을 보이는데, 이것은 시험편내의 잠재균열과 공극이 압축응력에 의해 폐색되는 것에 기인한다고 알려져있다.[11] Fig. 4에서와 같이 정하중 상태와 동하중 상태에서의 거동을 비교해 보면 동하중 상태에서는 가압초기에 비선형적인 변형거동이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 시험편 파단부근에서의 소성변형은 정하중상태에 비해 동하중상태에서 보다 작게 나타남을 알 수 있다. 전체적인 시험편의 변형거동은 두 하중상태 모두 시험편 횡방향에 비해 축방향에서 취성적인 변형거동을 보인다.

응력속도가 물성에 미치는 영향을 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비를 통해 살펴보았다. Table 5와 같이 동하중상태에서 일축압축강도 · 탄성계수는 각각 10%, 9%의 상승을 나타내었다. 응력속도가 증가하면 일축압축강도 · 탄성계수에서의 증가가 나타난다고 알려져있으며[10] 시험결과는 이러한 경향과 잘 일치한다.

3.2 피로곡선과 영구변형

3.2.1 피로곡선

Fig. 5는 동하중강도(206 MPa)의 80% 응력수준하에서 90회의 피로 후 파단된 시험편에서 얻은 전형적인 피로곡선이다. 시험편 파단시까지의 총변형률 및 각 피로횟수당 변형률의 증가량이 축방향보다는 횡방향에서 두드러짐을 볼 수 있고 피로시험시 변형률의 변화는 양방향 모두 크게 세 단계로 구분될 수 있다. 변형률의 변화에 대한 단계별 구분은 Homand-Etienne *et al.* (1983)의 연구에서도 유사하게 보고된 바 있다.

피로곡선은 피로시험시 시험편의 변형거동을 나타내는 것으로 완전탄성체가 아닌 암석에서는 일반적으로 hysteresis loop의 형태로 나타난다. 이것은 재하시 시

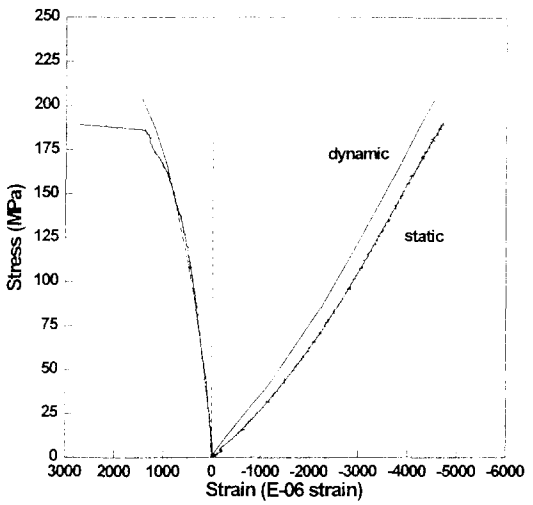

Fig. 4. Comparison between static and dynamic stress-strain curves under monotonic loading.

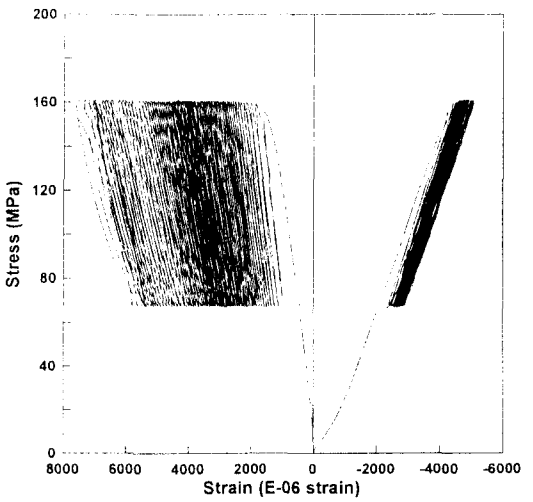

Fig. 5. A typical fatigue curve of Pocheon granite under uniaxial compression.

Table 5. The comparison of properties under static and dynamic loading

Uniaxial Compressive Strength (MPa)		Elastic Modulus (GPa)		Poisson's Ratio	
static	dynamic	static	dynamic	static	dynamic
197	206	49.09	55.49	0.234	0.178
187	210	48.22	52.79	0.292	0.146
191	204	47.62	49.5	0.2	0.136
177		46.89		0.244	
avg. 188	avg. 206	avg. 47.95	avg. 52.59	avg. 0.242	avg. 0.153

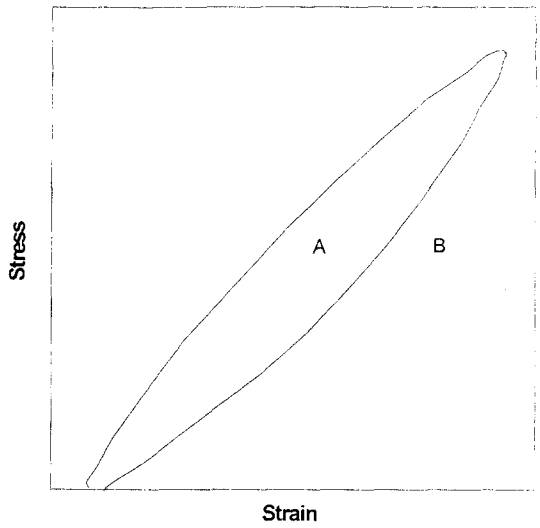

Fig. 6. A typical hysteresis loop under cyclic uniaxial compression loading.

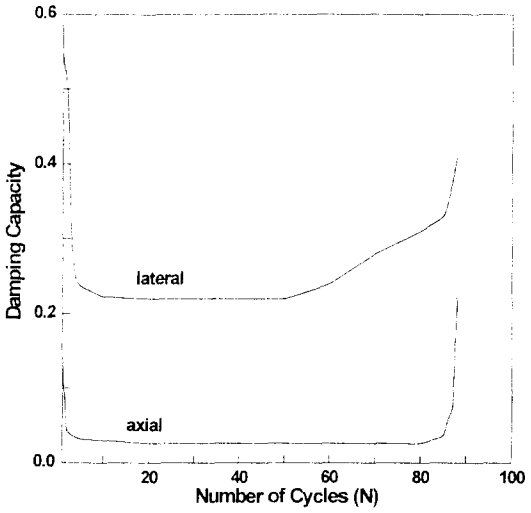

Fig. 7. Damping capacity variation of Pocheon granite under cyclic uniaxial compression loading.

험편내에 축적된 에너지가 제하시 완전히 회복되지 못하고 에너지손실이 발생하여 유발되는 현상이다.

Hysteresis loop의 면적은 재하시 단위체적당 외부로 부터 얻은 에너지와 제하시 방출한 에너지의 차를 나타내며 손실된 에너지는 피로시험시 피로균열의 생성과 성장 그리고 전파에 쓰인다. 따라서 에너지의 손실정도는 damping capacity(Ψ_s)를 통해 고찰할 수 있다. damping capacity는 식(1)과 같이 정의되며 피로시험의 경우 Fig. 6과 같이 각 피로횟수에서 피로곡선이 나타내는 응력진폭내의 면적(A+B)에 대한 hysteresis loop의 면적(A)의 비로서 정의될 수 있다.

$$\text{Damping capacity}(\Psi_s) = E_s / E_t \quad (1)$$

E_s : 각 피로횟수에서 단위체적당 손실된 에너지

E_t : 각 피로횟수의 최대변위에서 나타나는 총변형률에너지

Fig. 5의 피로곡선에서 hysteresis에 의한 에너지손실을 정량적으로 알아보고자 damping capacity를 조사하였다. Fig. 7은 각 피로횟수에 따른 damping capacity의 변화를 표시한 그림으로서 변화양상은 크게 세 단계로 구분될 수 있다. Fig. 5와 Fig. 7을 비교하면 피로시험시 hysteresis loop의 발달형태는 양방향 모두 크게 세 단계(초기, 중기, 말기)로 구분된다.

초기에서는 최초의 피로횟수(loading cycle)에서 발생한 damping capacity가 피로횟수의 증가와 더불어 감소하고 변형률의 증가율도 피로횟수의 증가와 더불어 감소한다. 이것은 가압초기에 시험편내의 잠재균열과 공극이 압축응력에 의해 폐색되는 현상에 기인하는 것으로 판단된다.[11]

중기에서는 변형률은 일정하게 증가하는 반면 damping capacity는 비교적 낮은 값을 일정하게 유지하였다. 이것은 재하시 시험편내 축적되는 에너지중 소량이 제하시마다 영구변형을 유발하며 손실되고 있는 것으로 시험편 내부에서는 피로하중에 의한 균열발달이 진전되고 있는 것으로 판단된다.

말기에서는 변형률의 급격한 증가와 더불어 damping capacity 또한 크게 증가한다. 이것은 재하시 시험편내 축적되는 에너지중 비교적 많은 양이 손실되고 있는 것으로 시험편내부에서는 대규모 피로균열의 발달에 기인하여 영구변형이 급속히 발생하는 것으로 판단된다.[11]

Fig. 7의 damping capacity에서도 축방향보다는 횡방향에서 큰 값을 나타내었다. 일반적으로 0.5의 포아송비는 완전소성체에서 나타나는 것으로 보고되고 있는데 반해, Fig. 5에서의 횡방향의 변형거동을 축방향의 변형거동과 비교할 때 '탄성학적으로 포아송비는 0.5를 넘을 수 없다.'라는 전제가 적용될 수 없음을 알 수 있다. 최근의 피로거동에 관한 연구[12]에서도 이러한 사실을 지적하고 있다. 지금까지의 연구결과에 따르면 일반탄성학적인 포아송비의 개념으로 생각할 수 없는 횡

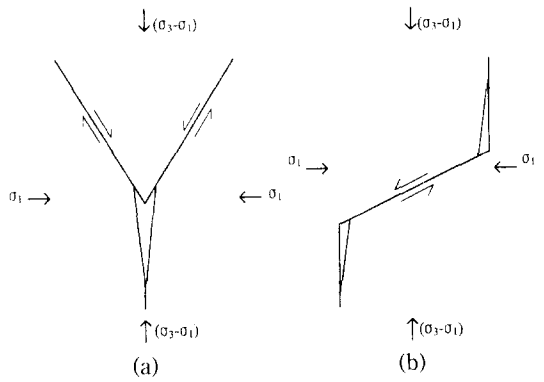

Fig. 8. Crack model proposed by Brace *et al.*

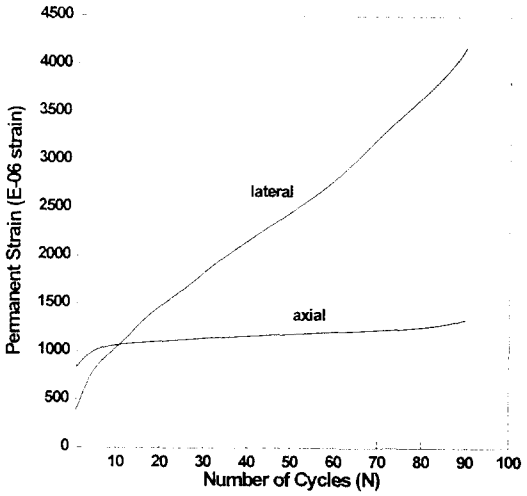

Fig. 9. Permanent strain variation of Pocheon granite under cyclic uniaxial compression loading.

방향의 변형거동은 축방향의 균열형성과 팽창에 기인한다.

Zoback and Byerlee(1975)는 이러한 변형거동이 일축압축상태에서는 잘 나타나지만 삼축압축상태에서는 봉압에 반비례한다는 시험결과를 발표하였다. Zoback and Byerlee는 삼축압축상태하에서의 실험으로부터 봉압은 축방향의 균열형성과 팽창을 억제하는 방향으로 작용한다고 설명하고 있다. 축방향으로 형성되는 균열의 메카니즘은 Brace *et al.*(1966)가 제시한 2가지 균열모델을 통해 설명될 수 있으며 Fig. 8과 같다. Fig. 8과 같이 압축응력이 가해질 때 암석입자의 경계면에서는 미끄러짐이 발생하게 된다. 미끄러짐이 커질수록 입자경계면의 마찰력이 감소되고 결국 입자경계면의 첨단부근에서 축방향의 균열이 형성된다. 따라서 형성된 축방향 균열로 인하여 과도한 횡방향 변형이 나타날 수 있다. 이러한 메카니즘에 대한 많은 연구가 필요하다고 생각된다.

3.2.2 영구변형

Fig. 9는 Fig. 5의 피로곡선에서 피로횟수에 따른 영구변형률의 변화를 예시한 것이다. 영구변형률의 변화는 양방향에서 모두 세 단계(초기, 중기, 말기)로 구분될 수 있다. 초기는 영구변형률의 증가가 점차 감소하는 단계로 피로횟수 약 5회 이내에서 볼 수 있다. 중기는 일정한 영구변형률의 증가가 발생하는 단계로 시험편파단이 임박할 때까지 나타난다. 말기는 급격한 영구변형이 발생하는 단계로 시험편 파단이 임박한 수회 미만의 피로횟수 내에서 발생한다.

영구변형률의 변화 역시 피로곡선의 변화와 동일하게 축방향보다는 횡방향에서 두드러진 변화가 나타나 시험초기부터 횡방향의 영구변형률이 완전탄성학적인 포아송비의 개념으로는 생각할 수 없는 큰 값을 나타낸다.

Fig. 9의 영구변형률의 변화양상을 Creep시험에서 볼 수 있는 변형률의 변화양상과 비교해 볼 때 매우 유사함을 알 수 있다. 초기는 primary creep의 변형거동과 중기는 secondary creep의 변형거동과 말기는 tertiary creep의 변형거동과 비교될 수 있다. 이러한 유사성을 통해 피로시험시 나타나는 변형거동은 Creep와 관련하여 생각할 수 있음을 알 수 있다.

3.3 탄성계수, 포아송비의 변화

3.3.1 탄성계수의 변화

각 피로횟수마다 재하시 응력-변형률 곡선의 접선탄성계수를 응력진폭의 50% 부근에서 구하여 탄성계수의 변화형태를 고찰하였다. Fig. 10은 피로응력수준의 영향을 알아보기 위하여 90%, 80%, 70%, 60% 응력수준에서 대표적인 피로곡선을 대상으로 탄성계수의 변화를 비교한 것이다.

탄성계수는 응력수준에 비례하여 큰 값을 나타내었으나, 전반적으로 피로횟수의 증가에 따라 감소하였다. 단, 60% 응력수준에서는 이러한 지속적인 감소경향이 나타나지 않았다.

90% 응력수준에서는 피로횟수가 증가함에 따라 탄성계수의 감소가 두드러지게 나타났는데 이것은 높은 응력수준으로 인해 급속한 파괴의 진행이 이루어지고

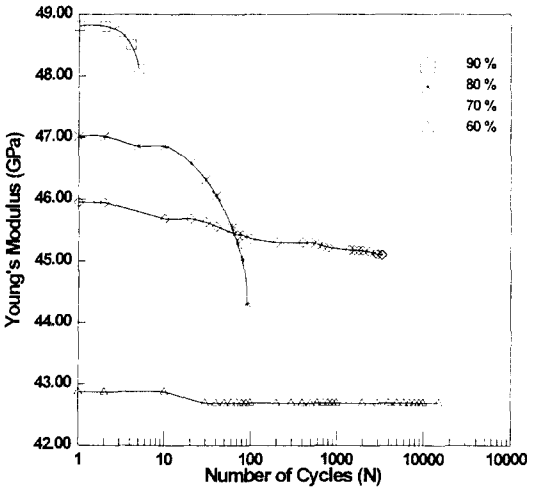

Fig. 10. Young's modulus variation of Pocheon granite under cyclic uniaxial compression loading.

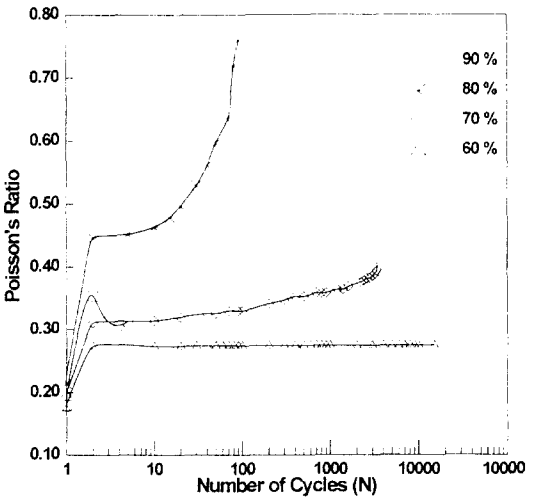

Fig. 11. Poisson's ratio variation of Pocheon granite under cyclic uniaxial compression loading.

있음을 나타낸다. 80% 응력수준에서는 탄성계수가 큰 폭으로 감소하였다. 이것은 비교적 높은 응력수준으로 인해 시험편내에서 지속적인 파괴과정이 진행되고 있는 것으로 판단된다. 70% 응력수준에서 나타난 점진적이지만 다소 작은 폭의 감소는 비교적 낮은 응력수준에 기인하는 것으로 보인다. 60% 응력수준에서는 피로횟수 30회 이후부터 피로횟수 15,000회까지 탄성계수의 변화가 나타나지 않았다. 탄성계수의 변화가 거의 나타나지 않는 점을 볼 때 60% 응력수준이 실험 편의상 설정한 최대 피로횟수 15,000회 내에서는 피로파괴가 일어날 수 없는 피로하한 응력수준으로 생각된다.

3.3.2 포아송비의 변화

포아송비는 동일 피로횟수에서 시험편 축방향의 응력-변형률 곡선의 기울기에 대한 횡방향의 응력-변형률 곡선의 기울기의 비로써 구하였다. Fig. 11은 피로응력수준의 영향을 알아보기 위하여 90%, 80%, 70%, 60% 응력수준에서 대표적인 피로곡선을 대상으로 포아송비의 변화를 비교한 것이다.

Fig. 11에서 포아송비는 첫번째 피로횟수에서 정적일축압축시험에서 얻을 수 있는 포아송비보다 작은 값을 나타내었으나 두번째 피로횟수부터는 정적일축압축시험에서 얻을 수 있는 포아송비보다 큰 값을 나타내었다. 단 90% 응력수준에서는 첫번째 피로횟수부터 비교적 낮은 초기치를 나타내었고 두번째 피로횟수 이후로는 포아송비가 감소하였다. 이것은 높은 응력수준에 기인하여 시험초기부터 피로균열이 형성되고 있음을 나타낸다고 판단된다. 포아송비는 90% 응력수준을 제외한 나머지 응력수준에서, 응력수준에 비례하여 큰 값을 나타내었으며 포아송비의 변화폭 또한 응력수준에 비례하여 큰 변화폭을 나타내었다. 60% 응력수준에서는 두번째 피로횟수 이후로는 피로횟수 15,000회까지 포아송비의 변화가 거의 나타나지 않았으므로 포아송비의 변화에서도 60% 응력수준이 피로파괴가 일어날 수 없는 피로하한 응력수준으로 생각된다.

두번째 피로횟수에서 나타난 급격한 포아송비의 증가와 피로횟수에 따른 포아송비의 증가는 피로시험시 횡방향의 변화가 두드러지게 나타나고 있음을 말한다. 이것은 3-2절의 피로곡선에서 각 피로횟수당 변형률의 증가량과 영구변형률이 축방향보다 횡방향에서 크게 나타나는 것과 관련지어 생각할 수 있다. 이러한 관련성은 시험편 내부에서 축방향의 균열형성과 팽창이 발생하고 있음을 설명하고 있다.

3.4 S-N 곡선

S-N 곡선은 대표적인 피로시험의 시험결과로서 피로응력수준에 대해 시험편 파단이 일어난 피로횟수의 관계를 나타낸다.

Fig. 12는 총 21개 시험편에 대한 피로시험결과로서 응력수준이 낮아질수록 피로횟수는 증가하였다. 이것은 응력수준이 낮을수록 피로수명이 길어짐을 말하는 것으로써 피로하한 응력수준에 대한 응력수준의 영향을 단적으로 나타내는 것으로 판단된다. 60% 응력수준

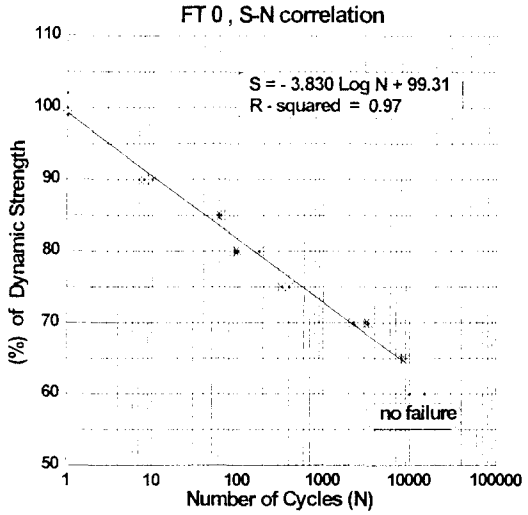

Fig. 12. S-N curve of the Pocheon granite.

에서는 15,000회까지 시험편 파단이 발생하지 않았다. 이러한 현상을 3-3절에서 탄성계수 및 포아송비의 변화가 60% 응력수준에서는 거의 나타나지 않았던 것과 연관시켜 보면, 정확한 한계를 정하기는 어려우나 본 연구의 시험조건 내에서는 약 60% 응력수준이 피로파괴가 일어날 수 없는 피로하한 응력수준으로 판단된다.

피로하한 응력수준으로 판단되는 60% 응력수준을 제외한 나머지 응력수준에서는 대체적으로 응력수준과 피로횟수간의 선형적인 관계가 나타난다. 이러한 선형적인 관계를 S-N 곡선으로 나타내고자 회귀분석을 실시하였고 회귀분석에 사용한 함수 식은 $Y=\alpha$ Log N+ β(α: S-N 곡선의 기울기, β: Y축 절편)이다. 회귀분석결과 S-N 곡선은 식 (2)와 같으며 이때의 상관계수는 0.97이다.

$$S = -3.830 \text{ Log } N + 99.31 \quad (2)$$

S : 응력수준
N : 피로횟수

4. 동결-융해 하에서의 피로시험결과 및 고찰

본 절에서는 동결융해에 의한 열적피로를 받은 암석의 피로특성을 규명하고, 그 결과를 신선한 암석의 피로 특성과 비교 · 고찰하였다.

4.1 동하중강도 및 동탄성계수의 변화

동결융해과정시 발생하는 물리적 풍화작용이 암석의

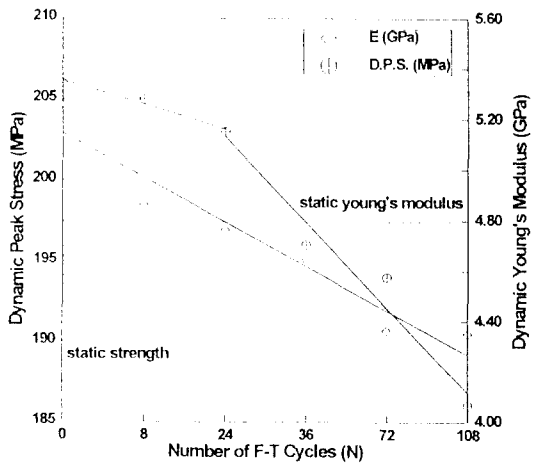

Fig. 13. The variation of dynamic peak stress and dynamic Young's modulus with respect to the static uniaxial compressive strength and Young's modulus.

Table 6. Dynamic peak stress and dynamic Young's modulus measured at each freeze-thaw cycle

F-T cycle	Dynamic peak stress (MPa)	Dynamic Young's modulus (GPa)
0	206	52.59
8	205	48.63
24	203	47.64
36	196	46.44
72	194	43.64
108	186	43.50

*Static uniaxial compressive strength: 188 MPa
*Static Young's modulus: 47.95 GPa

피로거동에 미치는 영향을 알아보기에 앞서 물성에서의 변화를 살펴보았다. 고찰대상으로 선정한 물성은 동하중강도와 동탄성계수로서, 5단계의 동결융해과정(8, 24, 36, 72, 108회)을 거친 후 측정된 값은 Table 6과 같으며 이들의 변화를 정하중상태의 일축압축강도 및 탄성계수와 비교하였다.

Fig. 13은 Table 6의 결과를 도시한 것으로서 동하중강도, 동탄성계수 모두 동결융해 반복수의 증가에 따라 전반적으로 감소하였다. 동하중강도는 동결융해 반복수 24회까지는 서서히 감소하다가 36회부터 큰 감소폭을 나타내었다. 동탄성계수는 전체적으로 비교적 일정한 비율로 감소하였다.

일반적으로 동하중강도, 동탄성계수는 정하중시의 일축압축강도 및 탄성계수보다 큰 값을 나타내는데[10]

동하중강도는 동결융해 반복수 108회에서 동탄성계수는 동결융해 반복수 36회에서부터 더 낮은 값을 나타내었다. 동하중강도와 동탄성계수는 동결융해과정을 거치지않은 상태를 기준할 때 108회의 동결융해를 거친 후 각각 10%, 17% 감소한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 시간상의 제약으로 인하여 동결융해 반복수를 108회로 제한하였으나 이 수준에서도 뚜렷한 물성치의 감소를 확인할 수 있어 동결융해가 강도 등의 물성에 미치는 영향이 분명히 존재함을 알 수 있다. 따라서 석재 등과 같이 산업용, 장식용 등으로 사용되는 암석의 경우에 있어서는 앞으로 이러한 특성에 대한 변화를 심층적으로 연구 파악할 필요가 있다고 판단된다.

4.2 피로곡선과 영구변형

4.2.1 피로곡선

동결융해과정시 발생하는 물리적 풍화작용이 시험편의 피로거동에 미치는 영향을 알아보고자 동결융해를 거친 시험편의 피로곡선과 피로곡선에서 나타나는 damping capacity(Ψ_s)의 변화를 고찰하였다. 동결융해 반복수에 따라 동하중강도가 변화하나 응력수준은 신선한 암석의 경우와 비교하기 위하여 신선한 암석의 동하중강도인 206 MPa를 100%로 하였다.

Fig. 14는 108회의 동결융해과정을 거친 시험편에 대해 80% 동하중강도 수준에서 얻은 피로곡선이며 이때의 한계피로횟수는 34회이다. 피로곡선의 거동은 세 단계(초기, 중기, 말기)로 크게 구분될 수 있다.

초기는 피로횟수 5회 이내로서 피로횟수가 증가함에 따라 총변형률은 증가하였으나 변형률의 증가율은 점차 감소하였다. 이것은 가압초기에 시험편내의 잠재균열과 공극이 압축응력에 의해 폐색되는 현상에 기인하는 것으로 판단된다.[11]

중기는 시험편 파단이 임박할 때까지의 단계로서 변형률은 피로횟수에 비례하여 일정하게 증가하였다. 이것은 재하시 시험편내 축적되는 에너지에 의해 점진적인 균열발달이 진행되고 있는 것으로 판단된다.

말기는 시험편파단이 임박한 단계로서 변형률의 급격한 증가가 나타났다. 이것은 재하시 시험편내 축적된 에너지가 급격히 방출됨으로써 피로균열의 대규모 발달로 인한 소성적 영구변형이 발생하는 것으로 설명될 수 있다.[11] Fig. 15는 Fig. 14의 피로곡선에서 피로횟수에 따른 damping capacity의 변화를 도시한 것이다. damping capacity의 변화 역시 피로곡선에서의 경우와 유사한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

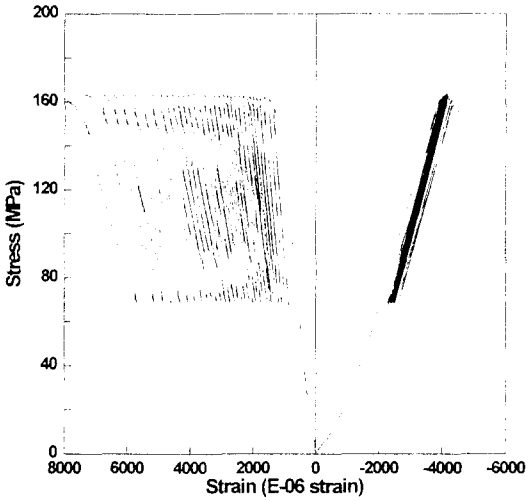

Fig. 14. Fatigue curve of Pocheon granite at freeze-thaw cycle 108 under uniaxial compression loading.

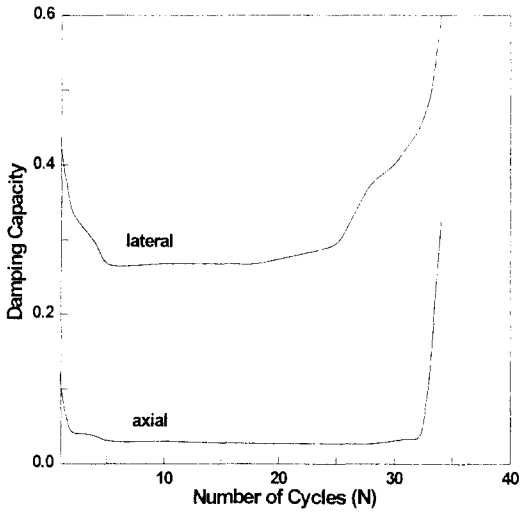

Fig. 15. Damping capacity variation of Pocheon granite at freeze-thaw cycle 108 under cyclic uniaxial compression loading.

특히 축방향에 비해 횡방향에서 두드러지게 나타나는 damping capacity의 변화는 영구변형이 축방향보다는 횡방향으로 발달하고 있음을 말한다. 이와 같은 단계별 특징을 동결융해과정을 거치지 않은 암석의 경우(3-2절)와 비교해 볼 때, 변형거동의 전체적인 경향은 동일하지만 말기에서 나타나는 변형거동이 상대적으로

조기에 발생함을 알 수 있다. 이것은 동결융해과정시 발생하는 물리적 풍화작용이 시험편의 내구성을 약화시키고 있음을 나타내는 것으로 판단된다.

3-2절에서 고찰한 바와 같이 동결융해과정을 거치지 않은 암석의 경우 피로곡선에서 축방향보다는 횡방향에서 변형거동이 더 두드러지게 나타나는데, Fig. 14를 통해 이와 같은 횡방향에서의 변형거동이 동결융해과정을 거친 경우에 더 잘 나타난다는 것을 알 수 있다. 이것은 시험편의 내구성의 약화가 축방향의 균열형성과 팽창을 촉진한다는 것을 나타내는 것으로 판단된다.

4.2.2 영구변형

피로곡선에서 발생하는 영구변형률의 변화를 통해 물리적 풍화작용이 피로거동에 미치는 영향을 고찰하였다.

Fig. 16은 동결융해 반복수 108회를 거친 시험편에 대해 80% 응력수준하에서 피로시험결과 얻어진 Fig. 14의 피로곡선으로부터 영구변형률의 변화를 구하여, 이를 동결융해 과정을 거치지 않은 경우와 비교한 것이다. 영구변형률의 변화 역시 양방향 모두 세 단계(초기, 중기, 말기)로 구분될 수 있으며, 영구변형, damping capacity 등이 암석의 소성변형에 근거한 특성이라는 것을 고려할 때 일치되는 경향으로 판단할 수 있다.

축방향의 영구변형률의 변화에서, 초기는 영구변형률의 증가가 점차 감소하는 단계로 피로횟수 약 5회이내에서 볼 수 있다. 중기는 일정한 영구변형률의 증가가 발생하는 단계로 시험편 파단이 임박할 때까지 나타난다. 말기는 급격한 소성적 영구변형이 발생하는 단계로 시험편 파단이 임박한 수회 미만의 피로횟수 내에서 발생한다. 횡방향의 영구변형률의 변화에서, 동결융해과정을 거치지않은 경우는 축방향의 변화양상과 동일한 변화양상을 보이지만 동결융해 과정을 거친 경우는 말기의 변화양상이 비교적 조기에 나타나는 것으로 판단된다.

신선한 시험편의 경우와 같이, 영구변형률의 발생량은 동결융해과정을 거친 경우에도 축방향보다는 횡방향에서 변화폭이 크게 나타났다. 축방향에서는 영구변형률의 증가가 총발생량에서 차이를 나타내고 있으나 서로 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 횡방향에서는 영구변형률의 증가가 동결융해 과정을 거치지 않은 경우와는 달리 급격하게 나타났다.

이와 같은 방향에 따른 영구변형률 발생형태의 차이는 피로곡선에서 횡방향변형률의 발생이 축방향변형률

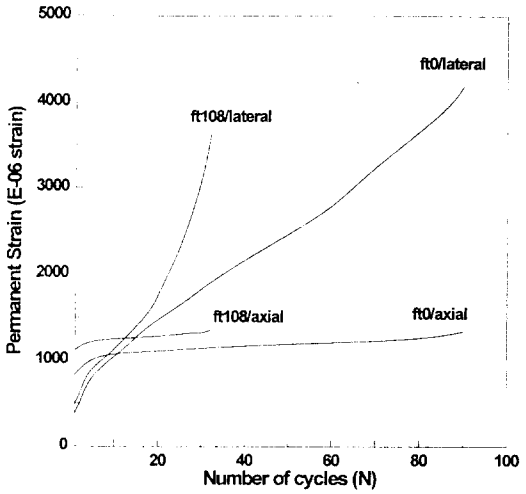

Fig. 16. Permanent strain variation of Pocheon granite at freeze-thaw cycle 0 and 108 under cyclic uniaxial compression loading.

의 경우보다 현저하게 크게 나타나는 것과, 피로가 진행됨에 따라 포아송비의 변화가 탄성적 범위를 벗어난 0.5 이상의 값을 보이는 경향과 일치하는 현상으로 파악할 수 있다. 따라서 피로파괴의 경우에 있어서 횡방향변형률의 거동은 시험편내부의 균열발달 정도를 알려줄 수 있는 중요한 지표가 될 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 S-N 곡선

앞절의 피로곡선의 변화와 영구변형률의 변화에서 고찰한 바와 같이 동결융해에 의한 시험편의 내구성의 약화로 인하여 피로횟수의 한계 역시 감소하게 된다. 소정(8회, 24회, 36회, 72회, 108회)의 동결융해과정을 거친 총 73개의 시험편에 대한 피로시험결과를 S-N 곡선을 통해 동결융해과정을 거치지 않은 경우와 비교하였다. 응력수준은 동결융해과정을 거치지 않은 경우와 동일하게 설정하였다(각 동결융해 반복수에서 응력수준별 시험편 수는 Table 3 참조).

S-N 곡선을 통해 나타나는 동결융해과정의 영향을 알아보고자 회귀분석을 실시하였다. 단 60% 응력수준은 피로파괴가 발생하지 않는 피로하한 응력수준으로 판단되기에 회귀분석자료에서 제외하였다. S-N 곡선을 구하기 위하여 회귀분석에 적용한 함수 식은 식 (2)와 동일하다.

Table 7은 각 동결융해 반복수에 따라 얻어진 S-N

Table 7. The variation of constants in the regression analysis measured at each freeze-thaw cycle

F-T cycle	α, Slope of S-N curve	β, Intercept of S-N curve
0	-3.830	99.31
8	-3.665	98.97
24	-3.674	98.09
36	-3.571	94.61
72	-3.188	93.19
108	-3.061	89.58

곡선들의 기울기와 Y축 절편을 나타낸 것이다. 전체적으로 볼 때 동결융해가 진행될수록 S-N 곡선의 기울기(절대값)는 감소하였는데 이것은 동결융해로 인하여 한계피로횟수가 감소하는 것에 기인한다. 한계피로횟수의 감소는 피로에 대한 저항력의 감소를 말한다. 따라서 동결융해에 의한 물리적 풍화정도가 커질수록 피로에 대한 저항력은 약해지며 그 경향은 동결융해가 진행될수록 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 일축압축응력하에서 석재의 피로특성과 이에 대한 동결융해의 영향을 알아보고자 하였다. 피로시험은 동결융해과정을 거친 경우와 거치지 않은 경우로 나누어 실시되었다. 연구결과 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 포천화강암의 S-N 곡선에서 동하중강도 60% 수준의 피로응력하에서는 15,000회까지 피로파괴가 일어나지 않았으며, 동탄성계수와 동포아송비 역시 피로횟수에 따른 변화가 나타나지 않아 피로하한 응력수준은 동하중강도의 약 60% 수준인 것으로 판단된다.

(2) 피로곡선에서 소성변형을 나타내는 영구변형, damping capacity 등의 변화특징은 세 단계—변화가 점차 둔화되는 초기, 일정한 변화가 발생하는 중기, 급격한 변화가 발생하는 말기—로 구분될 수 있다.

(3) 피로시험시 두번째 피로횟수에서부터 횡방향변형률의 증가율이 축방향변형률의 증가율보다 크게 나타나 포아송비가 급속히 증가하였다. 이는 시험편 축방향과 평행한 균열의 발달로 인한 피로파괴가 진행되는 것으로 볼 수 있다.

(4) 동하중강도와 동탄성계수는 신선한 상태를 기준할 때 108회의 동결융해를 거친 후에는 각각 10%, 17% 감소하였으며 이러한 물성치의 감소는 동결융해가 강도 등의 물성에 미치는 영향이 현저히 존재함을 말한다.

(5) 동결융해가 진행될수록 S-N 곡선의 기울기(절대값)는 감소하며 한계피로횟수 역시 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 동결융해에 의한 물리적 풍화정도가 커질수록 피로하중에 대한 저항력은 약해지며 그 경향은 동결융해가 진행될수록 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. Attewell, P.B. and Farmer, I.W., 1973, Fatigue behaviour of Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 10, pp. 1-9.
2. Homand-Etienne, F., More, S. and Houpert, R., 1983, Strain and fatigue behaviour of rock, Proc. 5th ISRM International Congress on Rock Mechanics, pp. A129 - A132.
3. Zoback, M.D. and Byerlee, J.D., 1975, The effect of cyclic differential stress on dilatancy in Westerly granite under uniaxial and triaxial conditions, J. of Geophysical Research , Vol. 80, pp. 1526-1529.
4. Ishizuka, Y. and Koyama, H., 1993, Effect of strain rate on strength and frequency dependence of fatigue failure of Rocks, Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Balkema, pp. 321-327.
5. 이원규, 1987, 반복하중에 의한 화강암의 역학적 거동에 관하여, 대한광산학회지, Vol. 24, pp. 1-7.
6. 김일중, 1990, 일정한 응력진폭에 의한 반복하중하에서 사암의 피로파괴거동에 관한 연구, 한국 자원공학회지, Vol. 27 , pp. 9-19.
7. ASTM, 1984, "Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing thawing".
8. JIS A 6204, "콘크리트용 화학 혼화재".
9. 윤지선(역), 1991, 암석 · 암반의 조사와 시험, 일본토질공학회(편), 구미서관, pp. 543-552.
10. 강문구, 김재동, 임한욱, 1990, "하중속도가 암석의 강도 및 변형특성에 미치는 영향에 관한 연구", 강원대학교 산업기술연구소 논문집, 제10호.
11. 김재동, 민경원, 장보안, 1993, 국내산 석재의 물리적 화학적 역학적 특성 및 내구성에 관한 연구, 한국학술진흥재단 보고서.
12. 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., Vol. 27, pp. 51-56.
13. Brace, W.F. and Paulding, B.W. and Scholz, C., 1966, Dilatancy in the fracture of crystalline rocks, J. of Geophysical Research, Vol. 71, No. 16, pp. 3939-3953.