

주기전단 하중하의 암석 절리의 역학적 거동에 관한 실험적 연구

이희석¹⁾ · 박연준²⁾ · 유광호²⁾ · 이희근³⁾

A Experimental Study for the Mechanical Behavior of Rock Joints under Cyclic Shear Loading

Hee-Suk Lee, Yeon-Jun Park, Kwang-Ho You and Hi-Keun Lee

ABSTRACT The precision cyclic shear test system was established to investigate the mechanical characteristics of rough rock joints under cyclic loading conditions. Laboratory cyclic shear tests were conducted for saw-cut joints and artificial rough rock joints using Hwangdeung granite and Yeosan marble. Surface roughness and aperture characteristics of specimens were examined by measuring surface topography using the laser profilometer. Peak shear strength, phase difference during loading and unloading, and anisotropic shear behavior were investigated throughout the cyclic shear test results. These features and their subsequent variations in each loading cycle are significantly dependent upon the second order asperities and the strength of intact rock. It was observed that degradation of asperities for rough rock joints under cyclic shear loading followed the exponential degradation laws of asperity angle and that the mechanism for asperity degradation would be different depending upon the normal stress level, roughness of joint surface and the loading stage.

Key words : Rock joint, Roughness, Cyclic shear, Asperity degradation.

초 록 주기전단하중 하의 암석 절리에 대한 역학적 거동을 규명하기 위해 정밀 주기전단시험 장치를 설계·제작하였다. 실험실에서 황동화강암과 여산대리석 인공 절리 시료로 평면절리와 거친 절리에 대해 일련의 주기전단시험을 실시하였다. 시료에 대한 레이저 변위계를 이용한 3차원 거칠기 측정을 통해 절리의 거칠기 특성을 규명하였다. 주기전단시험 결과를 통해 주기전단 과정의 단계별 거동 특성과 하중과 제하시의 거동 차이, 전단거동의 이방성 등을 고찰하였다. 거친 절리면의 역학적 거동 특성은 주로 2차 거칠기의 영향과 암석 재료의 높은 강도에 영향을 받았다. 주기전단시 거친 절리에 대한 돌출부 손상이 지수적인 거칠기 손상 법칙을 따름을 실험적으로 검증하였으며, 수직응력과 거칠기 종류, 하중 단계에 따라 돌출부들의 손상 기구가 다름을 확인하였다.

핵심어 : 암석 절리, 거칠기, 주기전단, 돌출부 손상.

1. 서 론

지하철, 지하 에너지 비축 시설, 암반 사면, 터널, 방사성 폐기물 지하 처분장 등과 같은 다양한 암반 구조물의 안정성과 내구성 뿐 아니라 비교적 얇은 심도에서의 굴착 공사들은 주로 절리에 의해 지배되는 절리 암반의 역학적 특성에 큰 영향을 받는다. 거칠기의 크기, 분포 특성, 돌출부(asperity) 강도, 분리도(separation), 맞물림 정도(matedness), 충전물 등과 같은 절리의 다양한 측면에서의 특성들은 실제 암반의 거동을 훨씬 더 복잡하게 만든다. 절리면의 역학적 특성은 대개 현장에서 실험하는 것이 어려우므로 대개 일정 수직응력 하의 실험실 직접전단시험을 통해 평가되며, 이로부터 얻은 정점 전단응력(peak

shear stress), 잔류 전단응력(residual shear stress)과 팽창성(dilatancy)등과 같은 절리의 변형 및 파괴 거동과 여러 물성 등의 자세한 조사, 연구는 매우 중요한 자료가 된다.

현재까지 대부분의 실험적 연구는 최대 전단 강도와 일방향 전단변형거동(uni-directional shear behavior)에 집중되어 왔으며, 전단 과정 동안의 암석절리 거동의 전체

1)정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 Post Doc.

2)정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

3)정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수
원고 접수일 : 1999년 10월 5일

원고 심사 완료일 : 1999년 11월 20일

적인 측면을 연구하려는 노력은 아직까지 부족한 실정이다. 특히 발파, 지진, 순차적 터널굴착, 고속전철 터널과 양수발전소 등에서 발생하는 주기적인 하중 증감에 의한 충격, 진동 현상에 의한 절리 거동에 대한 관심이 점점 고조되면서부터 주기전단, 동전단(dynamic shear)과 같은 절리 특성에 관심을 가지게 되었다. Hutson과 Dowding (1990)은 CNC 공작기계로 정밀 가공된 정현파(sinusoidal) 형태의 암석 절리면 주기전단 시험 결과를 보고한 바 있다. Huang(1990)은 인공 석고 성형 재료(hydrostone)로 제작된 거칠각을 달리한 톱니형 절리 시료에 대한 주기전단과 돌출부 손상 거동을 실험적으로 규명하였으며, Plesha(1987)에 의해 제안된 이론적인 마모 법칙과의 관련성을 해명하였다. Jing 등(1993)은 천연 절리면을 복제한 콘크리트 시료에 대한 전단 방향에 따른 이방성과 주기전단 거동 특성을 규명하여 주기전단하의 절리 거동의 일반화를 시도하였다. 최근 Homand 등(1999)은 정현파 형태의 성형 절리 시료에 대한 주기전단시험 결과를 발표한 바 있다. 하지만 아직까지 거친 인공 절리에 대한 자세한 실험결과는 보고되지 않고 있다. 암석 인공절리의 거동은 돌출부 강도와 압축강도가 매우 크고 절리 거칠기가 매우 불규칙하므로 성형 시료와는 상당히 다른 거동을 보일 것으로 예상된다.

본 연구에서는 주기전단 하중하의 암석 절리의 전단 거동을 규명하기 위해 직접전단시험 장치를 직접 설계·제작하였으며, 이를 MTS 815 암석역학 시험 시스템에 부착하였다. 황동화강암과 여산 대리석 인공 절리 시료를 평면절리와 거친 절리로 성형하여 주기전단시험을 실시하였다. 또한 시험 전에 절리의 거칠기 특성을 정량화하기 위해 3차원 레이저 단면계를 이용하여 시험 시료에 대한 3차원 단면을 측정하여 해석하였다. 실제 암석의 거친 인공 절리면에 대한 주기전단 결과를 해석하여 그 특성을 일반화하였으며 절리면의 거칠각 손상 특성을 규명하였다.

2. 시료, 실험장치 및 실험방법

2.1 시험편의 특성과 준비

주기전단시험에 사용된 암석 시료는 국내의 대표적인 석재로 사용되는 황동화강암과 재료 자체의 강도가 작은 여산대리석의 두 가지로 하였다. 황동화강암은 전북 황동지방에서 산출되는 중생대 쥐라기의 화강암이며, 여산대리석은 전북 여산에서 산출되는 유백색의 조립질 대리석이다. 대상 암석시료의 물리적, 역학적 특성을 파악하기 위

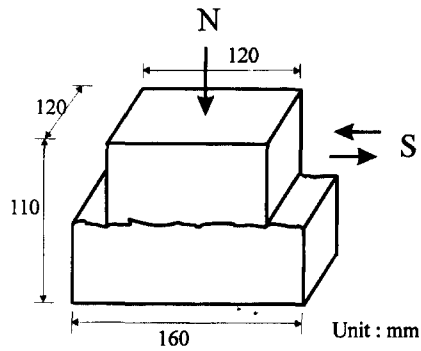
Table 1. Physical and mechanical properties of rock samples.

Sample Properties	Hwangdeung granite	Yeosan marble
Bulk specific gravity	2.72	2.76
Apparent porosity(%)	0.49	0.19
P-wave velocity(m/sec)	3650	3080
S-wave velocity(m/sec)	1970	1710
Uniaxial compressive strength (MPa)	151	72
Young's modulus(GPa)	54.1	48
Poisson's ratio	0.29	0.31
Tensile strength (MPa)	14	16
Shore hardness	Dry : 69.5 Wet : 67.6	Dry : 30.3 Wet : 29.0

하여 ISRM 기준에 의거하여 각종 물성시험을 실시하였으며 그 결과는 Table 1에 제시하였다. 물성시험을 위한 시험편의 각 결과 값은 5번의 시험에서 얻은 평균값을 나타낸 것이다. 각 시료의 단축압축강도는 화강암이 151 MPa, 대리석이 72 MPa으로서 화강암의 단축압축강도가 대리석의 약 2.1배로 나타났다. 쇼어 경도 역시 약 2.3배 정도 차이가 났으며 포화시와 건조시의 차이도 약간 보였다. 인장강도는 간접인장시험(Brazilian test)으로 구하였다.

절리면 거칠기의 측정과 직접전단시험을 위한 절리 시료는 실험실에서 인위적인 균열을 형성시켜 제작하였다. 우선 결함이 없는 3가지 압종의 암석 덩어리를 다이아몬드 톱을 사용하여 가로×세로×높이가 160×120×120 mm가 되도록 절단하였다. 성형한 시료는 전단시험시에 가압면이 되는 양쪽 면을 표면연삭기로 연삭한 후 인장균열 발생장치의 양쪽 가압판 사이에 놓고 하중을 가하여 인위적으로 절리면을 생성하였다. 본 연구에서는 시료를 Fig. 1과 같이 상부 절리면의 양쪽 끝 부분을 약 20 mm 정도 잘라내어 전단하중이 가해지는 동안 절리의 접촉면적이 일정하게 유지되도록 하였다. 한편 다이아몬드 톱으로 블록 시료의 중앙을 절단하여 평면절리 시료를 제작하였다. 절단한 시료의 접촉면은 시편연마기로 ±0.001 mm의 정밀도로 깨끗하게 연마하여 동일한 조건이 되도록 하였으며 절리면의 양 끝부분도 20 mm 정도 잘라내었다.

2.2 실험 장치



(a) A schematic view and dimensions



(b) A view of representative fractured joint specimens

Fig. 1. A view and dimension of representative rough joint specimens

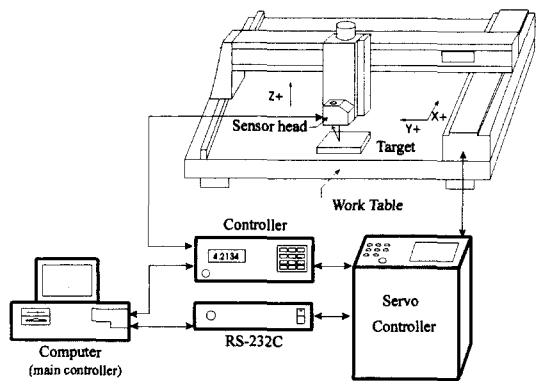


Fig. 2. Schematic diagram of coordinated measuring machine.

2.2.1 레이저 변위계

준비된 절리 시험편의 거칠기를 측정하여 여러 거칠기 파라미터값을 결정하고 이를 각종 전단 시험의 기본 자료로 활용하기 위해 절리면의 형상을 수치화하여 측정하는 작업이 필요하다. 이 연구에서는 이정인에 의해 제작되고 배기윤(1999)이 사용한 3차원 측정기를 사용하였으며 전체적인 모습은 Fig. 2와 같다. 이 3차원 측정기는 레이저 변위계(laser profilometer), 위치 지정 시스템(positioning system) 및 자료 출력과 전체 시스템을 제어할 수 있는 컴퓨터의 세 부분으로 구성된다. 레이저 변위계는 일본 Keyence사에서 만든 LC-2450이고 위치지정 제어기는 일본 OHM사에서 만든 PS-20T, PS-101C이며, X축, Y축 방향의 제어는 PS-20T에 의해, Z축 방향의 제어는 PS-101C에 의해 이루어진다. X축은 좌우로 지정된 대로 움직이고 Y축은 테이블 앞뒤로 이동하며 Z축은 상하 운동을 한다. 레이저 변위계는 변위계가 레이저를 측정 지점에 쏠 때 그 측정 지점에서 반사된 빛의 각도에 의해 변

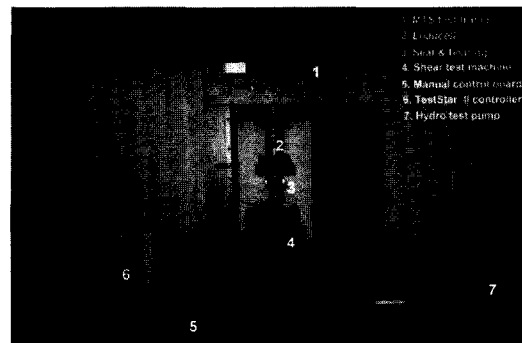


Fig. 3. A view of MTS 815 rock mechanics testing system.

를 측정한다. 최소 측정한도는 0.5 μm 이고 센서헤드로부터 5 cm 떨어진 지점을 중심으로 $\pm 8 \text{ mm}$ 사이가 가능 측정범위가 된다.

2.2.2 압축시험장치

본 연구에 사용된 기본 장치는 MTS 815 압축 시험 시스템이다. 이 장치는 기본적으로 유압 펌프, 구동장치(actuator), 시험 프레임, 각종 신호를 생성하고 입력신호를 처리하는 TestStar II 컨트롤러와 제어 컴퓨터부, 수동 시험 제어 보드, 축방향, 횡방향 익스텐소미터(extensometer)와 축방향 변위변환기(LVDT), $\pm 4600 \text{ kN}$ 용량의 차압 셀(ΔP -cell)과 $\pm 250 \text{ kN}$ 용량의 로드셀, 그리고 고온/저온 시험 챔버로 구성된다. 이 시험장치는 압축 인장 하의 다양한 파괴 및 강성 시험과 주기 및 피로 시험 그리고 고온/저온 상태하의 시험을 실시할 수 있다. Fig. 3은 직접전단시험장치가 부착되어 있는 전체 시험 프레임의 모습을 나타내었다.

2.2.3 주기전단시험장치

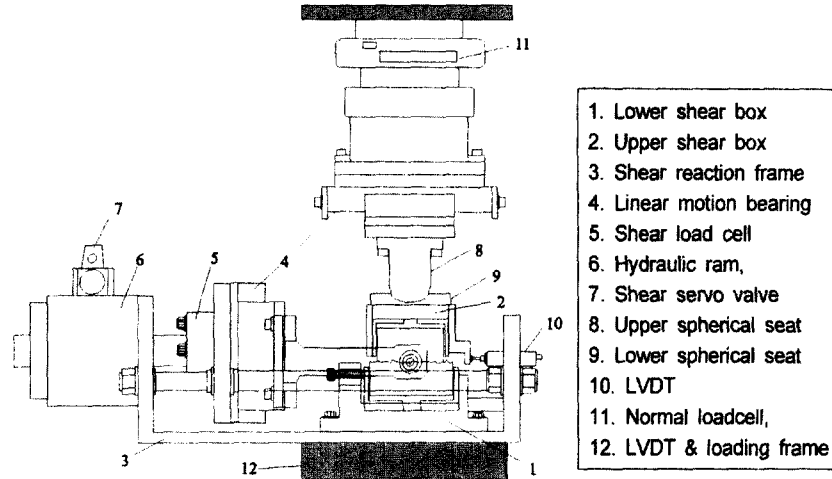


Fig. 4. Schematic diagram of cyclic shear testing apparatus.

제작된 직접전단 시험장치는 수직하중과 전단하중의 제어를 모두 MTS 시스템에서 가능하도록 설계되었다. MTS 시험기의 프레임 안에 설치된 직접전단 시험장치의 형태는 Fig. 4와 같다. 절리 시료를 수용하는 내부 상부 전단상자의 내부 규격은 폭과 길이가 125 mm, 높이는 50 mm이다. 하부전단상자의 내부 규격은 폭과 길이가 각각 166 mm, 126 mm, 높이는 50 mm이다. 전단하중을 가하는 형태는 전단상자가 설치된 후 하중 중심에 맞추어 상부 전단 상자의 중심부 양쪽에서 왕복 지지대(arm)가 밀고 당겨서 주기전단되는 형태이다. 내부 상자와 외부 상자 사이는 약 1-2 mm 가량의 유격이 존재하며 이는 실험 결과에 왜곡시키므로 상자 부위에 렌치볼트를 설치하여 유격을 제거하였다. 유압램은 복동식으로서 최대 60 mm의 왕복 운동이 가능하다. 유압램의 앞 부분에는 전단하중을 측정용 하중변환기가 설치되며, 그 앞면에는 시험 중 수직방향 변위를 구속하지 않고 마찰저항을 줄이기 위해 직선운동 베어링이 부착되어 있다. 또한 유압램의 윗 부분에는 전단 구동을 제어하기 위한 서보밸브가 설치되어 있다. 하중변환기는 ± 225 kN의 용량을 가진 미국 Cooper사의 LGP-310을 사용하였다. 전단변위 측정용 LVDT가 상부 전단 상자 끝부분에 달아서 설치되어 있다. 전단변위를 측정하기 위한 LVDT로서 일본 TML사에서 제작한 스트레인 게이지 형태의 CDP-50 LVDT를 사용하였으며, 측정 변위의 범위는 ± 25 mm이다. 수직방향 변위의 측정은 MTS 시험 시스템에 내장된 정밀 변위 변환계를 이용하였다. 전단방향, 수직방향의 하중과 변위 제어뿐만 아니라 필요한 데이터의 취득은 MTS Teststar II

소프트웨어를 통하여 직접 수행된다.

2.3 실험 방법

2.3.1 절리 거칠기 측정

본 연구에서는 한 시료당 3개의 기준선을 정하여 대표적인 단면형상을 측정하였다. 시험편 절리면에 대하여 시료의 중앙선을 기준으로 양쪽으로 40 mm의 간격을 띄워 3개의 기준선을 정하여 표시를 하였다. 먼저 레이저 변위계의 산란에 따른 측정오차를 막기 위해 절리면들을 흰색 아크릴 물감으로 고르게 칠한다. 다음으로 1차원 단면 측정의 경우 미리 표시해 놓은 단면위치를 X-Y 테이블의 기준 위치에 올려놓고 세 축선을 Y 방향으로 고정시킨 후 X축 방향(전단 방향)으로 0.2 mm 간격으로 표면 형상을 스캐닝한다. 이 때 축선과 레이저 변위계 이동 방향이 정확히 일치하도록 주의한다. 모든 측정과정은 컴퓨터로 제어되며, 자동으로 수행된다. 컴퓨터 프로그램으로 각 초당 평균 안정화 값을 파일로 받아서 해석한다.

2.3.2 주기전단시험방법

주기 전단 시험을 실시하는 방법 및 순서는 다음과 같다.

(a) 시험편의 폭과 길이를 측정하여 전단면적을 구하고 필요한 수직하중값을 계산한다.

(b) 내부 전단 상자에 혼합 수지형 석고 재료(Diastone MR-33)로 몰딩하여 유격을 없애고 절리면의 수평을 잘 맞춘다.

(c) 압축 시험기 상부 가압대에 직선운동 베어링을 부착하고 아래 가압봉에 전단시험 장치를 결합하고 모든 유압,

전기 장치를 조립한다.

(d) 냉각수 순환 밸브를 열고 컨트롤러와 컴퓨터의 전원을 동시에 켜서 TestStar II 프로그램을 실행시킨 후 시험에 필요한 파라미터 값을 지정한다.

(e) 하부의 내부 전단상자를 외부 전단상자에 넣고 렌치 볼트로 잘 죄어서 유격을 없앤다. 상부 전단 상자를 엮어서 절리면을 잘 맞춘 후 전단 왕복대와 직선운동 베어링을 결합한다.

(f) 제어 프로그램 상에서 초기 수직압력을 가한 후 주기(cyclic) 명령어를 통해 변위 제어 주기전단이 진행되도록 지정하고 유압장치를 구동한다. 상부 전단상자 위에 구면좌를 올려놓고 수동 제어 보드로 상자와 가압봉이 거의 닿을 때까지 올려서 상자를 밀착시킨다. 시험 실행 명령 이후 전단주기는 모두 MTS 프로그램 상의 자동 설정된 방식으로 진행된다.

(g) 실험이 끝난 후 수동 제어 보드로 가압대를 바닥으로 내린 후 유압을 끈다. 소프트웨어 상에서 변경이 필요한 명령 및 변수들을 재정의한다. 이후 내부상자들을 분리하고 압축공기로 상자를 청소한 후 다시 시료를 설치하고 (e) ~ (g)와 같은 방법으로 실험을 계속한다.

준비된 두 가지 압중의 평면 절리 시료(GS, MS : 각각 화강암, 대리석)과 거친 절리 (GH, MH : 각각 화강암, 대리석) 시료를 내부 상자에 몰당한 후 주기 전단 시험을 실시하였다. Fig. 5는 시험을 위해 주기전단 시험장치에 시료가 설치된 모습을 보여준다. 시험시 가해진 수직응력의 범위는 0.2 ~ 5 MPa였으며, 시험 동안의 전단 변위 속도는 0.05 mm/sec로 유지한 채 ±15 mm 전단변

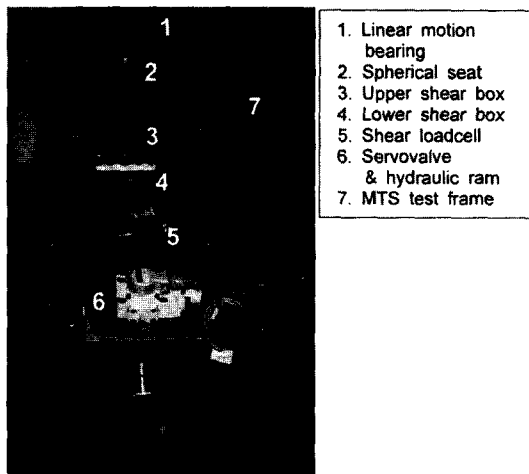


Fig. 5. A view of installed specimens in the test system before shear tests.

위까지 전단시켰다. 주기 수는 기본을 2.4주기로 하였으며 이후 실험결과를 비교하면서 주기 수를 10-16회까지 늘려서 주기 증가에 따른 돌출부 손상 특성을 고찰하였다. 한 주기당 평균 시험 시간은 20-30분 정도 소요되었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 절리 거칠기 측정 결과

절리면의 거칠기를 정량적으로 표현하는 파라미터는 진폭, 파장, 기울기 등을 측정하는 간단한 방법과 통계적 기법, 주파수 분석 등의 복잡한 방법 등이 있다. Tse와 Cruden(1979)에 의하면 절리면 기울기와 관련된 파라미터로는 절리면의 평균 거칠각 (micro average inclination angle) i_{ave} , 거칠기 단면의 일차 미분값 제곱의 평방평균값(Z_2)이 있다. 그 외에 절리면의 평균 기울기 (average slope of joint asperity) SL_{ave} , 절리면 기울기의 표준편차(standard deviation of slope) SD_{SL} , 절리거칠각의 표준편차(standard deviation of i -angle) SD_i 등으로 표현할 수 있다(이상돈, 1996). 절리면 진폭에 관련된 파라미터로는 평균 절리면 높이에 대한 표준편차(standard deviation of height, SDH), 평균 절리면 높이에 대한 평균(centerline average, CLA), 그리고 평균 자승값(mean square value, MSV) 등이 있다. 이 외에 거칠기 형상지수(roughness profile index) R_p 는 절리표면을 따라 측정된 절리면의 총 길이를 절리면에 투영한 직선 거리로 나

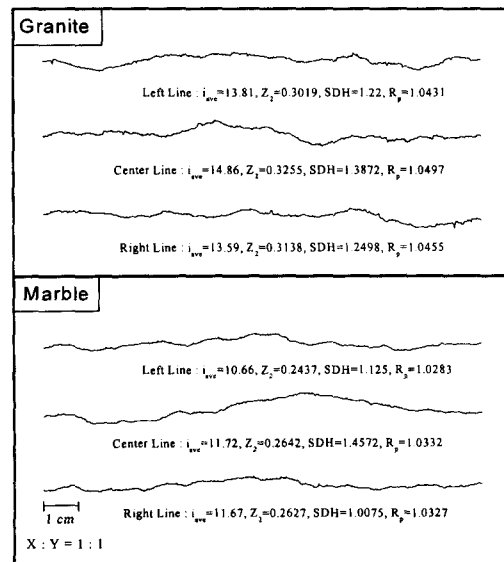


Fig. 6. A typical record of measured joint profiles.

Table 2. Range of calculated roughness parameters.

Roughness parameter	Granite joint profiles			Marble joint profiles		
	Range	Mean	S.D.*	Range	Mean	S.D.
$i_{ave} (^{\circ})$	9.406 ~ 19.144	13.73	1.78	6.702 ~ 16.892	12.17	2.49
$i_r (^{\circ})$	12.02 ~ 30.482	17.79	3.40	9.7299 ~ 28.64	16.05	6.05
Z_2	0.212 ~ 0.569	0.327	0.0884	0.171 ~ 0.546	0.29	0.1524
SDH(mm)	0.698 ~ 3.859	1.933	0.8282	0.531 ~ 4.675	2.304	1.2003
R_p	1.022 ~ 1.0924	1.047	0.0156	1.014 ~ 1.095	1.039	0.026
SDi ($^{\circ}$)	6.648 ~ 28.266	11.906	4.4807	6.26 ~ 24.42	10.581	6.4621

* S.D : Standard Deviation

눈 무차원 량이다.

본 연구에서는 여러 파라미터 중 i_{ave} , i_{rms} , Z_2 , SDH, 그리고 R_p 를 중심으로 거칠기 특성을 해석하였다. 거칠기 파라미터를 구하기 위해 먼저 각 단면에 대해 0.2 mm 간격으로 3축선에서 측정된 디지털화된 자료들을 거칠기 해석 프로그램(이상돈, 1996)에 입력하여 거칠기 파라미터들을 결정하였다. 거칠기 파라미터는 측정 간격에 따라 의존성을 보이기 때문에 1 mm 간격의 측정값을 해석의 기준으로 삼았다.

Fig. 6은 측정된 단면들 중 대표적인 모습을 보여주고 있다. Kana 등(1996)에 의하면 암석 절리의 거칠기는 거시적인 절리면 기울기인 1차 거칠기(primary asperities)

와 미세한 요철의 2차 거칠기(secondary asperities) 성분이 있으며 이들은 각각 전단 거동에 다른 영향을 준다고 했다. 화강암과 대리석 모두 미세한 요철의 2차 거칠기가 뚜렷하게 발달해 있는 것을 알 수 있다. 즉 시험에 사용된 시료들의 거칠기는 1,2차 거칠기로 구성되는 전형적인 암석 절리의 거칠기 특성을 나타냄을 알 수 있다. 육안 상으로는 화강암과 대리석의 암중에 따른 거칠기 특성이 크게 다르지 않지만 구한 거칠기 파라미터에 의하면 전반적으로 화강암의 거칠기가 대리석보다 크게 나타났다. 이는 대리석의 1차 거칠기가 화강암의 1차 거칠기에 비해 비교적 균질하고 기복이 적기 때문이다.

Table 2에 전체 시험 시료에 대해 얻은 거칠기 파

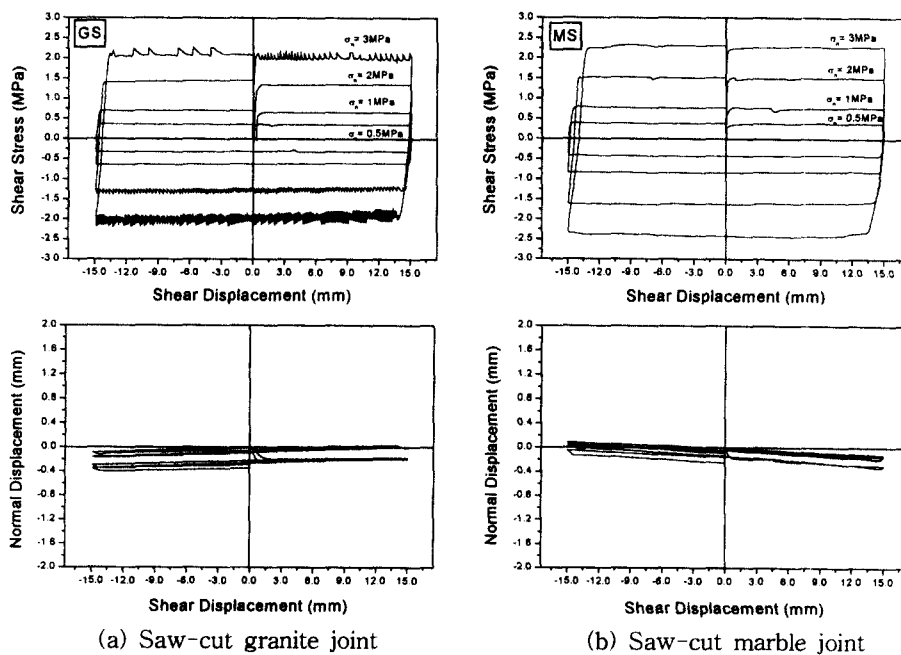


Fig. 7. A typical shear tests recording of flat saw-cut joint for various normal stress.

라미터들의 범위와 통계치들을 나타내었다. 시험 시료들의 거칠기 파라미터들의 범위는 이상돈(1996)에 의한 결과와 비슷하거나 약간 크게 나타났다. 대부분의 화강암 절리 단면들이 대리석에 비해 큰 파라미터 값을 보였다.

3.2 평면 절리의 전단 거동

Fig. 7은 화강암과 대리석 평면 절리 시료에 대해 각각 0.5, 1, 2, 3 MPa의 일정 수직응력에서 1주기 동안의 전단 거동을 나타낸다. 시험은 동일 시료에 대해 수직응력을 증가시키면서 실시되었다. 전단 저항값들은 미세한 평면의 기울어짐으로 인해 전진전단과 역전단시 약간씩 차이가 있으므로, 전진전단과 역전단 위상 동안의 평균값으로 구해졌다. 수직응력에 따른 전단저항 값을 회귀하여 화강암과 대리석에 대해 각각 34.6°, 38.3°의 기본 마찰각(ϕ_b , basic friction angle)을 얻었다. 전체적으로 화강암 절리에 비해 대리석의 기본마찰각이 더 크게 나타났다. Fig.7의 전단변위-전단응력 곡선에서 2 MPa 수직응력 이후에는 전단응력의 심한 요동 현상(stick slip)을 볼 수 있는데, 이러한 진동은 화강암 평면 절리는 수직응력이 높아지면 석영 광물 입자와 다른 입자들의 경도 차이로 인해 물결무늬로 마모 경도가 낮은 입자 부분만 손상되어 미세한 거칠기가 생기기 때문이라고 생각된다. 이러한 현상은 Suh와 Sin(1981)이 보고한 높은 수직응력에서의 변

위강화(displacement hardening) 현상과 관련되지만, 전체적으로 수직응력 수준이 아주 높은 편이 아니어서 큰 전단응력 증가는 일어나지 않았다. 대리석 절리의 경우 이러한 요동 현상이 뚜렷하게 일어나지 않았는데, 이는 대리석 평면 절리의 경우 수직응력이 높아지더라도 광물 조성이 거의 방해석(calcite)으로만 이루어져서 균등하게 손상되어 암석 입자 자체의 기본 마찰각 수준에서 일정한 것으로 생각된다.

평면 절리 시료의 주기전단에 따른 손상 정도를 살펴보기 위해 1 MPa의 수직응력에서 두 암종의 시료에 대해 15주기까지 주기전단시험을 실시하였다. Fig.8은 이들 평면절리의 주기 전단 동안 첫 번째 주기와 15번째 주기의 시험결과를 보여주고 있다. 화강암의 경우 15주기에서의 값들이 육안으로도 약간 증가한 것을 확인할 수 있는데, 특히 10 주기 이후부터 역전단시 전단응력의 요동현상이 두드러지게 나타났다. Fig.8(a)의 화강암 평면절리의 팽창곡선은 1주기나 15주기나 거의 비슷한 양상을 보였다. 이는 실제 화강암 절리는 마모에 의한 암분 생성이나 절리면 파쇄가 거의 일어나지 않음을 의미한다. 이에 비해 Fig. 8(b)의 대리석 절리는 1주기와 15주기가 거의 비슷한 전단저항을 보였으며 요동 현상이 일어나지 않았다. 이에 비해 평면절리의 팽창곡선은 15주기 후에 0.15mm 이상 아래 쪽으로 하강했다. 이러한 경향은 Plesha(1995)

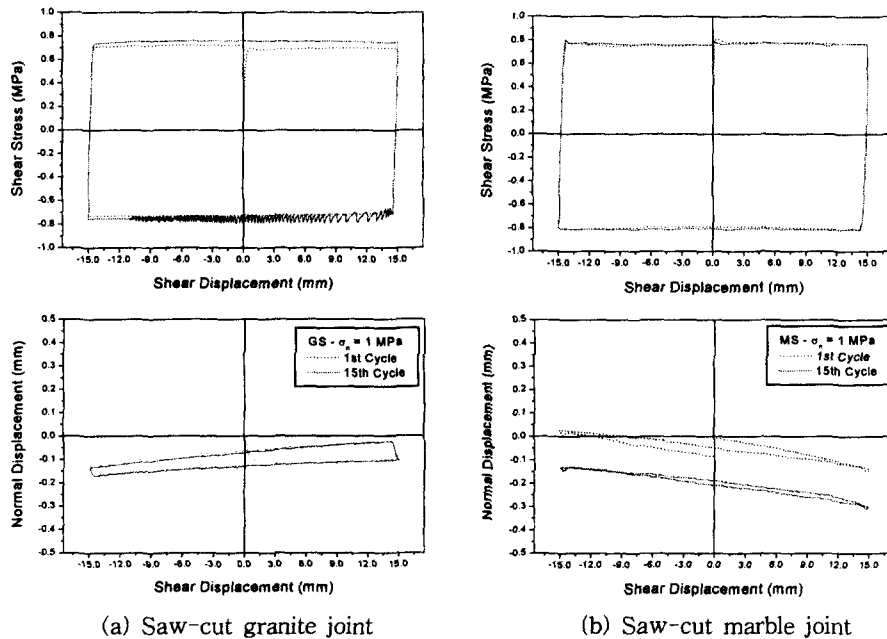


Fig. 8. A typical shear tests recording of flat saw-cut joint during 15 cycles.

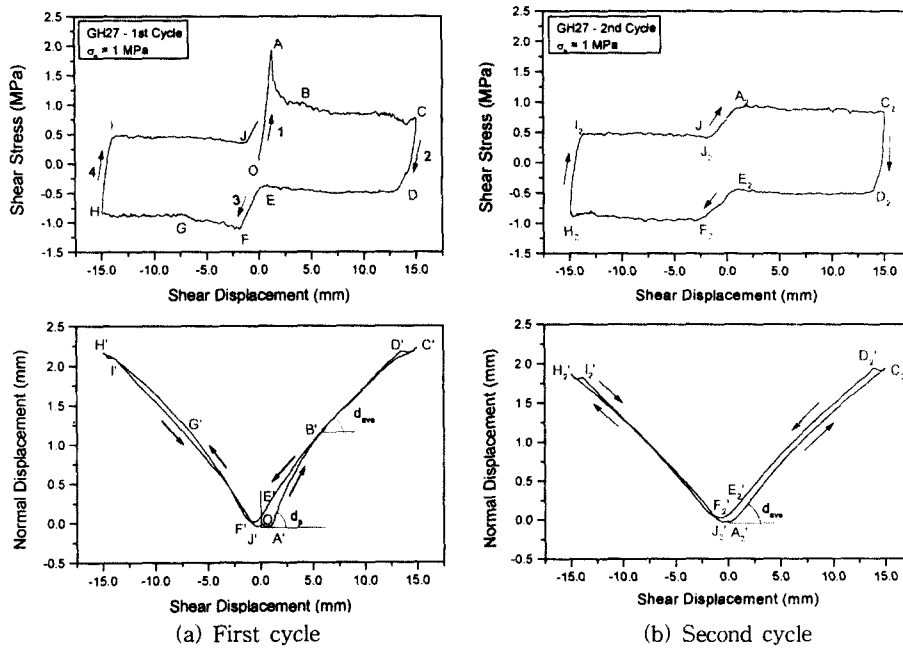


Fig. 9. A typical recording in a complete 2 cycles of direct shear testing of rough joint in granite.

가 언급한 것과 같은 절리평면 손상에 따른 부피 감소현상(seating)이며, 대리석 절리의 경우 전반적으로 절리면 압축강도(JCS, Joint wall compressive strength)가 낮고 입자의 경도가 낮아서 이러한 부피 감소 현상이 많이 생기는 것으로 생각된다.

3.3 거친 절리의 주기전단 거동

Fig. 9는 1 MPa 일정 수직응력 하에서 주기 전단 하의 거친 화강암 절리의 2주기까지의 전형적인 시험결과를 나타낸다. Fig. 9(a)에서 1, 2, 3, 4는 각각 전진전단 하중 단계(forward shear loading stage), 전진전단 제하 단계(forward shear unloading stage), 역전단 하중 단계(reverse shear loading stage) 그리고 역전단 제하 단계(reverse shear unloading stage)를 나타낸다.

Fig.9(a)에서 선 OA, CD, EF, HI와 선 C'D', HT의 기본적인 탄성 변형구간을 나타내며, 점 A와 F는 각각 전진전단과 역전단 시의 정점전단응력, 선 AB와 선 FG 구간은 변형을 연화(strain softening)가 일어나는 구간, 선 BC와 GH는 잔류전단응력 수준을 나타내며 DE와 IJ는 제하시 절리면 마찰을 나타낸다. 또한 O'A'는 초기 압축 구간이며 A'B', F'G'는 초기 팽창이 일어나는 구간 그리고 B'C', G'H'는 선형에 가까운 팽창이 일어나는 구간

이다. A'B', F'G' 구간은 매우 급격하게 팽창각이 증가하고 상당히 비선형적인 팽창을 보이는데, 이는 Fig. 9(a)에서의 변형을 연화 과정의 급격한 2차 거칠기 마모와 관련된다. 또한 이 구간의 정점전단응력 근처의 팽창각을 최대 팽창각이라 하며 이는 2차 거칠기 특성을 반영한다고 간주할 수 있다. 이에 비해 B'C', G'H'는 평균 팽창각과 관련되며, 주로 1차 거칠기 특성을 반영하는 것으로 생각된다. Fig. 9(b)의 C₂D₂와 H₂I₂, C'₂D'₂와 H'₂I'₂ 구간은 탄성 변형 구간, JA₂와 E₂F₂는 각각 2번째 주기에서의 절리면의 엇물림(interlocking)이 발생하는 구간, A₂C₂와 F₂H₂는 각각 잔류전단응력 수준을, 그리고 D₂E₂와 I₂J₂는 제하시 돌출부 마찰 구간을 나타낸다. 2주기부터는 1주기에서의 정점전단강도 성분들이 모두 파쇄되어 잔류마찰만이 남는 것을 알 수 있다.

규칙적 톱나를 가진 절리는 1차 거칠기만이 존재하지만, 거친 절리면에 대한 대부분의 실험 결과는 미세한 2차 거칠기의 엇물림 특성 때문에 잔류전단강도에 비해 매우 큰 정점전단 강도를 보이며 제하시에는 하중시 최대강도 부근의 전단변위에서 오히려 더 작은 전단응력을 보였다. 또한 다양한 규모의 거칠기 때문에 각 전단 단계에서의 미세한 전단응력의 요동이 두드러지며, 하중과 제하시의 마찰력의 뚜렷한 차이를 보였다.

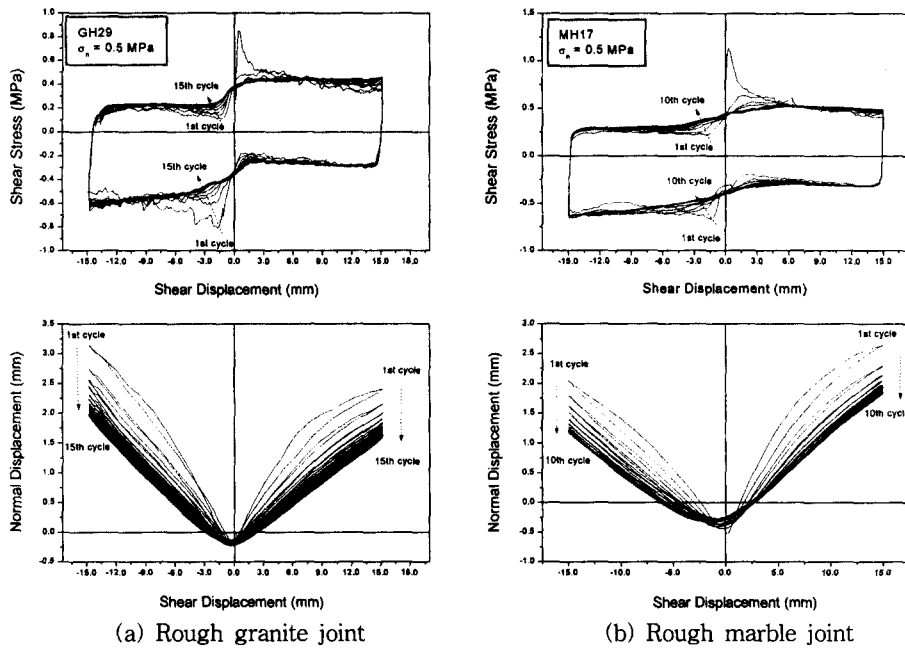


Fig. 10. A typical shear tests recording of rough joint during several cycles in low normal stress.

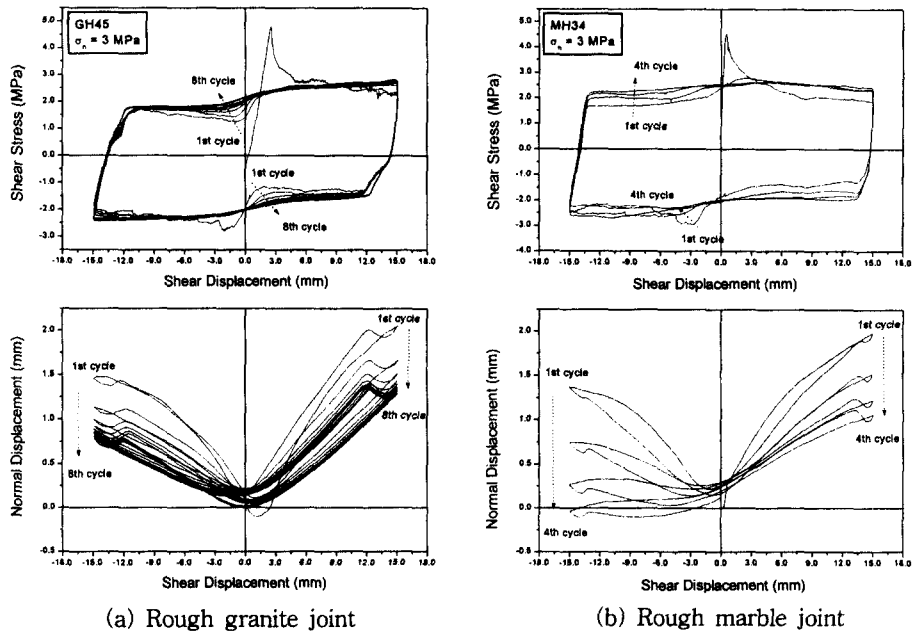


Fig. 11. A typical shear tests recording of rough joint during several cycles in high normal stress.

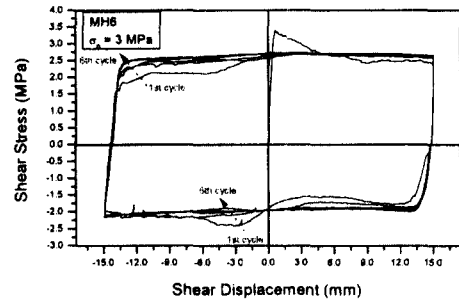
Fig. 10과 Fig. 11은 대표적인 낮은 수직응력(0.5 MPa)과 높은 수직응력(3 MPa) 하에서 화강암과 대리석 절리에 대한 여러 주기 동안의 대표적인 주기전단 거동을 보

여준다. 그림에서 보는 바와 같이 화강암과 대리석의 전단변위 대 전단응력 곡선에서 모두 1주기에서 뚜렷한 정점전단강도를 보이며, 역전단의 경우에는 전진전단의 경우

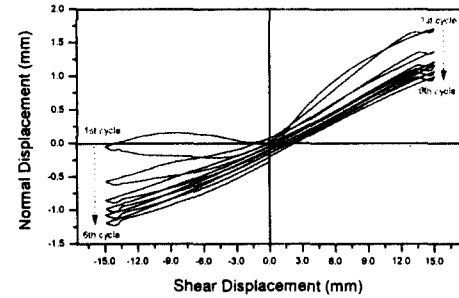
에 비해 상당히 작는데, 초기 전단과정에서의 절리면 손상 때문이다. 정점전단강도의 크기에 영향을 미치는 것은 2차 거칠기에 의한 잇물림(interlocking)이며, 대부분의 2차 요철들은 1주기 전단 내에서 손상됨을 알 수 있다. 하중단계와 제하단계에서의 마찰력은 특히 낮은 수직응력의 경우(Fig. 10) 상당히 큰 차이를 보였는데 이는 주로 1차 거칠기 성분들이 주기 증가에 따라 손상되는 정도가 작기 때문이다. 이는 전단변위 대 수직변위 곡선들에서 뚜렷이 확인할 수 있는데, 1주기에서는 팽창 곡선이 상당히 비선형적인 거동을 보이며, 최종 팽창량도 상당히 크지만, 주기 증가에 따라 점점 선형적인 거동을 보이며 최종 팽창량의 감소도 매우 작아진다. 이는 1주기에서 1, 2차 거칠기가 결합된 팽창 거동이 이후 주기에서 2차 거칠기의 손상으로 인해 1차 거칠기의 손상만이 지배적이기 때문이다. 또한 낮은 수직응력에서 1차 거칠기의 손상 정도는 작은 것으로 생각할 수 있다.

이에 비해 높은 수직응력의 경우(Fig. 11) 전단변위 대 전단응력 곡선에서 하중과 제하 시의 마찰력의 차이가 상당히 작게 나타났으며, 이를 통해 잔류전단응력(하중단계)에 영향을 주는 1차 거칠기의 손상이 매우 크게 일어남을 알 수 있다. 또한 낮은 응력에서는 서로 비슷하던 화강암과 대리석의 거동이 다르게 나타났는데, 화강암 절리의 경우 높은 절리면 강도로 인해 1차 거칠기의 손상이 상당히 높은 응력에서도 더디게 진행되지만, 대리석의 경우는 4주기 정도에서 하중과 제하단계에서의 마찰력이 거의 동일하게 나타났으며, 이는 절리면의 거의 평면화 된 것으로 생각할 수 있다. 규칙적인 톱니형 절리면의 팽창은 단일 거 각에 의존하여 제하시에 선형적인 팽창, 수축 거동을 보이지만 불규칙한 거친 절리면의 경우 다양한 거칠각의 팽창성이 결합되어 비선형적인 거동을 보인다. 제 1주기에서 뚜렷한 비선형 거동을 보이던 거친 절리의 팽창성은 2주기 이후부터는 선형에 가까운 팽창성만을 보이는데, 이러한 차이는 2차 거칠기의 존재 때문이다. 따라서 거친 절리면의 손상 특성은 1차 거칠기와 2차 거칠기의 손상 특성으로 분리되어 생각해야 한다. 1차 거칠기의 손상은 상대적으로 완만한 절리면 마멸(wear)에 의하여 발생하며 수직응력 크기에 의존한다. 이에 비해 2차 거칠기의 손상은 급격한 전단 파쇄(shearing off)에 의하여 제 1 전단 주기에서 대부분 손상된다.

전단변위 대 수직변위 곡선은 1주기에서는 낮은 수직응력에서와 같이(Fig. 10) 상당히 비선형적인 거동을 보였지만, 이후 직선에 가까운 거동을 보였다. 특히 대리석 절



(a) Shear displacement vs. Shear stress.



(b) Shear displacement vs. normal displacement

Fig. 12. A typical shear tests recording of rough marble joint during 6 cycles showing anisotropy.

리의 경우 주기 증가에 따라 최종 변형량의 차이가 매우 크게 일어나서 4주기에서는 3,4분면에서의 팽창거동은 거의 일어나지 않아서 평면화의 진행정도를 확인할 수 있다. 따라서, 절리면의 강도 또는 경도의 차이는 주로 1차 거칠기의 손상에만 영향을 준다고 생각된다. 또한 대부분 절리들은 팽창곡선의 이방성을 뚜렷이 보였다. 이는 주로 거친 절리의 1차 거칠기의 차이 때문이다.

Fig. 12는 전진전단과 역전단시의 뚜렷한 이방성을 보이는 대리석에 대한 전형적인 시험결과를 나타낸다. 전단변위 대 전단응력 곡선에서 전진과 역전단시의 마찰력의 차이도 상당히 크며, 이는 절리면의 1차 거칠기가 전진전단 방향으로 우세함을 나타내며, 팽창곡선이 3,4분면에서 오히려 수축이 진행되는 현상으로 나타났다. 정점전단강도는 맞물림의 불량 때문에 다른 시료에 비해 작게 나타났다.

3.4 거칠각 손상 거동의 정량화

주기 전단시의 절리표면의 손상은 절리 돌출부 각도의 변화로 이상화하여 팽창곡선에서의 할선 또는 접선 기울기를 통해 평가할 수 있다. Patton(1966)은 낮은 수직 응력 상태에서 초기 돌출부 각도 i_0 는 정점 전단 응력에서의 순간 돌출부 각도 i_p 는 정점 전단 응력에서의 순간 돌출부

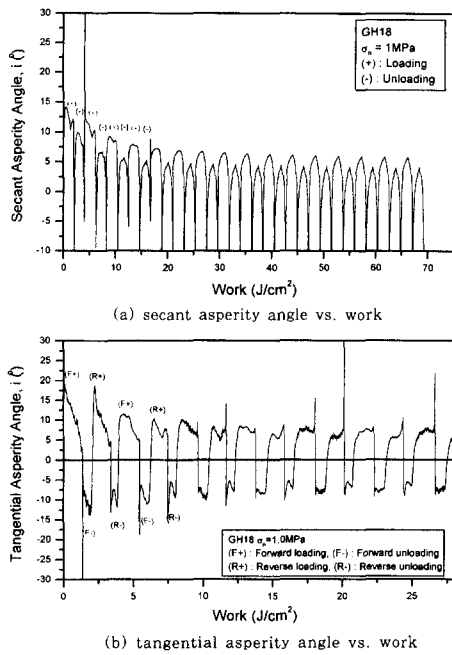


Fig. 13. A typical recording of secant and tangential asperity angle versus work exerted on the joint surface for during cycles.

각도 i_0 와 같다고 보았다. Barton 모델(1987)에서는 정점 전단응력에 대한 돌출부 각도를 절리거칠계수와 절리면 압축강도의 향으로 구한다. Plesha(1987)와 이후 Zubelewicz 등(1987)은 절리면 돌출부 거칠각의 손상을 표현하는 지수 모델을 다음과 같이 제시하였다.

$$i = i_0 e^{-CW} \quad (1)$$

여기서 i_0 는 초기 돌출부 거칠각이며, C는 손상상수 (damage coefficient), W는 마찰 미끄러짐에 의해 소산되는 일 또는 에너지이다. 이 에너지는 일반적인 절리의 전단의 경우 전단응력이 가변적이므로 W에 대해, 전단변위와 응력에 대한 적분 정의로 구할 수 있다. Hutson과 Dowding(1990), Huang 등(1993)은 일정한 거칠각을 가진 절리 시료에서의 주기 전단하의 거칠각의 변화를 전단시 발생한 일과 관련시켜 Plesha 모델(1987)에서의 손상상수를 구한 바 있다.

거칠 절리의 경우 다양한 규모의 거칠기들이 혼재하며 초기 거칠각을 정확히 표현하기 어렵다. 따라서 이의 추정을 위해서는 Plesha 모델(1987)의 수치 모델링을 통해 대표값으로 역산하거나 거칠기 측정 결과를 이용할 수 있다. 본 연구에서는 거칠각 성분의 손상 특성을 정량화하

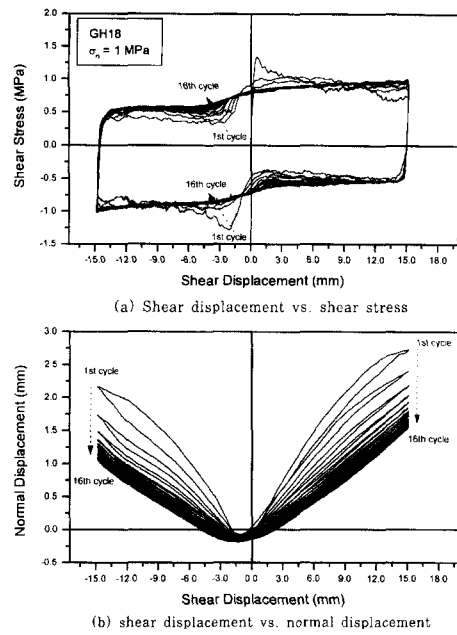


Fig. 14. Shear tests recording of GH18 granite joint during 16 cycles.

기 위해 전단시 축적되는 일(work)을 시험결과를 통해 계산하였으며 팽창곡선을 해석하여 각 전단 단계에서의 할선 팽창각(secant dilation angle)과 접선 팽창각(tangential dilation angle)을 구하였다.

Fig. 13은 대표적인 화강암 절리의 16주기까지의 주기 전단시험결과로부터 얻은 축적된 전단 일 대 할선과 접선 거칠각의 변화를 각각 나타낸다. 초기 부분에서 거칠각의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있으며 원점과 ± 15 mm 부근은 값의 큰 진동이 일어났는데, 이는 팽창곡선의 거동이 바뀌는 부근이므로 오류의 값을 산출하므로 해석에서 무시되어야 한다. 전단 거동과의 비교를 위해 Fig. 14에 해석시료의 주기전단거동을 나타내었다. 해석에 사용된 화강암 시료는 강도와 팽창 거동 이방성이 거의 없는 주기전단 시험 결과를 선택했으며, 팽창곡선은 5주기 이후부터는 거의 선형에 가까와져서 그 이후 손상이 크게 발생하지 않음을 알 수 있다.

할선 팽창각을 사용하는 경우 평균 거칠각의 변화가 반영되며 주로 1차 거칠기의 평균 거칠각의 손상 특성을 나타낸다고 생각할 수 있다. Fig.13(a)에서 (+)는 하중 단계를 (-)는 제하 단계를 나타내며 전진전단과 역전단은 구분하지 않았다. Fig. 13(b)에서는 (a)에 비해 거칠각 크기의 최대값이 더 크게 나타남을 볼 수 있다. 또한 구분

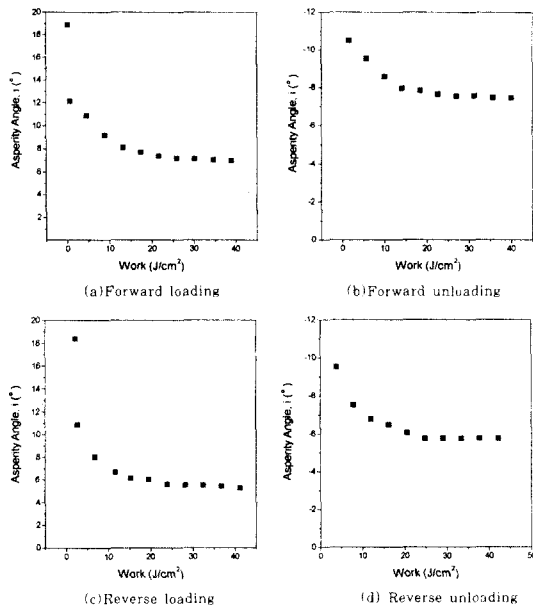


Fig. 15. Relation between tangential work versus asperity angle for different shear stage during 10 cycles.

을 쉽게 하기 위해 제하시의 거칠각 변화는 음의 값으로 도시하였다. 또한 구간과 하중과 제하 단계에서의 차이가 뚜렷하게 나타난다. 전단 일 증가에 따른 거칠각 변화는 초기에는 각 전단 단계에서 다소 불규칙하게 나타나는데, 이는 비선형적인 절리 팽창 거동을 반영한다. 따라서 모든 구간에 대해 소성일의 함수로 정확히 평가하기 어렵다. 본 연구에서는 이들 각 단계별로 손상상수 특성을 평가하기 위해, 각 주기에서 전전전단, 역전단 그리고 그 때의 제하 단계에서의 평균 팽창각을 사용하여 나누어 각각의 주기에 대해 평균화하여 대표값을 해석하였다. 또한 초기 전단 단계에서는 2차 거칠기의 영향이 팽창각에 크게 반영되므로 2차 거칠기 마모가 결합된 절리 거칠각의 평가를 위해 초기 단계에서의 최대 팽창각을 계산하여 결과에 반영하였다.

Fig. 15는 계산된 각 전단 단계에서의 주기에 따른 손상 특성을 보여준다. 각 점들은 1주기에서의 평균 팽창각으로부터 유추된 평균 거칠각(1차 거칠기 성분)을 나타내며 Fig. 15(a)와 Fig. 15(c)의 경우 최초의 한 점은 최대 팽창각으로부터 유추된 2차 거칠기 특성이 포함된 거칠각 성분이다. 전단 일에 대해 절리 거칠각이 모든 전단 단계에서 지속적으로 감소함을 알 수 있다. 이는 Plesha 모델에서의 절리 거칠각의 지수 마모법칙이 이상화된 거친

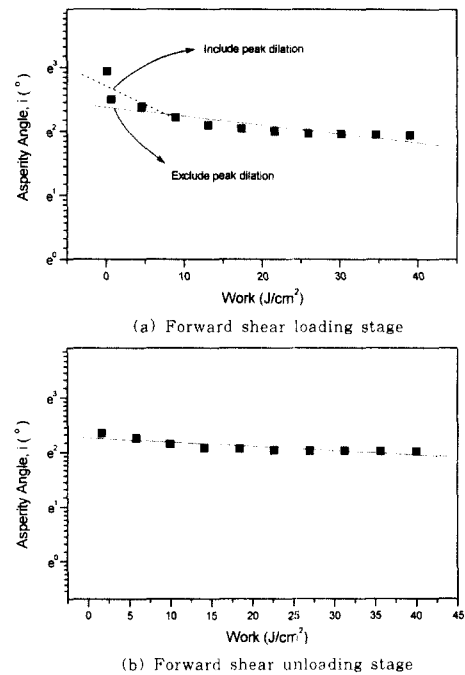


Fig. 16. Determination of damage coefficient using asperity angle changes.

Table 3. Damage coefficient of granite joint samples(GH18) estimated from cyclic test results.

Shear stage	Damage coefficient(C) (cm ² /J)	Determination coefficient(R ²)
Forward loading (Include peak asperity angle)	0.0878	0.90
Forward loading (Exclude peak asperity angle)	0.0137	0.73
Forward unloading	0.0079	0.87
Reverse loading (Include peak asperity angle)	0.0887	0.86
Reverse loading (Exclude peak asperity angle)	0.015	0.85
Reverse unloading	0.011	0.84

절리에 대해서 적용될 수 있음을 의미한다. 하지만 이들 손상의 정도는 하중시와 제하시에 따라 상당히 다르므로, 전 주기에 대해 동일한 손상 법칙을 적용할 수 없다.

지수 손상 법칙에서의 손상상수 (C)는 위 그래프들의 거칠각에 상용로그를 취하여 선형회귀했을 때의 기울기로서 구할 수 있다.

$$\ln(i) = \ln(i_0) - CW \tag{2}$$

하지만 여기서 하중 단계에서 2차 거칠기 성분을 포함하는 최대 팽창각으로 계산된 돌출부 거칠각을 회귀에서 고려할 것인가의 여부에 따라 기울기 값이 크게 달라지게 된다. 따라서 본 연구에서는 재하 단계에서 최대 팽창각의 거동(2차 거칠기 특성)을 포함시켜 제 1 주기에서 거칠각 손상을 고려한 경우와 각 주기에서의 평균 팽창각의 거동만으로 고려한 경우의 두 가지 경우로 나누어서 각각 손상상수를 추정하였다.

Fig. 16은 하중시와 제하시에 손상상수를 구한 그래프를 나타내며 이렇게 구한 손상상수 값을 Table 3에 요약하였다. Fig. 16에서 각 점들은 한 주기에 대한 평균 팽창각을 나타내며 Fig. 16(a)의 최초 점은 최대 팽창각으로부터 구한 값이 포함된 것을 나타낸다. Table 3에서 보는 바와 같이 2차 거칠기가 고려되면 손상 계수는 그렇지 않은 경우에 비해 8배 가량 증가하는 것을 볼 수 있다. 시료가 이방성이 적은 경우이므로 전진 전단시와 역전단시 손상 계수는 비슷한 값을 보였다. 이에 비해 각 재하 단계에서는 약간씩 재하 단계보다 작은 경향을 보였다. 전체적으로 본 연구에서 구한 손상계수는 Huang(1990)이 성형 절리에 대해서 구한 값보다 2~5 배 정도 큰 값을 보였다. 대리석 시료의 경우 최대 팽창각과 평균 팽창각의 크기 차이가 더 크므로 전반적으로 큰 손상계수 값이 산출될 것으로 생각된다. Hutson과 Dowding(1990)의 정현파 암석절리에 대한 손상상수 C는 특정 재료에 대해 상수가 아니며 절리에 가해진 수직응력에 따라 변하지만 단일한 거칠각에 대해 이상화된 것이므로 거친 절리의 거동에의 적용은 한계가 있으며, 본 연구에서 구한 값이 더 실제 값에 가깝다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 화강암과 대리석 평면 및 거친 절리면에 대해 일련의 정량화된 단면 측정과 주기직접전단시험을 실시하였다. 실험결과로부터 도출되는 결론은 다음과 같다.

- 1) 절리 단면 자료 해석을 통해 거친 절리면의 거칠기 파라미터를 구하였으며, 1차 거칠기와 2차 거칠기 성분들로 나뉘어진 전형적인 암석절리임을 확인하였다.
- 2) 평면절리의 주기전단 결과, 경도와 구성광물의 차이에 따라 화강암은 주기 증가에 따른 응력 요동현상을 보였으며, 대리석의 경우 부피감소 현상을 보였다.
- 3) 주기 전단 하중 하의 일련의 전단시험 결과로부터 각 주기전단 단계에 따른 특성을 일반화하였다. 잔류 강

도에 비해 매우 큰 정점 전단강도, 정방향 하중 단계와 역방향 재하 단계의 전단 거동의 차이와 절리 거동의 이방성 등과 같은 규칙적인 틈니형 절리면의 거동과는 다른 신선하고 거친 절리면의 특징들을 발견하였다.

4) 주기 증가에 따른 돌출부 손상 특성을 조사하였으며, 기존의 규칙적 절리에 대한 거칠각의 지수적인 손상 법칙이 거친 절리에도 적용될 수 있음을 확인하였다. 거친 절리에 대한 손상 상수는 수직응력, 거칠기 종류 및 전단 단계에 무관한 단일 상수로 간주될 수 없으며, 기존 지수 손상법칙의 전면적인 수정이 필요하다.

5) 실험 결과들은 앞으로 정확한 손상 기구를 고려한 거친 절리의 주기전단하중 하의 절리 거동의 구성모델 개발과 다양한 조건에서의 절리 거동 예측에 직접 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 건설교통부 과제 R&D/970007 "산지 사면과 급경사면 안정성 평가 및 보강대책 시스템 개발" 중 제 3세부과제 "절리 암반사면의 안정성 평가 및 보강대책 개발 연구"의 지원에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해 준 건설교통부 관계자 여러분께 깊이 감사드리는 바이다. 아울러 삼성중공업 등 연구 관계자 여러분들과 실험 기재를 제공하여 주신 삼성물산(주) 건설기술연구소장 및 관계자 여러분들에게 감사드리는 바이다.

참 고 문 헌

1. 이상돈, 1996, 절리형상의 정량적 측정을 통한 각종 거칠기 파라미터의 비교분석 및 전단거동 해석, 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
2. 배기윤, 1999, 레이저 변위계를 이용한 암석절리면의 3차원 거칠기 측정기 개발, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
3. Barton, N. and Bakhtar, K., 1987, Description and modelling of rock joint for the hydro-thermo-mechanical design of nuclear waste vaults, AECL TR-418.
4. Huang, X., 1990, A laboratory study of the mechanical behavior of rock joints-with particular interest to dilatancy and asperity surface damage mechanism, Ph.D. Thesis, Univ. of Wisconsin- Madison, USA.
5. Huang, X., Haimson, B. C., Plesha, M. E. and Qiu, X., 1993, An investigation of the mechanics of rock joints-part I. laboratory investigation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 30, 257~269.
6. Homand, E.F., Lefevre, F., Belem T. and Souley M.,

1999, Rock joints behavior under cyclic direct shear tests, Rock Mechanics for Industry, Amadei Kranz, Scott & Smeallie(eds), Balkema, Rotterdam, 399~406

7. Hutson R. W. and Dowding C. H., 1990, Joint asperity degradation during cyclic shear. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 27, 109~119.
8. Jing, L., Stephansson, O. and Nordlund, E., 1993, Study of rock joints under cyclic loading conditions, Rock Mech. Rock Eng., 26, 215~232.
9. Kana, D. D., Fox, D. J., and Hsiung, S. M., 1996, Interlock/friction model for dynamic shear response in natural jointed rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 33, 371~386.
10. Patton, F. D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock, Proc. 1st Cong. ISRM, Lisbon, Vol. 1, 509~513.
11. Plesha, M. E., 1987, Constitutive models for rock discontinuities with dilatancy and surface degradation, Int. J. for Num. and Anal. Meth. in Geomech. 11, 345~362.
12. Plesha, M. E., 1995, Rock joint: Theory, constitutive equations, Mech. of Geomaterial Interfaces, Selvadurai & Boulon(ed.), 375~393 .
13. Suh., N. P. and Sin H. C., 1981, The genesis of friction, Wear 69, 91~114.
14. Tse, R. and Cruden, D. M., 1979, Estimating joint roughness coefficients. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16, 303~307.
15. Zubelewicz, A., O'Connor, K., Dowding, C. H., Belytschko, T. and Plesha, M. E., 1987, A constitutive model for cyclic behavior of dilatant rock joints, Proc. 2nd Int. Conf. Constitutive Laws for Eng. Materials, II, 1137~1144.

이 회 석



1993년 서울대학교 공과대학 자원공학
학과, 공학사
1995년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사
1999년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학박사

Tel : 02-880-7234

E-mail : ichsuk@rockeng.snu.ac.kr

현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 Post
Doc.

박 연 준



1981년 서울대학교 공과대학 자원
공학과, 공학사
1983년 서울대학교 대학원 자원공
학과, 공학석사
1992년 미국 Minnesota 대학교 대
학원 토목공학과, 공학박사

Tel : 0331-220-2580

E-mail : yjpark@mail.suwon.ac.kr

현재 수원대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

유 광 호



1984년 연세대학교 공과대학 토목공
학과, 공학사
1986년 연세대학교 대학원 토목공학
과, 공학석사
1992년 미국 Minnesota 대학교 대
학원 토목공학과, 공학박사

Tel : 0331-220-2566

E-mail : khyou@mail.suwon.ac.kr

현재 수원대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

이 회 근



1970년 서울대학교 공과대학 자원
공학과, 공학사
1973년 서울대학교 대학원 자원공
학과, 공학석사
1977년 일본 교오또대학(京都大學)
교 대학원 자원공학과, 공
학박사

Tel : 02-880-7234

E-mail : irram@rockeng.snu.ac.kr

현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수