

## 거칠기와 수직응력에 따른 암석 절리면의 전단거동

이명호<sup>1)\*</sup>, 김종우<sup>2)</sup>, 장광택<sup>2)</sup>

### The Influence of Rock Joint Roughness and Normal Stress on Shear Behaviour

Myoung-Ho Lee, Jong-Woo Kim and Kwang-Taek Chang

**Abstract** In this study, direct shear tests were carried out on the 30 rock joint samples in order to investigate the influence of roughness and normal stress on the shear behaviour. Joint roughness profiles were measured by use of 3D laser profiler, and then the samples were equally classified into three individual groups according to the roughness index of rock joints. Peak shear strength, residual shear strength, shear stiffness, dilation angle of rock joints were investigated in condition of five different constant normal load. Peak shear strength was increased as roughness index was increased, and the influence of roughness on strength was found to be more considerable in case of lower normal stress condition. Residual shear strength and shear stiffness were increased as roughness index and normal stress were increased. Finally dilation angle was decreased as normal stress was increased, but it was increased as roughness index was increased in the same normal stress condition.

**Key words** Rock joint, Roughness, Normal stress, Shear behaviour, Direct shear test

**초 록** 본 연구에서는 거칠기와 수직응력이 절리면의 전단거동에 미치는 영향을 검토하기 위하여 30개의 자연 암반 절리 시료를 대상으로 실험을 실시하였다. 3차원 레이저 거칠기 측정장치를 이용하여 절리면의 거칠기 정보를 측정하였으며, 시료들의 거칠기에 따라 10개씩 세 가지 그룹으로 분류하였다. 다음으로 수직응력을 다섯 단계로 변화시켜가며 전단실험을 실시함으로써 최대전단강도, 잔류전단강도, 전단강성, 팽창특성 등을 조사하였다. 절리면의 거칠기가 증가함에 따라 최대전단강도는 증가하였으며, 거칠기가 최대전단강도에 미치는 영향은 수직응력이 작은 경우에 더욱 크게 나타났다. 또한 절리면의 거칠기가 증가할수록 잔류전단강도도 점차 증가하였다. 전단강성은 거칠기 및 수직응력이 커짐에 따라 증가하는 것으로 나타났으나, 팽창각은 수직응력이 증가할수록 감소하였고, 동일한 수직응력하에서는 절리면의 거칠기가 커질수록 증가하였다.

**핵심어** 절리면, 거칠기, 수직응력, 전단거동, 절리면 전단실험

## 1. 서 론

현지 암반은 단층, 절리, 균열 등의 불연속면을 포함하고 있으며 이러한 불연속면들은 암반구조물의 안정성에 매우 큰 영향을 미친다. 암반 내 불연속면들 중에서도 가장 많이 분포하고 있으며 암반의 역학적 거동에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 절리를 들 수 있는데, 절리면의 전단거동은 절리면의 응력조건과 거칠기 등의 기하학적 조건에 의존하므로 대부분의 역학적 특성은

실험실 전단시험을 통하여 연구되고 있다.

한편, 절리면의 전단거동에 대해서는 국내외에서 지난 수십 년 간 활발히 연구되어 왔으며(Barton, 1976, Bandis et. al. 1981, 이상돈 등, 1994, 이승도, 2002), 이들의 연구 결과에 따르면 절리면의 전단변형이 증가함에 따라 전단응력은 최대치에 도달한 후 잔류응력 상태로 감소하고 절리면은 전단변형과 수직한 방향으로 팽창하며, 절리면의 전단거동은 거칠기에 의해 큰 영향을 받는 것으로 알려졌다. 특히 절리면의 거칠기가 전단거동에 미치는 영향을 검토하기 위한 연구도 실시되었데(Leichnitz, 1985, 광정렬 등, 2003), 이와 관련한 대부분의 연구들은 자연 절리면의 암석시료가 아니라 톱날형 인공모사암석 내지는 인장파괴로 만든 인공 절리면의 암석시료를 실험대상으로 한 문제점이 있다.

<sup>1)</sup> (주)진산이엔지

<sup>2)</sup> 청주대학교 토목환경공학과 교수

\* 교신저자 : niceguy205@nate.com

접수일 : 2007년 4월 10일

심사 완료일 : 2007년 5월 1일

본 연구에서는 절리면의 거칠기와 절리면에 가해지는 수직응력이 암석의 전단거동에 미치는 영향을 검토하기 위하여 30개의 자연 암반 절리 시료를 대상으로 전단시험을 실시하였다. 이를 위해 3차원 레이저 거칠기 측정장치를 이용하여 절리면의 거칠기 정보를 수치적으로 측정하고 이를 정량화 하였으며, 절리면 시료 각각의 거칠기 정보에 따라 상대적으로 거칠기가 작은 것(NJ-L), 중간 것(NJ-M), 큰 것(NJ-H) 등으로 10개씩 3개의 그룹으로 분류하였다. 그리고 3가지 그룹별로 수직응력을 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 MPa 등의 5단계로 나누어 절리면 전단시험을 실시하였다. 이와 같은 실험의 결과를 토대로 하여 수직응력과 절리면 거칠기의 변화가 절리 암석 시험편의 최대전단강도, 잔류전단강도, 전단강성, 팽창특성 등에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 시험편 및 시험장치

2.1 시료의 물리적 특성

본 연구에 사용한 시료는 경상남도 김해 지역 일대에서 채취한 평균 직경 52 mm인 코어 형태의 유문석영질 안산암이다. 대상 시료의 기본적인 물리적 특성을 파악하기 위하여 각종 실내 물성 시험을 실시하여 밀도, 흡수율, 일축압축강도, 영률, 포아송비 등을 구하였다. Table 1은 암석 시료의 물성을 정리한 것으로 여기서 나타낸 값은 암석 시험편 5개의 실험 결과의 평균값이다.

2.2 3차원 레이저 거칠기 측정장치

암석 절리면의 거칠기는 일반적으로 Barton(1976)이 제시한 10가지 기준형상에 의거한 JRC값에 따라 분류되고 있다. 그러나 이러한 JRC 결정법은 측정자의 주관 이 개입될 소지가 많기 때문에 신뢰도가 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 최근 레이저 변위계가 암반공학 분야에 도입된 이후로 절리면의 거칠기를 3차원 정보로 변환하여 해석하는 연구가 국내에서도 실시된 바 있으며(배기운 등, 2002), 여기서 절리면의 거칠기 파라미터들의 상호 관계가 분석되기도 하였다.

본 연구에서는 절리면의 거칠기 파라미터들을 정량적으로 표현하고, 거칠기 파라미터가 전단거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 30개의 자연 절리 시료를 대상

으로 3차원 레이저 거칠기 측정장치를 이용하여 절리 시험편들의 거칠기 정보를 조사하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 거칠기 측정장치의 구성도를 나타낸 것으로, 이는 변위계의 위치지정 제어부와 작업 테이블(1)로 이루어진 위치지정 시스템, 절리 표면의 높이를 측정하는 레이저 변위계(2), 자료 출력과 전체 시스템을 직접 제어하는 컴퓨터(3) 등 크게 세 부분으로 구성되어 있다. 이 장치에서 작업테이블의 크기는 500 mm×500 mm이며 레이저 변위계는 10 μm의 정밀분해능을 가지고 있다. 제어 컴퓨터는 위치지정 시스템의 작업테이블 위에서 레이저 변위계를 특정 위치로 이동시킨 후 변위 측정을 실시하고 측정치를 저장하는 역할을 하는데, 이 과정을 절리면의 전체 형상이 측정될 때까지 반복한다.

2.3 절리면 전단 시험장치

본 연구에서 사용한 절리면 전단 시험장치는 만능재료시험기(UTM)의 프레임에 전단시험기를 설치하여 절리 시험편에 대한 전단시험을 실시할 수 있도록 제작한 것이다. Fig. 2는 시험장치의 전체적인 모습을 나타낸 것으로서 이 장치는 UTM(1), UTM 제어부(2), 전단시험기(3), 자료획득장치(4), 전단펌프(5) 등으로 구성되어 있다.

UTM은 미국 Tinius Olsen사에서 제작한 것으로 입출력 신호의 피드백이 가능한 서보 컨트롤 형식의 만능시험기로서, 여기에는 압력계와 LVDT가 장착되어 있어 하중 및 변위의 조절·유지가 자유롭게 실시된다. 본

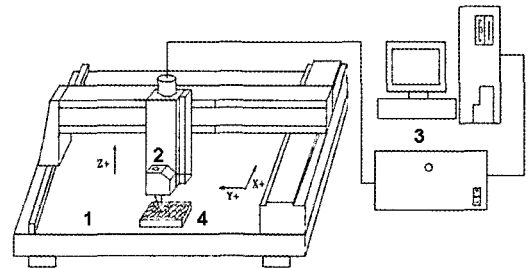


Fig. 1. Schematic diagram of 3D laser profiler (1: 3D Laser profiler stage, 2: Laser sensor, 3: Controller & Data acquisition apparatus, 4: Rock joint sample)

Table 1. Physical properties of rock samples

Properties	Density (kN/m <sup>3</sup> )	Absorption ratio (%)	P-wave velocity (m/s)	Uniaxial compressive strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
Value	26.3	0.32	3795	184	58	0.17

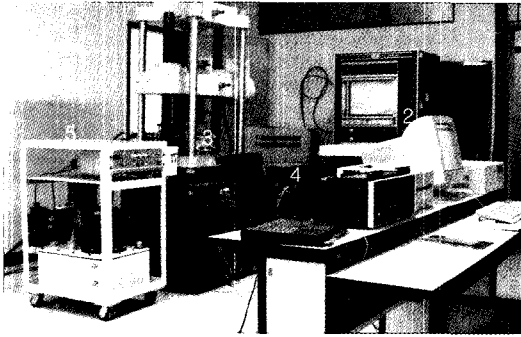
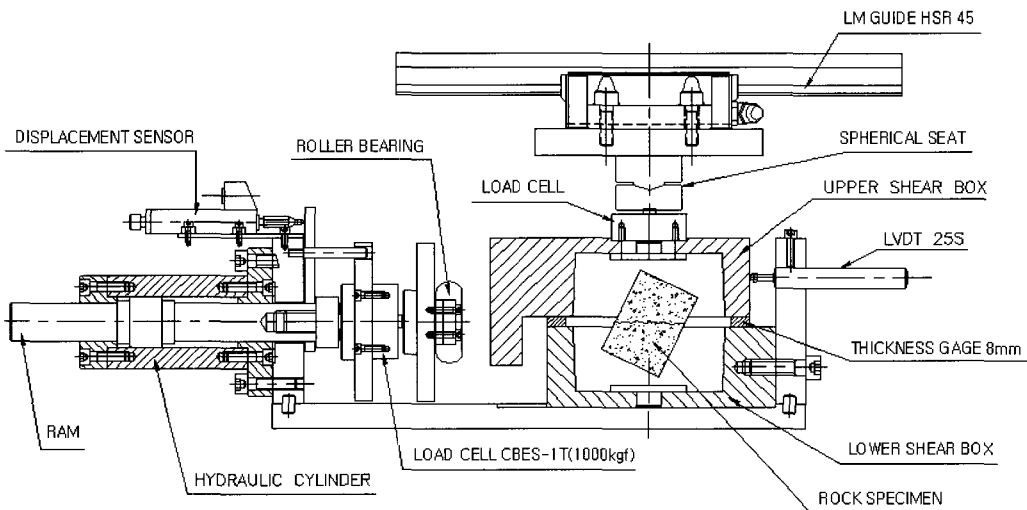


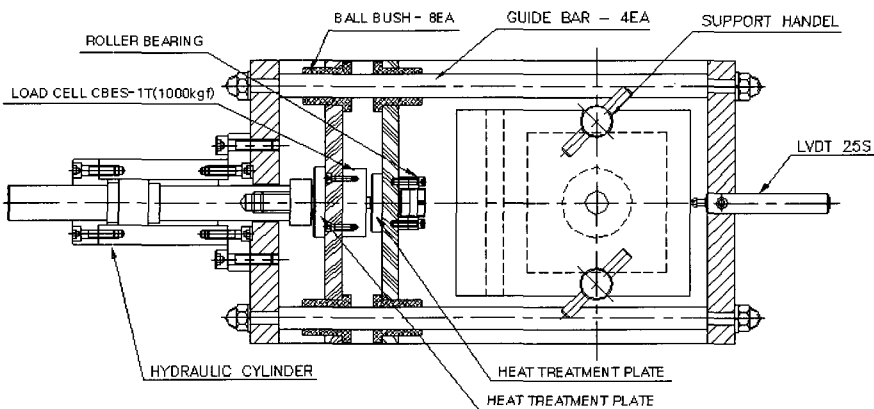
Fig. 2. General view of direct shear testing system (1: UTM, 2: UTM controller, 3: Shear testing apparatus, 4: Data acquisition apparatus, 5: Shear pump)

실험에는 이 UTM을 이용하여 전단시험을 하는 동안 절리 시험편에 가해지는 수직응력을 일정하게 유지하도록 하였다.

Fig. 3은 전단시험기의 형태를 나타낸 것으로, 이는 크게 상부 전단상자, 하부 전단상자, 전단하중을 가하는 유압램, 수직하중 측정용 로드셀, 전단하중 측정용 로드셀, 수직변위 측정용 LVDT, 전단변위 측정용 LVDT 등으로 구성되어 있다. 이 시험기에서 절리 암석 시험편에 전단하중을 가하는 형태는 전단펌프에서 일정한 속도로 전단변위 명령을 주면 유압램이 전진하면서 상부 전단상자를 미는 방식으로 되어 있다. 유압램 앞에는 하중 측정용 로드셀을 설치하였고, 그 전면에는 전단시험 중에 발생하는 수직방향으로의 변위를 구속하



(a) Side view



(b) Floor plan

Fig. 3. Schematic diagram of shear testing apparatus

지 않으면서 마찰저항을 줄이기 위한 정밀 롤러베어링이 부착되어 있다. 또한 상하부 전단상자는 연결용 손잡이(support handle)를 통해 상부 및 하부 전단상자를 결합시킨 후 전단시험기에 독립적으로 탈부착이 가능하도록 만들어졌으며, 전단상자의 내부 규격은 폭과 길이가 120 mm이고 높이는 45 mm이다.

전단시험을 실시할 때 시험편에 수직응력을 일정하게 유지하는 데에는 UTM을 사용한 반면에, 전단하중을 가하기 위해서는 전단하중용 펌프를 별도로 제작하여 사용하였다. 이 전단펌프는 전단하중을 가하는 가압장치와 전단변위 속도와 범위를 조절하는 제어장치로 구성되는데, 이는 전단변위를 분당 0.01 mm~10.0 mm까지 다양하게 제어할 수 있는 특징이 있다.

한편, 전단시험이 진행되는 동안 발생하는 수직하중, 전단하중, 수직변위, 전단변위 등의 자료는 2개의 로드셀과 2개의 LVDT를 이용하여 자료획득장치로 수집하였다. 또한 UTM의 가압판과 상부 전단상자 사이에는 직선운동 볼베어링을 설치하였는데, 이는 수직하중이 가해지는 동안에도 전단변위가 자유롭게 발생할 수 있도록 하는 장치이다.

### 3. 시험방법

본 연구에서는 총 30개의 자연 암반 절리 시험편에 대해 일정수직하중(Constant Normal Load, CNL) 조건 하에서 다음과 같은 방법으로 전단시험을 실시하였다.

- 1) 절리면의 단면적을 측정하여 시험에 필요한 수직하중의 값을 결정한다.
- 2) 상부 전단상자와 하부 전단상자에 각각 절리면 상부 시험편과 절리면 하부 시험편을 서로 수평이 되도록 몰딩을 한다.
- 3) 시험편이 몰딩된 상·하부 전단상자를 전단시험기에 결합한다.
- 4) UTM의 상부가압판에 직선운동 볼베어링을 부착한 후, 전단시험기를 UTM의 하부가압판 위에 설치한다.
- 5) 상부전단상자 위에 수직하중 측정용 로드셀과 구면좌를 올려놓고 직선운동 볼베어링과 로드셀, 구면좌, 압축 시험편의 하중 중심을 일치시킨다.
- 6) 수직변위 및 전단변위 측정용 LVDT를 각각 설치하고 모든 측정기들을 자료획득장치에 연결한다.
- 7) 이와 같이 시험을 위한 준비가 완료되면 소정의 수직하중을 가한 후 본격적인 전단시험을 실시한다. 이때 수직하중은 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 MPa 등으

로 5단계로 구분하였으며 전단하중을 가하는 동안 수직하중은 일정하게 유지되도록 하였다.

- 8) 전단펌프를 작동시켜 절리면에 전단하중을 가한다. 이때 전단변위가 0.1 mm/min의 일정한 속도가 되도록 변위제어를 하였으며, 시험편마다 총 15 mm의 전단변위를 발생시켰다. 시험중 실시간으로 수직하중, 전단하중, 수직변위, 전단변위 등의 자료를 초당 5개의 속도로 획득하였다.
- 9) 시험 후에는 하중을 제거하고 난 다음 전단시험기에서 상·하부 전단상자를 분리시켜 전단상자만을 꺼냄으로써 한 시험편에 대한 시험을 완료하였으며, 이와 같은 방법으로 총 30개 시험편에 대한 시험을 진행하였다.

## 4. 시험 결과 및 검토

### 4.1 절리면 거칠기의 측정 결과

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 거칠기 측정장치를 사용하여 자연 암반 절리면 시험편의 거칠기를 측정하였다. 이때 레이저 변위계의 측정간격은 가로 1 mm, 세로 1 mm로 하였으며, 측정 자료들을 포트란 프로그램으로 입력하여 통계 처리하였다.

해석한 파라미터는 절리면의 평균 기울기  $SL_{ave}$ 와 절리면의 평균 거칠각  $i_{ave}$ , 절리면 1차 미분의 평방평균값  $Z_2$ 와 거칠각의 평방평균값  $i_s$ , 절리면 높이에 대한 표준편차 SDH, 거칠기 형상지수  $R_p$ , 절리면 기울기의 표준편차  $SD_{SL}$ 와 절리 거칠각의 표준편차  $SD_i$  등 7가지 종류이다.

이들 파라미터들의 정의와 상호관계는 배기운 등(2002)에 의해 국내에서도 제시된바 있으며, 여기서 거칠기 형상지수  $R_p$ 와 절리면의 평균 거칠각  $i_{ave}$ 이 파라미터들 중에서 가장 양호한 상관관계를 가짐이 보고되었다. 또한 Tse & Cruden(1979)은 절리면 1차 미분의 평방평균값  $Z_2$ 을 이용하여 Barton의 절리거칠계수(JRC)를 결정하는 (1)식을 발표하기도 하였다.

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log Z_2 \quad (1)$$

Fig. 4는 본 연구에서 측정된 30개의 절리면 자료 중에서 3가지의 대표적인 형태를 나타낸 것으로 각각 NJ-L, NJ-M, NJ-H 등이다. 여기서 NJ는 자연절리(Natural Joint)를 의미하며, L, M, H 등은 절리면의 상대적인 거칠기 정도를 표현한 것이다. 즉 본 연구에서는 총 30개의 절리면 형상을 분석한 후에 각 절리면의 평균 거칠각( $i_{ave}$ )과 절리면 1차 미분의 평방평균값( $Z_2$ )을 토대로

Table 2. Classification of sample groups

Sample group	Sample No.	$i_{ave}$ (°)	$Z_2$
MJ-L	1	4.38	0.22
	2	4.59	0.18
	3	4.90	0.20
	4	4.73	0.21
	5	3.83	0.22
	6	4.33	0.18
	7	4.78	0.21
	8	4.47	0.19
	9	4.56	0.21
	10	4.31	0.21
	Ave.	4.49	0.20
NJ-M	1	6.08	0.24
	2	6.55	0.28
	3	5.53	0.23
	4	5.72	0.22
	5	5.29	0.25
	6	7.43	0.29
	7	5.54	0.27
	8	5.85	0.26
	9	6.80	0.25
	10	5.16	0.21
	Ave.	6.00	0.25
NJ-H	1	7.62	0.33
	2	7.20	0.36
	3	7.71	0.26
	4	7.07	0.30
	5	7.12	0.23
	6	8.66	0.32
	7	8.34	0.33
	8	8.16	0.31
	9	7.87	0.32
	10	8.10	0.31
	Ave.	7.79	0.31

L(low), M(medium), H(high) 등의 3가지 그룹으로 10 개씩 구분하였으며, 시료의 그룹 명칭을 NJ-L, NJ-M, NJ-H로 표시하였다.

Table 2는 3개 그룹에서  $i_{ave}$ 와  $Z_2$ 의 분포를 나타낸 것으로, 여기서 NJ-L 그룹은  $i_{ave}$ 의 평균값이 4.49°이고 NJ-M 그룹은 6.00°이며 NJ-H 그룹은 7.79°이다. 또한, Table 2에 나타난 3개 그룹의  $Z_2$ 의 평균값인 0.20, 0.25, 0.31을 (1)식에 대입하면 NJ-L, NJ-M, NJ-H 그룹의 JRC는 순서대로 10, 13, 16에 해당한다.

4.2 시험 결과 및 검토

본 연구에서는 절리면의 거칠기와 수직응력에 따른 절리면의 전단거동 특성을 파악하기 위하여 절리면의 거칠기 정도가 서로 다른 3가지 그룹별로 수직응력을 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 MPa 등의 5단계로 변화시켜가면서 절리면 전단시험을 실시하였다.

Fig. 5는 본 실험에서 얻어진 대표적인 전단응력-전단 변위 곡선을 보인 것으로, 절리면의 전단변형이 증가함에 따라 전단응력은 최대치에 도달하여 뚜렷한 최대전단 강도를 보이며 그 이후에는 전단응력이 급격히 감소하다가 거의 일정한 수준의 잔류전단강도를 나타내고 있다.

Table 3은 절리면 전단시험 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 여기서, 최대전단강도는 전단응력-전단변위 곡선에서 직접 구하였으며, 잔류전단강도는 전단응력-전단 변위 곡선에서 전단응력이 최대값을 지난 이후 전단 변위가 계속되는 동안에도 전단응력의 변화가 작은 구간의 평균값으로 하였다. 전단강성(shear stiffness)은 전단응력-전단변위 곡선에서 최대전단응력의 50% 응력 수준에서 비교적 선형인 구간을 선택하여 전단응력/전단 변위의 비로써 결정하였으며, 팽창각(dilation angle)은 최대전단강도에 도달하기 전의 수직변위가 가장 작을 때와 전단강도가 최대치에 도달했을 때의 평균 기울기로 구하였다.

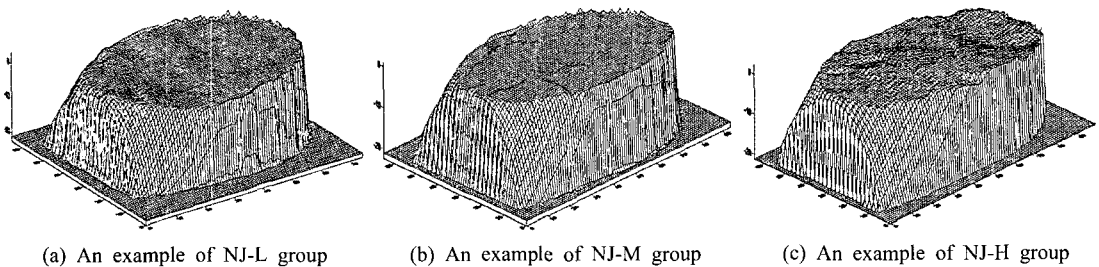


Fig. 4. Examples of 3D profile of rock samples

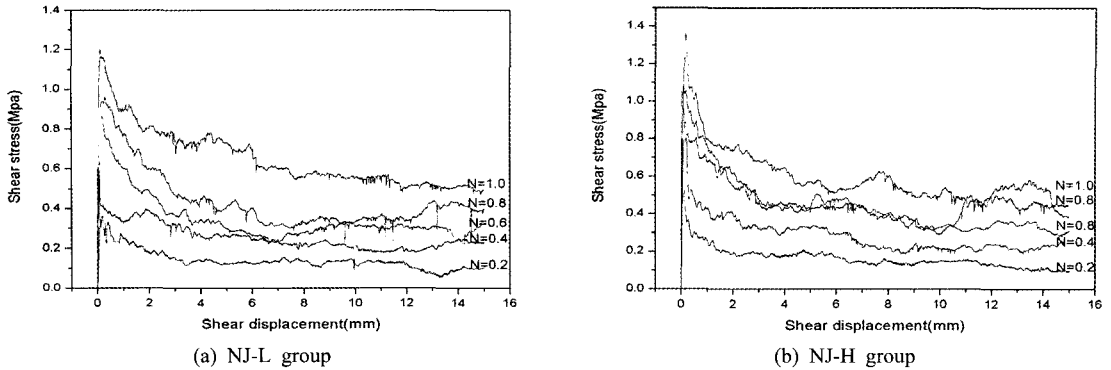


Fig. 5. Shear deformation curves under various normal stresses

Table 3. Results of direct shear tests

Sample group	Sample No.	Normal stress (MPa)	Peak shear strength (MPa)	Residual shear strength (MPa)	Shear stiffness (GPa/m)	Dilation angle (°)
NJ-L	1	0.2	0.34	0.16	1.71	26.6
	2	0.2	0.35	0.13	1.54	25.6
	3	0.4	0.52	0.20	5.38	24.1
	4	0.4	0.54	0.18	4.43	23.0
	5	0.6	0.84	0.30	6.27	17.4
	6	0.6	0.88	0.31	5.57	20.4
	7	0.8	0.90	0.48	6.67	14.1
	8	0.8	0.92	0.36	6.35	15.3
	9	1.0	1.20	0.60	8.89	13.0
	10	1.0	1.15	0.55	8.69	12.2
NJ-M	1	0.2	0.44	0.13	2.17	27.2
	2	0.2	0.45	0.11	3.50	27.6
	3	0.4	0.74	0.22	5.13	25.6
	4	0.4	0.78	0.26	5.15	25.2
	5	0.6	0.95	0.35	7.10	23.2
	6	0.6	0.97	0.36	7.15	24.9
	7	0.8	0.98	0.42	9.06	20.0
	8	0.8	1.06	0.52	8.69	19.4
	9	1.0	1.21	0.62	9.79	15.2
	10	1.0	1.23	0.60	10.77	16.7
NJ-H	1	0.2	0.53	0.15	3.30	32.0
	2	0.2	0.54	0.13	4.03	33.7
	3	0.4	0.85	0.33	5.76	28.8
	4	0.4	0.93	0.34	5.49	28.7
	5	0.6	1.04	0.44	8.45	26.6
	6	0.6	1.02	0.46	7.10	27.5
	7	0.8	1.20	0.65	9.23	22.6
	8	0.8	1.08	0.50	8.97	26.5
	9	1.0	1.31	0.62	15.39	20.0
	10	1.0	1.35	0.73	14.01	23.4

#### 가. 최대전단각도의 변화

Fig. 6은 3가지 거칠기 그룹에서 수직응력에 대한 최대전단각도의 변화를 나타낸 것이고 Table 4는 평균값을 정리한 것이다. Table 4에서 절리면의 평균 거칠각

이 4.49°인 NJ-L 그룹으로부터 평균 거칠각이 7.79°인 NJ-H 그룹쪽으로 절리면의 거칠기가 증가함에 따라 최대전단각도는 증가하였다. 또한, 수직응력이 0.2 MPa 일 경우 NJ-L 그룹에서 NJ-H 그룹으로 갈수록 최대전

단강도는 0.35 MPa에서 0.56 MPa로 60% 증가하였으나, 1.0 MPa일 경우는 1.18 MPa에서 1.33 MPa로 13% 증가하였다. 따라서 절리면의 거칠기가 최대전단강도에 미치는 영향은 수직응력이 작은 경우에 더욱 크게 나타남을 알 수 있었다.

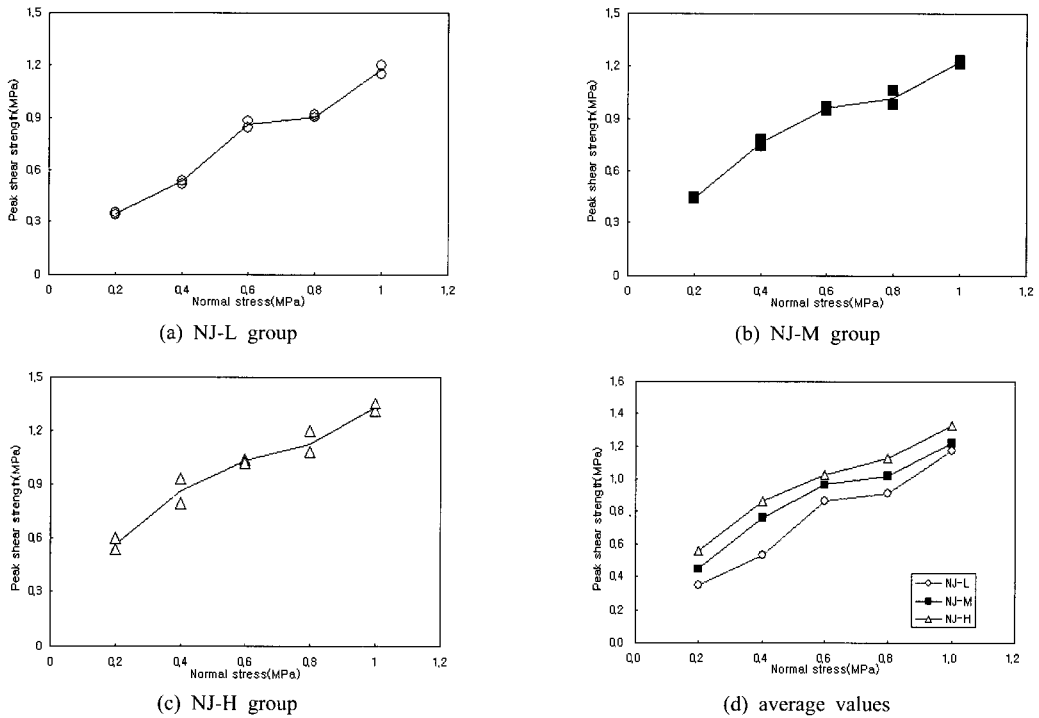
**나. 잔류전단강도의 변화**

Fig. 7은 3가지 거칠기 그룹에서 수직응력에 대한 잔류전단강도의 변화를 나타낸 것이고 Table 5는 평균값을 정리한 것이다. 그림과 표에서 수직응력이 0.2~1.0 MPa의 비교적 낮은 수준일 경우에는 절리면의 거칠기가 증가할수록 잔류전단강도도 최대전단강도와 마찬가지로 점차적으로 증가하는 경향을 볼 수 있으며 이는

곽정렬 등(2003)의 실험결과와 부합한다. 또한, 절리면의 거칠기가 잔류전단강도에 미치는 영향 역시 0.2 MPa의 경우를 제외하면 수직응력이 작은 경우에 더 크게 나타났다. 이와 같이 잔류전단강도가 수직응력이 작은 경우에 더 큰 증가를 보인 것은 절리면내에 존재하는 조그만 돌출부인 2차 거칠기가 영향을 미친 것으로 생각된다. 이와 같이 절리면의 거칠기는 최대전단변형 뿐만 아니라 일정량 이상의 전단변위 이후의 잔류전단변형에서도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

**다. 전단강성의 변화**

Fig. 8은 3가지 거칠기 그룹에서 수직응력에 대한 전단강성의 변화를 나타낸 것이고 Table 6은 평균값을 정



**Fig. 6.** Variation of the peak shear strength with normal stress

**Table 4.** Summary of average values of peak shear strengths

Normal stress (MPa)	Peak shear strength (MPa)		
	NJ-L	NJ-M	NJ-H
0.2	0.35	0.45	0.56
0.4	0.54	0.76	0.86
0.6	0.86	0.96	1.03
0.8	0.91	1.02	1.13
1.0	1.18	1.22	1.33

**Table 5.** Summary of average values of residual shear strengths

Normal stress (MPa)	Residual shear strength (MPa)		
	NJ-L	NJ-M	NJ-H
0.2	0.14	0.12	0.14
0.4	0.19	0.24	0.34
0.6	0.31	0.36	0.45
0.8	0.42	0.47	0.58
1.0	0.57	0.61	0.68

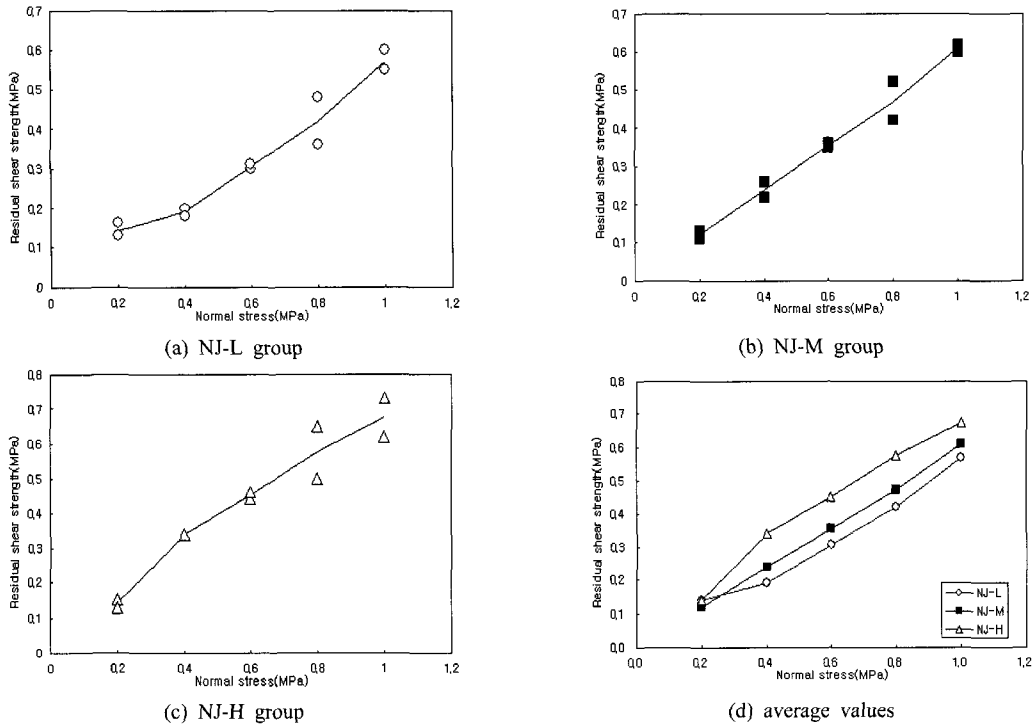


Fig. 7. Variation of the residual shear strength with normal stress

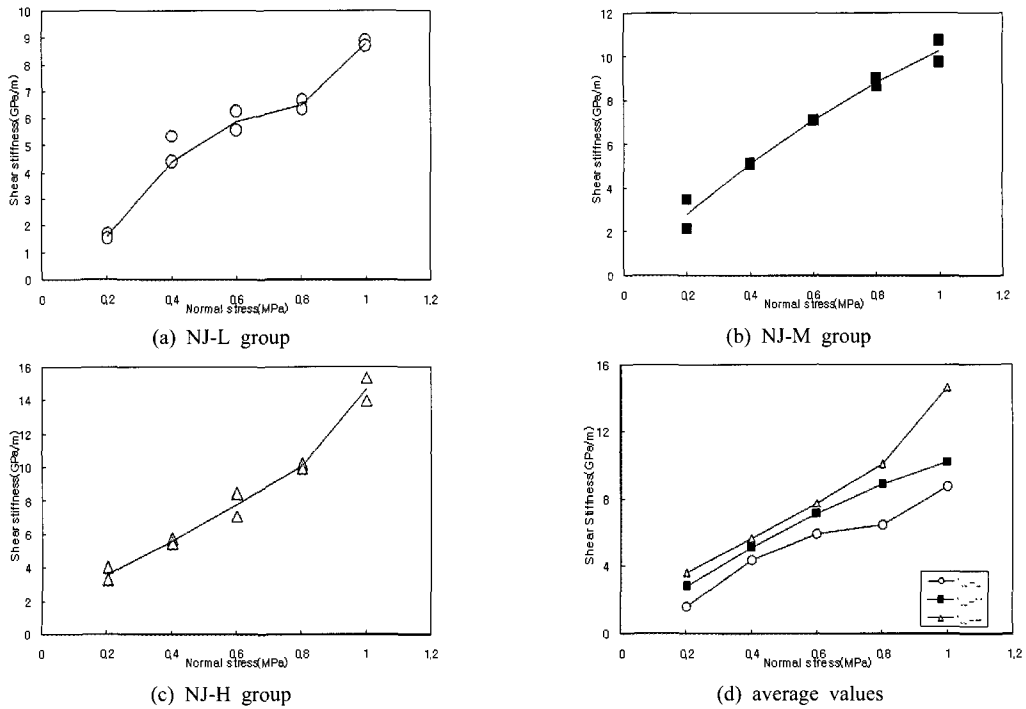


Fig. 8. Variation of shear stiffness with normal stress



리한 것이다. 표에서 수직응력이 0.2 MPa에서 1.0 MPa로 증가함에 따라 NJ-L 그룹의 전단강성은 1.63 GPa/m에서 8.79 GPa/m으로 증가하였고, NJ-M 그룹은 2.84 GPa/m에서 10.28 GPa/m, NJ-H 그룹은 3.67 GPa/m에서 14.7 GPa/m로 증가하였다. 또한, Fig. 8(d)에서 볼 수 있듯이 동일한 수직응력하에서는 절리면의 거칠기가 커질수록 전단강성은 증가하였다. 따라서 절리면의 거칠기는 전단강성에 큰 영향을 미치는 요소를 입증할 수 있었다.

Table 6. Summary of average values of shear stiffness

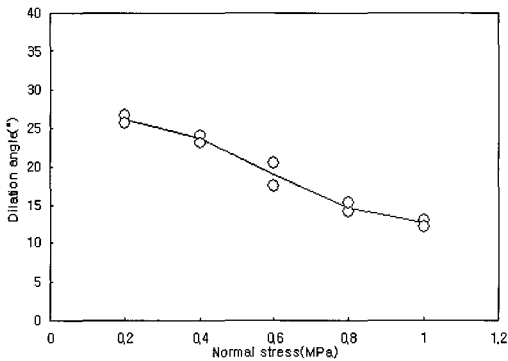
Normal stress (MPa)	Shear stiffness (GPa/m)		
	NJ-L	NJ-M	NJ-H
0.2	1.63	2.84	3.67
0.4	4.43	5.14	5.66
0.6	5.92	7.13	7.78
0.8	6.51	8.88	10.1
1.0	8.79	10.3	14.7

라. 팽창각의 변화

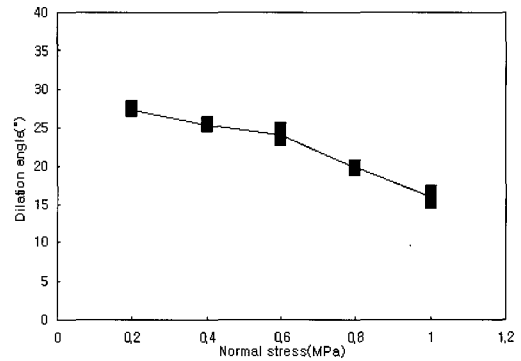
Fig. 9는 3가지 거칠기 그룹에서 수직응력에 대한 팽창각의 변화를 나타낸 것이고 Table 7은 평균값을 정리한 것이다. 수직응력이 0.2 MPa에서 1.0 MPa로 증가함에 따라 NJ-L 그룹의 팽창각은 26.1°에서 12.6°로 감소하였고, NJ-M 그룹은 27.4°에서 15.9°, NJ-H 그룹은 32.9°에서 21.7°로 감소하였다. 또한, Fig. 9(d)와 같이 동일한 수직응력하에서는 절리면의 거칠기가 커질수록 팽창각은 증가하였다. 따라서 절리면의 거칠기와 수직응력

Table 7. Summary of average values of dilation angles

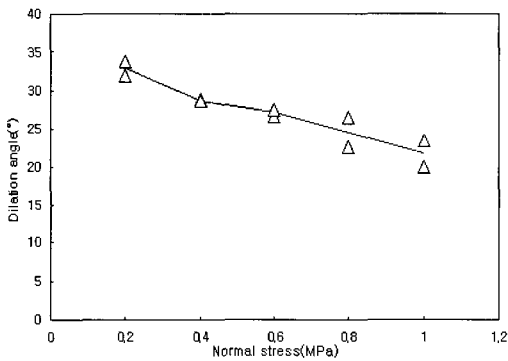
Normal stress (MPa)	Dilation angle (°)		
	NJ-L	NJ-M	NJ-H
0.2	26.1	27.4	32.9
0.4	23.5	25.4	28.7
0.6	18.9	24.0	27.1
0.8	14.7	19.7	24.6
1.0	12.6	15.9	21.7



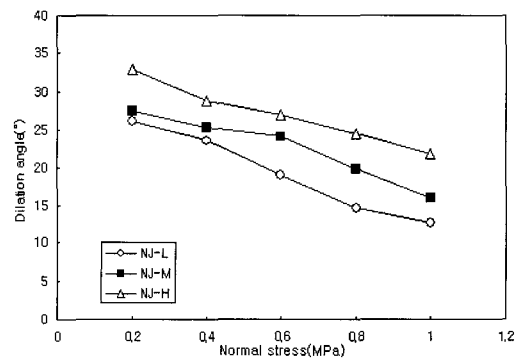
(a) NJ-L group



(b) NJ-M group



(c) NJ-H group



(d) average values

Fig. 9. Variation of dilation angle with normal stress

은 모두 팽창각에 큰 영향을 미치는 요소라고 생각된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 30개의 자연 암반 절리면 시료를 대상으로 3차원 레이저 거칠기 측정장치를 사용하여 각 시료의 절리면 거칠기 정보를 측정하여, 각각의 평균 거칠각( $i_{ave}$ )과 절리면 1차 미분의 평방평균값( $Z_0$ )에 따라 거칠기가 작은 것(NJ-L), 중간 것(NJ-M), 큰 것(NJ-H) 등의 3가지 그룹으로 10개씩 분류하였다. NJ-H, NJ-M, NJ-L 그룹의 평균 거칠각은 순서대로 4.49°, 6.00°, 7.79°이며 JRC 환산값은 각각 10, 13, 16에 해당하였다. 이들 시료에 대해 수직응력을 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 MPa 등의 5단계로 변화시켜가면서 절리면 전단실험을 실시하였다. 실험을 통해 절리면의 거칠기와 수직응력의 변화에 따른 최대전단강도, 잔류전단강도, 전단강성, 팽창각의 영향을 조사하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 전단시험에서 절리면의 전단변형이 증가함에 따라 전단응력은 최대치에 도달하여 뚜렷한 최대전단강도를 보였으며 그 이후에는 거의 일정한 수준의 잔류전단강도를 나타내었다.
- 2) NJ-L 그룹으로부터 NJ-H 그룹쪽으로 절리면의 거칠기가 증가함에 따라 최대전단강도는 증가하였으며, 절리면의 거칠기가 최대전단강도에 미치는 영향은 수직응력이 작은 경우에 더욱 크게 나타났다.
- 3) 절리면의 거칠기가 증가할수록 잔류전단강도도 최대전단강도와 마찬가지로 점차적으로 증가하였으며, 따라서 본 실험과 같이 비교적 작은 수직응력 수준에서는 절리면의 거칠기가 최대전단강도 뿐만 아니라 잔류전단강도에도 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- 4) 전단강성은 절리면의 거칠기 및 수직응력이 커짐에 따라 증가하는 것으로 나타났으나, 팽창각은 수직

응력이 증가할수록 감소하였고, 동일한 수직응력하에서는 절리면의 거칠기가 커질수록 증가하였다.

- 5) 절리면의 전단강도 특성은 절리면의 거칠기와 수직응력 이외에도 절리면의 강도와 충전물에 큰 영향을 받기 때문에 이에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

## 참고문헌

1. Barton N.R., 1976, The shear strength of rock and rock joint, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 12, 255-279.
2. Bandis. S.C., Lumsden A.C. and Barton N.R., 1981, Experimental Studies of Scal Effects on the Shear Behaviour of Rock Joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci.& Geomech. Abstr., 18, 1-21.
3. Lechnitz W., 1985, Mechanical properties of rock joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci.& Geomech. Abstr. 22, 313-321.
4. Tse R., Cruden D.M., 1979, Estimating Joint Roughness Coefficients, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 16, 303-307.
5. 이상돈, 강준호, 이정인, 1994, 절리면의 거칠기에 따른 암석의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구, 터널과 지하공간, 4, 261-273.
6. 이승도, 2002, 거칠기가 절리의 전단거동 및 투수성에 미치는 영향에 관한 연구, 터널과 지하공간, 12.4, 312-320.
7. 광정열, 이상은, 임한욱, 2003, 낮은 수직응력 하에서 인공 절리면의 전단 이방성에 관한 연구, 터널과 지하공간, 13.3, 169-179.
8. 배기윤, 이정인, 2002, 레이저 변위계를 이용한 암석 절리면의 3차원 거칠기 측정기 개발, 터널과 지하공간, 12.4, 268-276.



### 이 명 호

2005년 청주대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
2007년 청주대학교 대학원 자원공학과  
공학석사

Tel: 043-229-8466  
E-mail: niceguy205@nate.com  
현재 (주)진산이엔지 지반부



### 김 종 우

1986년 서울대학교 공과대학 자원공학  
과 공학사  
1988년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1993년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학박사

Tel: 043-229-8471  
E-mail: jwkim@cju.ac.kr  
현재 청주대학교 토목환경공학과 교수



### 장 광 택

1970년 인하대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1979년 인하대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1988년 인하대학교 대학원 자원공학과  
공학박사

Tel: 042-868-3242  
E-mail: ktchang@cju.ac.kr  
현재 청주대학교 토목환경공학과 교수