

절리면의 거칠기가 암석의 전단강도 특성에 미치는 영향

이명호((주)진산이엔지)

김종우 (청주대학교)

1. 서론

암반은 단층, 절리, 균열 등의 불연속면을 포함하고 있으며, 이러한 불연속면들은 암반구조물의 안정성에 매우 큰 영향을 미친다. 암반내 불연속면들 중에서도 가장 많이 분포하고 있으며 암반의 역학적 거동에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 절리를 들 수 있다. 절리면의 변형특성 및 파괴거동은 절리면의 응력조건과 기하학적 조건에 의존하므로 대부분의 역학적 특성 조사는 실험실 직접전단시험을 통하여 연구되고 있다.

본 연구에서는 절리면의 거칠기가 암석의 전단강도 특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 30개의 자연 암반 절리면을 대상으로 직접전단시험을 실시하였다. 이를 위해 3차원 레이저 거칠기 측정장치를 이용하여 절리면의 거칠기 정보를 수치적으로 측정하고 이를 정량화하였으며, 절리면 각각의 거칠기 정보에 따라 상대적으로 거칠기가 큰 것(NJ-H), 중간 것(NJ-M), 작은 것(NJ-L) 등으로 10개씩 3개의 그룹으로 분류하였다. 그리고 3가지 그룹별로 수직응력을 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 MPa 등의 5단계로 나누어 직접전단시험을 실시하였다. 이와 같은 실험의 결과를 토대로 하여 거칠기 및 수직응력의 변화가 절리 암석 시험편의 최대 전단강도, 잔류전단강도, 수직강성, 전단강성, 팽창특성 등에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 시험편 및 시험장치

2.1 시료의 물리적 특성

본 연구에 사용한 시료는 경상남도 김해 지역 일대에서 채취한 자연 암석 시료이다. 대상 시료의 기본적인 물리적 특성을 파악하기 위하여 각종 실내 물성 시험을 실시하여 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비, 밀도, 흡수율 등을 구하였으며 그 결과는 표 1에 나타나 있다.

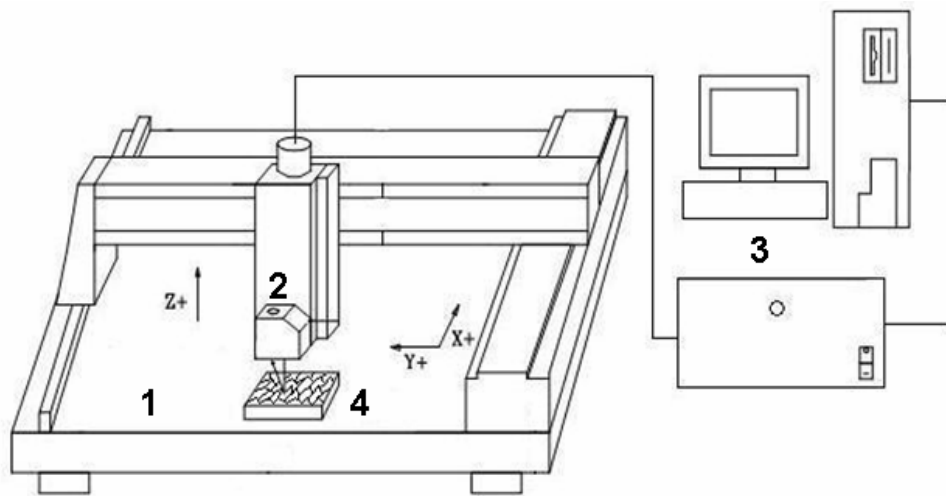
표 1. 대상 시료의 물리적 특성

Properties	Density (g/cm ³)	Absorption ratio (%)	P-wave velocity (m/s)	Uniaxial compressive strength(MPa)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
Value	2.63	0.32	3795	184	0.58	0.17

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 주관에 개입될 소지가 많기 때문에 신뢰도가 떨어지는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 기울기와 관련된 파라미터를 정량적으로 표현하고, 이러한 거칠기 파라미터가 전단 강도와 변형특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 30개의 자연 절리 시료를 대상으로 3차원 레이저 거칠기 측정장치를 이용하여 절리면의 거칠기 파라미터를 조사하였다.



- | | |
|---|-----------------------|
| (1) 3D Laser profiler stage | (2) Laser sensor |
| (3) Controller & Data acquisition apparatus | (4) Rock joint sample |

그림 1. 3차원 레이저 거칠기 측정장치

2.2 직접전단시험장치

본 연구에서 사용한 직접전단시험장치는 만능재료시험기(UTM)의 프레임에 전단시험기를 설치하여 절리 시험편에 대한 전단시험을 실시할 수 있도록 제작한 것이다. 그림 2는 직접전단시험장치의 전체적인 모습을 나타낸 것으로서 이 장치는 UTM, 전단시험기, 전단펌프, 자료수집 장치 등으로 구성되어 있다.

(1) 만능재료시험기(UTM)

본 연구에서 사용한 UTM은 미국 Tinius Olsen사에서 제작한 것으로 입출력 신호의 feed-back이 가능한 servo-control type의 만능시험기로서, 여기에는 압력계와 LVDT가 장착되어 있어 하중 및 변위의 조절·유지가 자유롭게 실시된다. 본 실험에는 이 UTM을 이용하여 전단시험을 하는 동안 수직응력을 일정하게 유지하도록 하였다.



(1) UTM (2) UTM controller (3) Shear testing apparatus
 (4) Data acquisition apparatus (5) Shear pump

그림 2. 직접전단 시험장치의 전체 모습

(2) 전단시험기

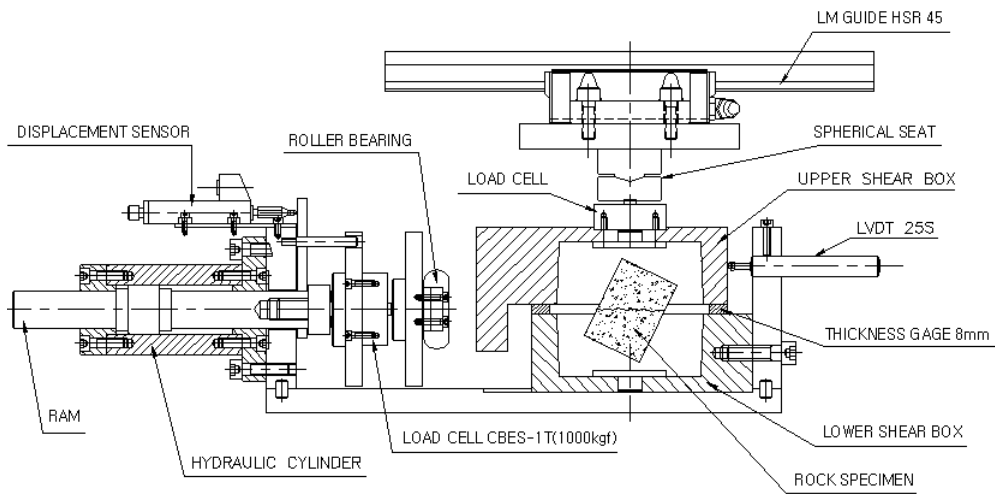
그림 3은 전단시험기의 도면을 보여준다. 이 시험기는 크게 상부 전단상자, 하부 전단상자, 전단하중용 유압램, 수직하중 측정용 로드셀, 전단하중 측정용 로드셀, 수직변위 측정용 LVDT, 전단변위 측정용 LVDT 등으로 구성되어 있다. 이 시험기에서 절리 암석 시험편에 전단하중을 가하는 형태는 전단펌프에서 일정한 속도로 전단변위 명령을 주면 유압램이 전진하면서 상부 전단상자를 미는 방식으로 되어 있다.

한편, 상·하부 전단상자는 연결용 손잡이(support handle)를 통해 상부 전단상자와 하부 전단상자를 결합시킨 후 전단시험기에 독립적으로 탈부착이 가능하도록 만들어졌으며, 전단상자의 내부 규격은 폭과 길이가 120mm이고 높이는 45mm이다.

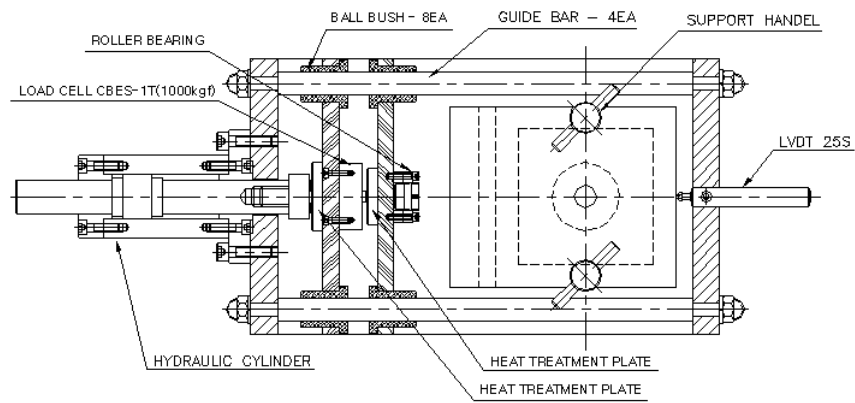
그림 4는 전단시험기의 모습을 나타낸 것인데, (1)번은 전단하중을 가하는 유압램, (2)번은 전단하중 측정용 로드셀, (3)번은 롤러베어링(roller bearing), (4)번은 상·하부전단상자, (5)번은 전단변위 측정용 LVDT를 나타낸다. 여기서 전단하중을 가하는 유압램 앞에는 하중 측정용 로드셀을 설치하였고, 그 전면에는 전단시험 중에 발생하는 수직방향으로의 변위를 구속하지 않고 마찰저항을 줄이기 위해 일본 THK사에서 제작된 롤러베어링을 부착하였다.

(3) 전단펌프

절리 시험편에 수직하중을 가하고 유지하는 데에는 UTM을 사용한 반면에, 전단하중을 가하는 데에는 전단하중용 펌프를 별도로 제작하여 사용하였다. 전단펌프는 전단하중을 가하는 가압장치와 전단변위 속도와 범위를 조절하는 제어장치로 구성되어 있다. 또한, 이 전단펌프는 전단변위를 분당 0.01mm ~ 10.0mm까지 다양하게 제어할 수 있는 특징이 있다.

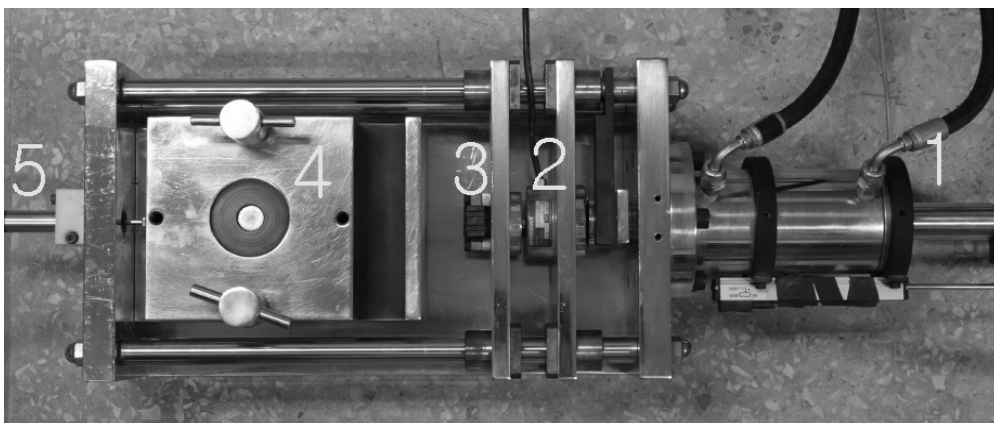


(a) Side view



(b) Floor plan

그림 3. 전단시험기의 도면



(1) Ram (2) Loadcell (3) Roller bearing (4) Shear box (5) LVDT

그림 4. 전단시험기의 모습

(4) 자료획득장치

전단시험이 진행되는 동안 발생하는 수직하중, 전단하중, 수직변위, 전단변위 등의 자료는 2개의 로드셀과 2개의 LVDT를 통해 자료획득장치로 수집된다. 본 실험에서 사용된 자료획득장치는 M&T Korea사 제품인 MT-16으로서 이는 입·출력 채널이 16개인 동적변형을 측정기이다. MT-16은 측정장비에서 들어오는 아날로그 형태의 전압 신호를 원하는 시간 간격으로 디지털 신호로 변환하여 컴퓨터로 전송한다. 한편, 컴퓨터로 전송된 자료들은 자체 프로그램을 통해 분석되거나 경우에 따라서는 ASCII 파일의 형태로 저장될 수도 있다.

(5) 기타

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 절리 암석 시험편에 대해 다음과 같은 방법으로 직접전단시험을 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) UTM과 제어용 컴퓨터의 전원을 켜고 UTM의 servo control program을 실행시킨다.
- (6) 상부전단상자 위에 수직하중 측정용 로드셀과 구면좌를 올려놓고 직선운동 볼베어링과 로드셀, 구면좌, 암석 시험편의 하중 중심을 일치시킨다.
- (7) 수직변위 및 전단변위 측정용 LVDT를 각각 설치한다. 한편, 본 실험에서 사용된 계측기는 수직하중 및 전단하중 측정용 로드셀 2개와 수직변위 및 전단변위 측정용 LVDT 2개로서 총 4개이다. 모든 계측기를 신호증폭기의 각 채널에 연결한다.
- (8) 신호증폭기와 자료획득용 컴퓨터의 전원을 켜고, 증폭기의 영점을 조정한 다음 자료획득을 위한 프로그램을 실행시킨다. 이때 컴퓨터에서 받아들이는 데이터는 초당 5개로 설정하였으며 시험중 실시간으로 수직하중, 전단하중, 수직변위, 전단변위 등의 자료를 획득하도록 하였다.
- (9) 이와 같이 시험을 위한 준비가 완료되면 소정의 수직하중을 가한 후 본격적인 전단시험을 실시한다. 이때 수직하중은 0.2MPa, 0.4MPa, 0.6MPa, 0.8MPa, 1.0MPa 등으로 5단계로 구분하였으며 전단하중을 가하는 동안 수직하중은 주어진 값의 2%이내의 범위로 일정하게 유지되도록 하였다.
- (10) 전단펌프를 작동시켜 절리면에 전단하중을 가한다. 이때 전단변위가 0.1mm/min의 일정한 속도가 되도록 전단하중을 점차 증가시켰으며, 시험편마다 총 15mm의 전단변위를 발생시켰다.

(11) 시험 후에는 하중을 제거하고 난 다음 전단시험기에서 상·하부 전단상자를 분리시켜 전단상자만을 꺼냄으로써 한 시험편에 대한 시험을 완료하였다.

4. 시험 결과 및 검토

4.1 절리 거칠기의 측정 결과

본 연구에서는 3차원 레이저 거칠기 측정장치를 사용하여 총 30개의 자연 절리면 암석 시험편에 대해 절리면의 거칠기를 측정하였다. 이때 거칠기 측정간격은 가로 1mm, 세로 1mm로 하였으며, 측정 자료들을 포트란 프로그램을 이용하여 해석하였다.

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

그림 5는 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} 를 토대로 L(low), M(medium), H(high) 등의 3가지로 구분하였으며, 시료의 그룹 명칭을 NJ-L, NJ-M, NJ-H로 표시하였다.

표 2는 거칠기 측정 결과를 나타낸 것으로, 여기서 NJ-L 그룹은 절리면의 평균 거칠각이 4.395° 이고 NJ-M 그룹은 5.994° 이며 NJ-H 그룹은 7.803° 이다.

4.2 직접전단시험의 결과 및 검토

거칠기에 따른 전단강도 특성을 파악하기 위하여 각 거칠기 별로 수직응력을 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0MPa 등의 5단계로 변화시켜가면서 전단시험을 실시하였다.

그림 6은 대표적인 전단응력-전단변위 곡선을 나타낸 것으로, 뚜렷한 최대전단강도를 보이며 그 이후에는 전단응력이 급격히 감소하다가 잔류전단강도를 나타내고 있다.

표 3은 직접전단시험 결과를 요약·정리하여 나타낸 것이다. 여기서, 최대전단강도는 전단응력-전단변위 곡선에서 가장 큰 값을 나타낸 경우를 취하였으며 잔류전단강도는 전단응력-전단변위 곡선에서 전단응력이 최대값을 지난 이후 전단변위가 계속되는 동안에도 전단응력의 변화가 작은 구간의 평균값으로 하였다. 전단강성(shear stiffness)은 전단응력-전단변위 곡선에서 최대전단응력의 50% 응력수준에서 비교적 선형인 구간을 선택하여 전단응력/전단변위의 비로써 결정하였으며, 수직강성(normal stiffness)은 수직응력과 수직변위를 나타낸 그래프의 기울기로, 팽창각(dilation angle)은 최대전단강도에 도달하기 전의 수직변위가 가장 작을 때와 전단강도가 최대치에 도달했을 때의 평균 기울기로 구하였다.

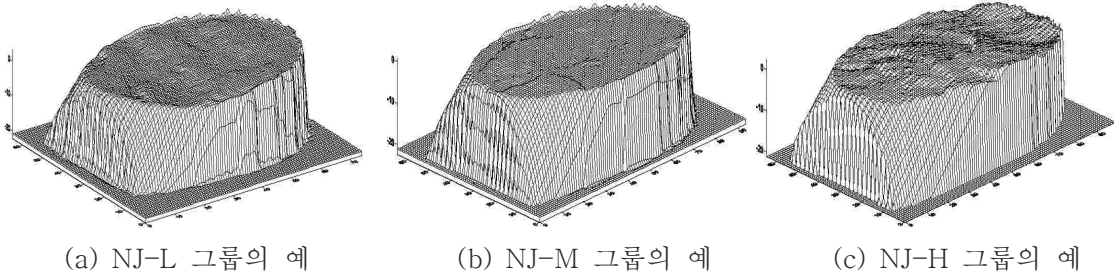
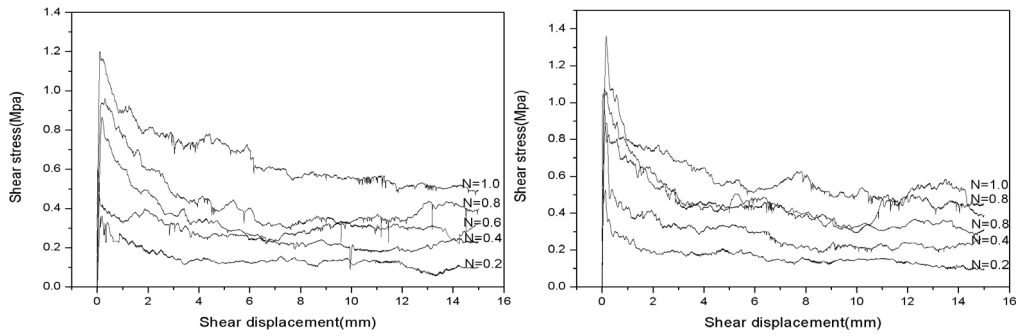


그림 5. 절리면의 3D 프로파일

표 2. 거칠기 측정의 결과

Sample group	Sample No.	SL_{ave}	i_{ave}	Z_2	i_{rms}	SDH	R_p	SD_{SL}	SD_i
MJ-L	1	0.076	4.377	0.221	12.342	0.423	1.023	0.234	13.046
	2	0.081	4.588	0.179	10.027	0.340	1.018	0.210	10.976
	3	0.086	4.902	0.204	11.393	0.441	1.022	0.222	12.314
	4	0.083	4.734	0.209	11.672	0.380	1.021	0.225	12.559
	5	0.070	3.827	0.220	12.270	0.554	1.023	0.230	12.791
	6	0.076	4.328	0.183	10.228	0.453	1.017	0.198	11.038
	7	0.084	4.780	0.209	11.619	0.461	1.023	0.226	12.529
	8	0.078	4.470	0.190	10.653	0.444	1.019	0.206	11.504
	9	0.080	4.558	0.207	11.576	0.490	1.021	0.222	12.364
	10	0.075	4.310	0.206	11.508	0.449	1.021	0.219	12.239
	Average	0.078	4.395	0.199	11.136	0.449	1.020	0.215	11.919
NJ-M	1	0.107	6.078	0.237	13.094	0.725	1.030	0.261	14.340
	2	0.115	6.545	0.280	15.398	0.708	1.037	0.303	16.574
	3	0.099	5.534	0.234	12.989	0.601	1.026	0.255	14.095
	4	0.101	5.722	0.224	12.447	0.796	1.025	0.245	13.539
	5	0.092	5.288	0.248	13.752	0.478	1.029	0.265	14.625
	6	0.121	7.433	0.289	15.802	0.649	1.039	0.318	17.254
	7	0.097	5.539	0.267	14.577	0.444	1.035	0.285	15.454
	8	0.103	5.845	0.256	14.141	0.612	1.031	0.277	15.205
	9	0.120	6.801	0.252	13.884	0.588	1.033	0.281	15.377
	10	0.091	5.155	0.207	11.514	0.378	1.023	0.227	12.592
	Average	0.104	5.994	0.249	13.760	0.598	1.031	0.272	14.906
NJ-H	1	0.134	7.620	0.326	19.523	0.708	1.048	0.355	19.551
	2	0.126	7.203	0.355	19.523	0.708	1.047	0.369	20.245
	3	0.135	7.711	0.264	14.788	0.850	1.028	0.321	17.343
	4	0.124	7.070	0.301	16.777	0.721	1.037	0.331	18.320
	5	0.125	7.121	0.226	12.756	1.158	1.022	0.275	15.356
	6	0.152	8.660	0.315	17.493	1.200	1.042	0.342	18.865
	7	0.146	8.344	0.330	18.267	0.993	1.044	0.355	19.556
	8	0.143	8.160	0.313	17.358	1.130	1.041	0.335	18.544
	9	0.138	7.870	0.321	17.817	1.156	1.042	0.342	18.856
	10	0.142	8.095	0.314	17.420	1.013	1.040	0.337	18.621
	Average	0.136	7.803	0.306	17.172	0.964	1.040	0.336	18.526



(a) NJ-L 그룹

(b) NJ-H 그룹

그림 6. 전단응력-전단변위 곡선

표 3. 직접전단시험의 결과

Sample group	Sample No.	Normal stress (MPa)	Peak shear strength (MPa)	Residual shear strength (MPa)	Normal stiffness (GPa/m)	Shear stiffness (GPa/m)	Dilation angle (°)
NJ-L	1	0.2	0.34	0.16	8.90	1.71	26.6
	2	0.2	0.35	0.13	8.38	1.54	25.6
	3	0.4	0.52	0.20	7.90	5.38	24.1
	4	0.4	0.54	0.18	8.46	4.43	23.0
	5	0.6	0.84	0.30	5.71	6.27	17.4
	6	0.6	0.88	0.31	6.33	5.57	20.4
	7	0.8	0.90	0.48	5.79	6.67	14.1
	8	0.8	0.92	0.36	6.06	6.35	15.3
	9	1.0	1.20	0.60	7.08	8.89	13.0
	10	1.0	1.15	0.55	7.75	8.69	12.2
NJ-M	1	0.2	0.44	0.13	8.63	2.17	27.2
	2	0.2	0.45	0.11	6.23	3.50	27.6
	3	0.4	0.74	0.22	8.12	5.13	25.6
	4	0.4	0.78	0.26	8.79	5.15	25.2
	5	0.6	0.95	0.35	5.77	7.10	23.2
	6	0.6	0.97	0.36	6.90	7.15	24.9
	7	0.8	0.98	0.42	7.81	9.06	20.0
	8	0.8	1.06	0.52	6.62	8.69	19.4
	9	1.0	1.21	0.62	6.43	9.79	15.2
	10	1.0	1.23	0.60	6.92	10.77	16.7
NJ-H	1	0.2	0.53	0.15	9.93	3.30	32.0
	2	0.2	0.54	0.13	9.80	4.03	33.7
	3	0.4	0.85	0.33	8.20	5.76	28.8
	4	0.4	0.93	0.34	6.29	5.49	28.7
	5	0.6	1.04	0.44	5.46	8.45	26.6
	6	0.6	1.02	0.46	6.70	7.10	27.5
	7	0.8	1.20	0.65	5.82	9.23	22.6
	8	0.8	1.08	0.50	5.57	8.97	26.5
	9	1.0	1.31	0.62	6.85	15.39	20.0
	10	1.0	1.35	0.73	6.09	14.01	23.4

(1) 최대전단강도의 변화

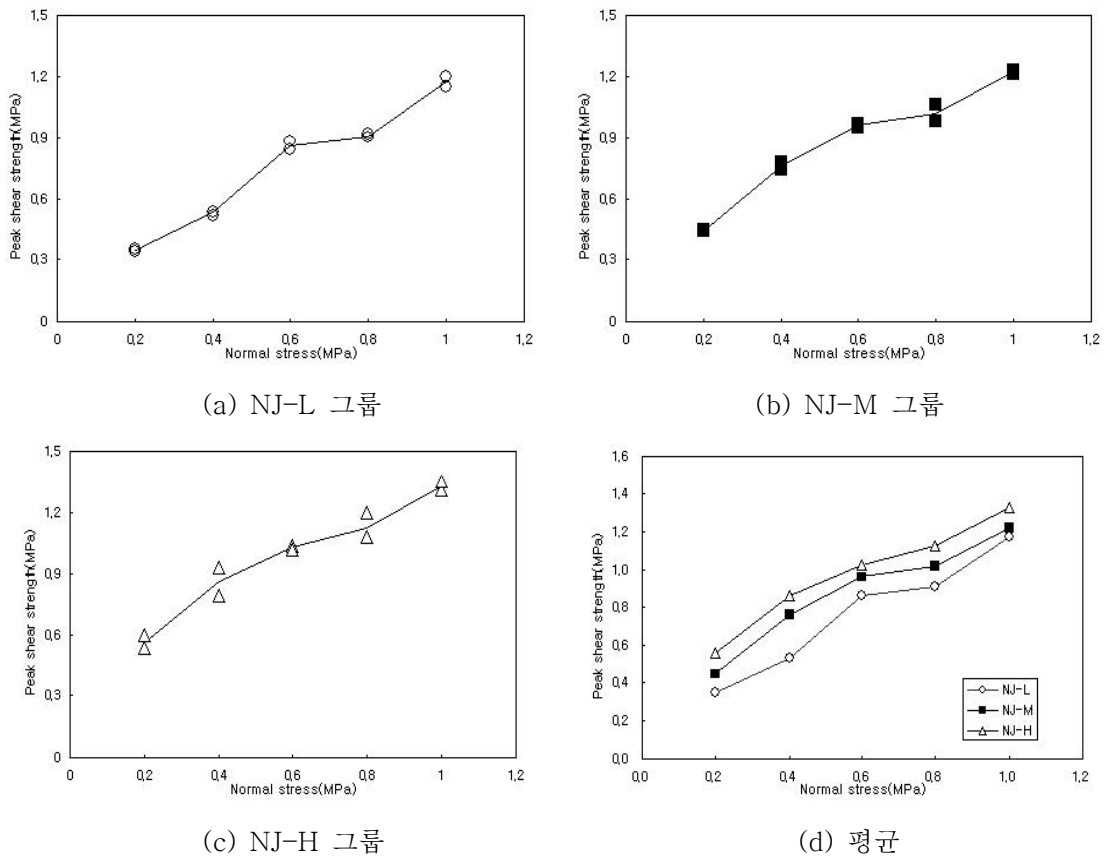


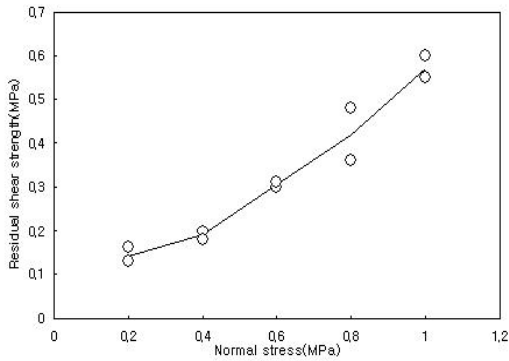
그림 7. 수직응력에 따른 최대전단강도의 변화

표 4. 평균 최대전단강도

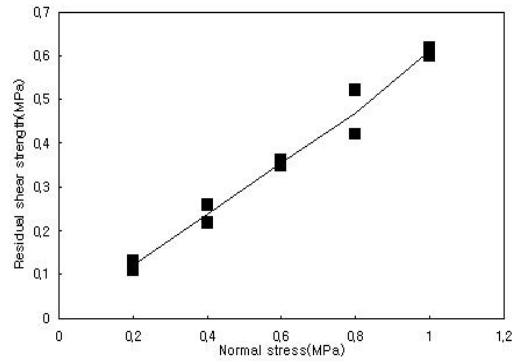
Normal stress (MPa)	Peak shear strength(MPa)		
	NJ-L	NJ-M	NJ-H
0.2	0.35	0.45	0.56
0.4	0.54	0.76	0.86
0.6	0.86	0.96	1.03
0.8	0.91	1.02	1.13
1.0	1.18	1.22	1.33

그림 7은 3가지 거칠기 그룹에서 수직응력에 대한 최대전단강도의 변화를 나타낸 것이고 표 4는 평균값을 정리한 것이다. 표 4에서 절리면의 평균 거칠각이 4.395° 인 NJ-L 그룹으로부터 평균 거칠각이 7.803° 인 NJ-H 그룹쪽으로 절리면의 거칠기가 증가함에 따라 최대전단강도는 증가하였다. 또한, 수직응력이 0.2MPa일 경우 NJ-L 그룹에서 NJ-H 그룹으로 갈수록 최대전단강도는 0.35MPa에서 0.56MPa로 60% 증가하였으나, 1.0MPa일 경우는 1.18MPa에서 1.33MPa로 13% 증가하였다. 따라서 절리면의 거칠기가 최대전단강도에 미치는 영향은 수직응력이 작은 경우에 더욱 크게 나타났다.

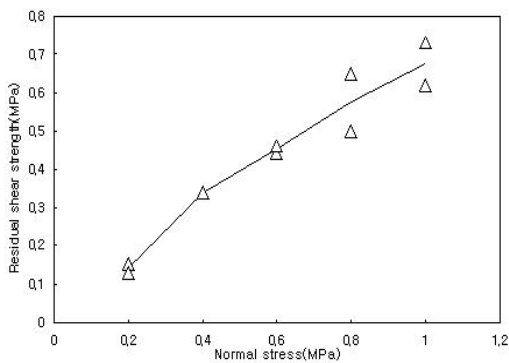
(2) 잔류전단강도의 변화



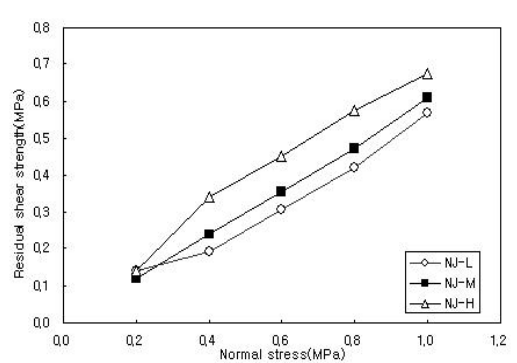
(a) NJ-L 그룹



(b) NJ-M 그룹



(c) NJ-H 그룹



(d) 평균

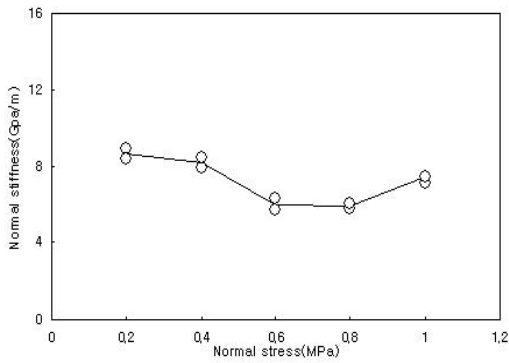
그림 8. 수직응력에 따른 잔류전단강도의 변화

표 5. 평균 잔류전단강도

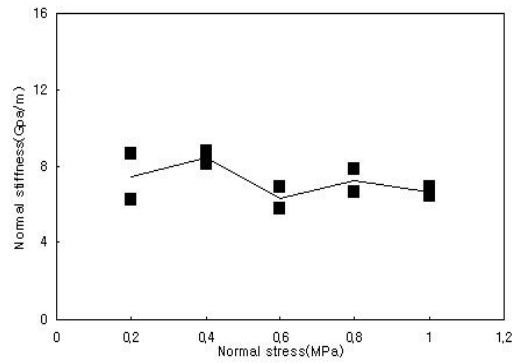
Normal stress (MPa)	Residual shear strength(MPa)		
	NJ-L	NJ-M	NJ-H
0.2	0.14	0.12	0.14
0.4	0.19	0.24	0.34
0.6	0.31	0.36	0.45
0.8	0.42	0.47	0.58
1.0	0.57	0.61	0.68

그림 8은 3가지 거칠기 그룹에서 수직응력에 대한 잔류전단강도의 변화를 나타낸 것이고 표 5는 평균값을 정리한 것이다. 그림 8과 표 5에서 절리면의 거칠기가 증가할수록 잔류전단강도도 최대전단강도와 마찬가지로 점차적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다. 또한, 절리면의 거칠기가 잔류전단강도에 미치는 영향 역시 0.2MPa의 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.

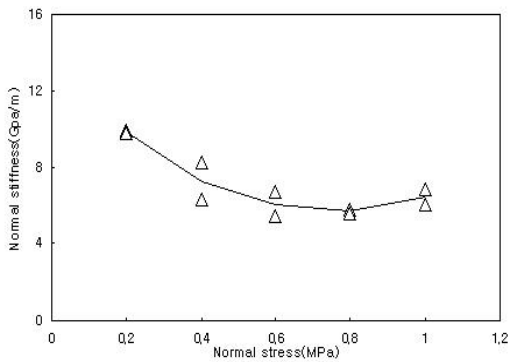
(3) 수직강성의 변화



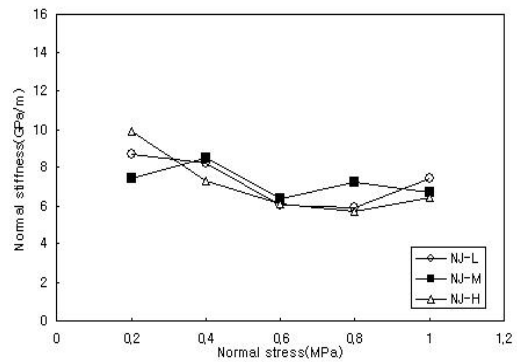
(a) NJ-L 그룹



(b) NJ-M 그룹



(c) NJ-H 그룹



(d) 평균

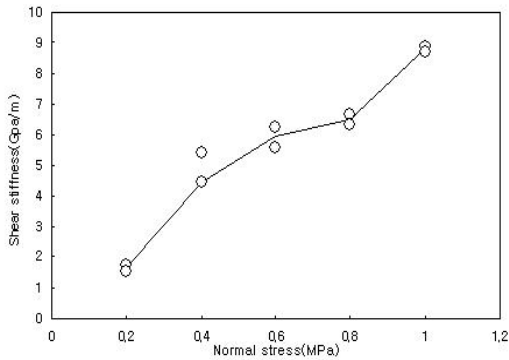
그림 9. 수직응력에 따른 수직강성의 변화

표 6. 평균 수직강성

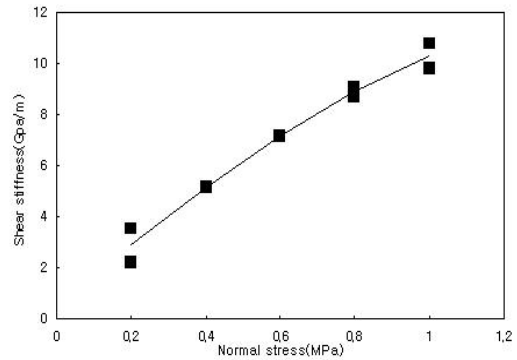
Normal stress (MPa)	Normal stiffness(GPa/m)		
	NJ-L	NJ-M	NJ-H
0.2	8.64	7.43	9.87
0.4	8.18	8.45	7.25
0.6	6.02	6.34	6.08
0.8	5.93	7.22	5.70
1.0	7.42	6.68	6.43

그림 9는 3가지 거칠기 그룹에서 수직응력에 대한 수직강성의 변화를 나타낸 것이고 표 6은 평균값을 정리한 것이다. 수직강성은 3가지 거칠기 그룹에서 6.02GPa/m ~ 9.87GPa/m로 거의 비슷한 값으로 나타났으며, 거칠기의 증가에 따른 수직강성의 뚜렷한 변화는 찾아볼 수가 없었다. 따라서 절리면의 거칠기는 수직강성에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다.

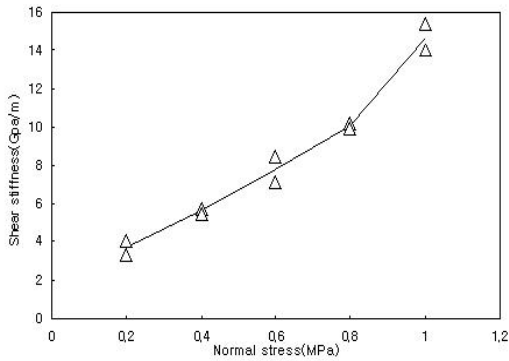
(4) 전단강성의 변화



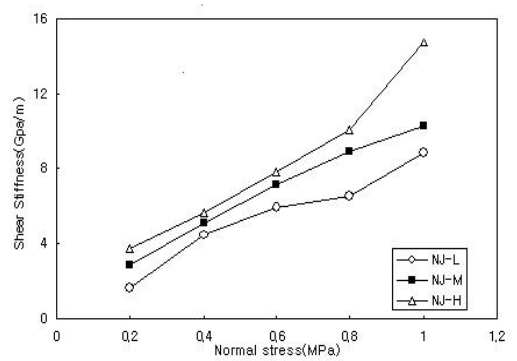
(a) NJ-L 그룹



(b) NJ-M 그룹



(c) NJ-H 그룹



(d) 평균

그림 10. 수직응력에 따른 전단강성의 변화

표 7. 평균 전단강성

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	10.28	14.7

그림 10은 3가지 거칠기 그룹에서 수직응력에 대한 전단강성의 변화를 나타낸 것이고 표 7은 평균값을 정리한 것이다. 표 7에서 수직응력이 0.2MPa에서 1.0MPa로 증가함에 따라 NJ-L 그룹의 전단강성은 1.63GPa/m에서 8.79GPa/m으로 증가하였고, NJ-M 그룹은 2.84 GPa/m에서 10.28GPa/m, NJ-H 그룹은 3.67GPa/m에서 14.7GPa/m로 증가하였다. 또한, 동일한 수직응력하에서 절리면의 거칠기가 커질수록 전단강성은 증가하였다. 따라서 절리면의 거칠기는 전단강성에 큰 영향을 미치는 요소라고 생각된다.

(5) 팽창각의 변화

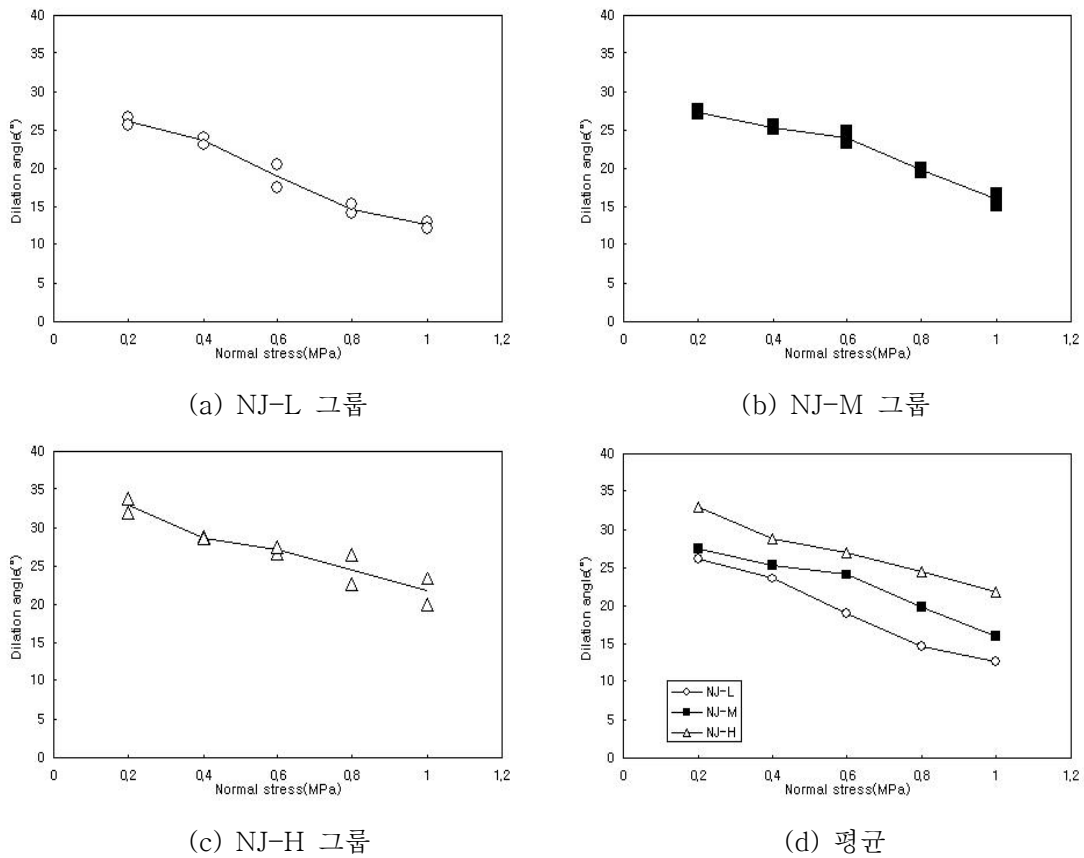


그림 11. 수직응력에 따른 팽창각의 변화

표 8. 평균 팽창각

Normal stress (MPa)	Dilation angle(°)		
	NJ-L	NJ-M	NJ-H
0.2	26.1	27.4	32.85
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

그림 10은 3가지 거칠기 그룹에서 수직응력에 대한 전단강성의 변화를 나타낸 것이고 표 7은 평균값을 정리한 것이다. 수직응력이 0.2MPa에서 1.0MPa로 증가함에 따라 NJ-L 그룹의 팽창각은 26.1° 에서 12.6° 로 감소하였고, NJ-M 그룹은 27.4° 에서 15.9° , NJ-H 그룹은 32.85° 에서 21.7° 로 감소하였다. 또한, 동일한 수직응력하에서 절리면의 거칠기가 커질수록 팽창각은 증가하였다. 따라서 절리면의 거칠기와 수직응력은 팽창각에 큰 영향을 미치는 요소라고 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 30개의 자연 암반 절리면 시료를 대상으로 3차원 레이저 거칠기 측정장치를 사용하여 각 시료의 절리면 거칠기 정보를 측정하여, 각각의 거칠기 정보에 따라 거칠기가 큰 것(NJ-H), 중간 것(NJ-M), 작은 것(NJ-L) 등의 3가지 그룹으로 분류하였고, 수직응력을 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 MPa 등의 5단계로 나누어 직접전단실험을 실시하였다. 실험을 통해 절리면의 거칠기와 수직응력의 변화에 따른 최대전단강도, 잔류전단강도, 수직강성, 전단강성, 팽창각의 영향을 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 절리면의 평균 거칠각이 4.395° 인 NJ-L 그룹으로부터 평균 거칠각이 7.803° 인 NJ-H 그룹쪽으로 절리면의 거칠기가 증가함에 따라 최대전단강도는 증가하였으며, 절리면의 거칠기가 최대전단강도에 미치는 영향은 수직응력이 작은 경우에 더욱 크게 나타났다.

2. 절리면의 거칠기가 증가할수록 잔류전단강도도 최대전단강도와 마찬가지로 점차적으로 증가하였으며, 절리면의 거칠기는 최대전단변형 뿐만 아니라 일정량 이상의 전단변위 이후의 잔류전단변형에서도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3. 수직강성은 $6.02\text{GPa/m} \sim 9.87\text{GPa/m}$ 의 범위로서 거칠기의 증가에 따른 뚜렷한 변화는 찾아볼 수가 없었다. 따라서 절리면의 거칠기는 수직강성에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 생각되나, 이에 관해서는 추가적인 검증 실험이 필요할 것이다.

4. 전단강성은 절리면의 거칠기 및 수직응력이 커짐에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

5. 팽창각은 수직응력이 증가할수록 감소하였고, 동일한 수직응력하에서는 절리면의 거칠기가 커질수록 증가하였다.

참고문헌

1. Barton N.R., 1976, The shear strength of rock and rock joint, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 12, pp.255-279.
2. 이상돈, 강준호, 이정인, 1994, 절리면의 거칠기에 따른 암석의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 4, pp. 261-273..
3. 김영근, 이희근, 1993, 수직 및 전단하중하에서 화강암 인공절리의 변형특성, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 3, pp. 142-151.
4. 광정열, 이상은, 임한욱, 2003, 낮은 수직응력 하에서 인공 절리면의 전단 이방성에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 13, No. 3, pp. 169-179.
5. 박병윤, 권상기, 2000, 암반 절리면 거칠기의 정량화에 대한 연구현황 분석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 10, pp. 566-579.