

## 절리면 전단거동에서의 법선응력 영향 고찰

조태진\*, 석재욱

### A Study on the Effect of Normal Stress on the Joint Shear Behavior

Taechin Cho\*, Jaewook Suk

**Abstract** Shear behavior of joint plane has been investigated considering the magnitude of normal stresses and initial surface roughness. Shear strength of joint plane has been measured by performing the multi-stage shear test in which applied normal stress level has been increased stepwise. Multi-stage shear test within the specified normal stress range has been repeated and two types of strength parameter variation have been observed: type 1 - both cohesion and friction angle decrease, type 2 - cohesion decrease and friction angle increase. Trends of strength parameter variation for the three rock types, gneiss, granite and shale, have been investigated and the influence of initial roughness of joint plane on the sequential shear strength change for the repeated multi-stage shear tests also has been analyzed.

**Key words** Shear behavior, Multi-stage shear test, Joint surface strength, Strength parameter variation, Roughness

**초 록** 법선응력 수준과 초기 절리면 거칠기를 고려하여 절리면의 전단거동 특성을 고찰하였다. 절리면 전단강도는 순차적으로 법선응력을 증가시키는 다단계 전단시험을 수행하여 측정하였다. 일정한 법선응력 구간에서의 다단계 전단시험을 반복적으로 수행하여 전단파괴 기준선을 산출하였으며, 기준선의 순차적인 변화양상을 고찰하여 전단강도정수인 점착력과 마찰각의 2가지 변화 형태를 도출하였다: type 1 - 점착력 감소 및 마찰각 감소, type 2 - 점착력 감소 및 마찰각 증가. 편마암, 화강암 및 셰일의 3가지 암종별 전단강도정수 변화양상을 고찰하였으며, 순차적 전단거동 과정에서 절리면의 초기 거칠기가 전단강도 변화에 미치는 영향도 분석하였다.

**핵심어** 전단거동, 다단계 전단시험, 절리면 강도, 강도정수변화, 거칠기

## 1. 서론

대규모 터널, 사면 및 지하비축설비 등의 암반 구조물은 기반암의 역학적 특성에 의해 안정성이 좌우된다. 암반은 단층이나 절리(joint), 암맥(dyke), 전단대(shear zone), 열극(fissure) 그리고 미세균열(microcrack)과 같은 다양한 크기의 불연속면(discontinuity)을 포함한다. 이중 단층이나 절리는 암반 구조물의 안정성에 결정적

인 영향을 미치므로 이에 대한 거동특성 등을 연구하는 것은 지하공간의 활용에 있어서 가장 최우선으로 고려되어야 할 요소 중 하나이다.

절리의 거동특성은 절리면 거칠기, 법선응력, 절리면 풍화정도, 기본마찰각 등에 영향을 받는 것으로 알려져 왔다. Patton(1966)은 전이응력 이하의 법선응력 수준에서는 절리면의 기본 마찰각과 거칠기에 의해 전단력이 결정되고 전이응력 이상에서는 돌출부 파쇄에 의해 거칠기의 영향이 발현되지 않는 특성에 입각하여 전이응력 수준을 경계로 전단모드가 상이한 형태의 이중선형 관계식을 제안하였다. Patton의 이중선형 관계식은 이후 Ladany and Archambault(1970), Jaeger (1971) 및 Barton(1973) 등에 의해 비선형 관계식으로 발전하였다. Hoek and Bray(1981)와 Kim(2001)은 Barton(1973)의 비선형 관계식이 높은 법선응력에서의 절리면 전단강도를 과대평가하는 경향을 실험을 통해 증명하였으며,

Received: Apr. 26, 2013

Revised: May. 15, 2013

Accepted: May. 20, 2013

\*Corresponding Author: Taechin Cho

Tel) +82516296557, Fax) +82516296553

E-Mail) chotc@pknu.ac.kr

Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

Park et al.(2011)은 전단강도와 JRC가 비교적 낮은 절정계수를 갖는 상관관계임을 밝혀내었다.

Jeager and Cook(1969)은 암반 절리면의 접촉면적과 마모과정에 대한 고찰을 통해 절리면의 마찰특성이 충전물에 의해 지배적인 영향을 받는다고 보고하였다. Lane and Heck(1964)은 현장 암반에 발달한 절리면에 대한 직접시험을 통해 절리면 강도 특성을 연구하였다.

Byerlee(1978)는 Barton(1973), Jeager and Cook(1969) 및 Lane and Heck(1964) 등의 전단강도 측정 자료를 토대로 법선응력에 따른 전단거동 특성을 고찰하여 5 MPa 이하의 법선응력 조건에서는 화성암, 퇴적암, 변성암의 전단강도가 매우 큰 분산을 나타내는 현상을 관찰하였으며, 암종별로 마찰력 특성이 뚜렷하게 나타나지 않는 요인이 다양한 크기의 거칠기에 의한 것으로 판단하였다. 법선응력 5~100 MPa 구간에서는 화강암 및 반려암 등과 같이 강도가 강한 암종과 응회암, 사암 및 석회암과 같이 강도가 약한 암종의 마찰각이 유사한 것으로 분석되었다. 이와 같이 낮은 법선응력 하에서의 전단거동은 절리면 돌출부에 의한 미끄러짐이 지배적이며, 높은 법선응력 수준에서의 전단거동은 돌출부의 전단파쇄(shearing off)를 수반한다(Hsu, et al, 1988). 본 연구에서는 법선응력 수준에 따른 절리면의 전단거동 변화양상을 전단강도정수 및 거칠기 특성 변화를 고려하여 고찰하였다.

## 2. 절리면 전단시험

편마암, 화강암 및 셰일의 3가지 암종에 대하여 절리면 전단시험을 수행하였으며, 시험편에 GN, GR 및 SH 기호를 각각 사용하여 암종을 구분하였다. 기호에 부가되는 숫자는 해당 암종에서의 시험편 번호를 의미한다. 예를 들어, GN01은 편마암 01번 시료를 지시한다. 절리면 강도는 전단강도를 규제하는 중요한 요소이며, 신선한 암석의 일축압축강도로 대표될 수 있다. 절리면 전단시험에 사용된 암종별 시료의 절리면 강도를 일정한 범위 이내로 제한하여 시험 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 전단시험에 사용된 시료의 일축압축강도를 측정하였으며, 일정한 범위 이내의 절리 시료를 선택하여 전단시험을 수행하였다. 전단시험에 사용된 시료들의 암종별 일축압축강도를 Table 1에 수록하였다.

전단시험은 동일 시료에 대하여 법선응력을 순차적으로 증가시키는 다단계 전단시험 방법을 도입하여 다음의 과정으로 수행되었다. 초기 법선응력 수준을 유지시킨 상태에서 전단력을 증가시켜 최대전단응력에 도달하면 전단하중을 유지한 상태에서 다음 단계의 법선응력

을 가하고, 새로운 법선응력 수준에서 최대전단응력에 도달할 때까지 전단력을 증가시켰다. 다단계 전단시험은 하나의 절리면을 통해 전단강도정수인 점착력과 마찰각을 산정할 수 있는 장점을 가진다. Yoon et al.(1998)는 직접전단시험에 의한 전단강도와 다단계 시험에 의한 전단강도의 차이가 암반분류 기준에 영향을 주지 않을 정도로 상관성이 있음을 확인하였다.

전단시험에는 인공절리 및 다양한 거칠기를 가지는 자연절리 시료를 사용하였다. Kim(2001)과 Grasselli and Egger(2003)은 전단거동에 의한 전단저항이 주로 전단방향으로 기울어진 기울기면에서 발생한다고 보고하였다. 본 연구에서는 전단시험 단계별로 절리시료 표면을 3차원 레이저스캐너로 측정하였으며, 거칠기 계수  $Ai-$ 를 산정하였다.  $Ai-$ 는 절리면 하부시료의 전단방향을 양의 x 방향으로 가정할 때 프로파일 상에서 음의 기울기를 갖는 부분의 경사각 평균치이며, 다음과 같은 수식으로 표현된다(Kim, 2001).

$$Ai- = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tan^{-1} \frac{|\Delta y_i|}{\Delta x_i}, \quad \Delta y_i < 0 \quad (1)$$

여기서  $\Delta x$ 는 거칠기 측정 간격,  $\Delta y$ 는 측정 간격에서의 고도 차이, N은  $\Delta y$ 가 음수인 경우의 데이터 쌍의 개수이다. Kim(2001)은  $Ai-$ 가 전단거동에 있어서 저항력으로 작용하고 마모, 파쇄 등이 가장 활발히 발생하는 기울기를 잘 표현하는 파라미터라고 제안했다. 본 연구에서는 거칠기 계수  $Ai-$ 를 절리면 거칠기를 표현하는 대표 계수로 사용하였다.

다단계 전단시험은 거칠기 프로파일 측정 → 다단계

**Table 1.** Uniaxial compressive strength of rock specimens

Rock type	Mean(MPa)	SD(MPa)*	Number of specimens
gneiss	209	42	19
granite	146	23	4
shale	74	7	4

\* standard deviation

**Table 2.** Normal stress applied for multi-stage shear test

Normal stress(MPa)	Stress increment(MPa)
0.1 - 0.5	0.1
0.7 - 1.5	0.2
1.8 - 3.0	0.3
3.4 - 5.0	0.4

전단시험 → 거칠기 프로파일 재측정의 순차적 과정을 반복하여 수행되었다. 다단계 전단시험은 4가지 수준의 법선응력 범위 내에서 수행되었다(Table 2 참조).

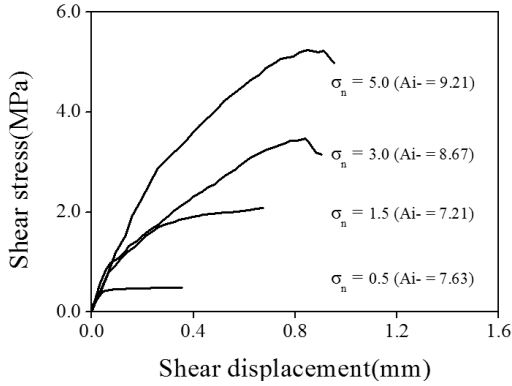


Fig. 1. Peak shear displacement of gneiss joint

### 3. 실험결과

#### 3.1 최대 전단변위

법선응력에 따른 최대 전단변위량을 고찰하기 위하여 유사한 거칠기의 절리 시료에서 측정된 법선응력수준에 따른 전단거동 특성을 Fig. 1에 도시하였다. 법선응력이 가장 낮은 0.5 MPa 수준에서  $Ai = 7.63$ 인 GN17 시료의 경우 최대전단변위가 상대적으로 가장 작게 발생하였다. 법선응력이 1.5 MPa 수준으로 상승된 GN35 시료( $Ai = 7.21$ )의 경우 최대전단변위가 GN17의 경우보다 크게 증가하였다. 이러한 경향은 법선응력이 증가되어도 지속되어 법선응력 5.0 MPa이 재하된 GN26 시료( $Ai = 9.21$ )에서 전단변위가 가장 크게 측정되었다. 이는 법선응력수준이 높을수록 절리면의 전단저항으로 발휘되는 변위가 크게 발생하며, 결과적으로 절리면 거칠기의 파쇄 및 마모 등이 더욱 활발히 진행되는 것을 의미한다.

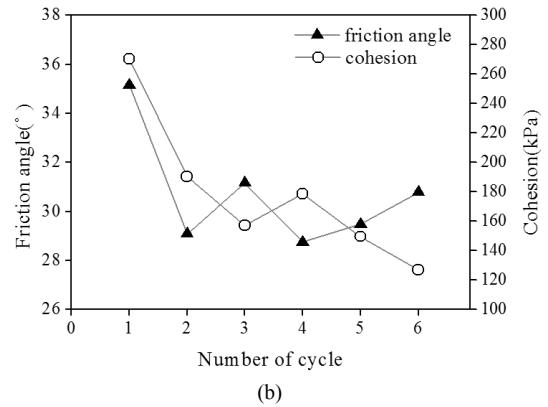
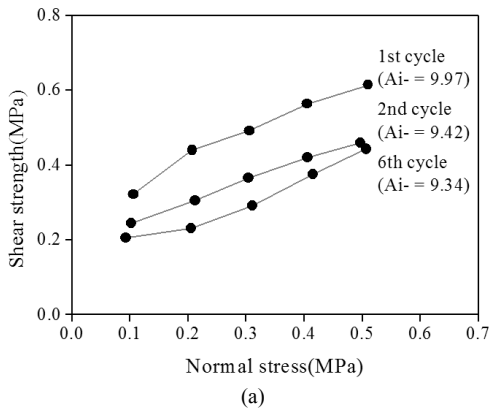


Fig. 2. Results of multi-stage shear test - GN48. (a) shear strength, (b) friction angle and cohesion

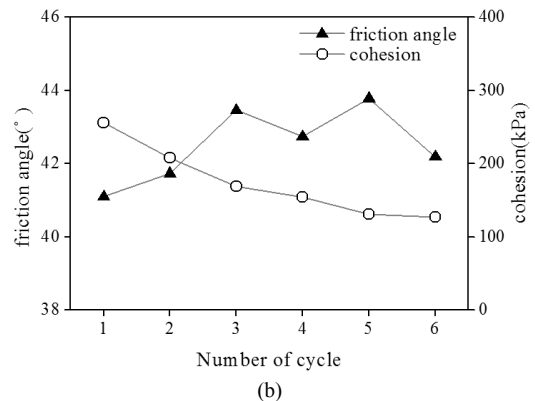
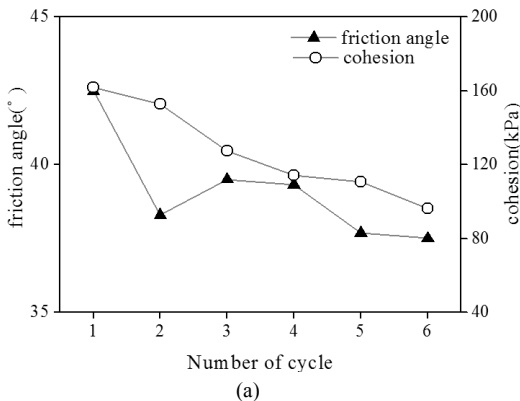


Fig. 3. Two types of cohesion and friction angle variations. (a) type 1, (b) type 2

3.2 전단강도정수

편마암 시료(GN48)를 사용하여 다단계 전단시험을 실시하여 법선응력 0.1~0.5MPa 구간에서의 전단강도 변화를 Fig. 2에 도시하였다. 전단시험이 반복됨에 따라 동일 법선응력 수준에서의 전단강도가 감소하는 것으로 나타났으며, 거칠기 계수  $A_i$ 도 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었다(Fig. 2a). 전단강도정수인 점착력(c)과 마찰각( $\phi_p$ )도 순차적 전단시험 과정에서 진동하는 양상을 나타내기는 하지만 전반적으로는 감소되는

양상을 나타내었다(Fig. 2b).

편마암, 화강암 및 세일에 대한 순차적 전단시험을 수행한 결과 모든 시료에서 전단강도는 지속적으로 감소하였으나 전단강도정수인 점착력(c)과 마찰각( $\phi_p$ )은 두 가지 변화 형태를 나타내었다. 첫째는 편마암 시료 GN28 경우에서와 같이 점착력과 마찰각이 동시에 감소하는 형태이다(type 1, Fig. 3a 참조). 두 번째 전단강도 변화양상(type 2)은 편마암시료 GN39 경우에서와 같이 순차적 전단거동에 의해 점착력은 감소하지만 마찰각은 증가하는 형태이다(Fig. 3b 참조).

순차적 전단거동에 의해 점착력과 마찰각이 동시에 감소하는(type 1) 양상을 나타내는 편마암 시료 GN28의 전단강도 변화를 Fig. 4에 도시하였다. 법선응력 0.1~0.5 MPa 구간에서의 반복된 전단거동에 의해 거칠기 계수  $A_i$ 가 초기 15.308에서 여섯 번째 전단시험에서는 11.824로 감소하였으며, 전단강도도 지속적으로 감소하였다. Fig. 4에 도시된 결과에 의거할 때 초기 전단시험에서 점착력은 162 kPa, 마찰각은 42.5°로 측정되었으며, 두번째 전단시험에서 점착력은 128 kPa, 마찰각은 39.5°, 여섯 번째 전단시험에서의 점착력은 96 kPa, 마찰각은 37.5°로 측정되어 점착력과 마찰각이 모두 감소하였다. 순차적 전단거동 과정에서 법선응력 수준에 따른 전단강도 변화를 Fig. 5에 도시하였다. 여섯

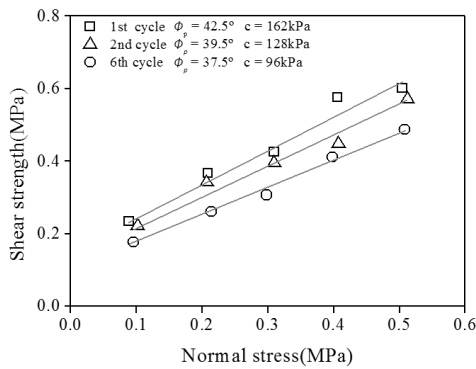


Fig. 4. Variation of shear strength - type 1

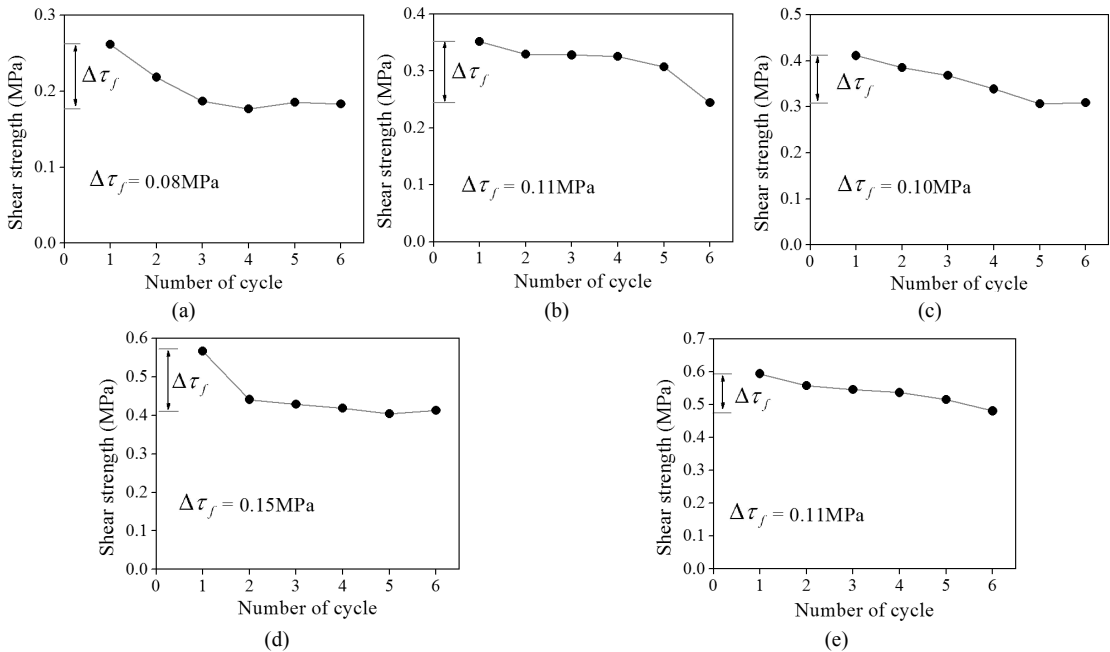


Fig. 5. Shear strength decrease for the different normal stresses - GN28. (a)  $\sigma_n = 0.1$ MPa, (b)  $\sigma_n = 0.2$ MPa, (c)  $\sigma_n = 0.3$ MPa, (d)  $\sigma_n = 0.4$ MPa, (e)  $\sigma_n = 0.5$ MPa

번 반복된 전단거동에 의해 법선응력 0.1 MPa 수준에서의 전단강도 감소폭은 0.08 MPa이다. 법선응력 0.2, 0.3, 0.4 및 0.5 MPa 수준에서의 전단강도 감소폭은 각각 0.11, 0.10, 0.15, 0.11 MPa이다. 이와 같이 법선응력이 클수록 반복거동에 의한 전단강도 감소폭이 증가하는 양상에 의해 전단강도정수인 점착력과 마찰각이 모두 감소하였다.

순차적 전단거동에 의해 점착력은 감소하지만 마찰각

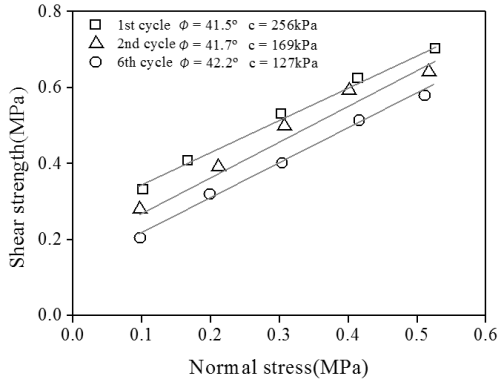


Fig. 6. Variation of shear strength - type 2

이 증가하는(type 2) 양상을 나타내는 편마암 시료 GN39의 전단강도 변화를 Fig. 6에 도시하였다. 법선응력 0.1~0.5 MPa 구간에서의 반복된 전단거동에 의해 전단강도가 지속적으로 감소하였다. 순차적 전단거동 과정에서 법선응력 수준에 따른 전단강도 변화를 Fig. 7에 도시하였다. 법선응력 0.1 MPa 수준인 경우에 여섯 번째 전단거동에서의 전단강도는 초기 전단강도 대비 0.15 MPa의 감소폭을 나타내었다. 법선응력 0.2, 0.3, 0.4 및 0.5 MPa 수준에서 여섯 번의 전단거동에 의한 전단강도 감소는 각각 0.17, 0.13, 0.11 및 0.05 MPa이 측정되어 법선응력이 클수록 전단강도 감소폭은 감소하는 경향을 보여준다. 결과적으로 법선응력 수준이 낮은 경우 반복 거동에 의한 전단강도는 감소폭이 크게 나타나고 법선응력이 높은 경우에는 상대적으로 전단강도 감소폭이 작게 나타나 전단강도 기준선의 절편인 점착력은 감소하고 기울기로 표현되는 마찰각은 증가하는 양상을 나타낸다.

절리면 강도에 따른 전단강도정수 변화양상을 고찰하기 위하여 압중별 전단강도정수 변화 형태를 Fig. 8에 도시하였다. 가로축은 다단계 전단시험이 수행된 법선응력 구간을, 세로축은 특정 법선응력 구간에서 전단강도 변화특성을 나타내는 절리 시험편 수효의 백분율이

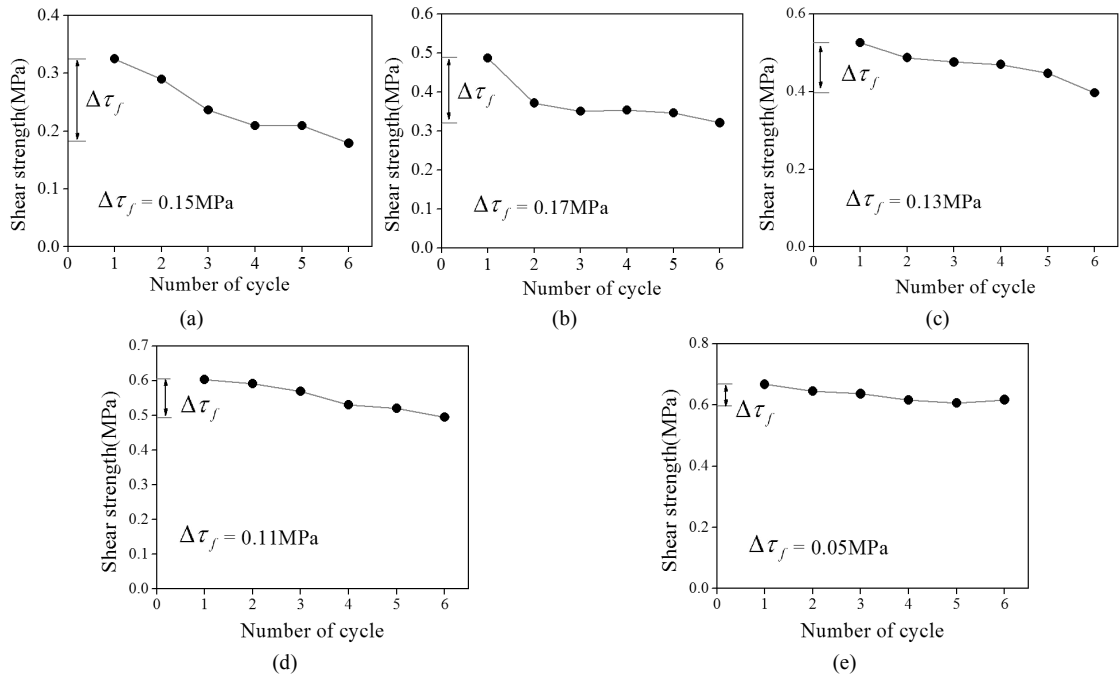


Fig. 7. Shear strength decrease for the different normal stresses - GN39. (a)  $\sigma_n = 0.1$ MPa, (b)  $\sigma_n = 0.2$ MPa, (c)  $\sigma_n = 0.3$ MPa, (d)  $\sigma_n = 0.4$ MPa, (e)  $\sigma_n = 0.5$ MPa

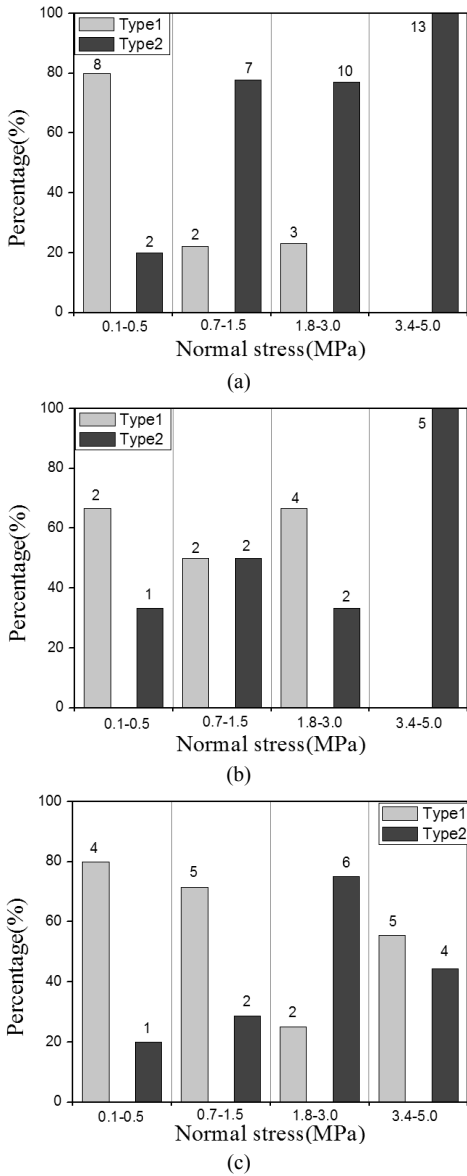


Fig. 8. Types of shear strength parameter change for the different normal stresses. (a) gneiss, (b) granite, (c) shale

다. 각 막대그래프 위에 기재된 수효는 절리 시험편 수효를 지시한다. 절리면 강도가 가장 높은 편마암의 경우 낮은 법선응력 구간인 0.1~0.5 MPa에서는 전단거동이 반복될 경우 10개 시험편 중에서 8개에서 점착력과 마찰각이 모두 감소하는 type 1 형태가 지배적으로 나타나며, 법선응력이 증가하면 점착력은 감소하나 마찰각이 증가하는 type 2 형태가 매우 우세하다(Fig. 8a). 특히, 법선응력이 3.0 MPa 이상인 경우에는 13개 절리

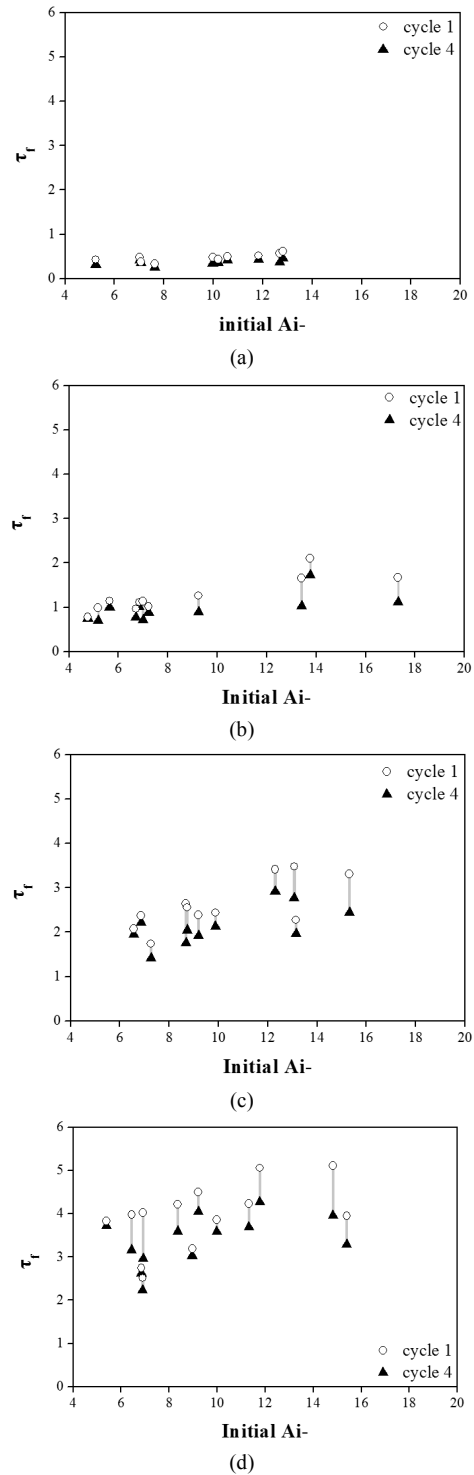


Fig. 9. Variation of  $\tau_f$  for the different normal stresses - gneiss. (a)  $\sigma_n = 0.3$  MPa, (b)  $\sigma_n = 1.1$  MPa, (c)  $\sigma_n = 2.4$  MPa, (d)  $\sigma_n = 4.2$  MPa

시료의 전단강도가 type 2 형태의 변화 양상을 나타냈다. 절리면 강도가 편마암보다 낮은 화강암의 경우 전반적으로는 편마암과 비슷한 양상의 전단강도정수 변화양상을 나타내지만, 법선응력 0.7~3.0 MPa 구간에서도 type 1 형태가 type 2보다 우세하게 나타난다(Fig. 8b). 절리면 강도가 가장 낮은 세일의 경우 법선응력 전체 구간에서 type 1 형태가 나타나며, 편마암 및 화강암의 경우와는 상이하게 법선응력 1.8~3.0 MPa 구간에서만 type 2 형태가 우세하다(Fig. 8c).

순차적 전단거동 과정에서 초기 절리면 거칠기 전단강도 변화에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 거칠기 계수  $A_i$ -를 기준으로 압종별 전단강도 변화 양상을 분석하였다. 편마암, 화강암 및 세일 시료를 이용하여 수행한 전단시험에서 초기 4회의 반복 전단거동에서 발생된 전단강도를 산정하였다. 먼저 편마암 시료에서 법선응력 0.3, 1.1, 2.4 및 4.2 MPa 수준에서 측정된 법선응력에 따른 전단강도 변화를 Fig 9에 도시하였다. 4회에 걸친 순차적 전단시험 동안 전단강도가 감소하였으며, 법선응력이 커질수록 전단강도는 뚜렷한 감소경향을 나타내었다. 또한 초기 거칠기가 클수록 전단강도 감소가 크게 나타났다. 화강암의 경우에도 법선응력이 클수록 순차적 전단거동에 의한 전단강도 감소가 크게 나타났다. 편마암과 같이 초기  $A_i$ -가 크고 법선응력이 높을수록 뚜렷한 전단강도 감소를 나타내었다(Fig. 10). 상대적으로 가장 낮은 절리면 강도를 가지는 세일의 경우에는 거칠기 크기에 따른 전단강도 변화가 상대적으로 매우 미약한 것으로 나타났다(Fig. 11). 이상의 결과들을 종합해 볼 때 순차적 전단거동에 의한 전단강도 변화는 절리면의 강도에 따라 상이한 양상으로 나타났다. 절리면 강도가 높은 편마암과 화강암은 높은 법선응력 조건에서 거칠기에 의한 영향을 상대적으로 크게 받는 것으로 나타났다. 절리면 강도가 낮은 세일은 법선응력이 높고 초기 거칠기가 클수록 반복거동에 의한 거칠기 감쇄가 뚜렷할 것으로 예상되지만 거칠기 감쇄에 따른 전단강도 감소는 가장 미약한 것으로 분석되었다.

절리면 거칠기가 전단강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 법선응력 0.1, 0.7, 1.8 및 3.4 MPa 수준에서 각각 측정된 전단강도를 거칠기 계수  $A_i$ -를 기준으로 분석하였다. 편마암에서의 거칠기 계수  $A_i$ -에 따른 전단강도 변화(Fig. 12a)를 고찰하였다. 거칠기 계수  $A_i$ -가 유사한 경우 법선응력이 높을수록 전단강도는 크게 나타났다. 화강암의 경우에도 편마암과 매우 비슷한 전단강도 변화 양상을 나타낸다(Fig. 12b). 절리면 강도가 가장 낮은 세일에 대한 전단강도 측정 결과를 Fig. 12c에 도시하였다. 전반적으로 법선응력이 클수록 높은 전

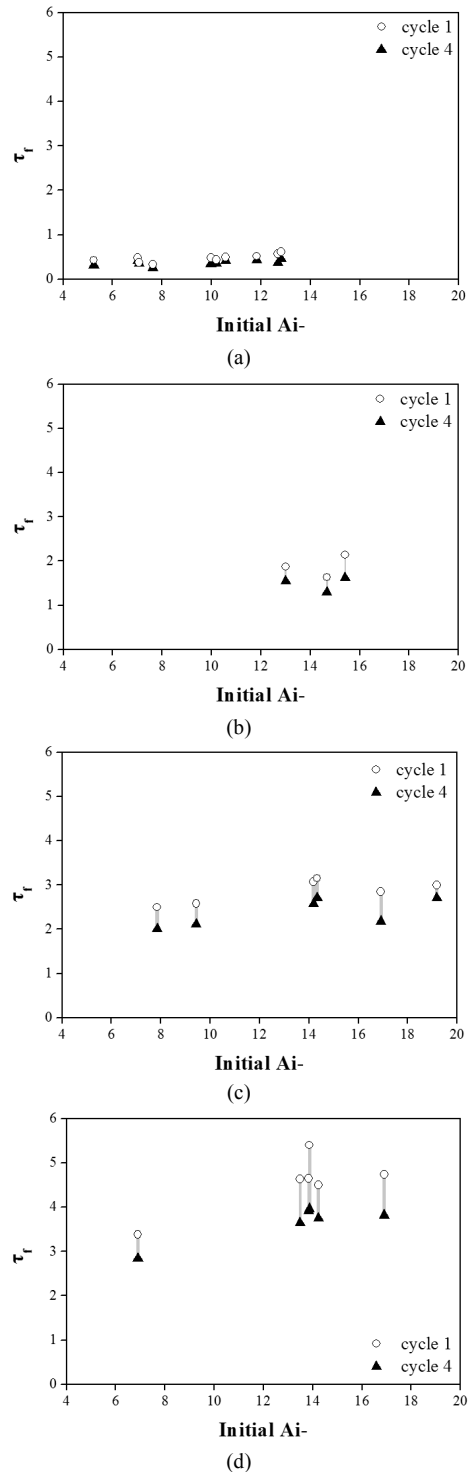
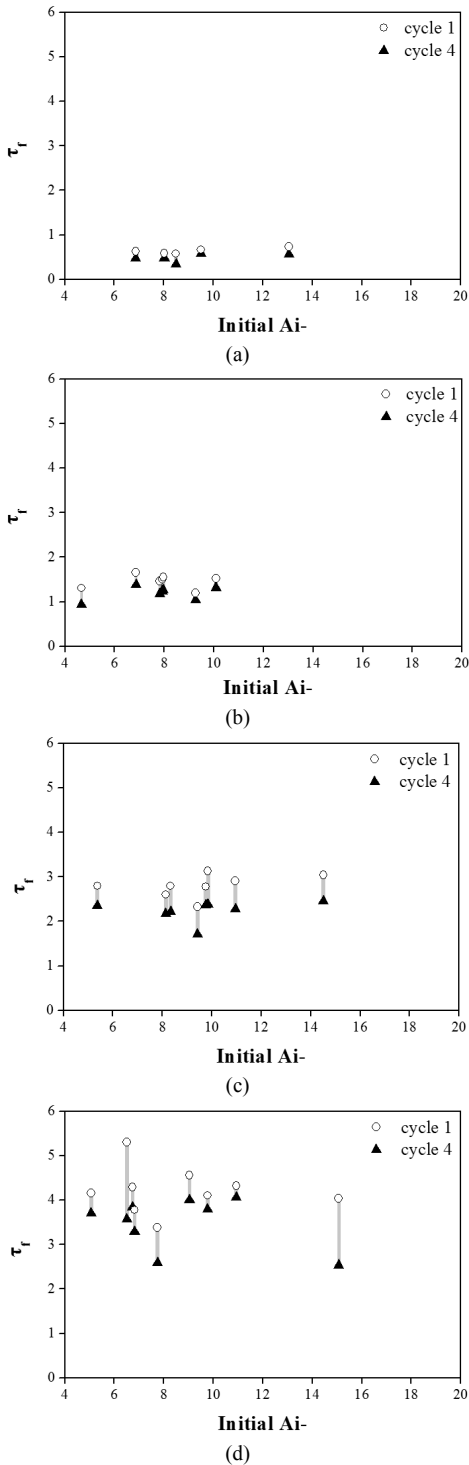
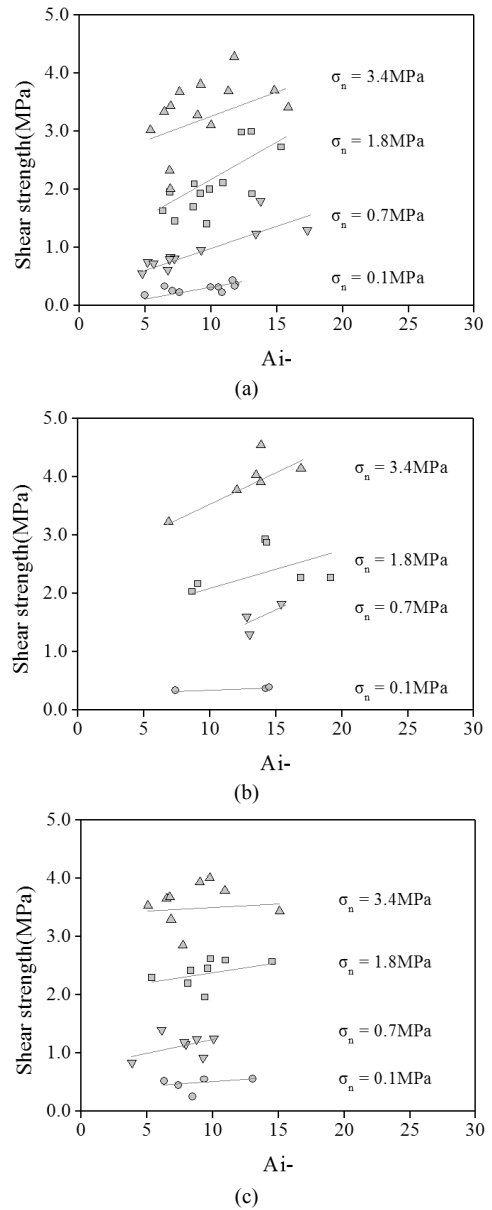


Fig. 10. Variation of  $\tau_f$  for the different normal stress - granite. (a)  $\sigma_n = 0.3$  MPa, (b)  $\sigma_n = 1.1$  MPa, (c)  $\sigma_n = 2.4$  MPa, (d)  $\sigma_n = 4.2$  MPa



**Fig. 11.** Variation of  $\tau_r$  for the different normal stress - shale. (a)  $\sigma_n = 0.3$  MPa, (b)  $\sigma_n = 1.1$  MPa, (c)  $\sigma_n = 2.4$  MPa, (d)  $\sigma_n = 4.2$  MPa



**Fig. 12.** Shear strength for the different normal stresses. (a) gneiss, (b) granite, (c) shale

단강도를 나타내고,  $A_i$ -가 클수록 전단강도는 증가한다. 그러나 편마암 및 화강암의 경우와 비교하면 전단강도에 대한 거칠기의 영향이 가장 작으며, 높은 법선응력 수준에서 거칠기 영향은 더욱 감소된다. 이는 편마암과 화강암에서는 거칠기가 파쇄되는 과정에서 상대적으로 높은 절리면 강도에 의해 전단저항으로 발현되어 나타나고, 셰일에서는 전단력에 의해 거칠기 파쇄



가 상대적으로 용이하여 법선응력이 높을수록 거칠기에 의한 전단저항이 발현되지 않을 수 있는 것을 의미하는 것으로 사료되었다.

#### 4. 결론

법선응력 수준에 따른 전단거동 특성을 고찰하기 위하여 절리면 강도가 상이한 편마암, 화강암 및 세일의 절리시료에 대하여 단계적 전단시험을 수행하였으며, 절리면의 초기 거칠기 및 강도를 고려한 전단강도 변화를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. 일정 응력수준에서의 최대전단변위는 법선응력이 높을수록 증가한다. 전단거동이 반복되면 전단강도가 감소하고, 강도정수인 점착력도 감소하지만 마찰각은 증가 및 감소의 2가지 변화 형태를 나타낸다. 마찰각의 증가는 절리면 강도가 높은 암석에서 뚜렷하게 나타난다. 절리면 강도가 크면 높은 법선응력 조건에서 거칠기에 의한 영향을 상대적으로 크게 받으며, 거칠기 감소에 따른 전단강도 감소도 가장 우세한 것으로 분석되었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2010학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2010-CD20100729)

#### Reference

1. Barton N., 1973, Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering. Geology*, Vol. 7, 287-332.
2. Byerlee. J.D, 1978, Friction of rocks, *Rock friction and earthquake prediction*, Birkhäuser Basel, pp. 615-626.
3. Grasselli, G. and Egger, P, 2003, Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters, *International Journal of Rock Mechanics and Minign Sciences*, Vol. 40, No. 1, pp. 25-40.
4. Hoek and Bray J.W., 1981, *Rock slope engineering*, revised third edition, E and FN Spon, London.
5. Hsu, S.M., Klaus, E. E., and Cheng, H. S., 1988, A mechano-chemical descriptive model for wear under mixed lubrication conditions, *Wear*, 128, 307~323.
6. Jaeger J. C., 1971, Friction of rocks and stability of rock slopes, *Geotechnique* 21, No. 2, pp. 97-134.
7. Jaeger, J. C. and Cook, M. G. W., 1969, *Fundamentals of Rock Mechanics*, Methuen, London, Chapter III.
8. Kim, D.Y., 2001, Roughness effects on the shear behavior of rock joints, A doctoral dissertation, HanYang univ.
9. Ladany B. and Archambault G., 1969, Simulation of shear behavior of a jointed rock mass. *Proc. 11th Symposium on Rock Mechanics*, New York, pp. 105-125.
10. Lane, K. S., and Heck, W. J., 1964, Triaxial testing for strength of rook joints, *The 6th U.S Symposium on Rock Mechanics*, Rolla, pp. 98-108.
11. Patton F. D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock. *1st Congress. ISRM*, Lisbon, Vol. 1, pp. 509-513.
12. Park. J.W, Lee. Y.K, Song. J.J and Choi. B.H, 2012, A New Coefficient for Three Dimensional Quantification of Rock Joint Roughness, *Journal of Korean society for Rock Mechanics*, Vol. 22, No. 2, pp. 106-119.
13. Yoon. J.S, Kim. D.Y, Lee. H.S and Yoon. H.I, 1998, A study on the shear strength measurement of the seoul granite by the 'Multi-stage' direct shear test, *Journal of Korean society for geosystem engineering*, Vol. 35, No. 5, pp. 435-443.



#### 조 태 진

1980년 서울대학교 해양학과 이학사  
1986년 미국 위스컨신대학교 공학석사  
1988년 미국 위스컨신대학교 공학박사

Tel: 051-629-6557  
E-mail: chotc@pknu.ac.kr  
현재 부경대학교 에너지자원공학과 교수



#### 석 재 욱

2006년 부경대학교 환경해양대학 환경  
탐사공학과 공학사  
2008년 부경대학교 대학원 에너지자원  
공학과 공학석사  
2013년 부경대학교 대학원 에너지자원  
공학과 공학박사

Tel: 031-910-3648  
E-mail: stonely@kistec.or.kr  
현재 한국시설안전공단 시설안전연구소  
연구원