

# 직접전단시험에서 절리면의 2차 거칠기가 거칠기 정량화 파라미터에 미치는 영향

## 이덕환, 최성웅\*

### Influence of Joint Secondary Roughness on Roughness Parameter in Direct Shear Test

Deok-Hwan Lee, Sung-Oong Choi\*

**Abstract** Rock joint surface roughness, which is known to be one of the most important factors for defining shear strength of rock mass, has been researched in various methods. However, approaches to separate a roughness into two groups (primary and secondary) for evaluating the roughness have been rarely performed. In this study, elements of secondary roughness were eliminated through direct shear testing with tensile joint specimen and they were quantified with joint parameters. It is revealed that roughness parameters decrease with increasing the normal stress and sampling intervals, except for the case in which the normal stress is larger than 1.5 MPa. Also it is analyzed that ratio of area reduction in the opposite direction of shearing decreases with increasing the roughness parameter.

**Key words** Primary roughness, Secondary roughness, Roughness parameter

**초 록** 절리면의 전단강도를 결정하는 중요한 인자로 알려진 암반 절리면의 거칠기는 여러 가지 방법에 의해 연구되어 왔다. 하지만, 거칠기를 구성하는 요소인 1차 거칠기와 2차 거칠기를 분리하여 거칠기를 평가하려는 시도는 매우 제한적으로 수행되고 있다. 본 연구에서는 인장절리 시험편을 이용하여 직접전단시험을 통해 2차 거칠기 요소를 파괴하고 이를 거칠기 파라미터를 이용하여 정량화 하였다. 거칠기 파라미터는 수직응력과 측정 간격이 증가할수록 감소하였으나, 1.5 MPa 이상의 수직응력에서는 일정한 경향을 나타내지 않았다. 또한 전단 반대방향의 거칠기 면적 감소율은 거칠기 파라미터가 증가할수록 감소하였다.

**핵심어** 1차 거칠기, 2차 거칠기, 거칠기 파라미터

## 1. 서 론

절리를 포함한 암반의 거동에 있어서 절리면의 전단 강도는 구조물의 안정성에 중요한 영향을 미친다. 절리면의 거칠기는 전단강도를 결정함에 있어 중요한 요소 중 하나로 인식되어 다양한 방법으로 연구되어 왔다.

현재 절리면의 거칠기를 평가하는데 있어 Barton and Choubey(1977)가 제안한 표준 프로파일(JRC)은 가장 널리 사용될 뿐만 아니라, 거칠기 평가의 기준과 같은 역할을 하고 있다. 하지만, JRC는 10개의 단면곡선과 육안으로 관찰한 단면을 비교하는 정성적인 평가이기 때문에 측정 결과에 주관이 개입된다는 점과 12 이상의 JRC에서 거칠기가 과소평가 된다는 문제점을 내포하고 있다(Hsiung *et al.*, 1993). 따라서, 이러한 문제점을 보완하기 위하여 통계적 파라미터, 프랙탈 차원 등을 이용한 다양한 정량화 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Park and Kwon, 2000).

거칠기를 연구하는 연구자들은 보다 정밀한 거칠기 정량화를 위해서는 거칠기를 형성하는 1차 거칠기(만곡)요소와 2차 거칠기(요철)요소를 고려하여 측정해야

Received: Jan. 28, 2014

Revised: Feb. 11, 2014

Accepted: Feb. 18, 2014

\*Corresponding Author: Sung-Oong Choi

Tel) +82332506253, Fax) +82332556253

E-Mail) choiso@kangwon.ac.kr

Dept. of Energy & Resources Engineering, Kangwon National University, 1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do 200-701, Korea

한다고 하였으나(Chun and Kim, 2001), 이와 같은 이분법적 구분 방식은 매우 제한적인 연구에만 적용되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 절리면의 2차 거칠기가 기하학적 파라미터에 미치는 영향을 시험적으로 분석하기 위하여 인공절리 시험편을 제작하고, 이에 대한 직접전단시험을 수행하여 2차 거칠기 요소를 파괴하였다. 거칠기는 직접전단시험 전, 후의 절리면을 대상으로 3차원 레이저 프로파일러를 이용하여 0.5 ~ 4.0 mm 간격으로 측정되었으며, 수치화된 절리면을 3차원 정량화 기법인 표면평균기울기( $\theta$ ), 2차원 정량화 기법인 미소 평균 거칠각( $A_s$ ), 1차 미분의 제공평방 자승근( $Z_2$ ) 파라미터를 이용하여 정량화 하였다. 직접전단시험 전, 후에 산출된 정량화 파라미터를 비교하여 절리면 거칠기에 대한 2차 거칠기 요소의 영향을 분석해 보았으며, 방향을 고려한 거칠기 파라미터의 분류를 통해 직접전단시험에 의한 절리면의 변화를 분석해 보았다.

## 2. 연구 방법

본 연구에서는 다양한 거칠기를 갖는 절리 시험편을 획득하기 위하여 인장 절리 시험편을 제작하였다. 절리 시험편은 50 mm × 60 mm × 100 mm의 화강암 블록을 상, 하부에 썸머가 부착된 인장절리 발생장치로 가압하여 인공 균열을 발생 시키는 방법으로 총 35개 세트를 제작하였다(Fig. 1). 생성된 인장 절리 시험편은 절리면이 최대한 수평이 되도록 불포화 폴리에스테르 수지를 이용하여 고정하였다. 제작에 사용한 암석은 전라북도 익산시 황등면에서 채취된 황등화강암으로서, NX 코어를 이용한 압축시험 결과 평균 150 MPa의 압축강도가 측정되었다.

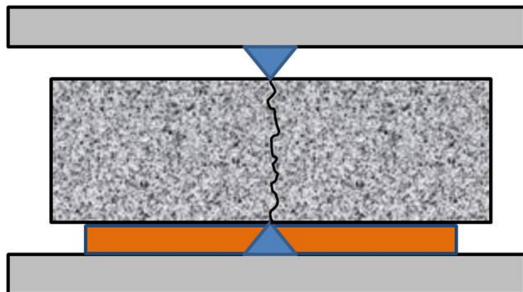


Fig. 1. Schematic diagram of tensile joint by splitting rock specimen

### 2.1 절리면 전단시험

암석 절리면의 2차 거칠기의 영향을 시험적으로 규명하기 위해 직접전단시험기를 사용하여 일정수직응력 조건의 직접전단시험을 수행하였다. Barton(1976)은 유효수직응력의 범위를 0.1 ~ 2.0 MPa에 놓인다고 하였으나, 본 연구에서는 2차 거칠기를 최대한 감소시키는 수직응력을 찾기 위하여 서로 다른 거칠기를 갖는 3개의 표본을 선정하여 0.5 MPa부터 최대 4.0 MPa까지 6단계의 수직응력 하에서 직접전단시험을 수행하였다. 국제암반공학회(ISRM, 1981)에서는 여러 수직응력 하에서의 직접전단시험을 수행 할 경우 한 가지 수직응력 하에서 시험이 끝난 후 다음단계 수직응력을 바로 가하여 시험을 수행하는 다단계 전단시험을 수행할 것을 권장하고 있다. 그러나 Zhao and Zhou(1992)는 이 방법은 다음단계 시험을 할 때, 절리면이 어긋난 상태에서 시험이 수행되기 때문에 낮은 전단강도를 보인다고 말한 바 있다. 본 연구에서는 거칠기 요소의 파괴를 목적으로 시험을 수행하기 때문에 각 단계의 시험 수행 후 절리를 원위치로 맞물려 시험을 수행하는 방법을 선택하였다.

표본시험편에 대한 분석을 통해 2차 거칠기가 최대 감소되는 수직응력을 선별하고, 이를 적용하여 나머지 시험편에 대해 직접전단시험을 수행하였다. 직접전단시험은 서보제어가 가능한 전동식 전단시험기를 사용하였으며, 전단 속도는 0.1 mm/min으로 설정하여 수행하였다.

### 2.2 거칠기 측정

본 연구에서는 절리면의 거칠기를 수치화하기 위해서 10  $\mu$ m의 정밀도를 갖는 3차원 레이저 프로파일러를 이용하여 절리면을 스캔하였다. 절리면의 측정간격에 대해 Barton *et al.*(1985)은 절리 길이에 2% 이하를 제안했으며, 일반적인 실험실 규모에서는 0.1 ~ 1.0 mm를 보편적으로 사용하고 있다. 본 연구에서는 이전 연구(Lee *et al.*, 2011)에서 통계적 파라미터와 높은 상관도를 보인 0.5 mm를 최소 측정간격으로 이용하였다. 거칠기의 측정은 시험 전과 각 수직응력 단계의 직접전단시험 후에 측정하였으며, 보다 정확한 평가를 위해 상, 하부의 절리면을 모두 측정하였다. 측정된 3차원 프로파일은 Fig. 2와 같은 측정간격에 의한 영향을 알아보기 위하여 각각 0.5 ~ 5.0 mm의 측정간격을 갖도록 재구성 하였다. 측정 위치에 따른 거칠기의 차이를 최소화하기 위해 거칠기는 40 × 50 mm 범위에 대하여 측정 하였다.

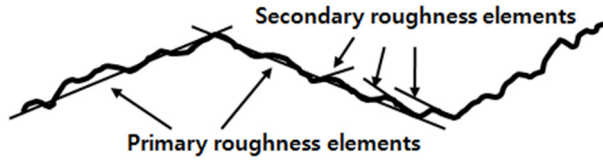


Fig. 2. Illustration of primary and secondary roughness

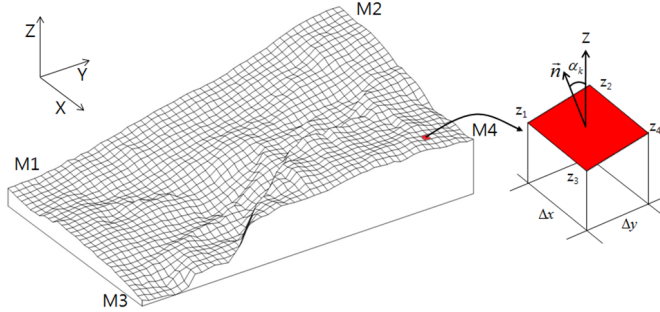


Fig. 3. Illustration of inclination angle of the elementary surfaces

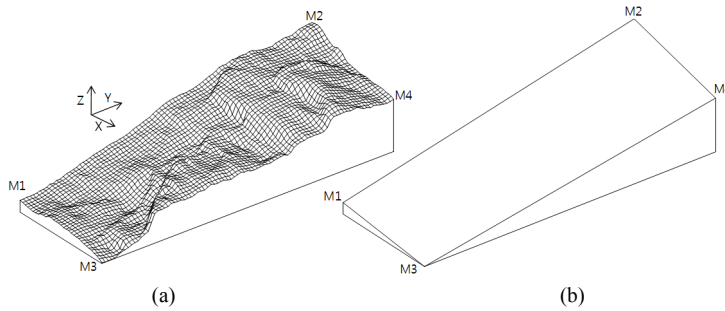


Fig. 4. Definition of the  $\pi$ -surface; (a) actual surface, (b)  $\pi$ -surface (modified from Belem et al., 2000)

수치화된 절리면의 거칠기를 정량화하기 위하여 본 연구에서는 2차원 파라미터인  $A_i$ ,  $Z_2$  그리고 3차원 파라미터인  $\theta_s$ 를 이용하였다. 먼저, 미소평균 거칠각인  $A_i$ 는 Eq. 1에서 정의된 바와 같이 일정한 측정간격 하의 측정점들이 이루는 각도를 평균한 것으로, JRC와 높은 상관관계를 보인다고 알려져 있다(Chun and Kim, 2001). Tse and Cruden(1979)이 암석에 대한 적용성을 확인한  $Z_2$ 는 Eq. 2에서 정의된 바와 같이 절리의 높낮이에 따른 기울기를 자승근 평균하여 정량화 하는 방법으로, 현재 거칠기의 정량화에 가장 많이 사용되고 있다. 표면평균기울기인  $\theta_s$ 는 2차원 파라미터인  $A_i$ 를 3차원으로 확장시킨 정량화 기법으로서, Fig. 3에서와 같이 절리면을 구성하는 미소평면의 법선과 기준축의 사잇각을 평균하는 방법이다(Eq. 3). 모든 거칠기 파라미터는

오차를 줄이기 위해 상, 하부 절리면에서 각각 산출된 값을 평균하여 사용하였다.

$$A_i = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \tan^{-1} \left( \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right) \quad (1)$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left( \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right)^2} \quad (2)$$

$$\theta_s = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\alpha_k)_i \quad (3)$$

여기서,  $N$  = 측정점의 개수,  
 $\Delta x$  = 측정간격,

- $y_i$  = 측선의 높이좌표,
- $m$  = 미소평면의 개수,
- $\alpha_k$  = 법선벡터와 Z축의 사이각.

측선과 미소평면의 기울기를 이용하여 평가하는 통계적 파라미터를 산출함에 있어 절리면의 기울기는 매우 큰 영향을 미치기 때문에 측정된 절리면에 Fig. 4과 같이 4개의 극점으로 이루어진  $\pi$ -평면을 적용하여 절리면 전체의 기울기를 보정하였다.

본 연구에서는 총 35개의 시험편을 제작하였으나, 그 중 10개 시험편은 절리면 전단시험으로 시험편이 갈라져 거칠기 측정 시 오류가 발생하여, 이를 제외한 25개 시험편에서 측정된 프로파일을 통계적 정량화 기법을 통해 정량화 하였다. 거칠기의 정량화는 방향에 따른 영향을 알아보기 위하여 전단에 직접 작용하는 방향(하부 시험편에서는 전단 반대방향, 상부 시험편에서는 전단방향)을 (+)로, 직접적이지 않은 방향을 (-)로 구분하여 산출하였다. 2차원 파라미터의 방향 평가는 측선의 기울기 방향으로 정하였으며, 3차원 파라미터의 방향성은 Zhang *et al.*(2008)이 제안한 Eq. 4를 사용하였다.

$$f_y = \frac{(Z_{i+1,j+1} + 2Z_{i,j+1} + Z_{i-1,j+1} - Z_{i+1,j-1} - 2Z_{i,j-1} - Z_{i-1,j-1})}{8d} \quad (4)$$

여기서,  $Z_{i,j}$  =  $i$ 번째  $x$ ,  $j$ 번째  $j$ 좌표의 높이 좌표,

- $d$  = 측정간격,
- $f_y > 0$  전단에 직접 작용하는 방향,
- $f_y < 0$  전단에 직접 작용하지 않는 방향,
- $f_u = 0$  전단방향과 수직인 방향.

### 3. 시험 결과

본 시험에 앞서 수행된 3개의 표본 시험편에 대한 직접전단 시험 결과와 각 수직응력단계에서 측정된 거칠기 파라미터를 Table 1과 같이 정리해 보았다. 각 거칠기 파라미터와 최대전단강도는 3개의 시험편에서 산출된 값의 평균이다. 표본 시험편의 최대 전단강도는 0.95 ~ 3.84 MPa의 범위를 보였으며, 내부 마찰각은 평균 40°를 나타냈다.  $Z_2$ ,  $A_i$ ,  $\theta_s$  세 종류의 파라미터 모두 1.5 MPa의 수직하중까지는 하중이 증가할수록 거칠기 파라미터가 감소하였으나, 2.0 MPa 이상에서는 유사하거나 오히려 증가하는 불규칙한 경향을 보였다. 이는 전단 시험 이후 시험편 표면의 부스러짐과 반대편 절리면의 강한 조직에 의한 굽힘이 발생한 것으로 미루어

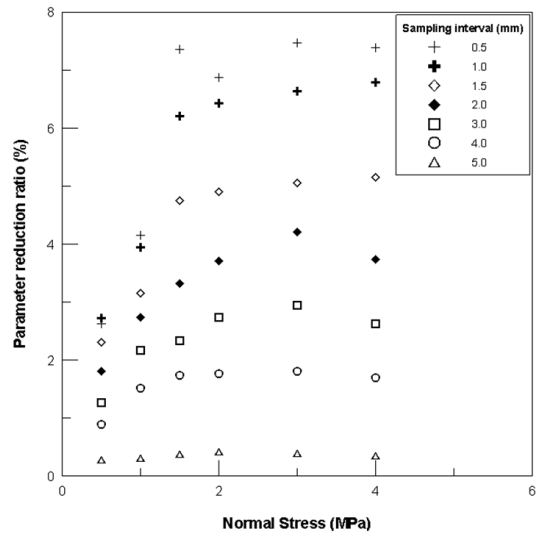


Fig. 5. Roughness parameter reduction ratio with respect to normal stress(sampling interval : 0.5 mm ~ 5.0 mm)

Table 1. Results of direct shear test and its measured parameters(average)

Nomal stress (MPa)	Max. shear stress (MPa)	$\theta_s$ (°)	$A_i$ (°)	$Z_2$
-	-	15.36	9.71	0.151
0.5	0.98	14.93	9.49	0.147
1.0	1.78	14.67	9.40	0.145
1.5	2.31	14.15	9.12	0.141
2.0	2.76	14.20	9.10	0.140
3.0	3.38	14.14	9.07	0.140
4.0	4.13	14.16	9.11	0.140

볼 때, 2.0 MPa 이상의 수직하중에서는 절리면의 전단에 의한 2차 거칠기 요소의 파괴와 동시에 절리면을 구성하고 있는 암석조직의 이탈이나 1차 거칠기 요소의 부분적 파괴가 발생하기 때문이라 판단된다.

Fig. 5는 절리면 측정간격에 따른 거칠기 파라미터의 평균 감소율을 나타낸 것이다. 거칠기의 감소율은 0.27 ~ 7.46%의 범위를 나타냈으며, 측정간격이 길어짐에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 5.0 mm의 측정간격에서는 모든 수직하중 단계에서 0.5% 이하의 거칠기 감소율을 보였는데, 이는 5.0 mm의 측정간격이 직접전단시험을 통해 파괴된 2차 거칠기 요소를 무시할 수 있을 만큼 충분히 긴 측정간격이며, 절리면의 1차 거칠기 요소의 변화가 전 구간에서 크지 않았기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 이상의 시험 결과로 미루어 봤을 때, 1.5 MPa의 수직하중이 2차 거칠기 요소 파괴에 가장 효과적이라 판단되기 때문에 추가 시험에서의 수직하중으로 채택하였으며, 변화가 작은 5.0 mm 측정간격에서의 거칠기를 1차 거칠기로 가정하였다.

Fig. 6 ~ 8은 1.5 MPa의 수직하중에서 2회 전단시킨 25개 시험편에서 측정된 거칠기 파라미터와 시험 전에 측정된 파라미터를 비교한 것이다. 시험 전에 측정된 파라미터 대비 시험 후 파라미터는 각각  $Z_2 = 7.27\%$ ,  $A_i = 7.45\%$ ,  $\theta_s = 8.33\%$ 씩 감소되었으며, 거칠기 파라미터와 선형의 관계에서 각각 0.79, 0.84, 0.86의 상관계수가 산출되어  $A_i$ 와  $\theta_s$ 가 가장 좋은 상관도를 갖는 것으로 나타났다.  $\theta_s$ 가  $A_i$ ,  $Z_2$ 에 비하여 높은 거칠기 감소율을 보인 것은 3차원 파라미터의 특성상 전단방향의

거칠기 감소뿐만 아니라 전단방향과 수직인 방향의 거칠기 감소도 포함했기 때문으로 판단된다.

전단에 직접 작용하는 방향과의 그렇지 않은 방향의 파라미터와 감소율 역시 선형의 관계를 나타냈으나, 상관계수는 직접 작용하는 방향에서는  $Z_2^+ = 0.81$ ,  $A_i^+ = 0.86$ ,  $\theta_s^+ = 0.86$ 을 나타내어 반대방향에서 얻어진  $Z_2^- = 0.67$ ,  $A_i^- = 0.72$ ,  $\theta_s^- = 0.71$ 에 비하여 상대적으로 높은 값을 나타내었다. 전단에 직접 작용하는 방향의 상관계수가 평균 파라미터에 비하여 높은 상관계수를

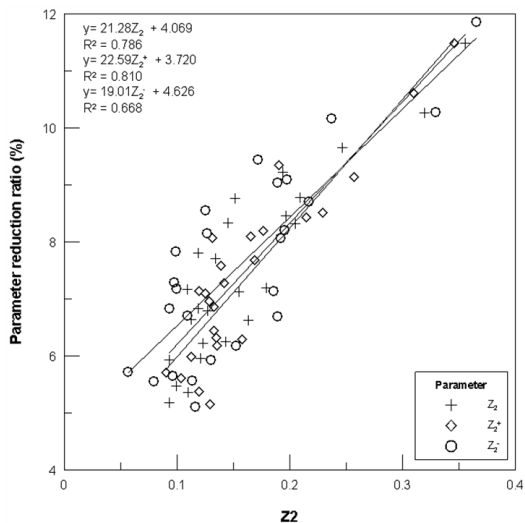


Fig. 6. Relation between  $Z_2$  and parameter reduction ratio

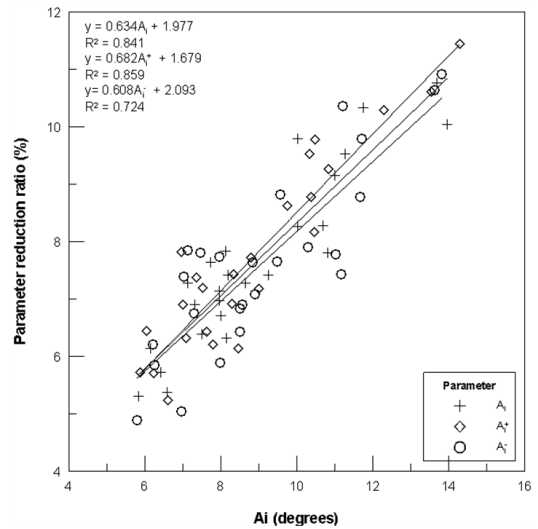


Fig. 7. Relation between  $A_i$  and parameter reduction ratio

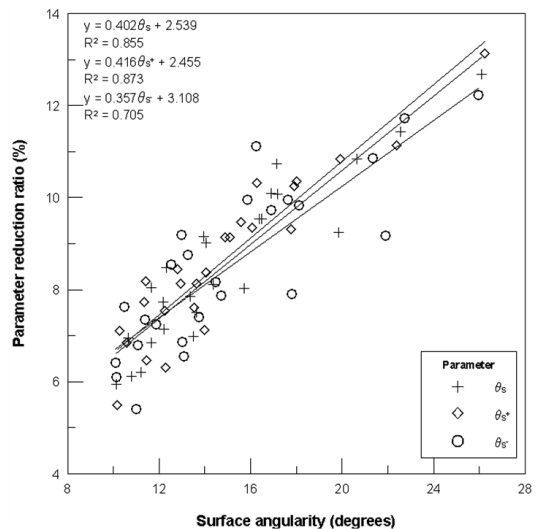


Fig. 8. Relation between  $\theta_s$  and parameter reduction ratio

나타낸 것은 이 방향의 2차 거칠기 요소가 반대방향의 거칠기 요소에 비하여 많이 파괴되었기 때문이다. 또한, 방향을 고려하지 않은 거칠기 파라미터에서는  $A_i$ 가 가장 높은 상관성을 보였으나, 전단에 직접 작용하는 거칠기의 비교에서는  $\theta_s^*$ 가 가장 높은 값을 나타낸 것으로 미루어 볼 때, 거칠기 요소의 파괴는 전단방향 뿐만 아니라 수직방향의 거칠기에도 영향을 미치며, 이런 감소 특성은 2차원 정량화 기법에 비하여 3차원 정량화 기법이 보다 정확하게 측정가능하다고 사료된다.

Fig. 9 ~ 11은 각 거칠기 파라미터와 전단에 직접 작용하는 방향의 요소 수 감소율 간의 상관관계를 나타낸 것이다. 그래프에서 보이는 바와 같이 전단에 직접 작용하는 방향의 요소 수 감소율은 3.99 ~ 11.32%의 범위에서 거칠기 파라미터가 증가할수록 감소하는 거듭제곱함수의 추세를 보였으며, 각 파라미터와의 상관계수는 각각  $Z_2 = 0.47$ ,  $A_i = 0.59$ ,  $\theta_s = 0.60$ 이 산출되었다.

2차원 파라미터에 비하여 3차원 파라미터에서 비교적 높은 상관도를 나타낸 것은 전단 방향에 따른 요소 수의 감소율이 3차원적 변화이기 때문에 인근측선의 변화에 따른 영향을 받으며, 단순 측선만을 이용한 2차원 파라미터에서는 이를 구현하기 힘들었기 때문으로 판단된다. 시험에서 산출된 상관계수가 비교적 낮은 하지만, 세 종류의 파라미터 모두 전단에 직접 작용하는 방향의 파라미터가 반대방향의 파라미터에 비해 높은 상관도를 나타낸 것으로 미루어 볼 때, 세 파라미터 모두 2차 거칠기 요소의 파괴 예측이 가능한 것으로 판단된다.

절리면의 거칠기가 증가할수록 전단에 직접 작용하는 요소 수의 감소율이 감소하는 것은 절리면을 형성하고 있는 거칠기 요소 중 2차 거칠기 요소의 비중이 낮은 거칠기의 절리면에서 더 높기 때문인 것으로 볼 수 있다. 또한, 높은 파라미터를 갖는 시험편에서는 2차 거칠기 요소의 파괴로 인하여 전체 거칠기는 감소하지만, 파괴되지 않은 1차 거칠기 요소의 영향으로 2차 거칠기 요소의 방향성은 바뀌지 않아 매우 한정된 부분에서만

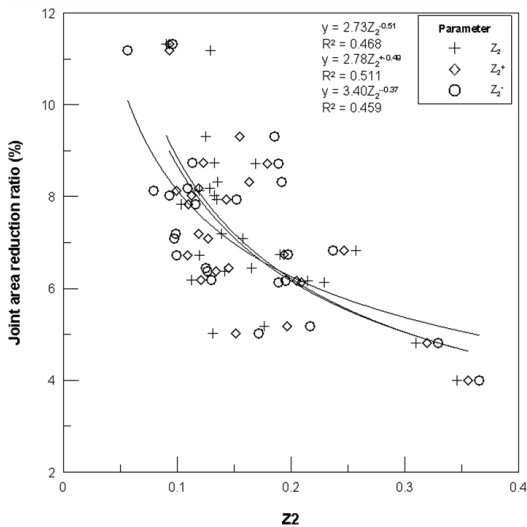


Fig. 9. Relation between  $Z_2$  and element quantity reduction ratio in the opposite direction of shearing

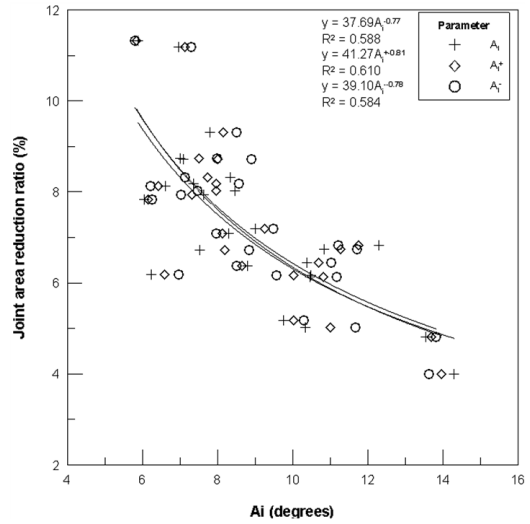


Fig. 10. Relation between  $A_i$  and element quantity reduction ratio in the opposite direction of shearing

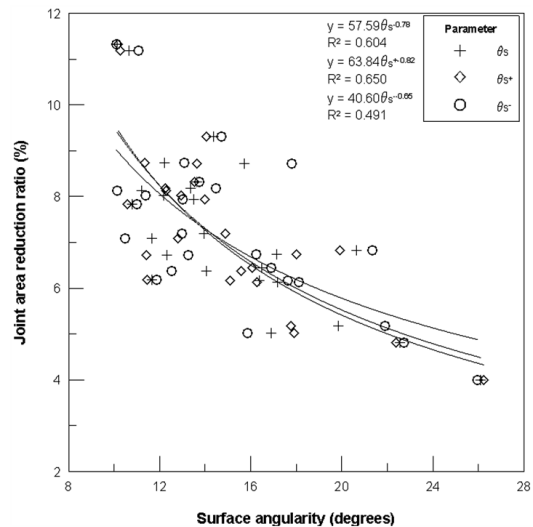


Fig. 11. Relation between  $\theta_s$  and element quantity reduction ratio in the opposite direction of shearing

변화가 나타난 것으로 판단된다.

#### 4. 고찰

본 연구에서 수직응력이 증가할수록 2차 거칠기 요소의 파괴가 증가한 것은 실제 접촉면적의 증가에 의한 것으로 판단된다. 이는 수직응력의 증가에 따라 접촉면적이 증가한다는 Walraven(1981)의 이론과 부합된다고 볼 수 있다. Scholz and Engelder(1976)은 거친 절리면에서 높은 응력 수준하의 미세거칠기의 파쇄는 전단응력이 급격히 감소한 뒤 다시 회복되는 스택-슬립에 의한다고 말한바 있으나, 본 연구에서는 이를 확인하지 못하였다. 이는 본 연구에서 사용된 시험편의 크기가 상대적으로 작은 50 mm × 60 mm의 면적을 갖기 때문에 전단시험을 통해 충분히 구현되지 못하였기 때문인 것으로 판단된다.

Seidel and Haberfield(2002)의 개념도를 통한 설명에서 절리 구성요소 침단부의 파괴는 전단 시 직접 맞닿는 면보다 그에 대응하는 면에서 우세하게 보이나, 본 연구의 결과는 직접 맞닿는 면의 파괴가 우세하게 나타났다. 이는 실제 시험편의 경우 2차 거칠기 요소가 개념도와 같이 평면상에 위치하는 경우보다 1차 거칠기 상에 위치하는 비율이 높다는 점과 독립적인 거칠기 요소가 아닌 다른 거칠기 요소와 함께 거동한다는 점에 의한 것으로 사료된다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 절리면 거칠기에 대한 2차 거칠기 요소의 영향을 시험적으로 알아보기 위하여 인장절리에 대한 직접전단시험을 수행하고 수직하중 및 측정간격에 대한 거칠기 파라미터의 변화를 측정해 보았다. 또한, 거칠기 파라미터의 방향성과 절리면 구성 요소의 방향성과의 관계도 분석해 보았다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 표본 시험편에 대한 0.5 ~ 4.0 MPa의 수직응력 하에서 수행한 직접전단시험 결과 거칠기 파라미터는 수직응력이 증가할수록 선형적으로 감소하는 추세를 보였으나, 1.5 MPa 이상의 수직응력 구간에서는 일정치 않은 경향을 나타내어 이를 2차 거칠기 요소 파괴에 효과적인 수직응력으로 선정하였다. 측정간격에 따른 평균 파라미터의 감소율은 측정간격이 증가할수록 낮아지는 것으로 나타났으며, 5.0 mm의 측정간격에서는 수직응력에 관계없이 0.5% 이하의

일정한 파라미터 감소율을 나타내었다.

2. 전체 시험편에 대한 1.5 MPa 수직응력 하에서 2회 직접전단시험을 수행한 결과, 파라미터 평균 감소율은  $\theta_s = 8.33\%$ ,  $A_i = 7.45\%$ ,  $Z_2 = 7.27\%$  이었으며, 거칠기 파라미터와 선형의 상관관계에서  $\theta_s = 0.86$ ,  $A_i = 0.84$ ,  $Z_2 = 0.79$ 의 상관계수를 각각 나타내었다. 방향을 고려한 파라미터와 감소율의 상관계수는 전단방향의 파라미터보다 전단반대방향에서 평균 0.145 가량 높게 측정되었다.
3. 전단에 직접 작용하는 방향의 거칠기 요소 수는 직접전단시험 전과 대비하여 3.99 ~ 11.32% 범위에서 감소하였으며, 감소율은 거칠기 파라미터가 증가할수록 거둬제곱의 추세를 나타내며 감소하였다. 상관계수는  $Z_2 = 0.47$ ,  $A_i = 0.59$ ,  $\theta_s = 0.60$  으로 나타나 3차원 파라미터에서 상대적으로 높은 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 인장절리 시험편을 제작하여 직접전단을 수행했으나, 인장절리의 특성상 거칠기의 제어가 불가능하여 낮은 거칠기와 매우 높은 거칠기의 시험편을 얻을 수 없었기 때문에 특정 구간에 편향된 거칠기만을 사용하는 제약이 있었다. 따라서 전체 구간에 대한 거칠기에 대하여 동일한 시험을 수행한다면 본 연구에서 얻어진 것과 다른 경향을 보일 수 있다고 판단된다. 또한, 추후 본 연구를 기반으로 추가적인 시험과 분석을 통해 이를 보완한다면 이분법적인 거칠기 평가에 기여할 수 있을 것이라 사료된다.

#### References

1. Barton, N.R., 1976, The shear strength of rock and rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 13, pp. 255-279.
2. Barton, N.R. and Choubey, V., 1977, Shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mech. and Rock Engng.*, Vol. 10, pp. 1-54.
3. Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K., 1985, Strength deformation and conductivity coupling of rock joints, *Int. J. of Rock Mech. and Rock Min. Sci. & Geomech. Abst.*, Vol. 9, pp. 579-602.
4. Belem, T., F. Homand-Etienne and M. Souley, 2000, Quantitative parameters for rock joint surface roughness, *Rock Mech. and Rock Engng.*, Vol. 33, pp. 217-242.
5. Chun, B.S. and Kim, D.Y., 2001, A numerical study on the quantification of rock joint surface roughness, *Korean Geotechnical Society*, Vol. 17, pp. 85-97.
6. Hsiung, S.M., Ghosh, A., Ahola, M.P. and Chowdhury, A.H., 1993, Assessment of conventional methodologies

- for joint roughness coefficient determination, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 30, pp. 825-829.
7. ISRM, 1981, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, In: E.T. Brown (ed), Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested Methods. Pergamon, Oxford, pp. 131-140.
  8. Lee, D.H., Lee, S.J. and Choi, S.O., 2011, A study on 3D roughness analysis of rock joints based on surface angularity, Tunnel & Underground Space, Vol. 21, pp. 494-507.
  9. Park, B.Y. and Kwon, S.K., 2000, Current status of the characterization of the rock joint surface, Tunnel & Underground, Vol. 10, pp. 566-579.
  10. Scholz, C.H. and Engelder, J.T., 1976, The role of asperity indentation and ploughing in rock friction-I: asperity creep and stick-slip, Int. J. Rock Mech. and Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 13, pp. 149-154.
  11. Seidel, J.P. and Haberfield, C.M., 2002, A theoretical model for rock joints subjected to constant normal stiffness direct shear, Int. J. Rock Mech. and Rock Mech. Min. Sci., Vol. 39, pp. 539-553.
  12. Tse, R. and Cruden, D.M., 1979, Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 16, pp. 303-307.
  13. Walraven, J.C., 1981, Fundamental analysis of aggregate interlock, J. of the Structural Eng. Division, ASCE, Vol. 107, pp. 2245-2270.
  14. Zhang, P., Li, N. and Yang, X., 2008, Surface roughness analysis of rock joints based on a 3D surface model, Int. Young Scholars' Symposium on Rock Mech., Beijing, pp. 243-247.
  15. Zhao, J. and Zhou, Y., 1992, Influence of joint matching characteristics in rock slope stability, Proceedings of ISRM Regional Symposium on Rock Slopes, New Delhi, pp. 139-146.



### 이 덕 환

2006년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사  
2012년 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 공학석사

Tel: 033-255-6253  
E-mail: jadenovember@kangwon.ac.kr  
현재 강원대학교 에너지자원공학과 박사과정



### 최 성 응

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 033-250-6253  
E-mail: choiso@kangwon.ac.kr  
현재 강원대학교 에너지자원공학과 교수