

수정 분할자법을 이용한 절리 거칠기 계수(JRC)의 정량화

장현식¹⁾ · 장보안^{*1)} · 김 열²⁾

¹⁾강원대학교 지구물리학과

²⁾한국도로공사 도로교통기술원

Estimation of Joint Roughness Coefficient(JRC) using Modified Divider Method

Hyun-Shic Jang¹⁾ · Bo-An Jang^{*1)} · Yul Kim²⁾

¹⁾Dept. of Geophysics, Kangwon National University

²⁾Highway & Transportation Technology Institute, Korea Highway Corporation

Barton and Choubey(1977)가 제안한 표준 거칠기 단면을 0.1mm 간격으로 수치화한 후 수정 분할자법을 이용하여 분할자 길이에 따른 단면의 길이를 측정하였다. 분할자 길이에 따른 단면의 길이를 log-log 그래프에 도시한 후 직선 회기분석을 통하여 표준 거칠기 단면의 프랙탈 차원과 절편을 구하고, JRC와의 관계를 분석하였다. 정확한 프랙탈 차원을 계산할 수 있는 분할자의 길이 범위인 교차거리는 0.3~2.4mm 내외이며, JRC는 프랙탈 차원보다는 절편과 더 높은 상관도를 보였다. 그러나 프랙탈 차원과 절편을 곱하였을 때 가장 좋은 상관도를 보였으며, 위의 결과를 이용하여 프랙탈 차원과 절편을 이용한 새로운 JRC 추정식을 도출하였다. 23개의 자연 암석절리의 단면을 수치화하여 Z_2 파라미터를 이용한 Tse and Cruden (1979) 식과 새로운 JRC 관계식으로 각 단면의 JRC를 계산하고 이를 비교하였다. 비교 결과 두 관계식으로 추정된 JRC는 매우 유사하여, 본 연구에서 도출된 새로운 관계식은 JRC를 추정하는데 매우 유용할 것으로 판단된다.

주요어 : 절리 거칠기 계수, 표준 거칠기 단면, 수정 분할자법, 프랙탈 차원, 절편

We assigned points on surface of standard roughness profile by 0.1mm along the length and measured coordinates of points. Then, the lengths of profile were measured with different scales using modified divider method. The fractal dimensions and intercepts of slopes were determined by plotting the length vs scale in log-log scale. The fractal dimensions as well as intercepts of slopes show well correlation with joint roughness coefficients(JRC). However, multiplication of the fractal dimension by intercept show better correlation with JRC and we derived a new equation to estimate JRC from fractal dimension and intercept. The crossover length in which we can determine the correct fractal dimension was between 0.3-3.2mm.

We measured joint roughness of 26 natural joints and calculated JRC using the equation suggested by Tse and Cruden(1979) and new equation derived by us. JRC values calculated by both equations are almost the same, indicating new equation is effective in measuring JRC.

Keywords : joint roughness coefficient(JRC), standard roughness profiles, modified divider method, fractal dimension, intercept

* Corresponding author : bajang@kangwon.ac.kr

서 론

지반공학에서 암반의 거동 특성을 이해하는 것은 매우 중요한 문제이다. 암반은 암석과 불연속면이 함께 존재하므로 암반의 거동을 이해하기 위해서는 암석자체의 거동특성 뿐만 아니라 불연속면에 대한 명확한 모델링이 필요하다. 그러나 불연속면은 기하학적으로 매우 불규칙할 뿐만 아니라 전단 시 생성되는 암석 부스러기의 영향, 불연속면 틈새변화 등과 같은 불확실성 요소들이 존재하므로 암반의 불연속면 구성 모델을 설정하는 것은 매우 어렵다. 특히 불연속면의 거칠기는 불연속면의 특성을 가장 크게 좌우하는 요소로서 불연속면의 최대전단강도는 불연속면의 거칠기에 지배를 받게 된다. 따라서 불연속면의 거칠기를 보다 정밀한 방법으로 측정하고 정량적으로 특성화시키는 것은 매우 중요한 과정이다.

절리면의 거칠기는 절리 거칠기 계수(JRC)로 기술되는 것이 일반적이고 JRC는 Barton and Choubey(1977)가 제안한 10개의 표준 거칠기 단면과 육안으로 비교하여 결정된다. 이러한 JRC 결정방법은 조사자의 주관과 경험에 따라 결과가 달라지며 많은 오차를 발생시킬 수 있다. 최근에는 절리면 거칠기를 레이저 스캐너나 디지털 측정 장치 등을 이용하여 정밀하게 수치화할 수 있게 됨에 따라 수치화된 거칠기 자료를 이용하여 정량적으로 JRC를 결정하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재까지 대부분의 거칠기 정량화방법은 1차원 거칠기 단면선을 대상으로 통계적 파라미터나 프랙탈 차원을 이용한 연구가 진행되었다. 거칠기 정량화에 이용되는 통계적 파라미터는 거칠기 높이에 대한 제곱평균자승근(RMS), 거칠기의 기울기에 대한 제곱평균자승근(Z_2), 구조함수(SF), 거칠기의 미소-평균각(A_i) 등이 있다 (Wu and Ali, 1978; Tse and Cruden, 1979; Krahn and Morgenstern, 1979). 이 중에서 Z_2 는 거칠기 정량화 방법으로 가장 널리 사용되는 파라미터로서 Tse and Cruden(1979)은 표준 거칠기 단면에 대한 Z_2 를 측정하고, JRC와의 상관성 분석을 실시하여 계산적으로 JRC를 추정할 수 있는 관계식을 제시하였다. 그러나 Milier(1990), 이상돈(1996) 등은 Z_2 와 JRC는 좋은 상관성이 있으나 측정간격에 따라 값이 변화하는 큰 단점이 있어 Z_2 만으로 거칠기를 표현하는 것은 충분하지 않다고 하였다.

프랙탈 차원은 복잡한 도형이나 자연에서 관찰되는 불규칙한 형상을 분수차원으로 나타내는 수학적인 개

념이다. 최근에는 절리 단면을 대상으로 분할자법(divier method), 박스집계법(box-counting method), 베리오그램법(variogram method), 파워스펙트럼법(power spectral method) 등을 이용하여 프랙탈 차원을 결정하는 연구가 진행되어 왔다(Feder, 1988; Orey, 1970; Berry and Lewis, 1980; Malinverno, 1990). Lee et al.(1990)와 Wakabayashi and Fukushige(1995)는 표준 거칠기 단면에 대한 프랙탈 차원을 결정하고 JRC와의 상관관계식을 제안하였다. 또한 Kulatilake et al.(1995)는 log(분할자) - log(단면 길이) 그래프 상에서 얻어진 프랙탈 차원과 회기선의 절편을 곱한 형태가 JRC와 좋은 상관관계를 보인다고 보고하였다.

본 연구에서는 표준 거칠기 단면을 수평선을 따라 0.1mm 간격으로 수치화한 후 수정 분할자법(modified divider method)을 이용하여 표준 거칠기 단면의 프랙탈 차원과 회기선의 절편을 구하고, JRC와 프랙탈 파라미터와의 유효한 상관관계식을 도출하였다. 또한 도출된 상관관계식을 23개의 자연 암석 절리 단면에 적용하여 유용성을 검증하였다.

연구 방법

수정 분할자법을 이용하여 절리면 거칠기의 프랙탈 차원을 측정하고 프랙탈 차원과 JRC와의 상관성을 분석하기 위해 Barton and Choubey(1977)의 10개의 표준 거칠기 단면과 23개의 자연 절리 시료를 0.1mm 간격으로 수치화 하였다. 이때 수치화된 표준 거칠기 단면의 경우 거칠기 정량화 연구에서 기준 역할을 하는 중요한 자료이므로 신뢰도에 대한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 거칠기 정량화 파라미터 중에서 가장 많이 사용되며, JRC와 좋은 상관성을 보인다고 보고된(Kulatilake et al., 1995) Z_2 파라미터를 이용하여 수치화된 표준 거칠기 단면의 JRC를 계산하고 실제 JRC와의 상관성을 분석하였다.

이렇게 상관성 분석을 통해 신뢰도가 검증된 표준 거칠기 수치화 자료에 대해 수정 분할자 방법을 이용하여 각 거칠기 단면의 프랙탈 차원과 절편을 구한 후, 프랙탈 차원 및 절편과 JRC 간의 회기분석을 실시하여 상관관계식을 도출하였다. 도출된 상관관계식은 23개의 수치화된 자연 절리면 시료에 적용하여 자연 절리면에 대한 적용성을 확인하였다. Fig. 1은 연구의 흐름을 나타낸 그림이다.

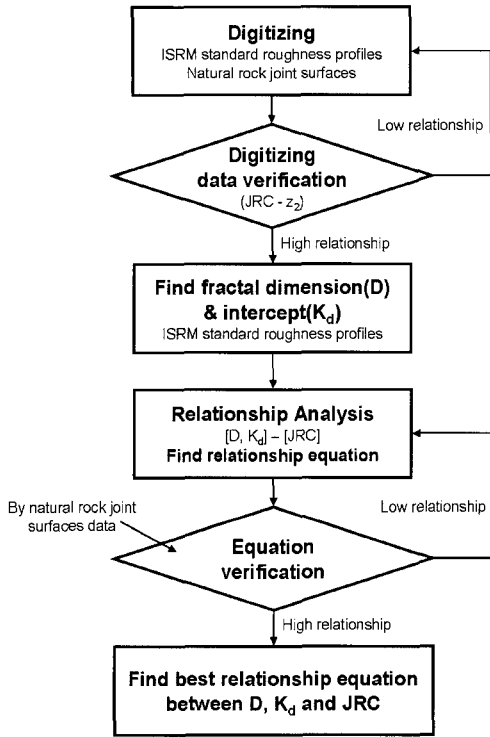


Fig. 1. Flow chart of research.

분할자법을 이용한 프랙탈 차원의 결정방법

프랙탈 형상이란 불규칙적이며 복잡한 도형을 나타내기 위한 수학적인 형상을 말하며, 자연계에 존재하는 프랙탈 형상은 리아스식 해안선, 구름, 눈의 결정, 동물체내의 혈관 분포, 나뭇가지 등이 있다. 유클리드 기하학은 정수차원에서 묘사될 수 있는 객체를 취급하는데 쉬운 예로 직선은 1차원이고, 사각형이나 원과 같은 도형은 2차원, 육면체나 구와 같은 입체 도형은 3차원으로 프랙탈 차원, D는 1차원은 1, 2차원은 2와 같이 정수로 표현된다(Fig. 2). 만약 길이가 1인 직선을 길이 r인 분할자로 나눈다고 하면 분할자의 수 N과 분할자의 길이 r은 프랙탈 차원, D에 대하여 식(1)과 (2)로 나타낼 수 있다. 또한 직선보다 복잡한 형태의 선, 즉 1차원의 직선과 2차원의 도형 사이의 선은 1과 2 사이의 프랙탈 차원을 갖는다.

$$N = 1/r^D \text{ or } Nr^D = 1 \quad (1)$$

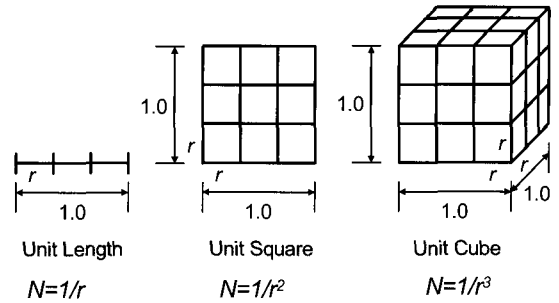


Fig. 2. The concept of dimension in Euclidean geometry(Seidel et al., 1995).

$$D = - \frac{\log(N)}{\log(r)} \quad (2)$$

분할자 방법은 자의 길이를 달리하여 단면의 길이를 측정하는 방법으로서 단면의 총 길이 L은 식(3)이 되며, 분할자의 수와 단면의 길이 사이에는 식(4)와 같은 관계가 된다(Fig. 3a). 여기서 r=분할자의 길이, N=사용된 분할자의 수, D=프랙탈 차원이다.

$$L = Nr \quad (3)$$

$$N = ar^{-D} \quad (4)$$

식(3)을 식(4)에 대입하면 식(5)가 되고 양변에 로그를 취하여 정리하면 식(6)이 된다.

$$L = ar^{(1-D)} \quad (5)$$

$$\log L = \log a + (1-D) \log r \quad (6)$$

총 길이 L은 분할자의 함수로 짧은 분할자를 사용할수록 L은 더욱 길어지게 된다. 분할자 길이, r에 대한 측정 길이, L을 log-log 그래프 상에 도시하면 음의 경사를 갖는 직선이 되고, 이 직선의 기울기는 식(6)에서 표현된 것같이 1-D이며 절편은 log a가 된다(Fig. 3b).

분할자법을 사용할 경우 분할자로 분리된 지점간의 수평거리가 서로 다르기 때문에 자료를 수치화하여 컴퓨터를 이용한 계산에는 약간의 어려움이 따른다. 그러므로 Brown(1987)은 분할자가 단면을 따라 측정하는 방법이 아닌 수평 분할간격을 사용하는 수정 분할자 방법(modified divider method)를 제안하였다

(Fig. 3a). 수정 분할자법은 분할자법과 매우 유사한 결과를 도출하지만 컴퓨터를 이용하여 수치화된 거칠기 단면을 분석할 경우 기존의 분할자법에 비해서 용이하므로 본 연구에서는 수정 분할자법이 사용되었다.

만약 거칠기 단면의 길이 L 이 분할자 길이 r 을 이용하여 측정되었다면, r 보다 작은 해상도의 정보들은 잃게 된다. 따라서 r 이 작을수록 L 을 보다 정밀하게 측정할 수 있지만 수치화 과정에서 r 의 크기는 측정 장비의 분해능과 분석 자료의 크기(자료의 용량) 등에 의해 제한될 수밖에 없으므로, 적절한 분할자를 사용하는 것은 매우 중요하다. 만약 거칠기 단면이 Fig 4와 같이 직선의 feature size로 구성되어 있다면 분할자 1(divider span 1)은 feature size보다 매우 작다. 이런 경우 분할자의 길이가 분할자 1 길이의 2배 혹은 3배로 증가하여도 분할자는 feature size 내의 직선을 따라 길

이를 측정하므로 거칠기 단면의 길이는 거의 변화가 없으며 Fig. 5의 $\log L - \log r$ 그래프의 왼쪽 부분과 같이 기울기가 매우 완만하게 도시되고 이 구간에서 구한 프랙탈 차원은 정확한 프랙탈 차원보다 낮은 값을 보이게 된다. 또한 분할자 2(divider span 2)와 같이 feature size보다 매우 큰 분할자를 사용할 경우 거칠기 단면의 길이는 거칠기 단면의 수평 길이와 거의 유사하고, 분할자의 길이가 분할자 2 길이의 2배 혹은 3배로 증가하여도 거칠기 단면의 길이는 거의 변화가 없다. 이런 경우는 Fig. 5의 $\log L - \log r$ 그래프의 오른쪽 부분에 해당하며 적정 구간의 $\log L - \log r$ 그래프보다 완만한 기울기를 보여 적정한 프랙탈 차원을 구할 수 없다(Kulatilake et al., 1997). 따라서 유효한 프랙탈 차원은 적절한 범위의 분할자 길이 내에서만 구할 수 있으며, 이러한 분할자의 범위를 적정범위

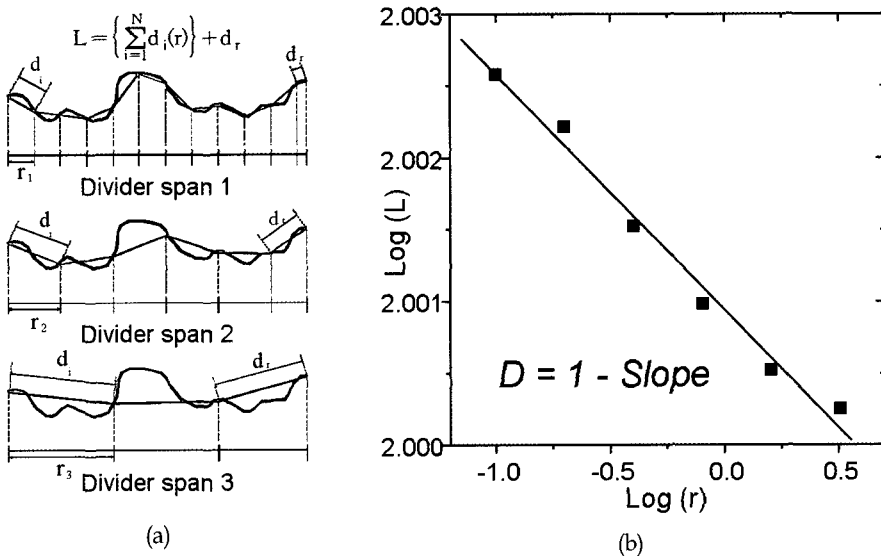


Fig. 3. Modified Divider method. (a) Divider applied to profile (b) $\log L - \log r$ plot.

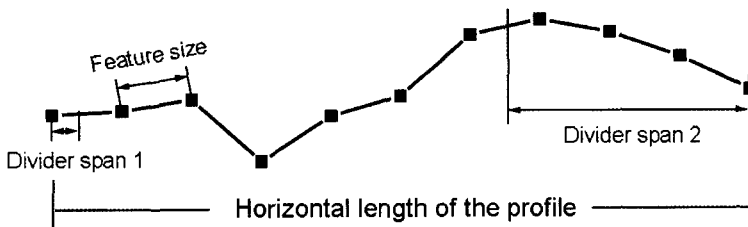


Fig. 4. Concept of the minimum and the maximum divider span(Kulatilake et al., 1997).

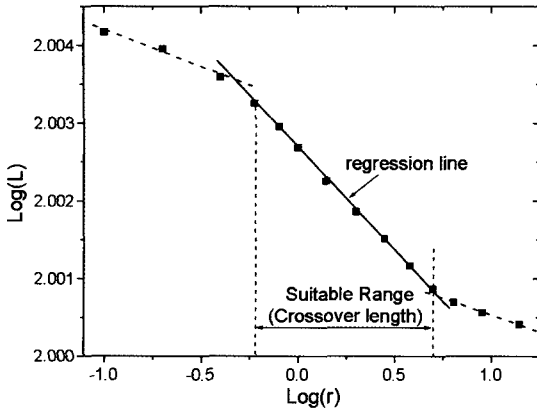


Fig. 5. Suitable range of r for the estimation of fractal dimension with the divider method(Kulatilake et al., 1997).

(suitable range) 또는 교차길이(crossover length)라고 한다(Fig. 5).

거칠기의 수치화

Barton and Choubey(1977)가 제안한 절리 거칠기 계수(JRC)는 공학적으로 가장 널리 사용되는 거칠기 파라미터이다. 그들은 100mm 길이의 암석 절리면 시료를 사용하여 수행된 136회의 절리면 진단시험을 통해 절리면의 거칠기에 따라 10개의 대표적인 단면곡선 군을 만들고 0에서 20까지의 계수를 할당하였다.

본 연구에서는 표준 거칠기 단면을 스캐너를 이용하여 컴퓨터 이미지 파일로 변환한 후 Fig. 6과 같이 CoreDRAW 프로그램 상에서 0.1mm 간격으로 수치화(digitizing)하였다. CoreDRAW 프로그램을 사용하면 단면의 확대가 용이하여 정확한 수치화가 가능하다는 장점이 있다(사이버출판사, 2001).

수치화된 표준 거칠기 단면은 앞서 언급한 바와 같이 거칠기 정량화 연구에서 기준 역할을 하는 중요한 자료이므로 수치화된 단면의 JRC가 표준 거칠기 단면에서 주어진 JRC와 같거나 매우 유사하여야 신뢰성 있는 연구결과가 나올 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수치화된 표준 거칠기 단면에 대하여 Z_2 (Myers, 1962) 파라미터를 이용해 JRC를 계산하고 이를 표준 거칠기 단면에서 주어진 JRC와 비교하였다. Z_2 파라미터는 거칠기의 기울기에 대한 표준편차를 나타낸 것으로서 식 (7)과 같이 계산할 수 있으며(Fig. 7), Tse and Cruden(1979)은 식(8)과 같은 Z_2 -JRC 관계식을 제시하

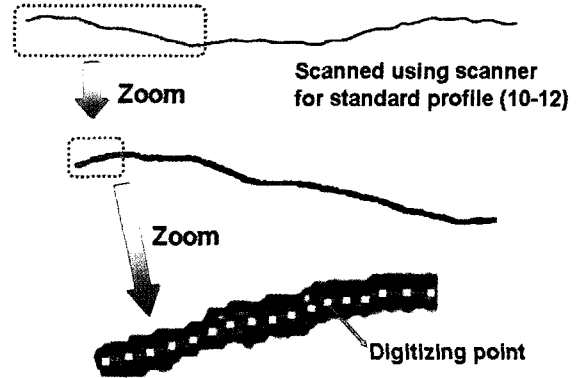


Fig. 6. Digitization of standard roughness profiles.

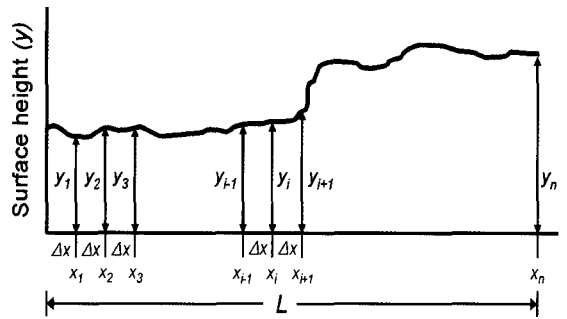


Fig. 7. The diagram used to define statistical parameters for a joint surface profile (Kulatilake et al., 1995).

였다. Krahn(1974)는 암반 절리면에서 마찰각과 절리면의 Z_2 사이에 선형관계가 존재한다고 발표하였으며, Kulatilake et al.(1995)은 Z_2 가 통계 파라미터 중에서 거칠기를 정량화하기에 가장 좋은 것으로 보고하였다.

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx} = \sqrt{\frac{1}{MD_x^2} \sum_{i=1}^M (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (7)$$

L : 평균값이 취해지는 거리

dx : 두 인접한 진폭 관측 점간의 일정한 미소거리

M : 측정간격의 개수

D_x : 측정간격

y_i : i 번째의 거칠기 높이

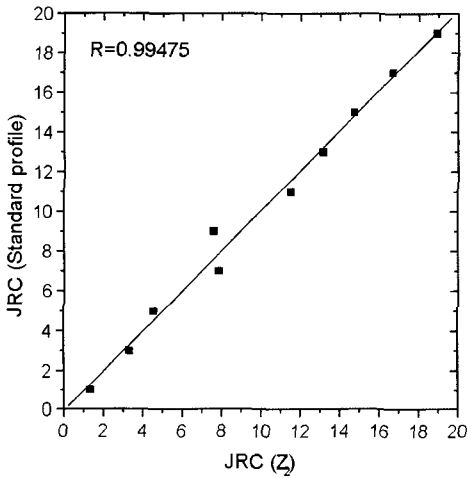
y_{i+1} : i+1 번째의 거칠기 높이

$$JRC = 32.20 + 32.47 \log Z_2 \quad (8)$$

Fig. 8은 표준 거칠기 단면의 JRC와 Tse and Cruden(1979)의 관계식으로 구한 JRC 간의 상관관계의 분석결과이다. 수치화된 자료에서 계산된 JRC는 JRC 8-10을 제외한 모든 범위에서 표준 거칠기 단면의 JRC와 거의 일치하였다. JRC 8-10 범위의 단면의 경우 계산된 JRC는 표준 거칠기 단면에서 주어진 범위보다 조금 낮은 7.62로 계산되었다. 이러한 결과는 표준 거칠기 단면이 경험적인 모델로부터 도출된 것이므로 통계 파라미터와의 약간의 오차를 보이는 것으로 판단되며, Tse and Cruden(1979)과 Kulatilake et

al.(1995) 등도 본 연구와 같은 연구결과를 발표한 바 있다.

자연 암석 절리면은 총 23개의 NX 규격 시추코어 시료에서 획득되었으며 절리면의 장정 방향의 중심선을 따라 디지털 게이지를 사용하여 $0.1 \pm 0.05\text{mm}$ 간격으로 거칠기의 높이를 측정하였다(Fig 9). 측정된 거칠기 단면들의 수평길이는 47~80mm 내이며 자료의 측정간격이 정확히 0.1mm가 아닌 경우에는 보간법(interpolation)을 통하여 자료의 측정간격이 정확히 0.1mm가 되도록 수정하였다.



Standard profile JRC range	Z ₂	JRC (Z ₂)
0~2	0.1122	1.33
2~4	0.1287	3.32
4~6	0.1405	4.58
6~8	0.1775	7.86
8~10	0.1747	7.62
10~12	0.2315	11.54
12~14	0.2593	13.15
14~16	0.2902	14.74
16~18	0.3333	16.69
18~20	0.3903	18.92

Fig. 8. Relation between JRC in standard profile and JRC calculated by Tse and Cruden(1979).

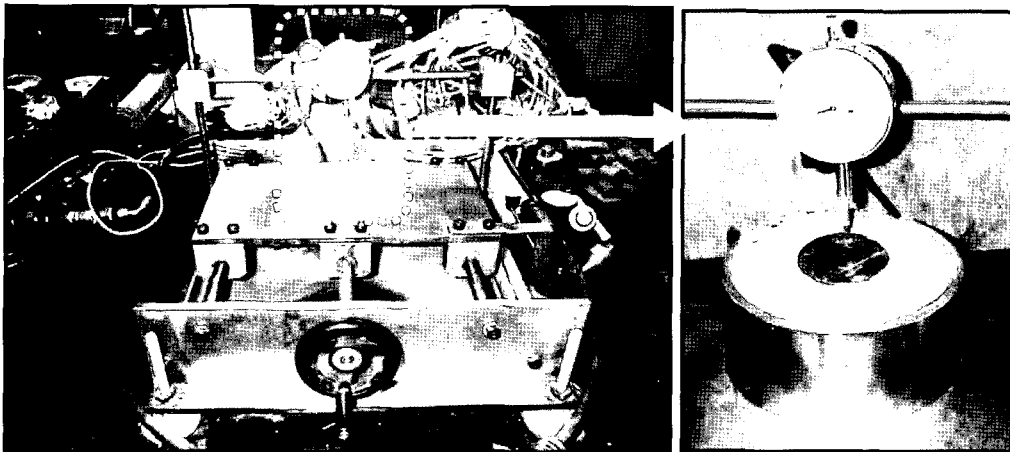


Fig. 9. Digital profilometer.

수정 분할자법을 이용한 JRC의 정량화

표준 거칠기 단면의 프랙탈 분석

수정 분할자 방법을 이용하여 표준 거칠기 단면에 대한 프랙탈 분석을 실시하고 프랙탈 차원과 JRC간의 상관관계를 분석하였다. 프랙탈 분석의 첫 단계는 적절한 프랙탈 차원을 획득할 수 있는 교차길이(crossover length)를 판단하는 것이다. 교차길이를 구하기 위하여 표준 거칠기 단면 10개에 대하여 분할자의 길이(r)를 0.1mm에서 50mm까지 증가시키면서 분할자 길이에 따른 총 길이(L)를 측정 후 Fig. 10과 같이 log 형태로 그래프에 도시하였다. 분할자의 길이가 0.3mm 이하에서는 상대적으로 곡선의 기울기가 낮게 나타나고 분할자의 길이가 2.4mm 보다 클 때는 L 의 크기가 분산되거나 기울기가 다시 완만해지는 특성을 보이나 분할자의 길이가 0.3~2.4mm 범위에서는 전반적으로 높은 기울기의 직선 형태를 나타냈다. 따라서 표준 거칠기 단면의 교차길이를 0.3~2.4mm 내외로 판단하였으며 분할자의 길이를 교차길이 내에서 6단계(0.3, 0.6, 0.8, 1.2, 1.6, 2.4mm)로 설정하였다.

Fig. 11은 10개의 표준 거칠기 단면을 앞에서 설정한 6단계의 분할자를 이용하여 각 분할자의 길이(r)에 따라 측정된 단면의 총 길이(L)를 log 값으로 도시한

것이며, 도시된 자료들에 대하여 선형회기분석을 실시하면 각 단면에 대한 프랙탈 차원과 절편을 구할 수 있다. 앞서 언급 하였듯이 프랙탈 차원은 단면의 거칠기 정도를 나타내는 파라미터며, 절편은 분할자의 길이가 0에 가까울 때의 거칠기 단면의 총 길이로 정의되므로 절편 또한 거칠기 정도를 나타내는 파라미터이다.

분석 결과 표준 거칠기 단면의 프랙탈 차원은 1.0016에서 1.0126의 범위를 보였으며, 절편의 경우는 2.0009~2.0201의 범위를 나타냈다. Fig. 12과 Table. 1에서 볼 수 있듯이 프랙탈 차원과 절편은 JRC가 증가함에 따라 전반적으로 증가하는 형태를 보이나 JRC 8-10, JRC 10-12 단면의 프랙탈 차원은 JRC 6-8 단면의 프랙탈 차원보다 작았으며, JRC 14-16 단면의 프랙탈 차원도 JRC 12-14 단면보다 작았다. 이러한 연구결과는 Kulatilake et al.(1995)에 의하여 구하여진 프랙탈 차원보다 전체적으로 낮은 값을 보이지만 JRC 범위에 따른 변화 형태는 매우 유사함을 알 수 있다. 그러나 Lee et al.(1990)과 Seidel et al.(1995)의 연구결과는 JRC가 증가함에 따라 프랙탈 차원도 일정하게 증가하는 형태를 보이고 있다. Turk et al.(1995)의 연구결과의 경우 JRC 10-12의 프랙탈 차원이 JRC 8-10 단면보다 작으며 JRC 14-16의 프랙탈 차원도 12-14 프랙탈 차원보다 작게 나타나 본 연구결과 거의 유사한 형태를 보이고 있다. 절편의 경우는 JRC 8-12 단면의 절편이

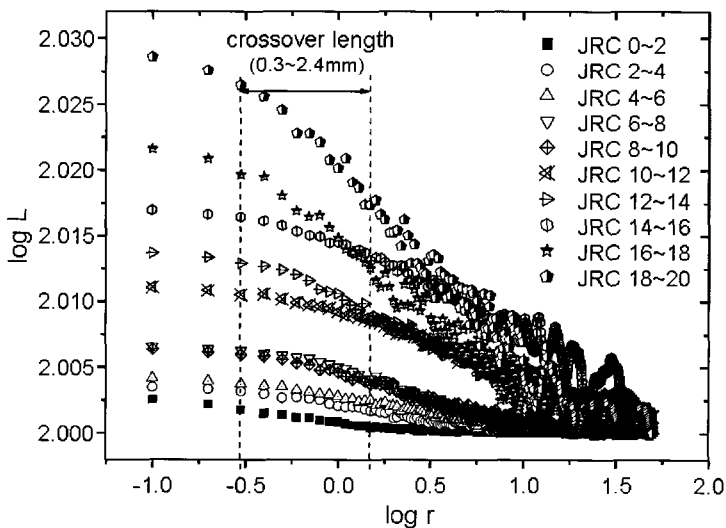


Fig. 10. log L - log r plot of standard profiles.

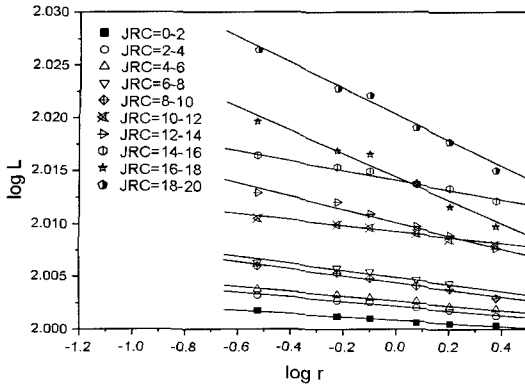


Fig. 11. log L - log r plot within crossover length.

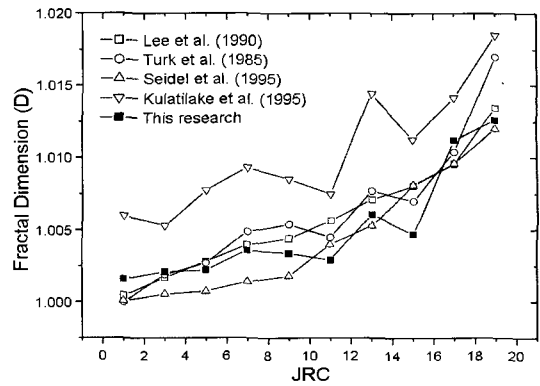


Fig. 12. Relation between JRC and fractal dimensions in standard profile.

Table 1. Fractal Dimension and intercepts of standard profile.

JRC	Lee et al. [*]	Turk et al. [*]	Seidel et al. [*]	Kulatilake et al. [*]	This research ^{**}		
	D	D	D	D	D	K _d	K _d / log L _H
0~2	1.000446	1.0000	1.00009	1.0060	1.0016	2.0009	1.0045
2~4	1.001687	1.0019	1.00054	1.0053	1.0021	2.0022	1.0011
4~6	1.002805	1.0027	1.00072	1.0077	1.0022	2.0027	1.0014
6~8	1.003974	1.0049	1.00140	1.0093	1.0036	2.0048	1.0024
8~10	1.004413	1.0054	1.00180	1.0085	1.0034	2.0044	1.0022
10~12	1.005641	1.0045	1.00400	1.0075	1.0029	2.0092	1.0048
12~14	1.007109	1.0077	1.00530	1.0144	1.0061	2.0102	1.0051
14~16	1.008055	1.0070	1.00810	1.0113	1.0047	2.0142	1.0071
16~18	1.009584	1.0104	1.00960	1.0142	1.0112	2.0144	1.0072
18~20	1.013435	1.0170	1.01200	1.0185	1.0126	2.0201	1.0101

* Divider method was used.

** Modified divider method was used.

JRC 6-8 단면의 절편보다 작게 나타났다.

JRC를 정량적으로 계산할 수 있는 관계식을 도출하기 위하여 프랙탈 분석으로 얻어진 프랙탈 차원과 절편을 프로파일의 실제 JRC 대비하여 상관관계 분석을 실시하였다(Fig. 13). 이때 절편은 단면의 수평길이(L_H)에 영향을 받으므로 절편을 단면의 수평길이를 나누어 절편을 표준화 시키는 방법을 사용하였다(Kulatilake, 1995). 상관도 분석결과 JRC는 프랙탈 차원(D)과는 R²=0.90, 표준화 절편(K_d/log(L_H))과는 R²=0.97로 프랙탈 차원보다는 절편이 JRC와 더 좋은 상관성을 나타냈으며, 표준화 절편과 프랙탈 차원의 곱(D*K_d/log(L_H))과는 R²=0.98의 상관성을 보여 절편과 프랙탈 차원의 곱의 형태가 JRC와 가장 상관도가

높았다(Fig 12). 이는 거칠기 정도와 상관성이 있는 두 파라미터를 서로 곱하거나 합하였을 때는 그 특성이 더욱 증폭되고 오차의 경우 상쇄되는 효과가 있기 때문으로 판단된다. 식(9)는 상관관계 분석을 통해 얻어진 프랙탈 차원, 절편과 JRC와의 새로운 관계식이다.

$$JRC = \frac{-143.73}{1 + e^{((K_d / \log(L_H)) \cdot D) - 0.9884}} + 19.62 \quad (9)$$

Lee et al.(1990)과 Wakabayashi and Fukushimae (1995) 역시 식(10), 식(11)과 같이 프랙탈 차원을 이용하여 JRC를 결정할 수 있는 관계식을 발표한 바 있다.

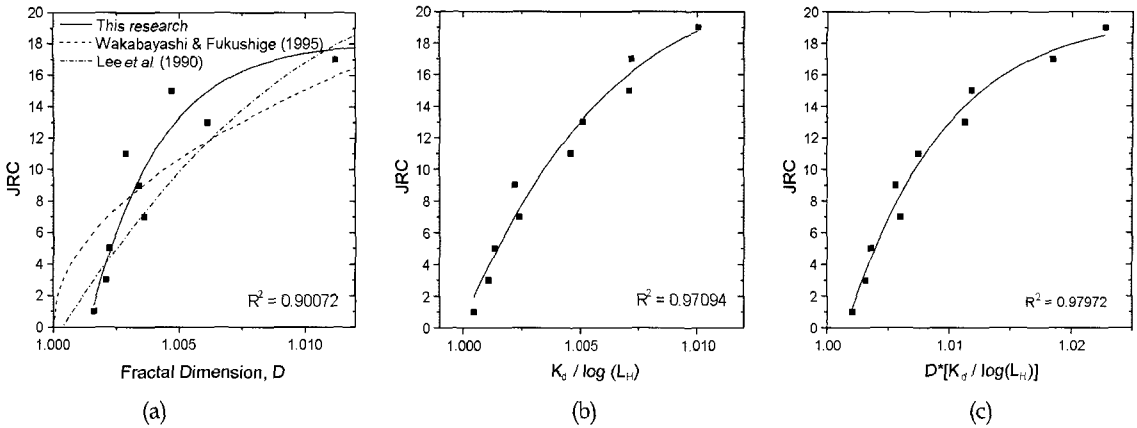
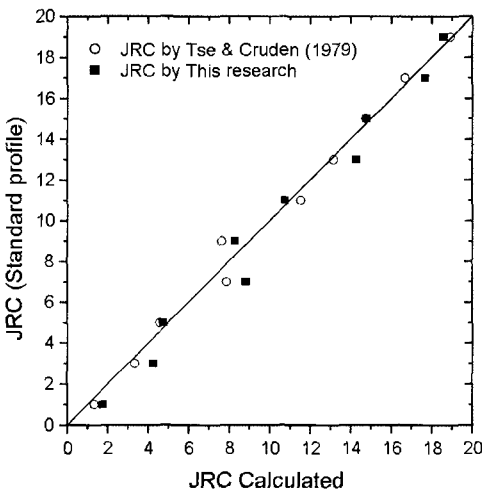


Fig. 13. Relations between JRC and D, $K_d/\log(L_H)$ and $D*K_d/\log(L_H)$ for standard profile.
 (a) JRC - D, (b) JRC - $K_d/\log(L_H)$ (c) JRC - $D*K_d/\log(L_H)$



Standard profile JRC range	JRC (Tse and Cruden)	JRC (This research)
0~2	1.33	1.75
2~4	3.32	4.22
4~6	4.58	4.73
6~8	7.86	8.82
8~10	7.62	8.26
10~12	11.54	10.76
12~14	13.15	14.27
14~16	14.74	14.75
16~18	16.69	17.69
18~20	18.92	18.57

Fig. 14. Comparison of JRC by Tse and Cruden and this research for standard profiles.

그러나 Fig. 13를 보면 식(10), 식(11) 관계식 보다는 본 연구결과(식(9))가 JRC와 더 좋은 상관도를 보이고 있다.

$$JRC = -0.87804 + 37.7844 \left(\frac{D-1}{0.015} \right) - 16.9304 \left(\frac{D-1}{0.015} \right)^2 \quad (10)$$

$$JRC = \sqrt{\frac{D-1}{4.413 \times 10^{-5}}} \quad (11)$$

앞서 언급한 바와 같이 Tse and Cruden(1979)에 제

시한 Z_2 를 이용한 JRC 관계식은 JRC와 높은 상관도를 보인다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서 도출된 JRC 관계식(식(9))과 Tse and Cruden(1979)의 관계식을 이용하여 표준 거칠기 단면의 JRC를 계산하고 이를 비교 분석하였다(Fig. 14). 본 연구에서 계산된 JRC는 JRC 10-12 단면을 제외한 모든 단면에서 Tse and Cruden(1979)의 관계식 보다 다소 높은 값을 나타냈다. 또한 Tse and Cruden(1979)의 관계식으로 계산된 JRC의 경우 JRC 8-10 단면에서 7.62 값을 보여 실제 JRC 범위를 벗어났고 본 연구에서 계산된 JRC는 JRC 2-4, JRC 6-8, JRC 12-14에서 실제 JRC 범위보다 약간

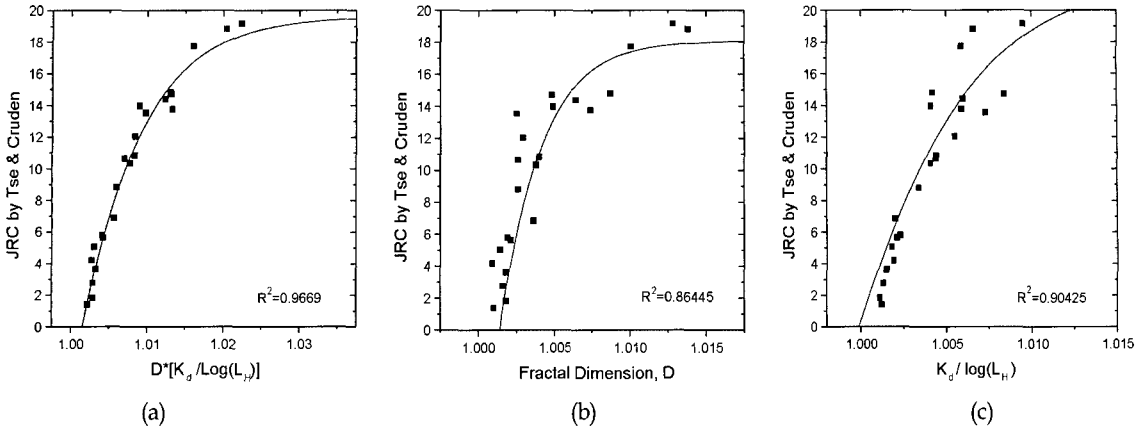


Fig. 15. Relations between JRC and D, $K_d/\log(L_H)$ and $D*K_d/\log(L_H)$ for natural rock joint.
 (a) JRC - D, (b) JRC - $K_d/\log(L_H)$ (c) JRC - $D*K_d/\log(L_H)$

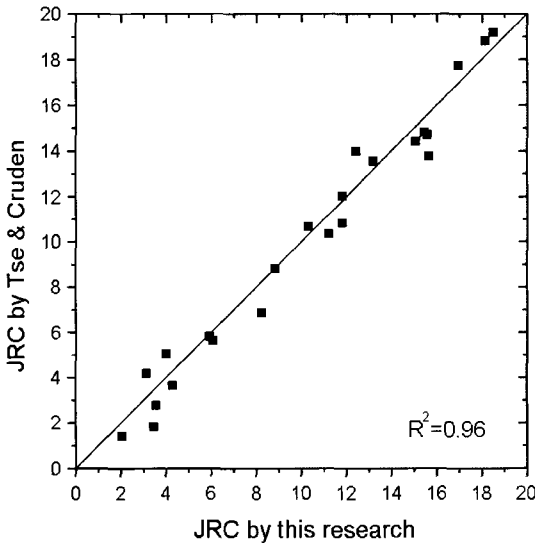


Fig. 16. JRC calculated by Tse and Cruden and this research for natural rock joints.

높은 값이 나왔으나 그 오차는 매우 작은 편이다. Fig. 14의 그래프를 보면 본 연구에서 계산된 JRC와 Tse and Cruden(1979)의 관계식으로 계산된 JRC는 실제 JRC와 전반적으로 유사함을 알 수 있다.

자연 암석절리의 프랙탈 분석 및 JRC 정량화

23개의 자연 암석절리를 대상으로 표준 거칠기 단면과 동일한 방법으로 프랙탈 분석을 실시하였다. 자

연 암석절리의 경우 표준 거칠기 단면과는 달리 JRC를 모르기 때문에 프랙탈 분석을 실시하기 전에 Z_2 파라미터를 계산하고 Tse and Cruden(1979)의 관계식으로 이용하여 JRC를 구하였으며, 이를 본 연구에서 도출된 식(9)를 이용하여 계산한 JRC와 비교하였다.

Fig. 15는 자연 암석절리 단면의 프랙탈 분석 결과이다. 자연절리에서도 표준화 절편($K_d/\log(L_H)$)이 프랙탈 차원(D)보다 JRC와 상관성이 더 높았으며, 표준화 절편과 프랙탈 차원을 곱한 형태($D*K_d/\log(L_H)$)가 $R^2=0.967$ 로서 JRC와의 가장 높은 상관도를 보였다. 이러한 결과는 표준 거칠기 단면에 대한 분석결과와 일치한다.

Fig. 16는 Tse and Cruden(1979)의 관계식으로 계산된 JRC와 본 연구에서 계산한 JRC를 비교한 그래프이다. JRC 값들은 두 JRC가 완벽하게 같을 때를 의미하는 대각선을 중심으로 높은 상관도($R^2=0.96$)를 보이며 약간 분산된 형태로 분포하고 있다. 본 연구에서 계산한 JRC는 Tse and Cruden(1979)의 관계식으로 계산된 JRC와 비교해 볼 때 큰 값이 9개, 작은 값이 12개, 거의 유사한 값이 2개이다. 그러나 대체적으로 두 JRC의 차이는 매우 적으며, 이는 본 연구 결과에서 도출된 JRC 관계식이 JRC를 계산하는데 효과적임을 나타낸다.

결론

본 연구에서는 JRC의 정량적인 측정을 위해 수정 분할자법을 사용하여 프랙탈 분석을 실시하였다. 분석에는 0.1mm 간격으로 수치화된 10개의 표준 거칠기

기 단면과 23개의 자연 암석절리 단면이 사용되었다. 표준 거칠기 단면을 대상으로 정확한 프랙탈 차원을 구할 수 있는 교차거리(crossover length)를 분석한 결과 교차거리는 0.3~2.4mm 내외였다. 따라서 프랙탈 분석에 적용된 분할자의 길이는 교차거리 내에서 6단계(0.3, 0.6, 0.8, 1.2, 1.6, 2.4mm)로 설정하였으며, 수정 분할자법을 이용하여 표준 거칠기 단면의 프랙탈 차원과 절편을 계산하였다. 계산된 프랙탈 차원과 절편을 표준 거칠기 단면에서 제시된 JRC와 비교분석한 결과 JRC는 프랙탈 차원보다 절편과 더 좋은 상관도를 보였으며 프랙탈 차원과 절편을 곱한 형태에서 가장 좋은 상관도를 보였다. 또한 상관관계 분석을 통해 프랙탈 차원과 절편을 이용하여 JRC를 결정할 수 있는 새로운 관계식을 도출하였다. 23개의 자연 암석절리에 대하여 새로운 관계식을 이용하여 JRC를 계산하고 이를 Tse and Cruden(1979)의 관계식으로 계산된 JRC와 비교한 결과 두 JRC는 거의 같은 값을 보였다. 따라서 본 연구에서 도출된 새로운 관계식은 JRC를 계산하는데 효과적임을 지시하고 있으며, Z_2 파라미터를 이용한 JRC 추정식은 샘플링 간격에 매우 큰 영향을 받는 것으로 보고되어 조사자에 따라 다른 결과를 나타낼 수 있으나, 수정 분할자 법을 이용한 JRC 추정식은 샘플링 간격에 영향을 받지 않으므로 Tse and Cruden(1979)의 관계식보다 더욱 정확한 JRC를 계산할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2001년도 강원대학교 기성회교수국외과견연구 지원에 의하여 연구되었다.

참고문헌

- (주)사이버출판사, 2001, 퍼펙트 한글코렐드로우 8, pp. 114~181.
- 이상돈, 1996, 절리형상의 정량적 측정을 통한 각종 거칠기 파라미터의 비교분석 및 진단거동 해석, 서울대학교 박사학위 논문, pp. 1~90.
- Barton, N. and Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics*. 10: 1-54.
- Berry, M. V. and Lewis, Z. V. 1980. On the Weierstrass-Mandelbroit fractal function. *Proc. of the Royal society of London, Ser. A*.370: 459-484.
- Brown, S. R., 1987. A note on the description of surface roughness using fractal dimension, *Geophysical Research Letters*. 14(11): 1095-1098.
- Feder, J. 1988. *Fractals*, Plenum Press, New York, 283.
- Krahn, J. and Morgenstern, N. R., 1979. The ultimate frictional resistance of rock discontinuities. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 16: 127-133.
- Kulatilake, P. H. S. W., Shou, G. Huang, T. H. and Morgan, R. M., 1995. New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 32(7): 673-697.
- Kulatilake, P. H. S. W., Um, J., and Pan, G., 1997. Requirements for accurate estimation of fractal parameters for self-affine roughness profiles using the line scaling method. *Rock Mech. Rock Engng. Springer-Verlag*. 30(4): 181-206.
- Lee, Y. H., Carr, J. R., Barr, D. J., and Hass, C. J., 1990. The fractal dimension as a measure of roughness of rock discontinuity profile. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 27(6): 453-464.
- Malinverno, A. 1990. A simple method to estimate the fractal dimension of a self affine series. *J. Geophys. Res. Lett.* 7: 1953-1956.
- Miller, 5. M., McWilliams, P. C. and Kerkering J. C., 1990, Ambiguities in estimating fractal dimensions of rock fractal surfaces, *proceedings, Rock Mechanics Contribution and Challenges*, eds: Hustruid & Johnson pp. 147~478.
- Myers, N. O., 1962. Characteristics of surface roughness. *Wear*. 5: 182~189.
- Orey, S. 1970. Gaussian Sample Fuction and Housdorff Dimension of Level Crossing. x. *Wahrshenikeits theorie verw. Gebierte* 15: 249-256.
- Seidel, J. P., Haberfield, C. M., 1995, Towards and Under-standing of Joint Roughness, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, springer-Verlag, 28.2, pp. 69-92
- Tse, R. and Cruden, D. M., 1979. Estimating joint roughness coefficients, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 16: 303-307.
- Turk, N., Gerd, M. J., Dearman, W. R. and Amin, F. F., 1987, Characterization of rock joint surfaces by fractal dimension, *proc. 28th U.S. Symp. on Rock*

- Mechanics, Tucson, Balkema, Rotterdam, 1223-1236.
- Wakabayashi, N. and Fukushige, I., 1995. Experimental study on the Relation between fractal dimension and shear strength. Fractured and jointed Rock Masses, Myer, Cook, Goodman & Tsang (eds). Balkema. Rotterdam, ISBN 9054105917: 125-131.
- Wu, T. H. and Ali, E. M. 1978. Statistical Representation of the joint roughness. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 15: 259-262.

투 고 일	2005년 8월 23일
심 사 일	2005년 8월 24일
심사완료일	2005년 9월 15일

장현식
강원대학교 자연과학대학 지구물리학과
200-701 강원도 춘천시 효자2동 192번지
Tel : 033-244-9275
e-mail : whitenull@kangwon.ac.kr

장보안
강원대학교 자연과학대학 지구물리학과
200-701 강원도 춘천시 효자2동 192번지
Tel : 033-250-8583
E-mail : bajang@kangwon.ac.kr

김 열
한국도로공사 도로교통기술원 사면유지관리연구센터
445-812 경기도 화성시 동탄면 산척리 50-5
Tel : 031-371-3212
E-mail : ranian78@hanmail.net