

암석의 절리면 거칠기 정량화 기법 개발을 통한 절리면 전단강도 특성 분석

Analysis of the Rock Joint Strength Characteristics Using New Rock Joint Roughness Quantification Method

이 인 모* ¹	Lee, In-Mo	홍 은 수* ²	Hong, Eun-Soo
배 석 일* ³	Bae, Seok-Il	이 석 원* ⁴	Lee, Seok-Won

Abstract

This paper introduces the surface roughness parameter, R_s to the characterization of joint roughness and quantitatively illustrates the influence of joint roughness on the joint shear strength. A new peak shear strength criterion for rock joints using R_s is suggested. The results show that the surface roughness parameter, R_s can appropriately reflect the degree of roughness for the rock joint surfaces tested in this study. A measuring interval of 2mm and profile length of 5cm can be used to characterize the joint roughness of the rock core size surfaces; however, the scale of fluctuation, δ_w should be considered to extend the surface roughness parameter, R_s to the large-scale field rock joint surfaces. For the smooth joint roughness, sliding of the rock cores is the principal shear mechanism; however, the breakage of roughness from the rock cores is inferred for rougher joint roughness.

요 지

본 연구에서는 절리면 거칠기를 정량적으로 산출하기 위하여 표면 거칠기 계수, R_s 를 이용한 측정방법을 제안하고, 이를 바탕으로 절리면 거칠기가 절리면 전단강도에 미치는 영향을 제시하였다. 제시된 R_s 를 이용하여 새로운 절리면 전단강도 모델을 제안하였다. 연구 결과, 표면 거칠기 계수인 R_s 는 암반의 절리면 거칠기를 정량적으로 표현할 수 있는 유용한 방법이 될 수 있음을 알 수 있었다. R_s 에 의한 암코어 규모의 절리면 거칠기 측정에는 최대 측정간격으로 2mm, 최소 측정 길이로 5cm가 적당하나, 이를 대규모의 현장 절리면에 확대 적용하기 위해서는 변동규모(scale of fluctuation), δ_w 를 도입하여야 한다. 절리면 거칠기가 작은 경우, 전단강도는 절리면에서의 미끄러짐으로 유발되었으나, 거친 절리면에서의 전단강도는 거칠기의 일부분이 파괴됨으로 인하여 발생됨을 알 수 있었다.

Keywords : Joint roughness, Joint shear strength, Joint shear test, JRC, Surface roughness parameter

1. 서 론

암반의 절리면 전단강도에 영향을 미치는 인자들은

절리면에 작용하는 수직응력, 절리면 근처에서의 암반의 일축압축강도, 암반의 기본 마찰각, 절리면의 풍화 정도, 절리면의 거칠기 등을 들 수 있다. 이중, 절리면

*1 정회원, 고려대학교 토목환경공학과, 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Env. Engrg., Korea Univ., inmolee@korea.ac.kr)

*2 정회원, 고려대학교 토목환경공학과, 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil & Env. Engrg., Korea Univ.)

*3 펜실베이니아 주립대학교 토목환경공학과, 박사과정 (Ph. D. Candidate, Dept. of Civil & Env. Engrg., Penn State Univ.)

*4 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부, 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Civil Engrg. Div., Korea Institute of Construction Technology)

Please scroll down through this window to view the 3 profiles for JRC estimation (A, B and C). The standard profiles can be independently scrolled in the window below for comparison.

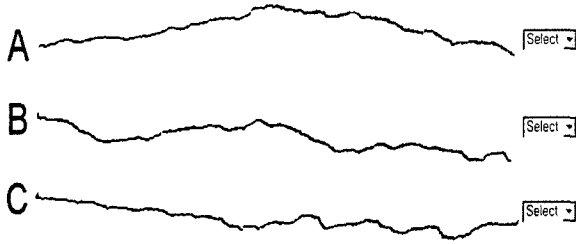


그림 1. Beer(2000)에 의해 제시된 3개의 프로파일

표 1. 3개 프로파일에 대한 산정 결과(after Beer, 2000)

프로파일	측정자 수	평균(mean)	표준 편차 (standard deviation)
A	147	10.6	2.38
B	145	13.1	2.89
C	144	13.9	4.34

거칠기에 대한 정성·정량화 작업은 많은 연구자에 의하여 수행(Tse and Cruden, 1979; Carr and Warriner, 1989; Lee et al., 1990; Maerz et al., 1990; Huang et al., 1992)되고 또한 각각의 연구목적에 맞게 사용되어 왔다. 그러나 현재까지 측정자 오차를 완전히 배제할 수 있는 정량화된 측정방법 및 절리면 거칠기 계수가 제시되지 못하고 있고, 일반적으로 많은 문제점이 제시됨에도 불구하고 Barton(1976)이 제안한 절리거칠기계수(Joint Roughness Coefficient), JRC를 사용하여 절리면 거칠기 정도를 표현하고 이를 절리면 전단강도의 산정에 사용하여 왔다. Beer(2000)는 그림 1과 같이 그의 web site에 10개의 JRC 프로파일과 함께 3개의 프로파일을 제시한 후, 홈페이지 방문자들에게 JRC 방법을 사용하여 절리면 거칠기를 산정하도록 제안하였다. 표 1은 3개 프로파일에 대한 전체 결과를 보여주고 있으며, 그림 2는 그중 가장 높은 표준편차를 보이고 있는 프로파일 C에 대한 분포도(frequency histogram)를 보여주고 있다. 설문조사 결과, JRC는 전술한 바와 같이 측정자의 주관에 의하여 결정됨을 알 수 있다.

본 연구에서는 우선적으로 지오멤브레인에 적용하여 거칠기 계수로 적용성을 검증 받은 표면 거칠기 계수(surface roughness parameter), R_s (Gokhale and Drury 1990; Gokhale and Underwood, 1990; Dove and Frost, 1996; Lee et al., 1998)를 이용하여 절리면 거칠기를 간편하며 측정오차를 최소화할 수 있는 측정방법을 제시하였다. 제시된 거칠기 측정방법을 이용하여 다수의 암코아, 실제 현장 절리면 및 Barton(1976)이 제시한 10개

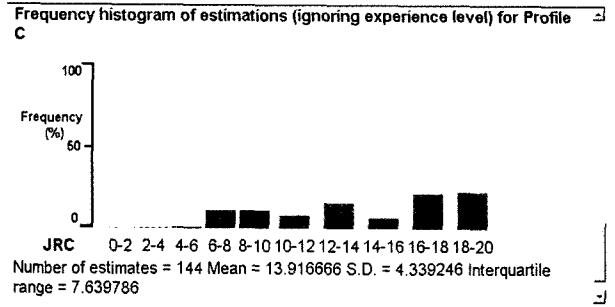


그림 2. 프로파일 C에 대한 frequency histogram(after Beer, 2000)

의 프로파일의 절리면 거칠기 값을 측정함으로써 제시된 거칠기 계수 및 측정방법의 타당성을 검토하고, 이를 확장하여 실제 현장에서 큰 규모의 절리면 거칠기 측정에 직접 적용할 수 있는 대안을 제시하였다. 이러한 거칠기 측정의 정량화를 바탕으로 하여 암석의 절리면 전단실험을 수행하여 절리면 거칠기가 절리면 전단강도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 Barton(1976)이 제시한 암석의 절리면 전단강도 모델에 JRC 값 대신 R_s 값을 적용한 새로운 절리면 전단강도 모델을 제시하였다.

2. 기존의 절리면 거칠기 계수

Tse와 Cruden(1979)은 경사파라미터(1차미분의 제곱 평균 지승근의 값), Z_2 와 구조함수(structure function), SF를 포함하여 총 8개의 거칠기 계수를 사용하여 Barton(1976)이 제시한 10개의 프로파일을 대상으로 거칠기 값을 산정하였다. 연구 결과, Z_2 와 SF가 JRC와 비교적 상관성이 높으며, 따라서 JRC의 정성적인 오차를 없애기 위하여 다음과 같은 관계식을 제안하였다.

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

$$JRC = 37.28 + 16.58 \log(SF) \quad (2)$$

Maerz 등(1990)은 암석의 절리면 거칠기 측정 장비(shadow profilometry)와 기법의 개발(photoanalysis)을 통하여 거칠기를 측정하였으며, 거칠기 계수로는 거칠기 형상지수(roughness profile index), R_p 를 사용하였다. 연구 결과, R_p 는 JRC와 상당히 좋은 상관성을 보이며, 따라서 다음과 같은 관계식을 제시하였다.

$$JRC = 401 \times (R_p - 1) \quad (3)$$

또한, 표면 거칠기 측정을 위하여 많은 연구자들은 프랙탈 차원(fractal dimension)을 도입하였다(Carr, 1989; Carr

and Warriner, 1989; Lee et al., 1990; Huang et al., 1992). 예를 들어, Huang 등(1992)은 프랙탈 차원을 invariant scaling parameter로 사용하여 연구하여 본 결과, 암석 절리면 거칠기 측정에 단독적으로는 사용하기 어려우나 다른 거칠기 계수와 병행하여 프랙탈 차원을 도입할 수 있음을 제안하였다.

3. 절리면 거칠기의 정량화

3.1 절리면 거칠기의 측정 방법

본 연구에서는 암석의 절리면 거칠기 정도를 측정하기 위하여 그림 3에서 보인 바와 같이 120° 간격을 이루는 3개의 프로파일에서 거칠기 값을 산정하였다. 제시된 3개의 프로파일 위치에서 0.5mm의 정밀도를 갖는 프로파일 게이지를 사용하여 형상을 측정한 다음, 얻어진 절리면 프로파일을 300dpi(dot-per-inch) 해상도의 스캐너로 주사(scan)하여 이미지 파일로 전환한 후 컴퓨터에 저장하였다. 저장된 이미지 파일을 UN-SCAN-IT version 5.0 프로그램(Silk Scientific Corporation, USA)을 사용하여 (x, y) ASCII 데이터로 수치화 한 후 이 좌표 값을 가지

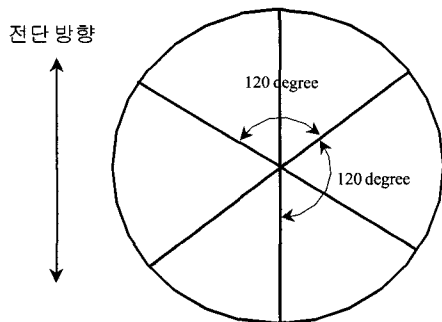


그림 3. 거칠기 측정을 위한 프로파일의 위치 및 방향

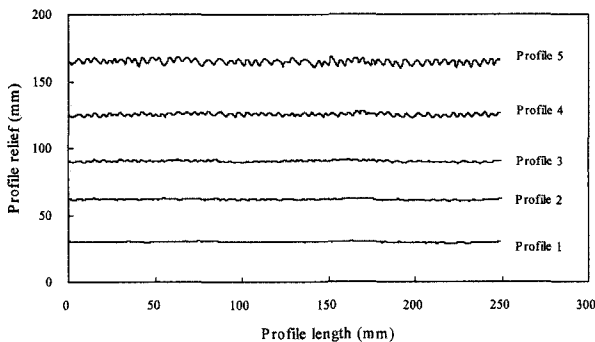


그림 4. 규칙적인 프로파일

고 절리면 거칠기 값의 산정에 사용하였다.

이렇게 측정된 절리면 형상을 정량화 할 수 있는 계수들은 현재까지 상당히 많이 제안되었으나, 본 연구에서는 Gokhale and Underwood(1990)와 Gokhale and Drury(1990)에 의해서 처음으로 소개된 표면 거칠기 계수(surface roughness parameter), R_s 를 사용하였다. R_s 는 3차원적인 거칠기 계수로서 식 (4)에서 보인바와 같이 실제 면적과 투영된 면적사이의 비율로 정의된다.

$$R_s = \frac{A_s}{A_0} \quad (4)$$

여기에서, A_s = 실제 표면의 면적

A_0 = 실제 표면이 투영되었을 때의 면적

3.2 측정간격과 측정길이의 결정

R_s 를 절리면 거칠기에 적용하기 위해서는 절리면이 가질 수 있는 최대와 최소의 거칠기 범위 내에서 각각의 거칠기를 정량적으로 잘 나타낼 수 있는 측정간격과 절리면이 가지는 굴곡도(waviness)를 고려한 측정길이를 먼저 규명하여야 한다. 여기에서, 측정간격이라 함은 프로파일을 직선으로 간주할 수 있는 최대 길이를 의미하며 일반적으로 측정간격이 작아질수록 절리면 거칠기 측정값은 커지게 된다. 따라서, 실제 절리면의 거칠기가 변화할 수 있는 범위에서 각각을 정확히 구분할 수 있는 측정간격을 우선 결정하는 것은 매우 중요한 일이다. 측정길이 역시 중요한 결정 요소로써, 일반적으로 절리면 거칠기 값이 변화하지 않도록 측정하기 위한 최소 측정길이를 의미한다. 즉, 규정된 측정길이 이상에서의 거칠기 측정은 거의 동일함을 의미한다.

여러 가지 문헌들을 참조하고 자연 암반 절리면의 형

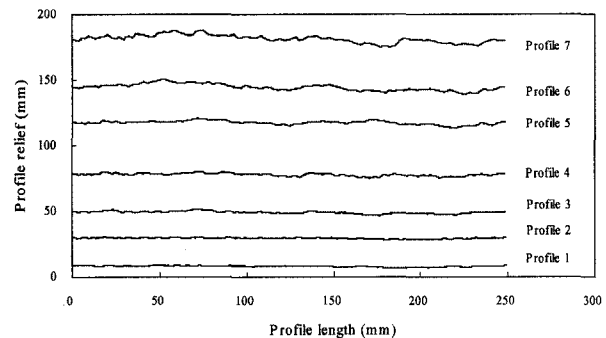
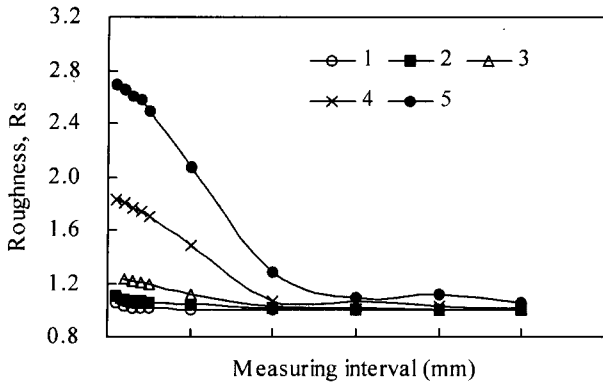
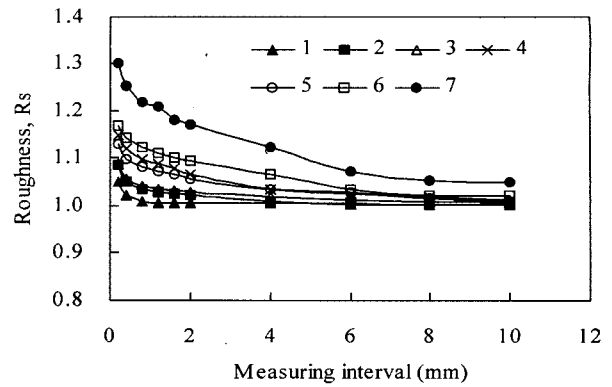


그림 5. 불규칙적인 프로파일



(a) 규칙적인 프로파일



(b) 불규칙적인 프로파일

그림 6. 측정간격 변화에 따른 RS 값

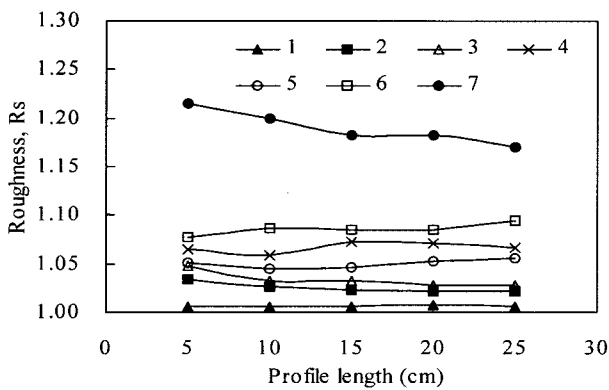


그림 7. 측정길이 변화에 따른 Rs 값

상과 범위를 고려하여 그림 4와 같이 규칙적인 표면 형상 그리고 그림 5와 같이 불규칙적인 표면 형상을 가진 프로파일들을 인위적으로 제작한 후 이를 바탕으로 측정간격과 측정길이를 구해보았다. 두 가지 프로파일 모두 측정간격은 0.1~10mm에 대해서, 측정길이는 5~25cm에 대해서 각각 검토해 보았다. 그림 6(a)는 프로파일 측정길이를 25cm로 고정하고 다양한 측정간격에 따른 Rs의 변화를 규칙적인 프로파일에 대해서 구해본 결과이고, 그림 6(b)는 같은 조건에서 불규칙적인 프로파일에 대한 결과이다. 그림 6(a)와 (b)를 살펴보면 측정간격 2mm가 각각의 프로파일을 충분히 구분시켜주는 최대 측정간격으로 볼 수 있다. 물론 2mm 이하의 측정간격에서 더 좋은 결과를 보여줄 수 있으나, 일반적으로 암반의 절리면 프로파일을 얻을 경우 프로파일 측정기를 이용하게 되는데, 프로파일 측정기의 정밀도가 약 1mm 정도이므로 이를 고려하여 2mm를 암반의 절리면 거칠기에 적용하는 측정간격으로 정하였다. 이외에도 5~20cm의 프로파일 측정길이에 대해서도 각각의 측정

간격을 적용시켜 보았고 그 결과는 그림 6과 비슷한 경향이였다. 다음으로 규명해야 하는 것이 측정길이이다. 그림 7은 불규칙한 프로파일을 측정간격 2.0mm로 고정 한 후 5~25cm의 프로파일 측정길이에 대해서 Rs를 구한 결과이다. 주어진 범위의 프로파일 측정길이에서는 Rs 값의 변화가 거의 없는 것을 볼 수 있고, 따라서 본 연구에서는 최소 측정길이를 5cm로 결정하였다.

3.3 절리면 거칠기의 측정 결과

앞에서 규명한 2mm의 측정간격과 5cm의 측정길이를 본 연구에서는 우선적으로 암코아의 절리면 거칠기 측정에 적용시켜서 거칠기 값을 산정하여 보았다. 암코아의 직경은 54mm이므로 측정길이를 만족시켰다. 모두 29개의 암코아에서 거칠기를 측정하여본 결과 Rs는 약 1.01~1.08 사이의 값에서 측정되었다. 따라서 거칠기를 구분하기 위해서는 최소 소수점 이하 둘째 자리까지가 요구됨을 알 수 있다.

또한 본 연구에서는 실제 현장에서의 절리면에 대해서 같은 측정방법으로 Rs 적용을 검토해 보았다. 현장 절리는 평창동에서 9개, 홍제동에서 5개 그리고 안암동에서 5개의 프로파일을 채취하였다. 앞에서 구한 측정간격 및 측정길이는 인위적으로 형성된 프로파일에 대하여 구한 결과이고, 따라서 실제 현장의 절리에도 적용될 수 있는지를 규명하기 위하여 앞의 그림 7과 유사한 형태의 자연 절리면에 대한 그래프를 그림 8에 보여주고 있다. 모든 절리면 거칠기의 측정간격은 2mm이었다. 비록 현장 절리면의 경우 인위적인 프로파일에 비하여 최소 측정길이인 5cm를 넘어도 약간의 변화가 있으나,

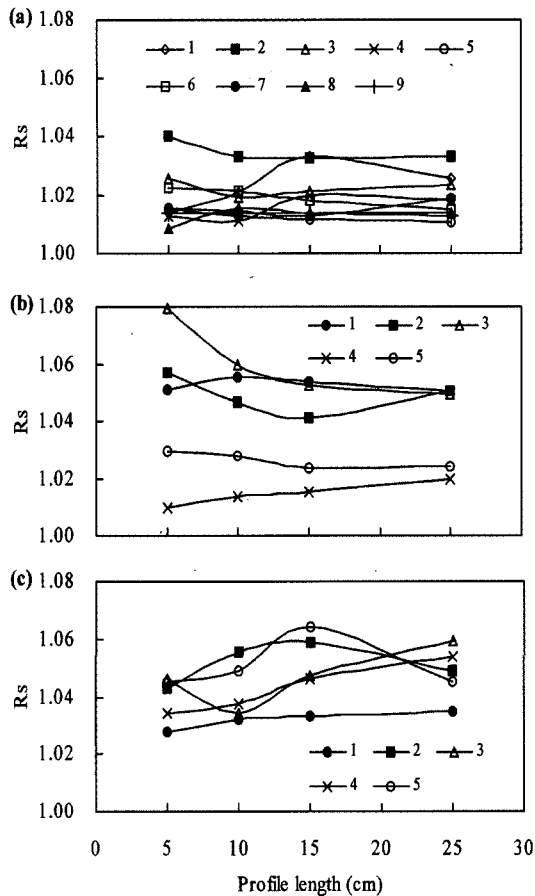


그림 8. 실제 현장절리에 대한 측정 결과, (a) 평창동, (b) 홍제동, (c) 인암동

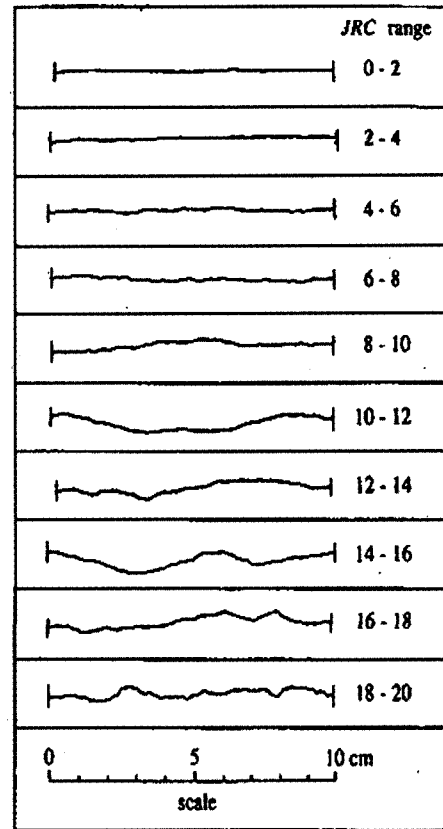


그림 9. Barton(1976)이 제시한 JRC

본 연구에서 제안하는 방법에 의하면 한 개의 거칠기 측정값은 3개의 다른 프로파일의 평균으로 구하여지고 따라서 최소 측정길이를 5cm라 규정하여도 실제 거칠기 값은 15cm에서 구하여지므로 앞에서 규정한 측정간격 2mm와 측정길이 5cm는 현장 절리면에도 적용이 가능하며, 따라서 절리면 거칠기 측정에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 Barton의 JRC 프로파일에 대한 R_s 의 적용

Barton(1976)이 제시한 JRC는 0~20 범위의 값을 갖는 거칠기의 미끄러짐 규모(sliding scale)이다(Barton and Choubey, 1977). 하지만 JRC는 2차원적인 프로파일만을 표현할 수 있고 정성적이므로 시각적으로 그 값을 판단할 수밖에 없는데, 판단하는 사람의 기술적 숙련도 및 경험에 따라서 값의 차이가 클 수 있다. 또한, 굴곡도와 작은 거칠기(roughness)와의 차이를 구분하지 못하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 JRC의 문제점은 거칠기의

미끄러짐 정도를 수치적으로 표현하는 것에 대한 것이 아니라 JRC를 얻는 과정에 관한 것이라고 볼 수 있다.

본 연구에서는 3차원의 정량적인 계수인 R_s 를 사용하여 인위적인 프로파일, 암코아 절리면 프로파일, 그리고 현장 절리 프로파일에 대하여 거칠기 값의 변화를 측정하고 적합한 측정간격 및 측정길이를 제시하였다. 비록 충분한 거칠기 측정이 이루어진 것으로 판단되나, 보다 객관적인 거칠기 정량화 작업을 제시하기 위하여 그림 9에서 보인 바와 같이 Barton(1976)이 제시한 10개의 JRC 프로파일에 대하여 본 연구에서 제시한 측정방법 및 R_s 를 이용하여 측정하였다.

그림 10은 10개의 프로파일에 대하여 본 연구에서 제시한 표면 거칠기 계수 R_s 와 JRC 값과의 상관성을 보여주고 있다. 여기에서 측정간격은 2mm이고, JRC 값은 Barton이 제시한 값의 범위에서 가운데 값을 선택하였다. 그림 10에서 알 수 있듯이 7번째와 8번째 프로파일 사이의 R_s 값에 커다란 차이를 보이고 있으며, 또한 8번째 프로파일의 R_s 값이 9번째의 값보다 약간 크게 산정

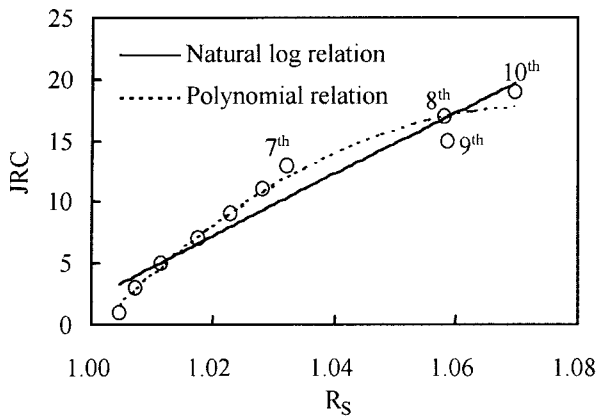


그림 10. JRC와 R_s 와의 상관관계

됨을 알 수 있다. 이것은 8번째 프로파일의 JRC 방법에 의해서 다소 과소평가 되고 있음을 제시해 준다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 8번째 프로파일은 긴 파장을 의미하는 굴곡도가 9번째 프로파일보다 크며, 9번째 프로파일은 세밀한 거칠기로 구성되어 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 제시한 거칠기 측정방법에 의하면 9번째 프로파일의 거칠기는 2mm 측정간격으로는 무시될 수 있으며, 따라서 8번째 프로파일의 거칠기가 더 큰 값으로 산정되었다. 이러한 측정결과로부터 JRC 산정방법은 굴곡도와 거칠기의 상대적인 구분을 하지 못함을 보여주고 있으며, 따라서 실제 현장의 경우 거칠기보다는 굴곡도가 실제 절리면 전단강도를 지배한다고 볼 때 본 연구에서 제안한 R_s 측정방법이 합리적이라 판단된다. 비록 R_s 역시 굴곡도와 거칠기의 구분을 명확히 제시하지는 못하지만 후술할 변동규모의 개념을 R_s 에 도입한다면 굴곡도를 고려한 R_s 값 산정이 가능하다고 판단된다.

많은 연구자들이 새로운 거칠기 파라미터를 제안하는 경우, 새로 제시하는 거칠기 파라미터의 값과 JRC 값과의 상대적인 비교를 통하여 새로운 거칠기 파라미터의 타당성을 분석하였으며, 이 논문에서도 R_s 와 JRC의 상관성을 비교하여 R_s 의 적용성을 검토해 보았다. 많은 관계식 중 자연로그와 다항식 관계를 이용하여 R_s 와 JRC의 상관성을 산정하여 본 결과를 그림 10에서 보여주고 있다. 상대적으로 10에서 16사이의 JRC 값에서 다항식 관계식이 더 좋은 상관성을 유지하나, 편의성을 고려한다면 자연로그의 관계식이 유용할 것으로 판단된다. JRC 값과 R_s 값의 관계는 아래 식 (5) 및 (6)과 같으며, 이 관계식을 사용하기 위해서는 거칠기의 변화범위,

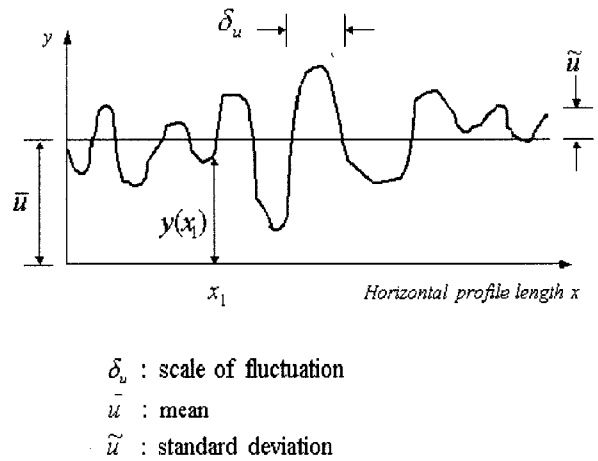


그림 11. 변동규모(scale of fluctuation), δ_u 의 개념

측정간격 등에 대한 주의가 필요하다.

$$JRC = 259.85 \times \ln(R_s) + 2.123 \quad (5)$$

$$JRC = -3394.6 \times R_s^2 + 7289.1 \times R_s - 3895.1 \quad (6)$$

3.5 변동 규모(Scale of Fluctuation)

지금까지 본 연구에서는 실제 현장의 절리면과 비교하여 상대적으로 규모가 작은 암코아에 집중하여 측정간격과 측정길이를 제시하였다. 그러나 이러한 방법은 연구적인 목적으로는 적합하나 현장 적용성에 있어서는 그 규모면에서 부적절할 수 있다. 또한, 실제 현장의 경우 거칠기보다 상대적으로 큰 파장의 굴곡도가 절리면 전단강도를 지배할 수 있으므로 본 연구에서는 실제 현장의 절리면 규모를 고려하기 위하여 통계학에서 이용되는 변동규모, δ_u (Vanmarcke, 1977)를 도입하여 암코아를 사용하여 제시된 측정간격 및 측정길이를 현장에 적용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

그림 11은 변동규모, δ_u 의 개념을 보여주고 있다. δ_u 는 어떠한 변동(fluctuation)을 나타내는 데이터들이 있을 때 이들이 평균값을 통과하는 정도를 나타낸 계수로써 R_s 측정규모를 결정하는 기본 길이라 정의할 수 있다. 실제 현장 절리면의 규모를 고려하여 굴곡도를 포함할 수 있는 측정간격과 측정길이를 추정하기 위하여 암코아의 실험결과를 사용하였다. 본 연구에서 거칠기 측정에 사용된 29개의 암코아들의 δ_u 값을 산정하여 본 결과, 평균 6.5mm를 얻을 수 있었다. 이것은 암코아 범위에서의 거칠기는 약 6.5mm 간격으로 굴곡도가 형성되었음을 의미한다. 암코아에 대한 R_s 측정간격은 2mm

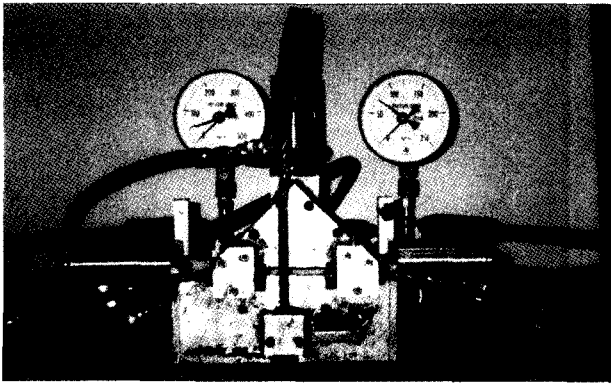


그림 12. 절리면 전단실험 장비

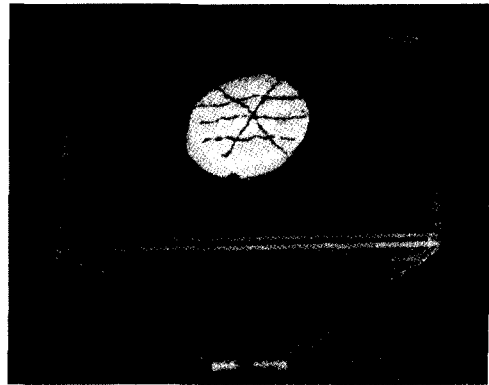


그림 13. 몰드에 성형된 암코아

로 적용되었으므로 δ_u 값이 R_s 측정간격보다 약 3배정도 크를 알 수 있고, 따라서 제시된 측정길이인 5cm는 측정간격 2mm의 25배 정도가 된다. 따라서, 큰 규모의 현장 절리에 적용하기 위하여 측정간격은 현장에서 측정된 δ_u 의 1/3 정도이고, 측정길이는 최소 측정간격($\delta_u/3$)의 25배 이상이어야 함을 유추할 수 있다. 이러한 추론으로부터 다음과 같은 관계식을 제안하고자 한다.

$$\text{현장 } R_s \text{ 측정간격} \leq \delta_u / 3 \quad (7)$$

$$\text{현장 } R_s \text{ 측정길이} \geq \frac{25}{3} \delta_u \quad (8)$$

여기에서, δ_u : 현장에서 구한 변동규모

이러한 현장조건에 따른 측정간격과 측정길이의 조정은 굴곡도가 절리면 전단강도에 중요하게 영향을 미치는 현장 절리면에 본 연구의 결과를 직접 활용할 수 있게 한다.

4. 절리면 거칠기가 절리면 전단강도에 미치는 영향

절리면 전단강도는 전술한 바와 같이 절리면 거칠기를 포함하여 여러 가지 영향인자에 의하여 지배된다. 많은 연구들이 절리면 거칠기의 증가에 따라 전단강도가 증가한다고 밝히고 있으나, 이러한 경향의 정량적인 제시 및 증가량의 규명이 제시되지 않았다. 본 연구에서는 전술한 절리면 거칠기의 정량화를 기본으로, 절리면 전단 메카니즘에 절리면 거칠기가 미치는 영향을 조사하고자 전단실험을 수행하였다. 이를 바탕으로 새로운 절리면 전단강도 모델을 제시하였다.

4.1 실험장치 및 방법

실험시료는 화강편마암이며 직경 54mm의 암코아를 사용하였다. 절리면 형성을 위하여 점하중 실험장비(point load test apparatus)를 사용하였으며, 동시에 Broch와 Franklin(1972)이 제시한 방법으로 절리면 암석강도(joint wall compressive strength), JCS를 산정하였다. 따라서 절리면의 풍화정도를 일정하게 유지할 수 있었다. 암코아의 종류는 100~200MPa 정도의 일축압축강도를 가지는 보통암 만을 선택하였다. 잔류 마찰각(residual friction angle)은 경사도 실험장비(tilt test apparatus)를 사용하여 구했으며, 27~30° 정도의 분포를 보였다. 그림 12에서 보이는 장비가(Hock and Bray, 1977) 절리면 전단실험 장비로 사용되었고, 수직응력은 0.5~4.0MPa의 범위에서 수행되었다. 암코아를 고정시키기 위해서 전단상자(shear box)에 맞는 몰드를 그림 13에서 보인 바와 같이 제작하였고 무수축 모르타르를 이용하여 암코아를 몰드에 고정시킨 후 유사 잔류강도가 측정될 때까지 ISRM 방법에 의하여 전단실험을 수행하였다.

절리면 거칠기 측정에 사용된 총 29개의 암코아로 전단실험을 수행하였다. 전단실험은 가능한 2mm/min의 변형을 유지하도록 하면서 최대 8~10mm의 변형까지 실험하였다. 실험도중 수직응력은 지정된 값을 유지하였으며, 전단하중, 전단변위 및 수직변위를 측정하였다.

4.2 실험 결과

동일한 지역에서 채취된 화강편마암 코아에 대한 직접전단시험 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

그림 14는 1.0MPa의 수직응력에서 각기 다른 절리면 거칠기를 갖는 암코아의 대표적인 전단응력-수평변위

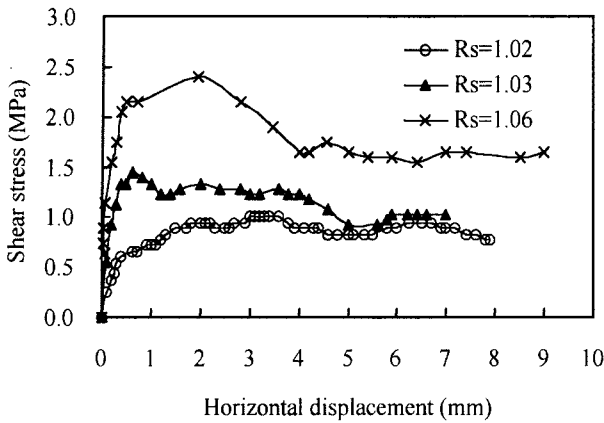


그림 14. 대표적인 전단응력-수평변위 그래프

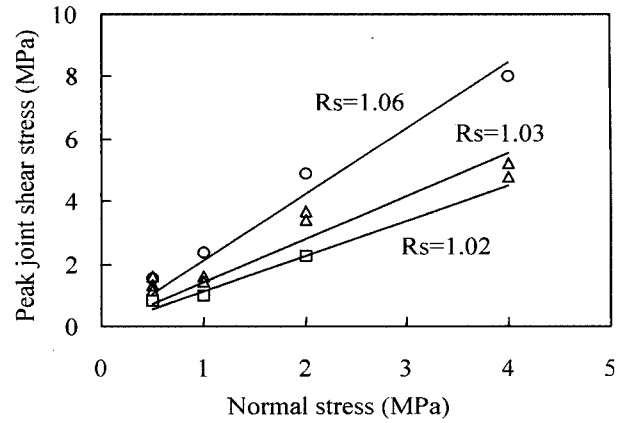


그림 15. 수직응력과 최대 전단응력과의 관계

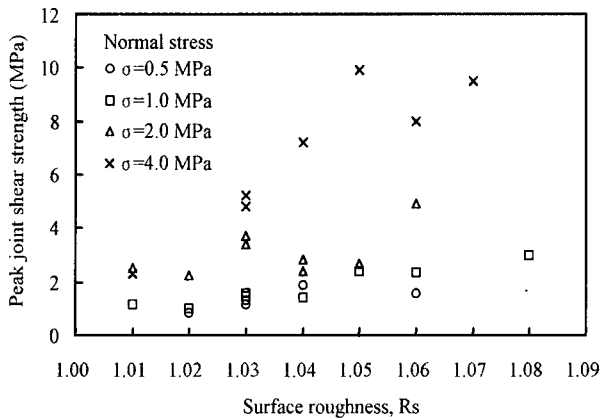


그림 16. 표면 거칠기 계수, R_s 와 최대 전단강도와의 관계

의 관계를 보여주고 있다. 예상되었듯이, 거친 표면의 암코아가 높은 최대 전단강도를 유발함을 알 수 있다. 거칠기가 작은 암코아의 경우는 실험 초기에 강도 증가와 함께 최대 전단강도에 이른 후 강도 감소 없이 잔류강도를 유지함을 알 수 있다. 그러나 거친 표면의 암코아인 경우 실험 초기의 급격한 강도 증가와 함께 최대 전단강도에 도달 후 뚜렷한 강도 감소를 보이며 한동안의 실험 후 유사 잔류강도에 도달함을 보이고 있다. 이러한 결과로부터 절리면 거칠기가 작은 경우의 전단강도는 표면에서 미끄러지는 현상으로 발생함을 추론할 수 있으며, 거칠기가 증가함에 따라 전단강도의 유발은 절리면 거칠기의 일부분이 파괴됨에 의하여 유발됨을 알 수 있다.

그림 15는 암코아에 대한 절리면 거칠기 변화에 따른 수직응력과 최대 전단응력과의 관계를 비교해 본 결과이다. 파괴선이 곡선을 이루고 있지만 편의상 선형적인 관계로 나타내었다. 절리면 거칠기의 증가에 따라 전단강도가 눈에 띄게 증가하는 것을 알 수 있었고, 이것은

표면 거칠기 계수, R_s 가 절리면 전단강도를 산정하는데 직접 적용될 수 있음을 보이고 있다.

그림 16은 수직응력이 각각 0.5, 1.0, 2.0, 4.0MPa에서 표면 거칠기 계수, R_s 와 최대 전단강도와의 관계를 보여주고 있다. 수직응력이 0.5~2.0MPa의 경우 선형적인 관계를 보여주다가, 수직응력이 4MPa 정도로 커지게 되면 약 1.04~1.05의 R_s 값에서부터 비선형적인 관계를 보임을 실험을 통하여 알 수 있었다. 실험된 보통암의 강도를 고려해 볼 때, 비선형관계가 시작되는 지점에서는 teeth breaking 현상이 일어났음을 알 수 있었다.

4.3 암석의 절리면 전단강도 모델

본 연구에서 새로운 암석의 절리면 전단강도 모델을 유도하기 위하여 식 (9)와 같이 많은 실험결과로부터 얻어지고 널리 사용되고 있는 Barton(1977)의 모델을 기본으로 이용하였다.

$$\tau_f = \sigma_n \times \tan(\phi_r + JRC \log(\frac{\sigma_d}{\sigma_n})) \quad (9)$$

여기에서, τ_f : 최대 전단강도

σ_n : 절리면 유효 연직응력

ϕ_r : 잔류마찰각

σ_d : 절리면 압축강도

새로운 관계식을 유도하기 위하여 자연로그와 다항식 관계로 구하여진 R_s 값을 식 (9)의 JRC항과 교체하였다. 그림 17과 18에 R_s 와 JRC의 관계를 각각 자연로그와 다항식 관계로 표현하였다. 여기에서 JRC는 절리면 전단실험과 물성실험에서 구한 τ_f , σ_n 그리고 σ_d 와

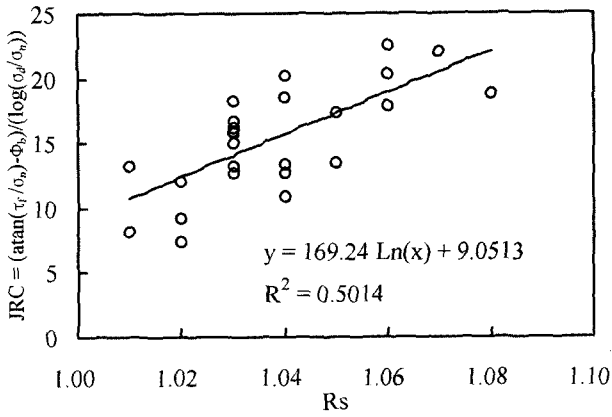


그림 17. R_s 와 JRC의 자연로그 관계

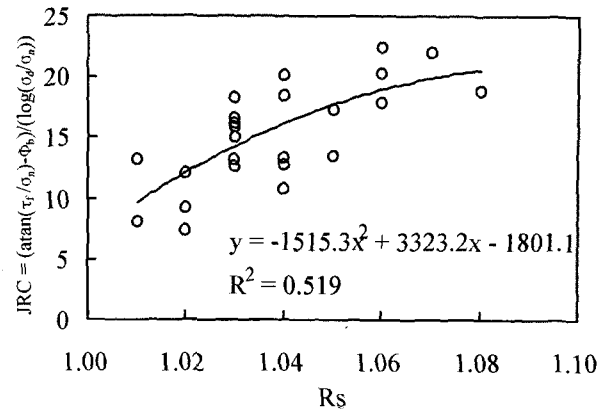


그림 18. R_s 와 JRC의 다항식 관계

틸트시험(tilt test)으로 부터 구한 ϕ_r 을 이용하여 계산된 결과이다. 아래 식 (10)과 (11)은 각각 수직응력이 0.5~4.0MPa에 해당하는 자연로그와 다항식 관계에 대한 새로운 절리면 전단강도 관계를 나타내고 있다.

$$\tau_f = \sigma_n \times \tan(\phi_r + (a \times \ln(R_s) + b) \log(\frac{\sigma_d}{\sigma_n})) \quad (10)$$

$$\tau_f = \sigma_n \times \tan(\phi_r + (c \times R_s^2 + d \times R_s + e) \log(\frac{\sigma_d}{\sigma_n})) \quad (11)$$

여기에서 a, b, c, d, e는 실험결과의 회귀분석에 의해 구해지는 상수들이다.

자연로그 관계의 경우, 거칠기 항은 다음 식 (12)와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{(\tan^{-1}(\frac{\tau_f}{\sigma_n}) - \phi_r)}{\log(\frac{\sigma_d}{\sigma_n})} = JRC = a \times \ln(R_s) + b \quad (12)$$

여기에서 왼쪽 항은 전단실험으로부터 그리고 오른쪽 항의 R_s 는 거칠기 측정으로부터 구할 수 있으며, 그림 17을 통하여 상수 a는 169.2 그리고 상수 b는 9.1임을 알 수 있다. 따라서 이러한 상수값을 식 (12)에 적용함으로써 자연로그 관계를 이용한 암석 절리면의 전단강도 식은 아래 식 (13)과 같이 제안할 수 있다.

$$\tau_f = \sigma_n \times \tan(\phi_r + (169.2 \times \ln(R_s) + 9.1) \log(\frac{\sigma_d}{\sigma_n})) \quad (13)$$

자연로그 관계와 같이 다항식 관계를 그림 18에 보여 주고 있으며, 따라서 다항식 관계를 이용한 암석 절리면

의 전단강도 식은 아래 식 (14)와 같이 제안할 수 있다.

$$\tau_f = \sigma_n \times \tan(\phi_r + (-1515.3 \times R_s^2 + 3323.2 \times R_s - 1801.1) \log(\frac{\sigma_d}{\sigma_n})) \quad (14)$$

5. 결론

본 연구에서는 절리면 거칠기를 정량적으로 산출하기 위하여 표면 거칠기 계수, R_s 를 이용한 측정방법을 제안하고, 이를 암코아, 현장 절리면, JRC 등에 적용하여 타당성을 제시하였다. 또한, 대규모의 현장 절리면에 확대 적용할 수 있는 방법으로 변동규모, δ_u 의 개념을 도입하였다. 절리면 거칠기의 정량화 및 절리면 전단실험을 통하여 절리면 거칠기가 절리면 전단강도에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 새로운 절리면 전단강도 모델을 제시하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 표면 거칠기 계수인 R_s 는 암반의 절리면 거칠기를 정량적으로 표현할 수 있음을 알 수 있었고, 본 연구에서 고려된 절리면의 경우 R_s 는 대략 1.01에서 1.08 사이에서 측정되었다.
- (2) 암코아 규모의 절리면 거칠기 측정에는 최대 측정간격으로 2mm, 최소 측정길이로 5cm가 적당하나, 이를 대규모의 현장 절리면에 확대 적용하기 위해서는 변동규모, δ_u 를 도입하여야 한다.
- (3) 절리면 거칠기가 증가함에 따라 높은 절리면 전단강도가 유발되었고, 거칠기가 작은 경우 전단강도는 절리면에서의 미끄러짐으로 유발되었으나, 거친 절

리면에서의 전단강도는 거칠기의 일부분이 파괴됨으로 인하여 발생됨을 알 수 있었다.

(4) 절리면 거칠기 측정 및 절리면 전단실험을 통하여 JRC와 Rs의 상관성을 자연 로그 및 다항식 관계로 유도한 후 이를 Barton이 제시한 절리면 전단강도 모델에 적용함으로써 새로운 전단강도 관계식을 제시하였다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2001-041-E00521).

참고 문헌

- Barton, N.(1976), "The Shear Strength of Rock and Rock Joints", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.13, pp.255-279.
- Barton, N. and Choubey, V.(1977), "The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice", *Rock Mechanics*, Vol.10, pp.1-54.
- Beer, A.J.(2000), <http://www.ex.ac.uk/~ajbeer/geomechanics/jrctest.htm>, The Camborne School of Mines, The University of Exeter in U.K.
- Broch, E., and Franklin, J.A.(1972), "The Point Load Strength Test", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.9, pp. 669-697.
- Carr, J.R.(1989), "Fractal Characterization of Joint Surface Roughness in Welded Tuff of Yucca Mountain, Nevada", *Proc. 30th U.S. Symp. Rock Mech.*, Morgantown, West Virginia, pp.193-200.
- Carr, J.R., and Warriner, J.B.(1989), "Relationship Between the Fractal Dimension and Joint Roughness Coefficient", *Bull. Assoc. Engng. Geol.*, Vol.26, pp.253-264.
- Dove, J.E., and Frost, J.D.(1996), "A Method for Measuring Geomembrane Surface Roughness", *Geosynthetics International*, Vol.3, pp.369-392.
- Gokhale, A.M., and Drury, W.J.(1990), "A General Method for Estimation of Fracture Surface Roughness: Part II. Theoretical Aspects", *Metallurgical Transactions A*, Vol.21A, pp.1193-1199.
- Gokhale, A.M., and Underwood, E.E.(1990), "A General Method for Estimation of Fracture Surface Roughness: Part I. Practical Considerations", *Metallurgical Transactions A*, Vol.21A, pp.1201-1207.
- Hoek, E., and Bray, J.W.(1977), *Rock Slope Engineering*, 3rd edition, Institution of Mining and Metallurgy, London, UK.
- Huang, S.L., Oelfke, S.M., and Speck, R.C.(1992), "Applicability of Fractal Characterization and Modelling to Rock Joint Profiles", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.29, pp.89-98.
- Lee, S.W., Frost, J.D., and Richter, G.K.(1998), "The Influence of Geomembrane Surface Roughness on Geomembrane-Geotextile Interface Strength", *Proceedings of Sixth International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, Georgia, pp.433-438.
- Lee, Y.H., Carr, J.R., Barr, D.J., and Hass, C.J.(1990), "The Fractal Dimension as a Measure of the Roughness of Rock Discontinuity Profile", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.27, pp.453-464.
- Maerz, N.H., Franklin, J.A., and Bennett, C.P.(1990), "Joint Roughness Measurement Using Shadow Profilometry", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.27, pp.329-343.
- Silk Scientific Corporation(1998), UN-SCAN-IT™ Version 5.0 User's Manual for Windows, USA.
- Tse, R., and Cruden, D.M.(1979), "Estimating Joint Roughness Coefficients", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.16, pp.303-307.
- Vanmarcke, E.H.(1977), "Probabilistic Modeling of Soil Properties", *J. Geotech. Engng. Div.*, Vol.11, pp.1227-1245.

(접수일자 2002. 3. 29, 심사완료일 2002. 6. 20)