

## 풍화작용에 따른 암반사면 안정성의 확률론적 해석

박혁진<sup>1\*</sup> · 우 익<sup>2</sup> · 엄정기<sup>3</sup>

<sup>1</sup>세종대학교 지구정보공학과, <sup>2</sup>군산대학교 해양건설공학과, <sup>3</sup>부경대학교 에너지자원공학과

## Probabilistic Analysis for Rock Slope Stability Due to Weathering Process

Hyuck-Jin Park<sup>1\*</sup>, Ik Woo<sup>2</sup> and Jeong-Gi Um<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Geoinformation Engineering, Sejong University

<sup>2</sup>Dept. of Coastal Construction Engineering, Kunsan National University

<sup>3</sup>Dept. of Energy Resources Engineering, Pukyong National University

Since weathering weakens the rock fabric and exaggerates any structural weakness, it affects mechanical properties as well as physical and chemical properties of rock. Weathering leads to a decrease in density, strength, friction angle and cohesion, and subsequently it affects negatively on the stability of rock slope. The purpose of the study is to investigate the changes of the rock slope stability caused by discontinuities which have different weathering grades. For that, the discontinuity samples which are divided into two different weathering grades are obtained from the field and tested their mechanical properties such as JCS, JRC and residual friction angle. In order to evaluate the effects on the stability of slope due to weathering, the deterministic analysis is carried out. That is, the factors of safety for planar failure are calculated for rock masses which have two different weathering grades, such as fresh and weathered rock mass. However, since the JRC and friction angle values are widely scattered and the deterministic analysis cannot consider the variation, the factors of safety cannot represent properly the stability of the rock slope. Therefore, the probabilistic analysis has been used to consider the scattered values. In the deterministic analysis, the factors of safety for the fresh discontinuity and weathered discontinuity are 1.25 and 1.0, respectively. The results indicate the fresh discontinuities are stable for planar failure and the weathered discontinuities are marginally stable. However, the probabilities of failure for the fresh discontinuity and weathered discontinuity are 25.6% and 45.9%, respectively. This shows that both discontinuities are analyzed as unstable in the probabilistic analysis.

**Key words :** weathering, JRC(Joint roughness coefficient), JCS(Joint wall compressive strength), residual friction angle, probability of failure

풍화작용은 암석의 물리적 및 화학적 특성을 변화시킬 뿐만 아니라 공학적 특성에도 영향을 미친다. 대개 풍화는 암석의 밀도 및 강도, 내부마찰각과 점착력 등을 감소시키며 이로 인해 암석으로 구성된 사면의 안정성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 풍화등급에 따른 암반 사면의 안정성을 분석하여 풍화가 사면의 안정성에 미치는 영향을 분석해 보았다. 이를 위하여 암반사면의 안정성에 가장 주요한 영향을 미치는 불연속면 시료를 풍화등급별로 채취하여 공학적인 특성의 변화를 분석하였다. 이러한 결과를 활용하여 신선한 암반으로 구성된 사면과 풍화된 암반으로 구성된 사면의 안전율을 산정하였다. 신선한 암반의 경우 안전율이 1.25로 안전한 것으로 분석되었으며 풍화된 암반의 경우 안전율이 1.0으로 계산되었다. 그러나 이렇게 산정된 안전율은 값의 분산이 심한 불연속면 거칠기 계수(JRC)와 잔류마찰각에 따라 심하게 변동되고 있어 안전율로 사면의 안정성을 정확하게 파악하기 힘든 실정이다. 따라서 본 연구에서는 불연속면 거칠기 계수(JRC)와 잔류마찰각이 일정한 범위 내에 분포한다는 점에 착안하여 확률변수로 고려하였으며 확률론적 해석을 수행하였다. 확률론적 해석 결과 신선한 암반에서의 파괴확률은 25.6%로 계산되어 매우 불안정한 것으로 파악되었으며 풍화된 암반의 경우는 45.9%의 파괴확률이 획득되었다. 현장으로부터 획득된 자료들의 분산으로 인해 결정론적 해석기법은 사면의 안정성을 평가하는 데 부적절한 것으로 판단된다.

**주요어 :** 풍화, 불연속면 거칠기 계수, 불연속면 벽면 강도, 잔류마찰각, 파괴확률

\*Corresponding author: hjpark@sejong.ac.kr

## 1. 서 론

풍화는 암석을 구성하고 있는 광물이 지구 표면 근처의 주변 환경과 평형을 이루기 위해 발생하는 반응을 의미한다. Price(1995)는 이러한 풍화과정을 공학적 관점에서 지표 근처의 지형학적 또는 공학적 환경에 노출되어 있는 토양, 암석, 암반의 순방향적 반응으로 정의하였다. 암석의 풍화과정은 기본적으로 물리적 분해(physical disintegration)과정인 물리적 풍화와 화학적 해체(chemical decomposition)과정인 화학적 풍화로 구분되는 데 이러한 과정은 암석의 조직을 약화시키고 구조적인 결함을 극대화하는 과정으로 암석의 공학적 특성을 저하시킨다. 일반적으로 물리적 풍화는 광물의 성분변화 없이 암석과 광물결정을 작은 결정으로 깨뜨려 암석을 분해하며 화학적 풍화는 광물의 성분적 특성을 변화시킨다. 대부분의 풍화는 이러한 풍화과정이 복합적으로 진행되는 과정이지만 물리적 풍화는 주로 지표면 근처에서 발생하며 화학적 풍화는 지표면에서 수십 혹은 수백 미터 아래까지도 발생하는 것으로 알려져 있다(Chorley, 1969). 이와 같은 풍화과정이 어느 위치에서 활발하게 작용할 것인가 하는 점은 주로 기후에 의해 결정된다(Price, 1995). 우리나라에서는 지표면 근처의 물리적, 화학적 과정이 선행적으로 작용하여 이후의 화학적 풍화에 필요조건이 되는 경우가 많다(Um *et al.*, 2009).

풍화의 주된 요소로는 대기, 물, 온도의 영향 등을 들 수 있다. 대기 중 암석의 풍화에 주된 영향을 주는 성분은 이산화탄소, 질소, 산소, 황산염 등이 있으며 이들은 산성비의 원인이 된다. 특히 황산염은 대부분의 암석에 가장 강력한 부식제로 작용한다. 또한 대부분의 암석은 침수와 건조과정을 반복할 경우 점진적으로 광물입자간의 결합력이 약화되어 부서지거나 균열이 발생되고, 이 균열에 물이 침투하여 결빙되면 부피팽창으로 인한 균열 내 인장력에 의해 균열이 더욱 더 크게 확장되거나 새로운 균열이 발생하게 되어 풍화가 더욱 더 진행되게 된다. 특히 우리나라는 계절의 변화가 뚜렷하여 동결융해과정에 따른 암반의 풍화가 상대적으로 많이 나타나고 있으며 환경오염에 따른 산성물질의 영향도 점점 커지고 있는 실정이다. 따라서 침수와 건조과정 또는 동결·융해과정에 따른 암석의 풍화 메커니즘과 풍화양상을 예측하는 것은 지질공학적으로 매우 중요하다.

암석의 풍화는 물리적 및 화학적 변화뿐만 아니라 지질공학적 특성 또한 변화시키며 이러한 특성의 변화

는 암반의 지질공학적 안정성과 효용성에 심각하고 부정적 영향을 미칠 수 있다. 특히 풍화는 암반의 밀도와 강도를 감소시키며 변형율을 증가시키는 것으로 알려져 있다(Bell, 2007). 또한 Price(2009)에 따르면 풍화는 암석의 밀도, 일축압축 및 인장강도, 변형계수, 슈미트해머 반발값, 내부 마찰각, 점착력을 감소시키며 공극율의 증가를 유발하는 것으로 보고되었다. 특히 우리나라는 전 국토의 2/3 이상이 산악지로 구성되어 산사태에 매우 취약하며 도로나 철도 등 사회기반시설 건설과 관련된 사면의 발달이 필연적이다. 따라서 이에 따른 노출암반의 풍화는 암반의 지질공학적 특성과 산사태 안정성에 막대한 영향을 미친다. 사면의 건설은 암반의 지질 및 수리지질 조건, 암반과 토양의 역학적 성질 그리고 허용 안전율과 구조물의 연령에 의하여 결정된다. 그런데, 구조물의 연령은 통상 수십 년의 시간이 고려되는데, 이때 문제가 되는 것은 국내의 극한 기후조건 - 여름의 열대성 기후와 겨울의 대륙성 기후 - 에 의한 암반 풍화가 암반의 역학적 특성이나 사면의 수리지질학적 특성을 변화시킬 수 있다는 것이다. 현재까지의 연구는 현재의 지질 조건이나 수리적 조건에 의존한 암반 사면의 안정성 분석이 주를 이루고 있는 반면 풍화와 관련된 암반사면의 안정성 해석에 관하여서는 관련연구의 수행이 거의 없는 편이다.

따라서 본 연구에서는 풍화가 암반사면의 안정성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 하였다. 이를 위하여 각 풍화등급별로 암석시료와 불연속면 시료를 채취하여 공학적 특성을 획득하였으며 이를 이용하여 사면의 안정성 해석을 수행하였다.

## 2. 연구지역 및 시료 채취

본 연구는 옥천지향사지대에 속하는 제천지역을 중심으로 분포하는 화강암을 중심으로 수행되었다. 주 연구 대상은 고속도로 혹은 고속철도의 건설을 위해 굴착된 사면으로 화강암이 관찰되는 사면을 중심으로 수행하였다. 제천지역에 분포하는 화강암은 흑운모 반상 화강암이 주를 이루고 있으며 이들 암석에 대하여 풍화등급에 따라 시료를 채취하고 실내실험을 통하여 암석물성을 측정하였다. 특히 본 연구에서는 풍화가 사면의 안정성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 암반사면의 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 인자인 불연속면 시료를 현장으로부터 획득하여 풍화등급별로 구분하고 특성을 분석하였다. 이를 위하여 연구지역내에 위치한 절취사면으로부터 암석 블록을 채

취하여 불연속면 시료를 획득하였다. 획득된 시료에 대하여 시료채취의 순서에 따라 시료의 번호를 부여하고 Lee *et al.*(1989)와 GSEG(1995)의 화강암 풍화 분류 방법을 기초로 하여 현장으로부터 획득한 암석의 풍화 등급을 분류하였다. 즉, 암석이 풍화를 받은 흔적이 전혀 없는 신선(Fresh, F), 절리면과 부분적으로 변색된 약한 풍화(Slightly Weathered, SW), 변색이 전체 암석에 걸쳐 발생하고 지질해머로 타격시 쉽게 부서지는 보통 풍화(Moderately Weathered, MW), 물에 침수될 경우 암석 구조가 왜해지는 심한 풍화(Highly Weathered, HW), 암반의 지질구조 흔적만 남아 있고 특성은 토양과 같은 완전 풍화(Completely Weathered, CW), 풍화를 지속적으로 받은 후 장소의 이동 없이 원래의 위치에서 토양화된 풍화잔류토(Residual Soil, RS)로 구분하였다. 특히 본 연구에서는 암반의 화학적 풍화기준, 변색정도, 슈미트해머 반발값, 지질해머에 대한 반발정도 및 반발음, 그리고 칼이나 지질해머에 의해 분리 혹은 파괴되는 양상과 미세절리 발달 상태를 기준으로 하여 풍화등급을 결정하였다. 이에 따라 현장으로부터 획득한 총 32개의 불연속면 시료를 풍화 등급에 따라 분류하였으며 획득된 32개의 불연속면 시료 중 신선(F)에서 약한 풍화(SW)의 풍화등급을 보이는 21개의 불연속면 시료를 신선한 불연속면 시료(FD)로 구분하였으며 보통 풍화(MW)에서 심한 풍화(HW)의 등급을 보이는 11개의 불연속면 시료는 풍화된 불연속면 시료(WD)로 분류하였다. 이렇게 분류된 시료에 대하여 풍화등급별 불연속면의 특성을 분석하였으며 특히 암반사면의 안정성을 분석하는 과정에서 활용한 Barton(1973)의 전단강도식(식 1)에서 사용된 파라미터, 즉 불연속면 거칠기 계수(Joint Roughness Coefficient, JRC), 불연속면 벽면 강도(Joint Wall Compression Strength, JCS), 그리고 기본마찰각(basic friction angle,  $\phi_b$ )에 대한 풍화 등급별 특성을 분석하였다.

$$\tau = \sigma_n \tan\left(\phi_b + JRC \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n}\right) \quad (1)$$

### 3. 풍화등급에 따른 불연속면의 공학적 특성

#### 3.1. Joint Roughness Coefficient(불연속면 거칠기 계수) 결정

Barton and Choubey(1977)는 10개의 표준화된 거칠기 프로파일(roughness profile)을 이용하여 0에서 20사이의 불연속면 거칠기 계수(JRC) 값을 결정하도록

제안하였다. 그러나 이러한 방식은 주로 육안비교에 의한 것으로 주관적이고 정성적인 결과를 초래하게 되는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 수평 및 수직의 디지털게이지(digital gauge)를 이용한 프로파일 미터(profile meter)를 이용하여 불연속면의 표면에 대한 거칠기를 획득하였다. 이를 위하여 각 불연속면의 표면으로부터 프로파일미터(profile meter)를 사용하여 수평 및 수직방향 변위를 획득하였고 이 값으로부터 식 (2)의 Yu and Vayssade(1991)의 방법에 의거하여 불연속면 거칠기 계수(JRC)를 획득하였다.

$$JRC_i = 95.23\sqrt{RL1} - 2.62 \quad (2)$$

이때

$$RL1 = \frac{\sum((x_{i+1}-x_i)^2 + (y_{i+1}-y_i)^2)^{1/2}}{L} - 1 \quad (3)$$

$L$ : 전체 profile 길이

$x_i, y_i$ : profile의  $i$ 번째 sampling point에서의 수평 및 수직방향 변위

각 불연속면당 4-6번의 반복 측정을 통해 4-6개의  $JRC_i$  값을 얻었고 Kulatilake *et al.*(1995)가 제안한 방법에 따라 평균을 계산하여 각 불연속면의 평균 JRC 값으로 고려하였다. 이렇게 획득된 JRC 값은 신선한 불연속면 시료(FD)의 경우 5에서 10사이의 값을 보이며 풍화된 진행된 불연속면 시료(WD)의 경우 8에서 15사이의 값을 보이고 있어 풍화된 불연속면 시료가 더 큰 값을 보이고 있다(Fig. 1). 풍화가 진행된 불연속면의 JRC 값이 신선한 불연속면의 JRC 값보다 큰 것은 풍화가 진행된 불연속면 표면에서는 풍화의 결과로 남게 된 석영 입자들이 표면을 거칠게 만들기 때문으로 보인다.

#### 3.2. Joint Wall Compressive Strength(불연속면 벽면 압축강도)

불연속면 벽면의 상태는 벽면이 충전되어 있지 않고 직접 암석끼리 접해 있는 경우 암반의 강도 및 변형 특성에 영향을 미친다(Barton and Choubey, 1976). 특히 불연속면의 벽면은 암석 내부에 비해 좀 더 빠르게 풍화가 진행되거나 열수작용에 의해 변형이 되기도 하며 이로 인해 불연속면의 벽면 압축강도와 전단강도는 암석 내부에 비해 낮은 값을 갖는다. 따라서 불연속면의 풍화정도는 불연속면 벽면 강도의 파악에 중요한 요소이며 불연속면 벽면에 대한 압축 강도, 즉

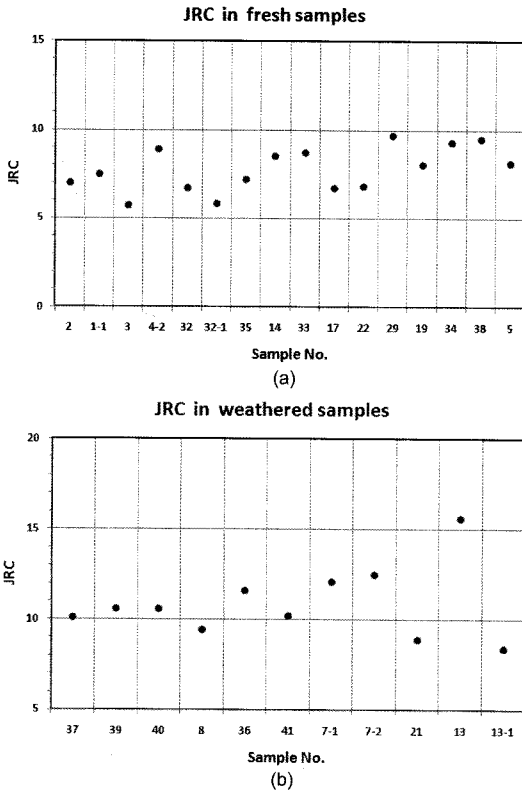


Fig. 1. Distribution of JRC in (a) fresh discontinuities and (b) weathered discontinuities.

JCS(Joint wall Compressive Strength, 불연속면 벽면 강도)에 영향을 미친다. 불연속면 벽면 강도(JCS)의 값을 얻기 위해 가장 보편적으로 사용되는 방법은 불연속면 벽면에 대한 슈미트해머 반발 시험을 통해 획득하는 방법이다. 본 연구대상 지역으로부터 슈미트해머 반발시험을 통해 획득한 신선한 불연속면 시료(FD)의 JCS는 평균 200 MPa, 풍화된 불연속면 시료(WD)의 불연속면 벽면 강도(JCS) 값은 평균 50 MPa 이다.

3.3. 직접전단시험

현장으로부터 획득한 32개의 불연속면 시료에 대하여 직접전단시험을 수행하여 불연속면의 잔류전단강도(residual shear strength)를 획득하였다. 잔류전단강도 중 잔류마찰각(residual friction angle)은 불연속면의 거칠기와 시료의 크기에 영향을 받지 않는 반면 암석의 종류와 불연속면 표면의 풍화정도에 크게 의존한다. 특히 잔류마찰각은 침투마찰각에 비해 불연속면 풍화의 영향을 크게 받는 것으로 보고되었으며 따라서 풍화정도에 따른 잔류마찰각의 획득이 풍화가 사면의 안

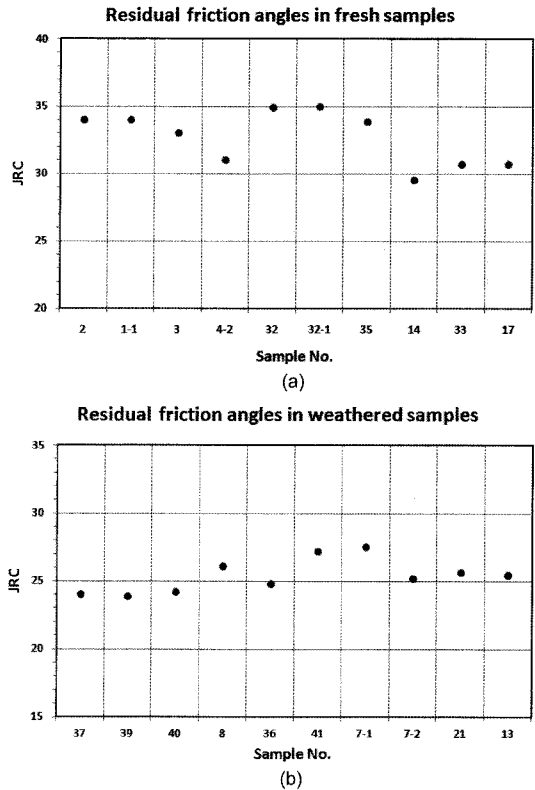


Fig. 2. Distribution of residual friction angle in (a) fresh discontinuities and (b) weathered discontinuities.

정성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 중요한 과정이라 할 수 있다. 직접전단시험의 결과 신선한 불연속면 시료(FD)의 잔류마찰각은 30도에서 35도 사이의 값을 보여주고 있으며 풍화된 불연속면 시료(WD)의 경우 24도에서 27도 사이의 값을 보여주고 있다(Fig. 2).

4. 연구대상 사면

풍화가 사면 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 연구대상 지역의 사면 한 개소를 대상으로 풍화등급 변화에 따른 사면의 안정성을 분석해 보았다. 대상 사면은 높이 30 m, 사면 경사 75도를 보이고 있으며 상부사면은 약 10도의 경사를 보이고 있다. 사면에서 파괴를 유발할 것으로 파악된 불연속면은 굴곡이 없는 평탄한 면으로 방향은 사면의 방향과 거의 평행하게 위치하고 있으며 불연속면의 경사는 56도로 평면파괴의 가능성이 있는 것으로 파악되었다. 이러한 사면을 대상으로 이전의 절에서 획득한 신선한 불연속면 시료(FD)의 강도 특성과 풍화된 불연속면 시료(WD)의 강

도 특성을 이용하여 풍화를 거의 받지 않은 사면과 풍화가 진행된 사면의 안정성을 비교해 보았다. 사면 안정성 분석을 위해 활용된 불연속면의 특성은 신선한 불연속면 시료(FD)의 경우 200 MPa의 불연속면 벽면 강도(JCS)값을 보이며 30도에서 35도사이의 범위를 갖는 잔류 마찰각과 최소 5에서 최대 10 사이의 불연속면 거칠기 계수(JRC)값을 가지는 것으로 파악되었다. 반면 풍화된 불연속면 시료(WD)의 경우 50 MPa의 불연속면 벽면 강도(JCS) 값과 최소 24도에서 최대 27도 사이의 잔류 마찰각, 그리고 8에서 15사이의 불연속면 거칠기 계수(JRC) 값을 보이는 것으로 파악되었다.

### 5. 연구대상 사면의 안정성 해석

#### 5.1. 한계평형해석의 결과

풍화에 따른 사면의 안정성 변화를 파악하기 위해 먼저 사면의 안정성을 가장 쉽게 파악할 수 있는 한계평형해석기법을 활용하여 평면파괴에 대한 사면의 안정성을 검토해 보았다. 이를 위하여 Rocscience 사의 RocPlane을 활용하였으며 불연속면의 전단강도식 중 Barton(1973)에 의해 제안된 전단강도식을 활용하여 안전율을 산정하였다. 풍화에 의한 안전율의 변화를 검

토하기 위하여 암반이 거의 풍화를 받지 않아 신선한 불연속면이 존재하는 경우와 MW에서 HW의 풍화등급을 보이는 불연속면이 파괴를 유발하는 두 가지 경우에 대하여 각각 안전율을 산정하였다.

결정론적 해석기법에 기초한 한계평형해석을 이용하여 안전율을 산정하기 위하여서는 전단강도식의 파라미터인 불연속면 벽면 강도(JCS), 불연속면 거칠기 계수(JRC) 그리고 잔류마찰각에 대하여 고정된 대표 값(deterministic representative value)이 사용되어야 한다. 그러나 현장에서 획득된 자료의 경우 불연속면 벽면 강도(JCS)만 평균값인 대표값을 가지고 있는 반면 불연속면 거칠기 계수(JRC)와 잔류마찰각의 값은 분산되어 있는 다수의 값을 갖고 있다. 즉 신선한 불연속면 시료(FD)의 경우 JRC 값이 5에서 10사이의 분포를 보이고 있어 결정론적 해석에 활용이 불가능하다. 따라서 현장으로부터 획득된 자료들의 통계분석을 통해 평균 8.3, 표준편차 2.3의 값을 획득하였고 평균값을 안전율 산정의 대표값으로 사용하였다. 또한 풍화된 불연속면(WD)의 경우 JRC값이 8에서 15사이의 값을 보이고 있으며 통계분석을 통해 평균 10.9, 표준편차 2.0을 획득하였다. 따라서 풍화된 불연속면에서는 평균값인 10.9를 대표 JRC 값으로 사용하였다. 잔류 내부마찰각의 경우에는 신선한 불연속면 시료의 경우

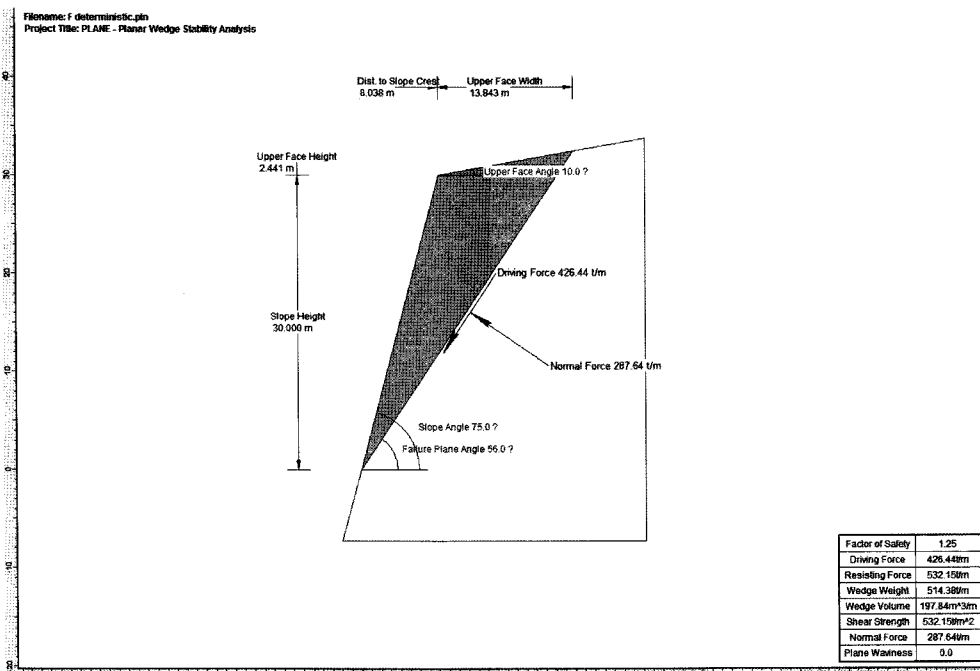


Fig. 3. Calculation of factor of safety in fresh discontinuity.

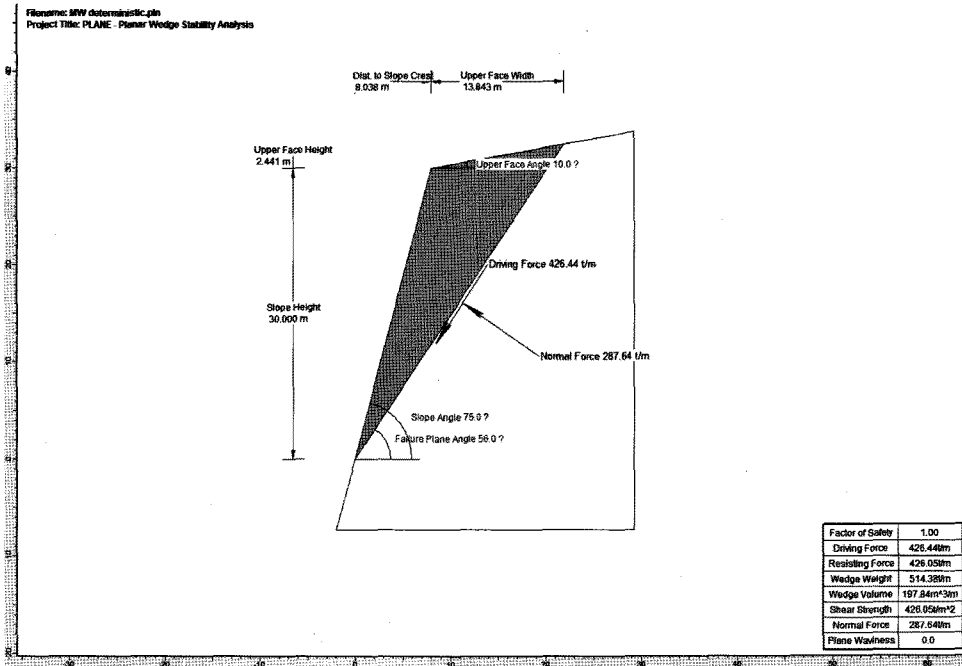


Fig. 4. Calculation of factor of safety in weathered discontinuity.

실험을 통해 획득된 자료들이 30도에서 35도 범위내에 분포하며 평균 33.1도, 표준편차 2.5를 보이고 있으며 풍화된 불연속면의 경우 24도에서 27도 범위에서 평균 25.1도와 1.2의 표준편차를 보이고 있다. 따라서 신선한 불연속면과 풍화된 불연속면의 경우 각각 33.1도와 25.1도의 값을 잔류마찰각의 대표 값으로 고려하여 안전을 산정에 사용하였다. 반면 JCS의 경우 신선한 불연속면(FD)은 슈미트헤머를 사용하여 획득한 200 MPa를, 풍화된 불연속면(WD)의 경우에는 50 MPa를 사용하였다. 이렇게 계산된 안전율은 신선한 불연속면의 경우 1.25, 풍화된 불연속면의 경우 1.00의 값을 보이고 있다(Fig. 3 and 4). 그러나 JRC 값의 경우 이미 각 불연속면 표면으로부터 4-6회의 digital profile 결과들을 평균한 값으로 이를 풍화된 불연속면의 대표 값으로 산정하기 위해 또 다시 평균화하는 것은 지나치게 불확실성이 많이 개입되는 문제를 가지게 된다. 또한 그림 6과 7의 sensitivity analysis에서도 확인할 수 있듯이 JRC의 변화나 잔류마찰각의 변화에 따라 안전율 값이 상당히 많이 변동되고 있음을 알 수 있다. 즉, FD 불연속면의 경우 내부마찰각 33.1도를 기준으로 JRC 값이 최소값인 5인 경우에서 최대값인 10으로 변화할 때 안전율이 0.81에서 1.62로 변화하는 것을 알 수 있다(Fig. 5a). 반면 평균 JRC 값인 8.3인 경우

잔류마찰각이 30도에서 35도로 변화할 때 안전율이 1.05에서 1.29로 변화하는 것을 알 수 있다(Fig. 6a). 한편 JRC 값이 6보다 작은 경우는 내부마찰각의 값과 상관없이 안전율이 1이하로 나타나 불안정한 상태를 보여주고 있다. 풍화가 진행된 WD 불연속면의 경우에는 평균 잔류마찰각 25.1도를 기준으로 JRC 값이 최소 값인 8에서 15로 변화할 때 안전율이 0.74에서 1.63으로 변화하고 있다(Fig. 5b). 또한 평균 JRC인 10.9를 기준으로 안전율을 산정할 경우에는 잔류마찰각이 24도에서 27도로 변화할 때 안전율이 1.06에서 1.06으로 변화하고 있으며 JRC 값이 10보다 작은 경우는 내부마찰각의 값과 상관없이 안전율이 1이하로 계산되었다(Fig. 6b). 앞서 살펴 본 바와 같이 잔류마찰각과 JRC의 변화는 안전율의 변화를 유발하여 사면의 안정성을 파악하기 힘들게 하고 있다. 특히 sensitivity analysis의 결과에서와 같이 JRC의 변화는 안전율의 급격한 결과를 유발하고 있다. 내부마찰각의 경우 현장으로부터 획득된 자료의 범위 내에서 변동하는 동안 즉, FD 불연속면의 경우 마찰각이 30도에서 35도로 변화할 때 안전율이 27.1% 증가한 반면, WD 불연속면의 경우 24도에서 27도로 증가하는 동안 안전율이 16.1% 증가하였다. 한편 JRC의 경우 그 값이 5에서 10으로 변화하는 동안과 8에서 15로 변화하는

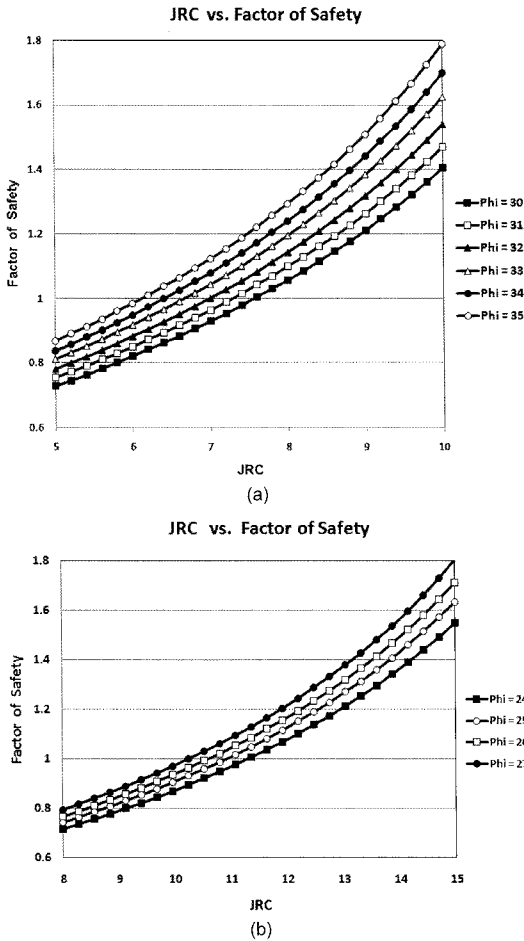


Fig. 5. Sensitivity analysis of JRC in (a) fresh discontinuities and (b) weathered discontinuities.

동안 각각 104%(FD 불연속면), 127%(WD 불연속면)의 안전율을 변화를 보이고 있다. 따라서 대표 값을 이용한 결정론적 해석방식을 통해서도 사면의 안정성을 정확하게 파악하기 힘든 실정이다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 현장에서 획득되는 자료들의 범위 내에서 변동될 수 있는 불확실성을 고려하여 안정성을 파악하기 위하여 확률론적 해석을 수행하였다. 자료의 수가 극히 제한적인 경우 확률론적 해석의 경우도 현장자료를 정확하게 반영하지 못할 수 있으나 본 논문의 경우에서와 같이 자료의 분산이 심한 경우 확률론적 해석은 자료의 분산을 정량적으로 고려할 수 있는 가장 적절한 방법이라 할 수 있다.

5.2. 확률론적 해석 결과

안전율을 획득하기 위한 결정론적 해석의 경우 앞서

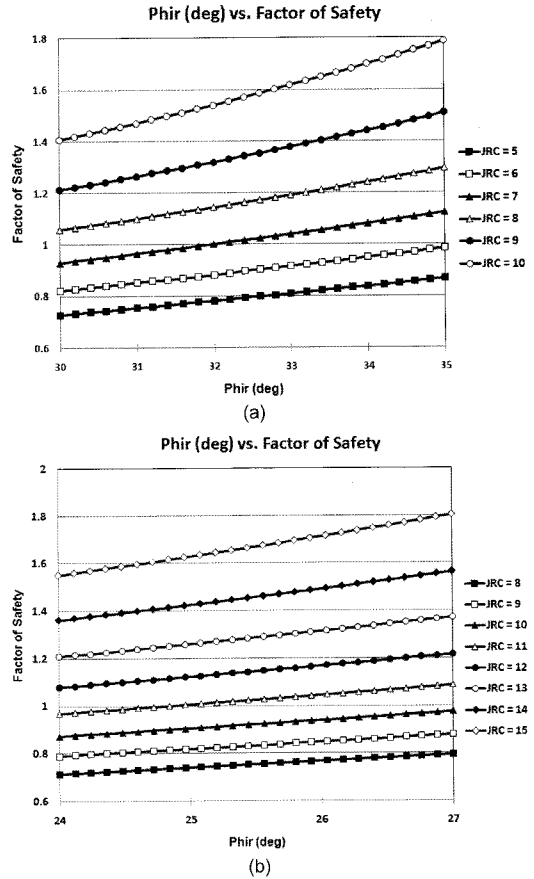


Fig. 6. Sensitivity analysis of friction angle in (a) fresh discontinuities and (b) weathered discontinuities.

살펴본 바와 같이 JRC와 잔류마찰각의 변화에 따라 안전율의 변화가 심하게 나타나고 있어 사면의 안정성을 쉽게 파악하기 어려운 실정이다. 특히 JRC의 경우 이미 각 불연속면의 JRC 값을 구하는 과정에서 4-6차례의 반복된 측정값을 평균화한 상태여서 서로 다른 불연속면의 값을 다시 평균화할 경우 이 값이 결정론적 해석에서 요구되는 각 풍화등급의 대표값으로 고려하기엔 무리가 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 JRC와 잔류마찰각의 변동을 고려하여 이 두 값을 확률변수로 간주하여 확률론적 해석을 수행하였다. FD 불연속면의 경우 JRC를 평균 8.3, 표준편차 2.3을 갖는 확률변수로 고려하였으며 확률분포함수는 정규분포함수로 선정하였다. 이는 기존의 연구들로부터 정규분포함수가 강도정수의 확률분포함수로 가장 많이 활용되었기 때문이다(Mostyn and Li, 1993; Hoek, 1998; Nilsen, 2000; park and West, 2001; Pathak and Nilsen, 2005, Park et al., 2005). 또한 현장으로

부터 획득된 JRC값이 5에서 10사이에서 변동함을 고려하여 Monte Carlo simulation을 수행할 때 그 범위 내에서만 변동되도록 제한하여 truncated normal distribution이 되도록 하였다. 한편 FD 불연속면의 마찰각은 평균 33.1도, 표준편차 1.2를 갖는 정규분포함수로 고려하였으며 30도와 35도 사이에서 변동이 되도록 제한하였다. 반면 WD 불연속면의 경우 JRC는 평균 10.9, 표준편차가 2.0인 확률변수로 고려하였으며 확률분포함수로는 8에서 15사이의 값을 가지는 truncated normal distribution으로 계산에 활용하였다. 잔류마찰각의 경우에는 25.1의 평균과 1.24의 표준편차를 갖는 확률변수로 24도에서 27도 사이의 값을 갖는 truncated normal distribution으로 고려하였다.

이렇게 제한된 확률특성을 이용하여 신선한 암반의 경우와 풍화가 진행된 암반에서의 확률론적 해석을 수행하여 각각의 경우에 대한 파괴확률을 계산하였다. 확률론적 해석과정을 수행하기 위하여서는 Monte Carlo simulation을 사용하였고 수차례의 반복 계산을 거쳐 약 10,000회 이상의 simulation에서 파괴확률이 안정되어 짐을 확인, 두 경우 모두 10,000회의 simulation을 수행하여 안전율이 1.0보다 작은 경우를 계산하여 파괴확률을 계산하였다. 이러한 과정을 통해 계산된 신선한 암반의 평면파괴에 대한 파괴확률은 25.6%로 계산되었으며 풍화된 암반의 경우 45.9%로 계산되었다(Fig. 7).

이러한 결과는 특히 신선한 불연속면 시료(FD)의 경우 획득한 결정론적 해석 결과와 큰 차이를 보이고 있다. 결정론적 해석결과 1.25의 안전율을 보이고 있어 안정한 것으로 파악되었으나 파괴확률은 25.6%로 상당히 불안정한 것으로 파악되었다. 이러한 결과는 JRC와 잔류마찰각의 변동이 사면의 안정성에 많은 영향을 미치고 있으나 결정론적 해석기법에서는 이러한 점을 파악하고 있지 못하다는 것을 보여주고 있다. 또한 암석과 불연속면이 거의 풍화를 받지 않은 경우에도 JRC 값과 잔류마찰각이 암반의 전단강도에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 특히 풍화가 진행됨에 따라 JRC 값의 경우 변동이 커질 가능성이 높아질 것으로 보이며 이런 경우 결정론적 해석은 사면의 안정성을 파악하기엔 한계를 보이리라 판단된다. 한편 WD 불연속면의 경우 파괴확률이 45.9%로 매우 불안정한 것으로 파악되었다. 이러한 결과도 WD 불연속면에 의한 평면 파괴의 안전율이 1.0으로 계산되었음을 고려할 때 매우 높은 파괴확률임을 알 수 있다. FD 불연속면의 경우와 마찬가지로 JRC 값과 잔류마찰각

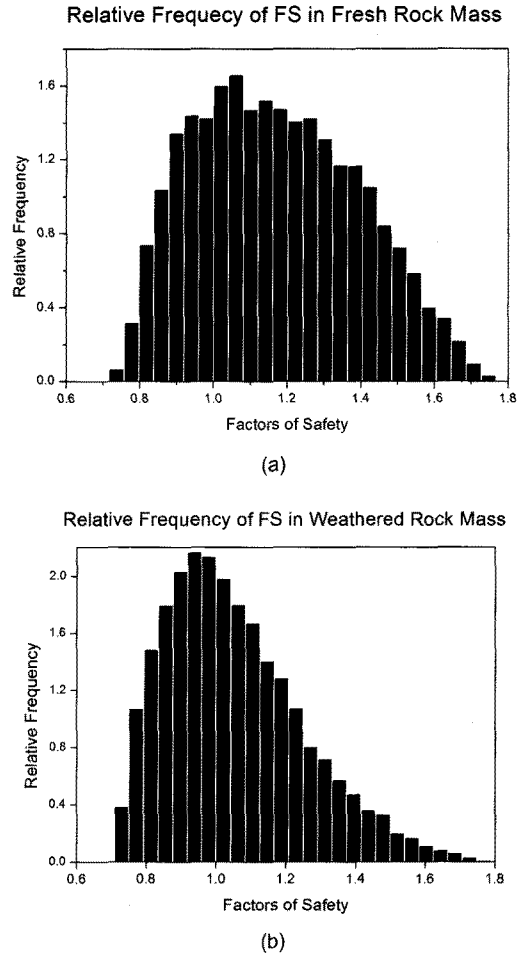


Fig. 7. Distribution of factors of safety in (a) fresh discontinuities and (b) weathered discontinuities

의 변동이 사면의 안정성에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. FD 불연속면과 WD 불연속면에 의한 사면의 안전율과 파괴확률을 비교해 보면 안전율은 풍화가 증가함에 따라 약 25%의 증가를 보이고 있으나 파괴확률의 경우는 약 180%의 증가를 보이고 있다. 이러한 결과는 값의 차이가 있기는 하지만 풍화의 진행이 사면의 안정성에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한 현장으로부터 획득한 JRC와 잔류마찰각은 변동이 매우 심해 결정론적 해석은 사면의 안정성을 적절하게 평가하는 데 부적절한 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

대기 중에 노출된 암석은 주위환경에 영향을 받는다.



강우, 온도, 응력의 변화 등과 같은 조건하에 장단기적으로 노출된 암석은 다양한 풍화작용에 의하여 공학적 및 물리적 성질의 변화가 발생하여 경우에 따라 암반사면과 같은 구조물의 붕괴를 유발하기도 한다. 대개 풍화는 암석의 밀도 및 강도, 내부마찰각과 점착력 등을 감소시키는 것으로 보고되고 있으며 이로 인해 암석으로 구성된 사면의 안정성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 풍화등급에 따른 암반사면의 안정성을 분석하여 풍화가 사면의 안정성에 미치는 영향을 분석해 보았다. 이를 위하여 암반사면의 안정성에 가장 주요한 영향을 미치는 불연속면 시료를 풍화등급별로 채취하여 공학적인 특성의 변화를 분석하였다. 신선한 불연속면 시료(FD)의 경우 200 MPa의 JCS값을 보이며 30도에서 35도 사이의 범위를 갖는 잔류 마찰각과 최소 5에서 최대 10 사이의 JRC 값을 가지는 것으로 파악되었다. 반면 풍화된 불연속면 시료(WD)의 경우 50 MPa의 JCS 값과 최소 24도에서 최대 27도 사이의 잔류 마찰각, 그리고 8에서 15사이의 JRC 값을 보이는 것으로 파악되었다. 이러한 불연속면 특성을 이용하고 연구대상지역으로부터 한 개소의 대상 사면을 선정하여 결정론적 해석기법과 확률론적 해석기법을 이용하여 사면의 안정성을 분석하였다. 결정론적 해석 기법에 의해 연구대상 사면의 안정성을 평가해본 결과 신선한 암반으로 구성된 사면의 경우 1.25의 안전율이, 풍화가 진행된 사면의 경우 안전율이 1.0으로 계산되었다. 그러나 sensitivity analysis를 통해 확인된 바와 같이 JRC와 잔류마찰각이 변화함에 따라 안전율의 값이 크게 변화되고 있어 값의 변화가 심한 JRC와 잔류마찰각은 평균 값을 대표 값으로 활용하는 결정론적 해석기법은 적절하지 않은 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 JRC와 잔류마찰각이 일정한 범위 내에 분포한다는 점에 착안하여 확률변수로 고려하였으며 확률론적 해석을 수행하였다. 확률론적 해석결과 신선한 암반의 경우 사면의 평면파괴 파괴확률이 25.6%로 계산되었으며 풍화가 진행된 암반에서의 사면의 파괴확률은 45.9%로 계산되었다. 이러한 연구 결과는 특히 신선암 암반의 경우 결정론적 해석결과와 상반되는 것으로 결정론적 해석에서는 안전한 것으로 계산되었으나 확률론적 해석에서는 25.6%로 상당히 높은 파괴확률을 보여 불안정한 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 현장으로부터 획득된 JRC와 잔류마찰각의 경우 분산이 매우 심하여 결정론적인 해석을 통해 안정성을 검토하는 것이 부적절하기 때문에 파악된다. 또한 풍화가 진행된 사면의 경우 파괴확률이

45.9%로 신선한 암반에서의 파괴확률인 25.6%보다 약 180%의 증가를 보이고 있어 풍화의 진행이 사면의 안정성에 심각한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

## 사 사

이 논문은 2006년 정부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2006-312-C00693)을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Barton, N. (1973) Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, v. 7, p. 287-332.
- Barton, N. and Choubey, V. (1977) The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, v. 10, p. 1-54.
- Bell, F. G. (2007) *Engineering Geology*, 2nd Ed. Butterworth-Heinemann, p. 581.
- Chorley, R. J. (1969) The role of water in rock disintegration, *Introduction to Fluvial Processes*, Methuen, p. 53-73.
- G.S.E.G. (1995) Geological Society Engineering Group Working Party Report: The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 283, p. 207-242.
- Hoek, E.T. (1998) Factor of safety and probability of failure. Course notes, Internet edition. <http://www.rock-eng.utoronto.ca/hoekcorner.htm>.
- Kulatilake, P.H.S.W., Shou, G., Huang, T.H. and Morgan, R.M. (1995) New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract*, v. 32, p. 673-697.
- Lee, S. G. and De Freitas, M. H. (1989) A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granites in Korea. *Quarterly Journal of Engineering Geology* v. 22, p. 31-48.
- Mostyn, G.R. and Li, K.S. (1993) Probabilistic slope analysis-state of play. *Proceedings of Conference on Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*. A.A. Balkema, p. 89-109.
- Nilsen, B. (2000) New trend in rock slope stability analysis. *Bull. Eng. Geol. Environ.* v. 58, p. 173-178.
- Park, H.J. and West, T.R. (2001) Development of a probabilistic approach for rock wedge failure. *Eng. Geol.* v. 59, p. 233-251.
- Park, H.J., West, T.R. and Woo, I. (2005) probabilistic analysis of rock slope stability and random properties of discontinuity parameters, I-40, Western North Carolina, USA. *Eng. Geol.* v. 79, p. 230-250.
- Pathak, S. and Nilsen, B. (2004) Probabilistic rock slope stability analysis for Himalayan condition. *Bull. Eng. Geol. Environ.* v. 63, p. 25-32.
- Price, D.G. (1995) *Weathering and weathering processes*,

- Quarterly Journal of Engineering Geology, v. 28, p. 243-252.
- Price, D.G. (2009) Engineering Geology; Principles and Practice, Springer, p. 450.
- Um, J.G., W. I., and Park, H.J. (2009) Variation of engineering geological characteristics of Jurassic Granite in Wonju due to freeze thaw weathering. Eco. Environ. Geol. v. 42, p. 261-272.
- Yu, X. and Vayssade, B. (1991) Joint Profiles and their Roughness Parameters. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract, v. 28, p. 333-336.

---

2009년 7월 22일 원고접수, 2009년 8월 22일 게재승인