

## 암반 사면의 파괴 예측을 위한 불연속면 분포 특성 분석

### Analysis of Discontinuity Distribution Property to Predict Rock Slope Failure

윤운상<sup>1)</sup>, Woon-Sang Yoon, 김정환<sup>2)</sup>, Jeong Hwan Kim, 배기훈<sup>3)</sup>, Kee-Hoon Bae

<sup>1)</sup> 서울대 지질학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Geological Science, Seoul Nat'l Univ.

<sup>2)</sup> 서울대 지질학과 교수, Professor, Dept. of Geological Science, Seoul Nat'l Univ.

<sup>3)</sup> 대덕 공영, Engineer, Daeduk Consulting & Construction co.

**SYNOPSIS** : Distribution of fracture system is an important factor to analyse instability of jointed rock slope. In the most case of rock slopes, joint distribution properties are related to potential, shape, size and locality of slope failure. The purpose of this paper is to present an application of fracture characterization related to rock slope failure. Fracture data used in this study are collected by scanline survey. Two aspects of fracture characterization for rock slope are handled in this study. First, In order to determine the potential and shape of slope failure, trace length of joints is considered as the weighting factor about collected orientation data. Second, Relationship between trace length and spacing is analysed to estimate failure location and size. The distribution of fracture system is directly influenced on wedge failure. It is effective to analyse the orientation of fractures by using weighting factors associated with the trace length of fractures rather than to analyse only that of fractures. It gives a conclusion that the wedge failure occurred along the peak of fracture density(or intensity) cycles

**Key words** : slope failure, fracture characterization, orientation, length, density(or intensity) cycle

## 1. 서론

불연속면의 분포는 절리 암반 사면의 불안정성을 분석하는 데 중요한 요소 중의 하나이다. 대부분의 암반 사면의 경우, 절리의 분포 특성은 사면 파괴의 가능성, 형태, 규모 및 위치와 관련되어 있다. 이 논문에서는 암반 사면의 파괴와 관련된 불연속면 특성에 대해 이미 파괴가 발생한 사면 사례를 중심으로 분석하였다. 이 연구에서 다루고 있는 선조사법(scanline)에 의한 불연속면 특성화는 크게 두가지 측면에서 접근하고 있다. 첫째, 사면 파괴의 가능성과 형태적 특성을 결정하기 위해 수집된 불연속면 방향 자료에 대해 불연속면의 자취 길이(trace length)를 가중 요소(weighting factor)로서 반영하여 그 영향을 평가하였다. 두 번째로는 불연속면의 자취 길이와 간격간의 상호 관계를 주기적 밀집도(cyclic intensity)의 측면에서 사면 파괴의 위치와 규모와 관련하여 분석하였다.

연구 대상은 경주-감포간 4번 국도 변의 덕동호 인근에 위치하는 암반 사면으로서 도로의 굴곡에 의해 사면 역시 굴곡되어 방향의 변화를 보이고 있다(그림 1). 사면의 암석은 백악기 경상누층군의 암석으로서 사암과 셰일의 호층을 보이는 퇴적암이며, 이를 관입한 화강암맥이 분포하고 있다. 사면을 방향 변화에 따라 총 5개의 구간(A-B, B-C, C-D, D-E, E-F)으로 구분하였을 때, B-C와 C-D 두 구간에서 비교적 큰 규모의 파괴가 발생하였다. B-C 구간에서는 높이 30m 이상의 썩기 파괴가 약 35m의 거리를

두고 2개소에서 발생하였으며, C-D 구간에서는 비교적 얇은 평면 파괴가 역시 두 개소에서 발생하였다. 그 외 구간에서도 소규모의 원호 및 썸기 파괴가 발생하고 있다

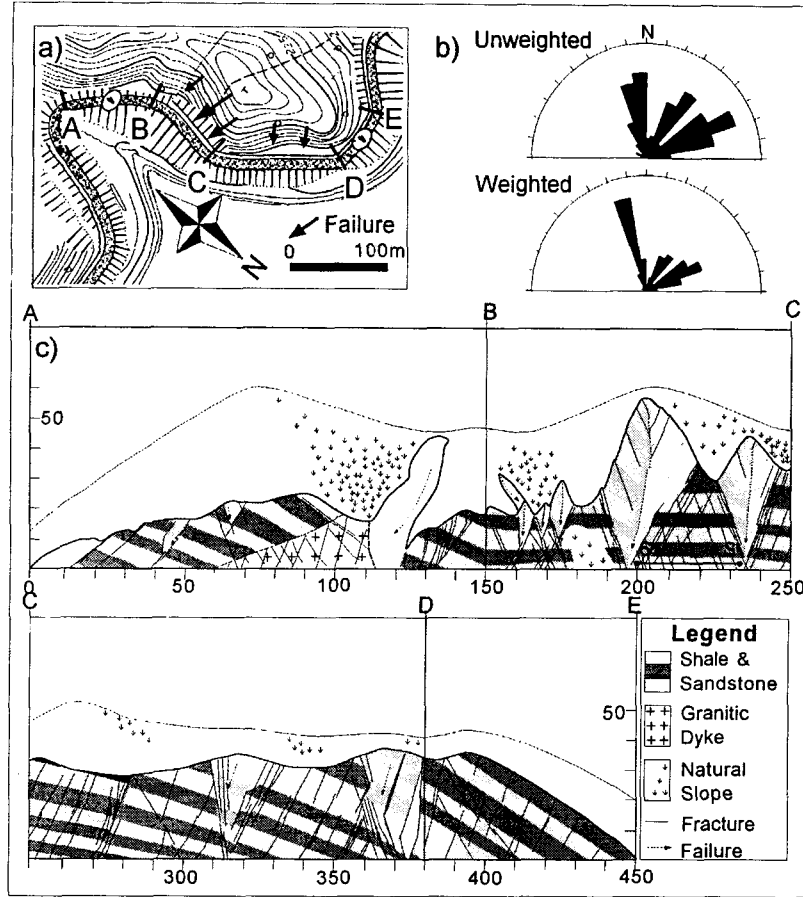


그림 1. 조사 사면의 위치 및 파괴 현황. a) 사면의 형상 및 파괴 지점, b) 발달하는 불연속면 방향 특성, c) 사면의 지질 및 파괴 특성

## 2. 사면 파괴의 가능성과 형태: 방향 및 가중 요소 분석

일반적으로 암반 사면의 썸기 파괴 분석에서 가장 많이 사용되는 도해적 방법으로는 평사 투영법이 있다. 사면안정분석에 사용되는 평사 투영법은 불연속면의 방향에 의해 사면의 파괴 유형과 파괴 가능성을 검토하는 간단하면서도 유용한 방법으로서 다양한 형태로 제시되어 있다. 그림 2는 사면 안정을 위한 투영망들로서 그림 2 a)는 노출범위(daylight envelope, Hoek & Bray, 1974)를 이용한 방법이며, b)는 Matherson(1988)의 방법으로서 썸기 파괴의 경우 두 불연속면의 교점을 직접 투영하여 평가한다. c)는 SMR-net(윤운상 외, 1997)이며, SMR 분류와 연계하여 평사투영해석과 암반분류에 의한 사면 안정성 평가를 통합하여 수행할 수 있도록 구성되었다. 여기서는 일반적으로 사용되는 노출 범위를 이용한 평사투영망을 사용하여 사면의 안정성과 관련된 불연속면의 방향과 가중 요소의 영향을 분석하였다.

그림 3은 구간 B-C와 C-D에 대해 그 안정성을 평사투영에 의해 분석한 결과로서 가중 요소(weighting factor)로 불연속면 자취 길이(trace length)를 채택하지 않은 경우와 채택한 경우의 분석 결과상의 차이를 보여준다.

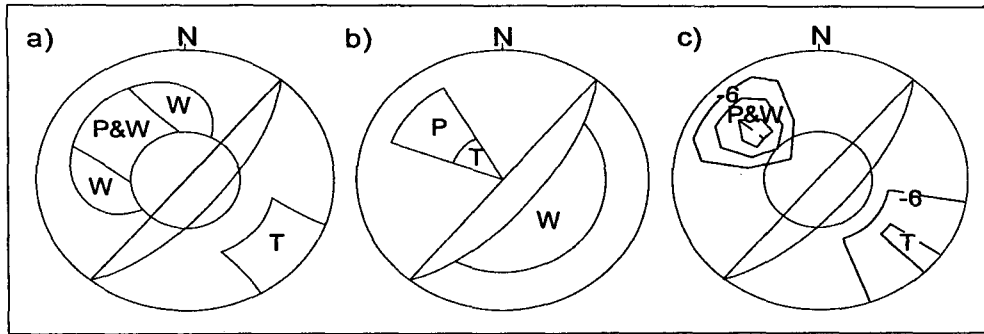


그림 2. 사면 안정성 해석을 위한 평사투영망. a) daylight envelope method, b) Matherson's method, c) SMR-net, P: planar, W: Wedge, T: Toppling failure

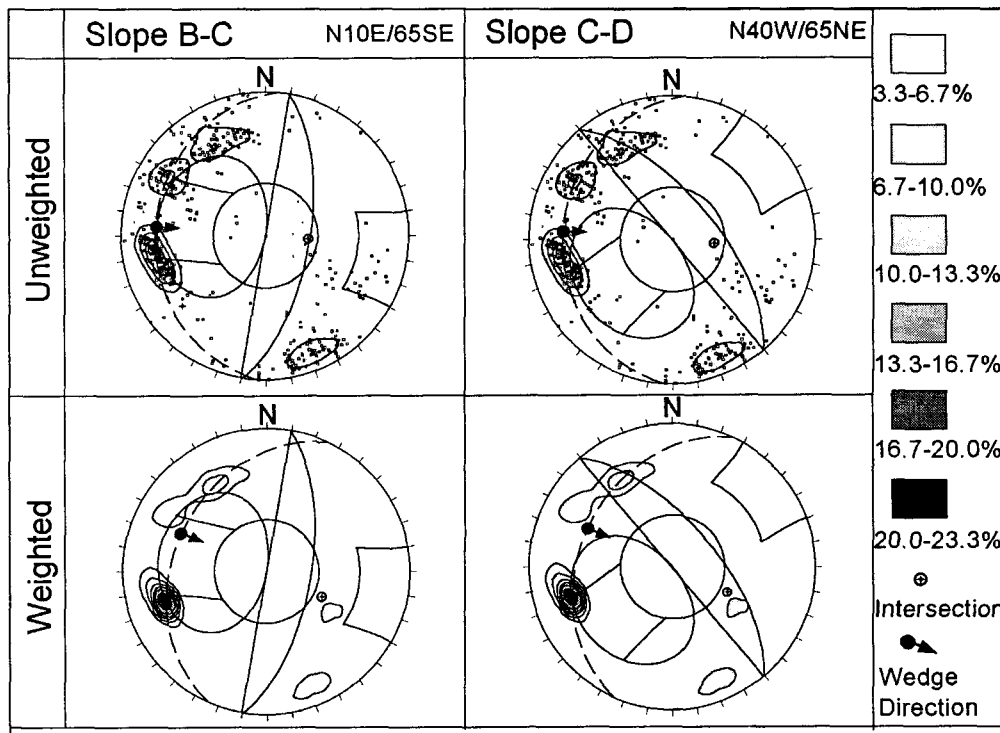


그림 3. 평사투영해석에 대한 불연속면 자취 길이의 가중 효과 분석

가중 요소를 채택하지 않은 일반적인 평사 투영 해석 결과, 두 구간에서 모두 사면 파괴의 가능성이 희박한 것으로 분석되었다. 집중도에 따라 불연속면을 Set 1과 Set 2를 구분하여, 길이 L을 가중하지 않았을 경우, Set 1 N13W/67NE, Set 2 N31E/68SE, 교차선 94/66을 가지며 Set 1의 최대 집중도는 13.6%이다. 이러한 불연속면 방향의 집중점에 대해 구간 B-C (N10E/65SE), 구간 C-D(N40W/65NE)에서 평사투영법에 의해 썩기 파괴의 가능성을 분석(마찰각 = 30°)한 결과, 길이를 가중하지 않은 상태에서는 두 구간 모두 파괴 영역에 해당하지 않고 있다. 즉 Zone B-C에서는 두 개의 큰 규모의 썩기 파괴가 발생하였음에도 불구하고, 썩기 암괴의 미끄러짐 방향은 사면에 대해 안전한 썩기를 지시하고 있다.

그러나, 동일한 방향 자료에 대해 각 불연속면의 자취 길이를 가중 요소로 채택하여 평사 투영 해석을 실시한 결과, Zone B-C와 C-D에서 실제 발생한 썩기 파괴 형태를 비교적 정확히 예측할 수 있는 분석 결과를 도출할 수 있었다. 불연속면의 자취 길이 L을 가중한 경우, Set 1 N16W/62NE, Set 2

N60E/60SE, 교차선 115/55를 가지며, Set 1의 최대 집중도는 22.6%이다. 즉 길이 가중에 의해 Set 1의 집중점과 집중도와 Set 2의 집중점이 변화하는 양상을 보이며, B-C 구간 사면에서는 썩기 파괴를, C-D 구간에서는 얇은 평면 파괴를 지시하여 현재 파괴 상태를 반영하고 있다.

이러한 결과는 암반 사면의 파괴 가능성이 절리의 방향과 길이의 함수임을 지시하고 있으며, 방향 자료를 평사투영해석에 사용할 때, 절리의 길이를 가중하여 분석하는 것이 효과적임을 보여 주고 있다.

### 3. 사면 파괴의 위치 및 규모: 불연속면의 자취 길이 및 간격 특성 분석

암반 사면의 안정성 분석에서 사면 파괴의 위치와 규모는 완전히 예측할 수 없다 하더라도 매우 중요한 분석 대상이다. 파괴의 가능성과 형태 외에 우리의 관심을 기울이게 하는 파괴 특성은 파괴의 규모와 파괴의 위치이다. 암반 사면의 대표적인 파괴 형태가 썩기 파괴라 할 때, 파괴 규모와 위치 역시 단일 구조의 분포 특성에 영향을 받을 것이다. 이러한 파괴 규모 또는 파괴 위치를 예측하기 위한 1차적 과정으로 단일 구조의 분포 특성을 정량화 하여야 한다. 이를 위하여 Zone B-C의 두 개 썩기 파괴사이에서 선조사를 실시하였다. 이 때 약 35m의 조사선은 Set 1 절리군의 누적 간격 약 13m에 해당한다. 그림 4는 불연속면 간격의 누적 거리로 표현된 약 13m 조사선과 교차하는 불연속면 길이(trace length)를 도시한 것이다.

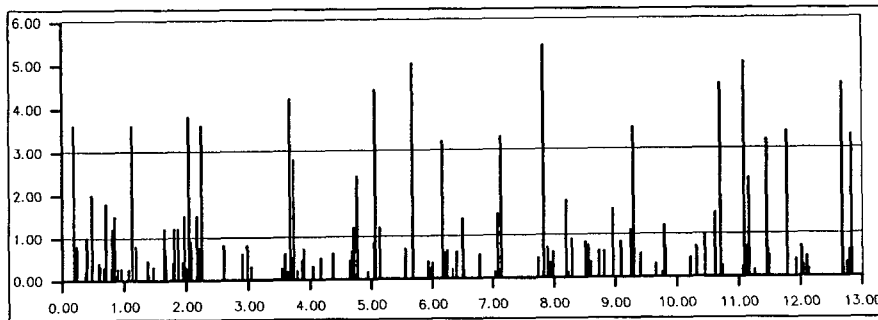


그림 4. 조사선(S-S')과 교차하는 불연속면의 분포 및 길이

그림 5 a)는 각 불연속면의 간격을 2cm 또는 5cm 간격의 상대빈도를 도시한 결과로서 절리 간격이 증가할수록 급격히 빈도가 감소하는 지수함수적 경향을 보이고 있으며, 누적 빈도(그림 5 b))에서도 같은 경향을 볼 수 있다. 이때, 절리 간격의 평균은 9.2cm이다. 그림 6 a)는 각 불연속면의 길이(trace length)를 도시한 것으로서 역시 길이가 증가할수록 급격한 감소를 보이고 있으며, 그림 6 b)는 누적 빈도를 log-log 도표에 도시한 결과로서 약 20cm에서 2m 구간에서 직선 구간을 보이며, 이때의 기울기는 42-45° 로서 -0.9 ~ -1의 구배를 보이고 있다. 불연속면 길이의 평균은 1.04m 이다. 이러한 지수함수적 분포 결과는 Priest and Hudson(1981)의 연구 결과와 일치하고 있다. 특히 불연속면 길이의 누적 빈도의 분석 결과는 프랙탈 차원의 지수를 가지는 power-law 분포의 양상을 보이고 있다.

이상과 같이 측정된 각 절리군의 평균 자취 길이와 평균 간격을 분석하였으나, 그 특성 모두 음의 지수 함수적인 빈도 분포를 보이고 있어 평균 길이와 간격을 균열 분포 모델의 구성에 직접 사용하기 어려운 측면이 있으며, 특히 사면에 발달하는 주 절리의 간격이 약 1m 내외 인 것과 직접적인 연관을 해결하기 어렵다. 따라서 불연속면 분포의 특성화를 위하여 이 외의 접근 방법을 고려하였다.

먼저 불연속면의 길이에 따른 빈도 특성을 살펴보기 위해 불연속면을 길이에 따라 등급을 구분하고 그 빈도에 의한 평균 간격을 구하였다. 불연속면의 길이를 3-10m, 1-3m, 1m이하로 구분하여 각각의 빈도를 구하여 조사선 길이에 대한 평균 간격을 구한 결과, 3-10m 길이의 불연속면의 평균 간격은 0.80m, 1-3m 길이의 간격은 0.53m, 1m 이하 불연속면의 평균 간격은 0.12m인 것으로 분석되었다(그림 4).

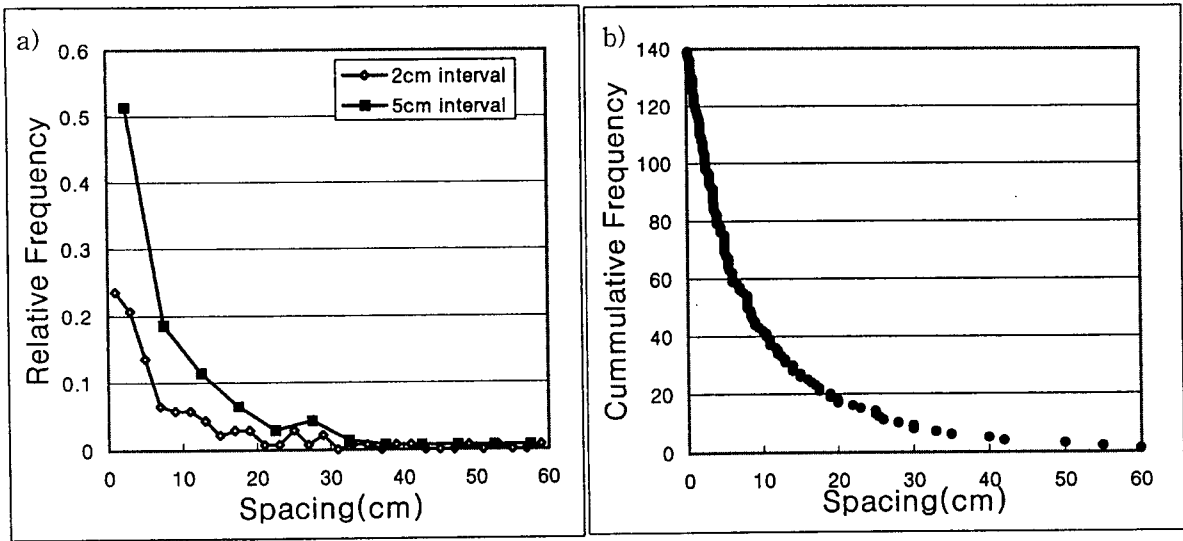


그림 5. 불연속면 간격의 상대 빈도(a)와 누적 빈도(b)

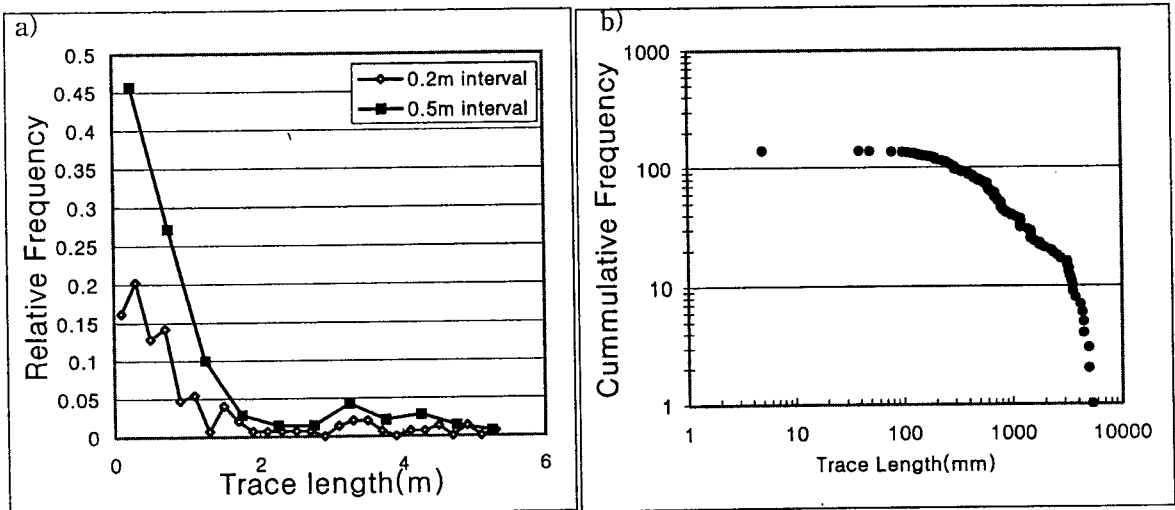


그림 6. 불연속면 길이의 상대 빈도(a)와 누적 빈도(b)

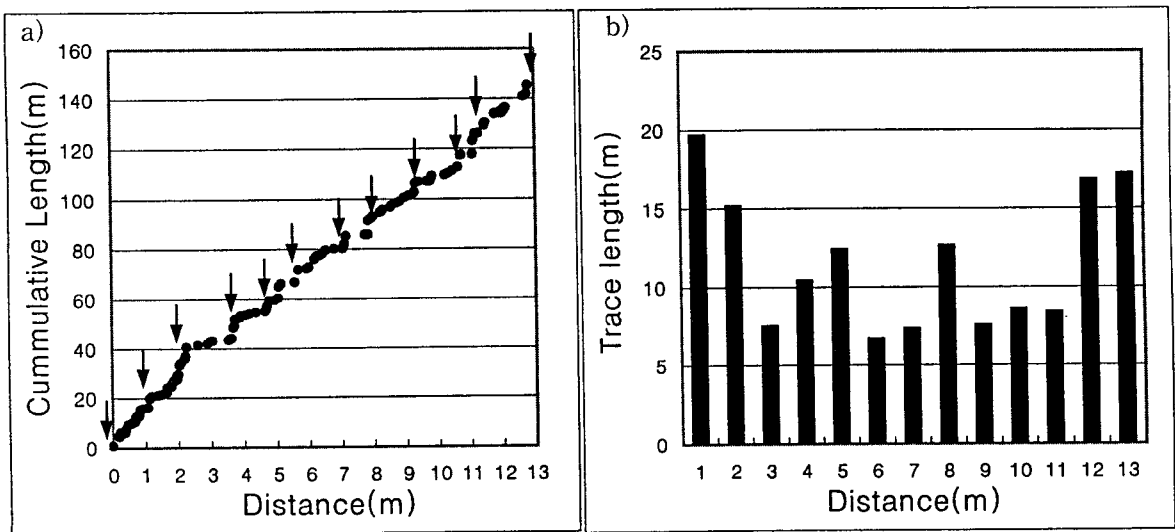


그림 7. 조사선 길이에 대한 불연속면의 누적 길이(a)와 구간별 길이(b)

또 다른 접근 방법으로 불연속면의 밀집도(밀도×연장성)를 분석하기 위해 조사선 길이에 대해 1m 간격으로 발달하는 불연속면 길이의 합을 도시하였다(그림 7 b). 쉼기 파괴 지점에 연하여 있는 조사선의 양끝에 불연속면의 밀도가 집중되는 양상을 보이며, 그 사이에서 최소 2차례의 밀집 주기가 있는 것이 확인된다. 또한 조사선 길이에 대해 불연속면의 길이를 누적하여 도시한 결과(그림 7 a), 최소 11차례의 밀집구간이 있는 것으로 분석된다. 즉 분석한 조사선의 경우 양끝의 1차 밀집도에 의한 약 13m의 밀집 주기, 2차 밀집도에 의한 약 4.3m의 밀집 주기, 3차 밀집도에 의한 약 1.3m의 밀집 주기가 관찰되었으며, 이상의 결과는 연구 대상 사면에서 발생한 쉼기 파괴가 조사선 상의 가장 단열 구조가 밀집된 양끝에서 발생하였다는 것을 지시한다. 따라서 선조사 자료의 적용에 있어 이러한 절리 밀도의 주기적인 분포의 분석은 파괴 위험 위치의 분석에 유용한 도구가 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 결론

이 연구에서는 사면의 파괴와 불연속면의 분포 특성 간의 관계 및 이의 특성화에 대해 사례를 중심으로 사면 파괴의 예측을 위한 불연속면의 실질적인 조사 방법과 적용 방법을 살펴보았다.

사면 파괴의 가능성과 그 형태 분석을 위해 일반적으로 사용되어왔던 평사투영법의 보다 합리적인 적용을 위하여 단열 구조의 연장을 가중 요소로 채택, 적용하였을 경우, 실제 사면 파괴 예측에 직접적 영향을 미치는 주요 불연속면에 대한 고려를 적절히 수행할 수 있었으며, 그 결과 실제 발생한 파괴를 분석해 낼 수 있었다. 특히 평사 투영법의 적용이 사면과 관련하여 폭넓게 사용되고 실제적인 사면의 설계, 관리의 중요 기준으로 적용되고 있는 만큼 가중 요소에 대한 적용과 그에 대한 분석 결과는 이들 업무에 활용될 수 있을 것이다.

또한 불연속면의 분포와 파괴 위치 및 규모 등의 사면 파괴와의 관련성을 분석한 결과, 불연속면의 연장성과 간격이 사례 사면에서 음의 지수 함수적 분포를 보이는 것으로 확인되었으며, 불연속면의 불연속면의 밀도 또는 밀집도가 집중되는 위치가 사면 파괴의 위치 및 규모에 직접적인 관련이 있는 것으로 분석되었다. 불연속면의 주기성에 대한 분석은 이러한 현상이 일반화 될 수 있는 단열 구조의 분포 특성으로서 정량화 할 수 있는 요소인지에 대한 폭넓은 조사와 분석을 필요로 하는 문제이다. 이러한 특성이 일반화 될 수 있는 불연속면의 분포 특성으로 확인된다면 이를 활용하는데 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

## 5. 참고 문헌

1. 윤운상, 김학수, 김정환, 1997, RMR-net를 이용한 암반 분류의 적용, 대한지질학회지, 33, 4, 202-209.
2. Hoek, E., and Bray, J., 1974, Rock slope engineering, Inst. Min. Metall., London, Eng., 309p.
3. Matherson, G.D., 1988, The collection and use of field discontinuity data in rock slope design, Q. J. Eng. Geol., 22, 19-30.
4. Priest, S.D. and Hudson, J.A., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 18, 183-197.

## 사사

이 논문은 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방지기술개발사업으로 수행한 내용이다. 연구에 많은 조언을 해주신 한국자원연구소 김원영 부장님께 감사드린다.