

일광단층 인근 화산암 암반사면의 단열계 기하 분석 및 암반 분류 수정안 제시

장태우¹ · 이현우² · 채병곤^{3*} · 서용석⁴ · 조용찬³

¹경북대학교 지질학과, ²(주)산하이앤씨

³한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 산사태재해연구팀, ⁴충북대학교 지구환경과학과

Geometric Analysis of Fracture System and Suggestion of a Modified RMR on Volcanic Rocks in the Vicinity of Ilgwang Fault

Tae Woo Chang¹, Hyeon-Woo Lee², Byung-Gon Chae^{3*}, Yong-Seok Seo⁴, and Yong Chan Cho³

¹Department of Geology, Kyungpook National University, ²Sanha ENC Co.

³Geological & Environ. Hazards Div., Korea Inst. of Geoscience & Mineral Res.

⁴Dept. of Earth and Environmental Sci., Chungbuk National University

본 연구는 대단층이 발달하는 화산암 분포지역에서 암반 절취사면을 대상으로 단열의 발달특성과 이에 따른 암반분류 수정안을 제시하고자 수행되었다. 부산-울산 고속도로 건설 현장 중 해운대-기장 사이의 일광단층에 가까운 도로 절취사면 노두에서 단열계의 특성이 조사 분석되었다. 단열간격 분포의 경우 신장단열은 대수-정규 분포를 보여주고 전단단열은 음의 지수 분포를 보여준다. 단열길이 누적빈도 분포 그림에서 중앙의 직선 구간이 1지점 -1.13, 2지점 -1.01, 3지점 -1.52의 지수를 가지며 멱법칙 스케일링을 지시한다. 각 지점에서 단열의 간격 및 밀도, 단열 간 교차점의 수 등을 분석하여 판단해 볼 때 암반의 안정성 및 강도는 1지점이 가장 낮고 2지점이 가장 높다. 한편, 각 지점에서 서로 연결된 단열의 최대 클러스터로 평가할 때 유체 이동의 능률은 3지점이 가장 높고 1지점이 가장 낮다. 이는 3지점이 상대적으로 단열의 길이가 긴 것들이 많으며 이들이 서로 연결하여 형성하는 최대 클러스터가 높은 비율로 전 지역에 고루 분포하고 있기 때문으로 볼 수 있다. 한편, 현장조사 자료를 토대로 응용통계기법을 이용하여 RMR 분류의 항목별 배점을 조정할 결과에 의하면, 대단층이 발달하는 화산암에서는 기존 RMR 분류 항목별 배점에 비해 현저히 다른 수정된 RMR 배점을 설정함이 타당한 것으로 나타났다. 분석결과 무결함 강도는 18, RQD는 61, 불연속면 간격 2, 불연속면 조건 2, 그리고 지하수 17의 배점이 나타났다.

주요어 : 단열계, 대수정규 분포, 음의지수 분포, 멱법칙 스케일링, 수정된 RMR

The properties of fracture system on road-cut slopes along the Busan-Ulsan express way under construction are investigated and analyzed. Fracture spacing distributions show log-normal form with extension fractures and negative exponential form with shear fractures. Straight line segments in log-log plots of cumulative fracture length indicate a power-law scaling with exponents of -1.13 in site 1, -1.01 in site 2 and -1.52 in site 3. It is likely that the stability and strength of rock mass are the lowest in site 1 as judged from the analyses of spacing, density and intersection of fractures in three sites. In contrast, the highest efficiency of the fracture network for conducting fluid flow is seen in site 3 where the largest cluster occupies 73% through the window map. Based on the field survey data, this study modified weighting values of the RMR system using a multiple regression analysis method. The analysis result suggests a modified weighting values of the RMR parameters as follows; 18 for the intact strength of rock; 61 for RQD; 2 for spacing of discontinuities; 2 for the condition of discontinuities; and 17 for ground water.

Key words : fracture system, log-normal distribution, negative-exponential distribution, power-law scaling, modified RMR

*Corresponding author: bgchae@kigam.re.kr

서 언

단열은 취성파괴로 발달한 지질구조이고 온도와 균압이 비교적 낮은 지각 상부 10 km 이내에 대단히 광범위하게 분포한다(Ramsay and Huber, 1987). 주어진 단열 조(set)에서 개개 단열의 자취길이는 무한한 크기의 범위인 수백 내지 수천 km의 크기에서 수 mm 스케일의 길이를 갖는다. 단열은 또 현미경 스케일로도 존재하는데 이와 같은 단열은 미단열(microfracture)이라 부른다. 개개 단열의 모양은 암석의 종류와 그 암석이 갖는 구조에 의존한다. 화강암이나 균질한 성분을 갖는 각종 암석에서는 대략 원형 내지 타원형이지만 역학적 성질이 크게 다른 암석이 교호하거나 접촉할 경우엔 그 형태가 아주 불규칙 할 수 있다(Twiss and Moore, 1992). 이러한 단열의 성질과 이들을 생성시키는데 작용하는 응력의 관계를 이해하는 일은 지구조 활동에 관심이 있는 지질학자뿐만 아니라 인간생활에 연관된 암반의 성질에 관심이 깊은 엔지니어들도 깊은 흥미를 갖고 있다.

단열은 지각을 통해 여러 종류의 유체(지하수, 광화용액, 석유등)를 이동시키는데 중요한 역할을 하기 때문에 단열의 기하는 대단히 중요하다. 또 단열계(fracture system)는 어떤 지역에서 댐이나 도로를 건설하기 위한 가능성 평가에서 암반의 역학적 특성으로써 암체의 안정성과 강도에 큰 영향을 주기 때문에 중요하다. 이와 같은 단열계의 영향은 단열계의 특성화(characterization)(Hancock, 1985)와 단열계의 시물레이션에 관한 광범한 연구를 촉진시켰다. 암석의 역학적 성질을 좌우하는 단열의 중요성은 개개의 단열의 경우는 배향, 길이, 간극(aperture), 조도(roughness)와 수반되는 성질에 의존하고, 단열계의 차원에서는 단열밀도, 단열간격, 단열망의 기하와 수반되는 성질에 의존한다(Odling, 1997).

본 연구는 부산-울산 고속도로 건설 구간 중 일광단층에 인접한 도로 절취시면 노두를 선택하여 단열계의 기하를 포함한 운동학적 및 역학적 성질과 투수성을 고찰하고자 한다. 이를 위해 본 연구는 부산-울산 고속도로 건설 현장의 해운대-기장 사이의 지역에서 세 곳(Fig. 1)의 노두를 선정하여 단열도 작성을 포함한 자세한 단열조사가 집중적으로 수행되었고 이들 자료는 실내에서 단열계의 특성을 규명하기 위해 다각도로 분석되었다.

또한, 본 연구는 전술한 고속도로 건설 현장 중 17개 지점에서 기존의 RMR 분류방법을 토대로 대규모 단층이 발달하는 화산암 지역에 적용할 수 있는 암반분류

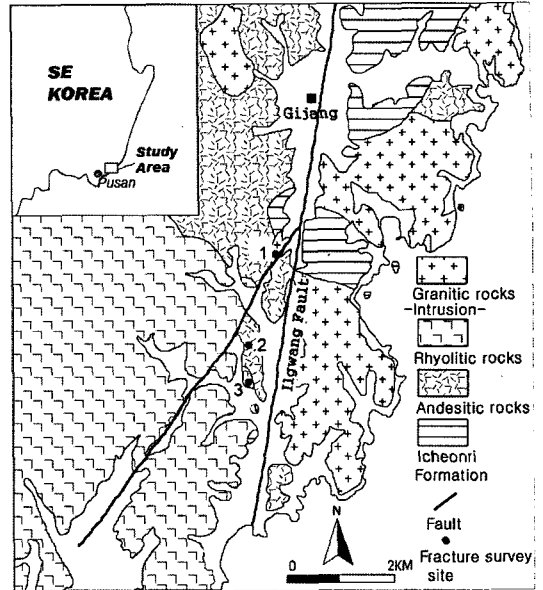


Fig. 1. Geological map of the study area.

기법의 수정안을 제시하였다. 이 과정에서 기존 연구들이 수행한 경험적 연구방법을 탈피하여 응용통계기법을 이용한 객관적·과학적 방법으로 인자별 배점을 수정하였으며, 이를 통해 인자별 배점설정의 객관적 근거를 확보한 수정된 RMR 분류체계를 제안하고, 그 결과를 지질학적 관점에서 평가하였다.

지 질

연구지역의 지질은 경상누층군 유천층군에 해당하는 이천리층, 안산암질암류, 유문암질암류와 이를 관입한 불국사 관입암류인 화강암질암류로 구성된다(Fig. 1).

이천리층은 기장읍 부근에 소규모로 분포하며 화강암질암류에 의해 관입된다. 대체로 흑색 내지 암회색 셰일로 되어 있으며 가끔 암회색 셰립 사암이 협재 된다. 이천리층은 대부분 주위의 화강암질암류의 관입으로 열변성 작용을 받아 혼펠스화 되어 있다. 이 층의 하부에는 안산암질 응회암이 놓이고 상부에도 응회질 사암이 퇴적되어 있는 것으로 보아 유천층군 화산활동기의 퇴적 산물로 생각할 수 있다.

안산암질암류는 기장읍 서쪽에 주로 분포하며 화강암질암류에 의해 관입되며, 야외에서 외관상 녹색계통의 색을 띠는 것이 가장 큰 특징이다. 본암은 조직으로 보아 세립질인 것, 반상조직인 것, 각력질인 것으로 혼재

되어 있는데 반상조적을 보여주는 것은 장석, 휘석, 각섬석의 반정이 식별되며 풍화 표면에서 더욱 잘 나타난다. 가력질인 것은 안산암과 조면안산암질암이 흔히 가력의 구성성분이다.

유문암질암류는 Fig. 1 지질도의 서남쪽에 넓은 분포를 보인다. 본 암은 안산암질암류를 피복하고 있으며, 본 암 분포지의 중심에는 반상유문암이 외곽부에는 라피리 응회암이 환상으로 노출되어 있다. 라피리 응회암에서 라피리의 암편은 유문암, 안산암, 혼펠스, 처트 등인데 라피리의 크기에 따라 미약하나마 층리를 이루기도 한다.

화강암질암류는 주로 일광단층의 동쪽에 넓게 분포하고 암주상으로 나타난다. 여기에서 본암류는 남쪽에서는 화강섬록암의 암상을, 북쪽의 두 암주는 흑운모 화강암의 암상을 보여준다. 본암은 이천리층, 안산암질암류, 유문암질암류를 관입하고 있지만 안산암과의 접촉부에 뚜렷한 연변상을 만들어 안산암 쪽으로 가면서 유색광물이 풍부한 암질의 포획체가 많아지며 입도도 감소되어 세립질의 섬록암대를 이루기도 한다.

본 역의 중앙부는 N10E의 주향을 가지고 북북동-남남서로 달리는 일광단층이 발달하는데 이는 경상분지 동

남부에 발달하는 양산단층계 중 북북동-남남서 방향으로 달리는 주향이동 단층조 중 하나이다. 또 기장읍 남쪽에서 일광단층이 분기되는 형태로 N35E의 북동-남서 방향의 단층이 이번 조사에서 확인되었으며 그 외 여러 노두에서 큰 단층 부근에 소규모의 조선단층이 무수히 발달한다.

단열망 분석

도로사면 세 곳에서 비교적 평탄하고 표면 피복 물질이 적은 곳을 골라 단열자료를 수집하였다. 먼저 각 지점의 노두에서 우세하게 발달하는 단열 조(fracture set)를 감지한 후 이들의 배향과 단열간격 및 단열길이를 측정하였다. 그 다음, 단열밀도 및 단열망의 기하를 분석하기 위해 1m×1m의 크기로 제작된 창틀망(window net)을 사용하여 각 지점에서 가로 세 개 창틀, 세로 두 개의 창틀, 합계 여섯 개의 창틀에 해당하는 면적(6m²)에 대해 모든 단열을 스케치하였고 각 창틀의 면적에 대해 사진을 촬영하여 각 지점별로 모자이크 하였다 (Figs. 2, 3 and 4).

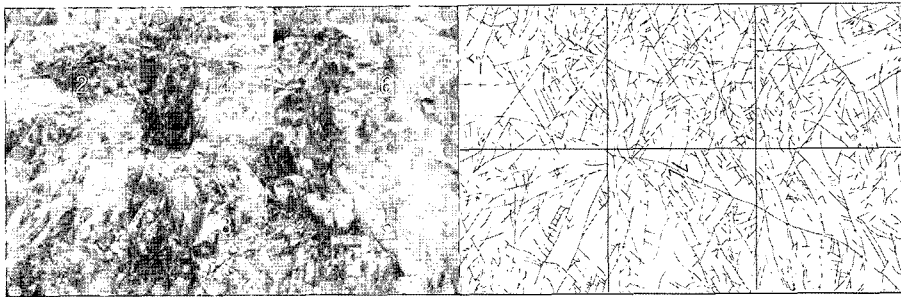


Fig. 2. Window map of the road-cut slope at site 1. (a) Photo mosaic of the slope of the window map. (b) Detailed sketch of fractures on the slope. The attitude of the slope is N30E, 50SE. Numbers in (a) represent each window.

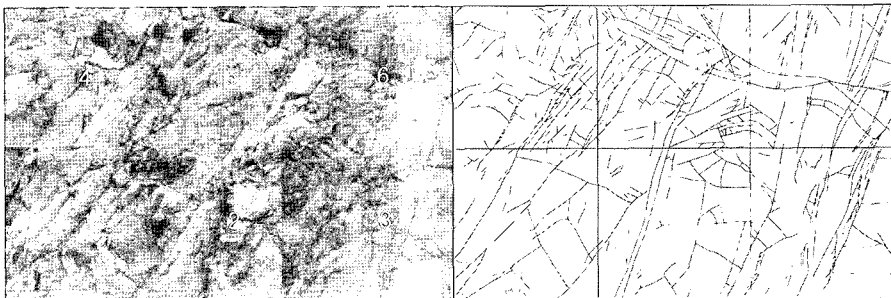


Fig. 3. Window map of the road-cut slope at site 2. (a) Photo mosaic of the slope of the window map. (b) Detailed sketch of fractures on the slope. The attitude of the slope is N20E, 50NW. Numbers in (a) represent each window.

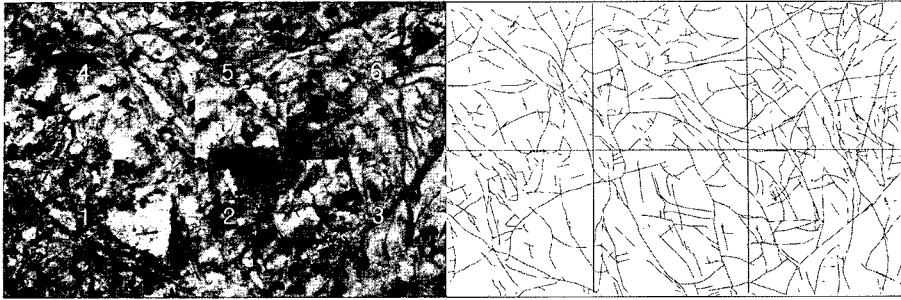


Fig. 4. Window map of the road-cut slope at site 3. (a) Photo mosaic of the slope of the window map. (b) Detailed sketch of fractures on the slope. The attitude of the slope is N20W, 45NE. Numbers in (a) represent each window.

단열의 배향

단열의 배향은 단열을 창틀망으로 스케치하고자 하는 각 지점에서 노두를 전체적으로 훑어본 후 대표적이고 우세한 단열 조를 선택하여 각 조별로 15내지 25개 정도 측정하였다. 1지점에서는 대략 N20W의 주향에 75NE로 경사하는 한 조 (북북서조)와 약 N85W의 주향에 55SW로 경사하는 다른 한조(동서조)가 발달한다(Fig. 5a). 북북서조의 단열들은 대부분 단열면이 미끄럼면으로 나타나며 전단단열로 판단된다. 특히 이들은 Fig. 2에서 대각선으로 달리는 우수단층(N40E, 88SE) 가까이에 많이 발달하고 이 단층에 접하며 종지하는 것이 많은 것으로 보아 이 단층에 수반되어 발달한 리델전단(Riedel shear)으로 생각된다.

북북서조의 단열들이 동서조의 단열들 보다 후기에 생성된 것으로 판단된다. 2지점의 단열(Fig 5b)은 전단 단열이 풍부하며 약 N60W의 주향에 55SW로 경사하는 단열(서북서조)이 매우 우세하게 발달하고 단열면상 미끄럼면이 잘 관찰된다. 이 단열들은 가끔 인접한 평행한 단열들과 밀접한 간격을 가지며 단열대를 형성하는 경

향이 있다. N30W에 이수직 경사를 보이는 단열(북북서조)은 2지점에서 부수조로 발달하며 단속적이다. 3지점에서 단열(Fig. 5c)은 약 N45E, 85NW의 단열(북동조)이 우세조로 균질하게 분포하고 동서조는 부수조를 이루며 길이도 짧은 것이 많다. 3지점의 단열들은 두 조가 공히 이수직 경사를 나타내고 1지점과 2지점 단열들에 비해 노두면에서 굴곡도가 크다. 즉 대부분 곡선 단열들이다. 또 이들은 노두에서 단열면의 간극에 평행하게 적갈색의 풍화 띠를 현저히 발달시킨다(Fig. 4). 이런 점으로 보아 3지점의 단열들은 대부분 신장절리로 간주된다.

단열의 길이

1지점과 3지점에서는 단열의 길이가 20 cm 이하인 것이 가장 많았으나 2지점에서는 단열 길이의 최대 빈도가 40-60 cm를 나타낸다.

단열의 길이에 대한 단열 자취 수의 누적분포를 양대수 그래프에 나타내어 보았다(Fig. 6). Fig. 6은 단열길이 감소함에 따라 측정된 단열자취의 수는 체계적으

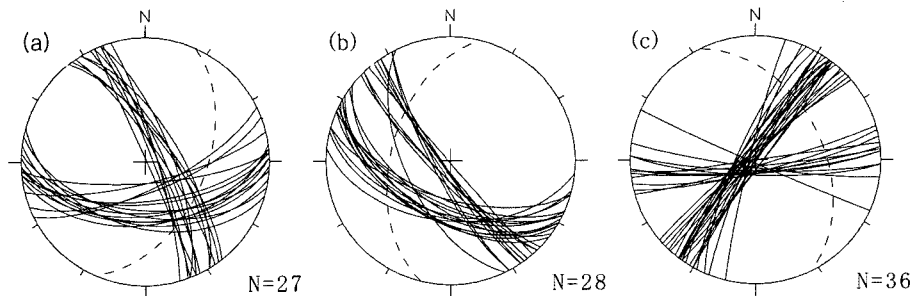


Fig. 5. Equal-area lower hemisphere projection of fracture sets at sites 1 (a), 2 (b) and 3 (c). Dashed lines represent the attitude of slope at each site.

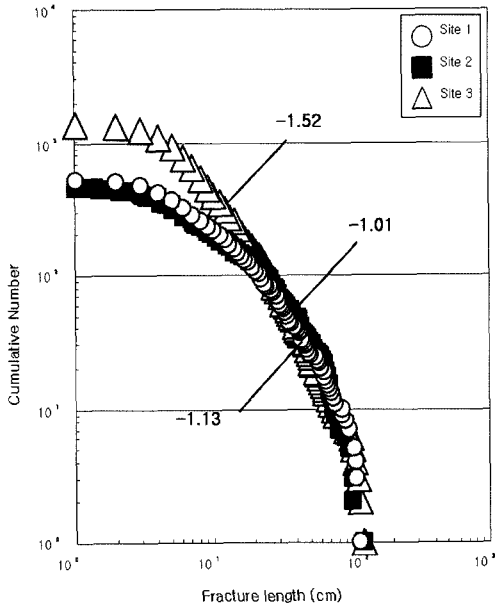


Fig. 6. Cumulative frequency distribution of fracture length.

로 증가하는 특성을 보여준다. 그러나 각 지점 단열의 누적길이를 대변하는 곡선들은 왼편에서는 기울기가 보다 편평화하고 오른쪽에서는 가파르게 나타난다. 각 지점 곡선의 중앙부는 직선을 이루며 단열길이와 누적 수 사이의 멱법칙 관계(power-law relationship)를 지시한다. 이들 단열 집단들에 대한 멱법칙 지수(power-law exponent)는 1지점에서 -1.52, 2지점에서 -1.01, 3지점에서 -1.13을 보여준다.

단열의 간격

각 지점의 단열 조에 대해 연장에 수직방향으로 간격을 측정하였다. 단열 간격은 암반의 역학적 거동 및 유체이동의 통로로써 투수성에 관한 정보를 제공한다. 본 역의 1지점에서 단열의 간격은 0 cm~15 cm의 좁은 범위를 갖는 것들이 대부분으로 동서조와 북북서조 각각에서 전체의 79%를 차지한다. 2지점과 3지점에서는 다수 단열 간격들의 범위가 0 cm~20 cm로 1지점보다 조금 더 넓으며, 2지점의 서북서조는 이 범위의 것들이 57%, 북북서조는 64%를 나타내고, 3지점에서는 북동조가 78%, 동서조는 71%를 차지한다. 이렇게 볼 때 다수 단열 간격 분포의 집중도는 2지점이 가장 낮다. 한편 단열의 평균 간격은 1지점 11 cm, 2지점 28 cm, 3지점 15 cm로 2지점이 가장 넓다.

Fig. 7에서 볼 때 1지점에서 단열 간격은 북북서조가

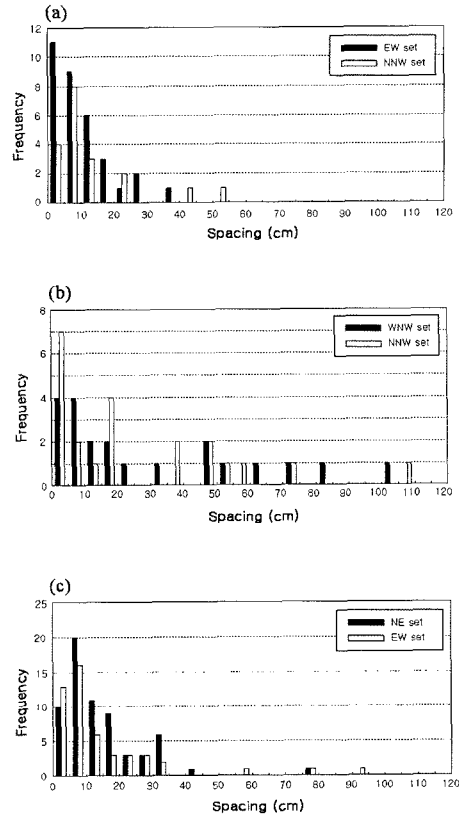


Fig. 7. Fracture spacing distribution at sites 1 (a), 2 (b), 3 (c).

최빈값(mode)이 0에 가까우며 음의 지수 분포(negative exponential distribution)를 보여주고 동서조는 최빈값이 0에서 멀어지며 대수 정규분포(log-normal distribution)를 나타낸다. 2지점에서는 북북서조와 서북서조가 공히 대략적이지만 음의 지수분포를 보여준다. 3지점의 경우는 북동조와 동서조가 단열 간격의 최빈값이 막대그림의 두 번째 칸에 위치하며 대수 정규분포를 나타내고 있다(Fig. 7c). 여기서 볼 때 단열 간격의 분포가 음의 지수 법칙이나 대수정규법칙이나는 단열 간격의 최빈값의 위치에 의존함을 알 수 있다.

단열의 밀도

각 지점에서 단열의 밀도는 1지점에서 24.4 m/m²로 가장 높은 값을 보여 주고, 3지점 15.5 m/m², 2지점 12.3 m/m²를 나타낸다. 각 지점에서 차츰별로 보았을 때 단열은 1지점과 3지점이 고른 분포를 나타내고 2지점은 다소 불균질한 편이다(Figs. 2, 3 and 4).

단열망의 기하와 연결성

Hancock(1985)은 인접한 단열간의 공간적 연결 관계를 토대로 단열계 구조 유형을 설명하였는데, 평면이나 단면에서 단열자취의 형태로부터 쉽게 감지할 수 있도록 연결 관계를 라틴어 알파벳의 글자 모양을 사용하여 특성화하였다. 본 연구에서는 이 유형을 활용하여 연구 지역 단열망의 유형을 조사하여 보았다(Table 1). 각 지점에서 단열자취 구조 유형은 1지점, 2지점, 3지점 모두

에서 y형이 가장 많이 조사되었으며 그 다음이 I형, T형, X형 등의 순이었다.

암석 단열계에서 투수성은 개개 단열들이 암석을 통하여 연속적인 통로를 형성할 수 있도록 얼마나 많이 교차하고 있고 얼마나 많이 연결되어 있는가에 달려 있다 하겠다. 단열과 단열이 교차하는 교차점의 수는 세 지점 가운데 1지점이 947개로 가장 많고 3지점이 545개로 그 다음이며 2지점이 390개로 가장 적다. 각 지점

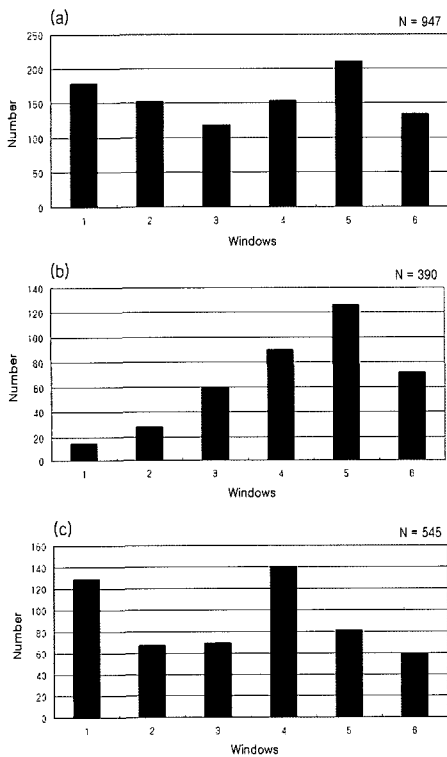
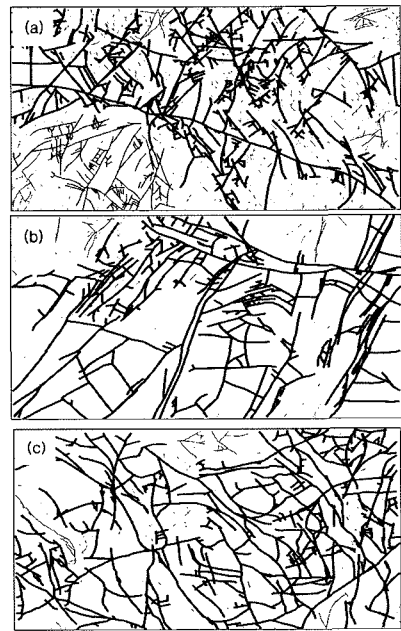


Fig. 8. Histograms showing the number of intersections between fractures in each window at sites 1 (a), 2 (b) and 3 (c).



— ≤1% — ≤3% — ≤6% — ≤12% — ≤25% — ≤50% — ≥50%

Fig. 9. Cluster structure of the window maps at sites 1(a), 2(b) and 3(c). A 'cluster' is a group of interconnected fracture traces. Clusters are identified by line thickness according to the proportion of the total trace length they represent.

Table 1. Distribution of fracture trace architectural types.

Type	Site 1	Site 2	Site 3
A	7	0	0
H	24	13	5
I	304	96	92
K	16	3	6
T	149	74	118
V	13	7	7
X	95	27	70
y	524	249	304
+	20	12	24

에서 창틀별로도 교차점의 수를 세어 보았다(Fig. 8). 1 지점에서는 창틀 중 5창틀에서 교차점의 수가 약간 많은 편이지만 전체적으로는 비슷한 수를 보여준다. 2지점에서는 창틀별 교차점의 수가 상당히 다양한데 교차점의 수가 가장 많은 5창틀은 1창틀에 비하여 무려 8배 이상에 이른다. 3지점에서는 1창틀과 4창틀에서 교차점의 수가 많지만 그 외 창틀에서는 70개 내외로 비슷하다.

단열망에서 단열 간 상호 연결성을 도식적으로 검토해보기 위해 각 지점별로 단열 스케치 그림을 이용하여 클러스터 구조(cluster structure)를 작도하였다(Fig. 9). 여기서 클러스터는 서로 연결된 단열자취의 묶음이다(Odling, 1997). 하나의 클러스터는 주어진 지역에서 단열망을 통하여 유체가 이동할 수 있는 모든 가능한 통로를 제공할 수 있다. Fig. 9에서 클러스터별 총 자취길이의 비율에 따라 선 굵기로 나타낸 클러스터들은 가장 큰 클러스터가 각 지점에서 모두 50%이상을 나타내는 것들이고 작은 클러스터들은 6%이하의 것들이며 중간 크기는 거의 없다.

응용통계기법을 이용한 RMR 분류 수정 제안

연구방법

본 연구에서는 과거의 경험적 방법에 의한 RMR 항목들의 가중치와 배점 설정을 지양하고, 객관적이고 과학적인 방법을 이용하여 연구지역 지질특성을 충분히 반영한 RMR 항목별 가중치를 설정하기 위해 통계학적 방법을 적용하였다. 통계분석방법은 분산이 크고 이질성이 강한 지질자료의 분석에 적합한 다중회귀분석을 적용하였다. 다중회귀분석의 장점은 첫째, 오차분산(error variance)을 줄이고 종속변수에 대해 보다 충분한 설명이나 예견이 가능하다. 또한, 다른 독립변수의 값을 통제된 상태에서 특정 독립변수가 종속변수에 독립적으로 행사하는 영향력을 측정할 수 있고, 각 독립변수가 종속변수에 미치는 효과의 상대적인 비교와 보다 정밀한 인과관계의 분석이 가능하다(채병곤 외, 2006).

본 연구에서는 먼저 단열의 정보를 수집하고자 연구

지역 내 17개 지점에서 현장 정밀조사를 수행하였다. 단열의 조사는 채병곤 외(2006)의 방법과 동일한 방법으로 실시하였다. 또한, 일반적으로 RMR 등급에 따라 사면의 경사도가 민감하게 결정됨을 감안하여 RMR 값과 사면 경사도와 관계에 대한 상관성 분석을 실시하였다. 변수의 결정은 기본 RMR 값과 기본 RMR의 분류인자 인 무결암의 강도, RQD, 간격, 불연속면의 상태, 지하수를 독립변수로 설정하고 사면 경사도를 종속변수로 설정하였다. 추출된 변수들은 다중회귀분석 알고리즘을 통하여 통계프로그램인 SPSS Ver. 13을 사용하여 분석하였다. 분석 결과를 토대로 다중회귀식을 구하였고, 중요도를 산출하여 각 분류인자 간의 배점 보정을 실시하여 RMR수정안을 제시하였다.

분석결과

연구지역의 조사 자료를 이용하여 통계분석을 실시한 결과는 다음과 같다. 모형설계는 사면경사와 RMR 분류인자(R1+R2+R3+R4+R5)로 독립변수와 종속 변수로 설계한다. Table 2는 회귀식의 적합성을 검증한 결과이다. 유의확률이 0.005를 기준으로 0에 근접한 값을 나타내면 적합하다고 본다. 그러나 0.005보다 큰 값을 나타내면 이 회귀모형은 적합하지 않다고 가정하고 회귀모형을 새로 만들어야 한다. 분석결과 유의확률은 0.003으로서 이 모형의 회귀식은 적합한 것으로 검증되었다.

Table 3은 추정된 회귀계수를 검증한 결과이다. 여기서 유의확률 역시 0.005보다 작은 값을 가져야 회귀계수 산정이 적합하게 이루어진 것이다. 그러나, Table 3에서 일부 항목의 유의확률이 0.005보다 큰 값을 나타내지만 Table 2에서 설정된 회귀식이 유의한 것으로 나타났다으므로, 회귀계수 검증에서 일부 항목의 유의확률이 0.005보다 크더라도 전체적인 회귀식과 회귀계수의 유의성은 확보된 것으로 판단할 수 있다. Table 4는 검증된 회귀계수가 설명력이 있는지를 나타낸다. 분석결과 수정된 결정계수(modified r^2)가 1에 가까운 값일수록 회귀계수는 설명력을 가지게 된다. 모형식과 회귀계수가 모두 적합하고 결정계수가 0.808로서 이 분석결과 회귀계수는 설명력이 있는 값으로 채택 될 수 있다.

Table 2. Analysis result of variance.

Model		Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F	Sig.
Slope angle	Regression	1.185	5	0.237	11.123	0.003
	Residual	0.149	7	0.021	-	-
Parameter of RMR	Total	1.334	12	-	-	-

Table 3. Verification result of the inferred regression coefficients of each parameter.

Model		Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	T	Sig.
		B	Std. error	Beta		
Slope angle	Constant	2.272	0.640	-	3.549	0.009
	R1	-0.042	0.0023	-0.286	-1.858	0.106
Parameter of RMR	R2	-0.054	0.010	-0.970	-5.149	0.001
	R3	0.0008	0.041	-0.038	-0.205	0.843
	R4	-0.004	0.017	-0.038	-0.250	0.810
	R5	-0.035	0.023	-0.265	-1.504	0.176

Table 4. Result of a model summary.

Model	R	R ²	Adjusted R ²	Std. Error of the estimate	Durbin-Watson
Slope angle					
Parameter of RMR	0.942	0.888	0.808	0.14595	2.018

Table 5는 추정된 회귀계수를 수량화하여 중요도를 나타낸 것으로서 R1은 18, R2는 61, R3은 2 R4는 2, R5는 17이다. 이 값은 각 요소들이 경사도에 미치는 영향력, 즉 인자별 가중치를 설명한다.

이 결과를 토대로 Table 6에서는 수정된 RMR과 기존의 RMR의 배점 관계에 대하여 비교하였다. 각각의 배점을 살펴보면, 무결압의 강도는 18점으로 3점의 증가를 보였고, RQD는 61점으로 약 3배의 증가를 보였으며, 간격과 분리면의 상태는 2점으로 큰 감소를 보이며, 지하수는 17점으로 2점의 증가를 보이고 있다. 이와 같이 연구지역의 화산암류에서 수정된 RMR 배점의 가장

큰 특징은 암질지수(RQD)의 배점이 61점으로 약 3배의 증가를 보이며, 간격(spacing)인자와 절리면의 상태 인자의 배점이 2점으로 큰 감소를 보인 것이다. RQD의 높은 가중치 부여는 공간적인 블록의 크기(block size)가 본 연구지역의 공학적 특성에 매우 큰 영향을 미침을 의미한다. RQD의 특성상 길이가 짧은 절리가 존재할 경우 엄청난 차이를 보이며 감소한다. 실제 간격자료를 비교해 본 결과, 10 cm 이하의 짧은 분리면의 간격 비율이 set1만이 23%로서 상대적으로 낮은 비율을 보였으며, set2, set3는 각각 47%와 41%의 높은 비율을 보였다. 또한 간격의 가중치가 큰 폭으로 감소한 것은 단열

Table 5. The determined coefficients and quantification result of each RMR parameter.

Explanatory variable	Standardized coefficients	Determined coefficients	Quantification
R1	-0.286	0.18	18%
R2	-0.970	0.61	61%
R3	0.038	0.02	2%
R4	-0.038	0.02	2%
R5	-0.265	0.17	17%
Sum	1.597	1	100%

Table 6. Comparison of the parameters between the preexisting RMR and the modified RMR.

Variable	Parameter	Rating	
		RMR	Modified RMR
R1	Intact rock strength	15	18
R2	RQD	20	61
R3	Spacing	20	2
R4	Discontinuity condition	30	2
R5	Groundwater	15	17
R1+R2+R3+R4+R5	RMRb	100	100

간격의 급간이 매우 크다는 것을 의미한다. 이는 특이한 지질학적 특성을 가지는 단층대에서 기존 RMR인자들 중 간격 인자는 변별력이 감소하기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 또한, 본 연구지역과 같이 절리가 불규칙적으로 조밀하게 발달하는 지역에서는 절리면의 상태 그 자체의 중요도도 상대적으로 감소한다고 할 수 있겠다.

이와 같이 결정된 회귀계수로부터 대단층이 발달하는 화산암 지역에 대한 다음과 같은 모형 식이 도출된다.

$$RMR = 0.18R1 + 0.61R2 + 0.02R3 + 0.02R4 + 0.17R5 \quad (1)$$

$(r^2 = 0.808)$

토 의

Priest와 Hudson(1976)이 야외조사 결과를 토대로 절리간격 분포가 다양하게 놓일 때 음의지수 분포를 합을 통계적으로 보여준 이래, Rives et al(1992)은 유사한 여러 논문을 정리해서 절리 간격의 상대적인 빈도를 음의지수 분포, 대수정규 분포, 정규 분포의 3가지 유형으로 정리하고 있다. 본역에서 절리간격 분포는 각 지점에서 세트별로 음의지수 분포와 대수정규 분포를 함께 보여준다. 음의지수 분포의 경우는 야외노두에서는 항공사진 분석의 경우보다 작은 간격의 자료가 자세히 획득될 수 있기 때문에 음의 지수 분포가 예상될 수 있다 (Priest and Hudson, 1976). 한편 Rives et al.(1992)의 실험에 의하면 단열이 독립적인 생성기구에 의해 발달할 때 음의지수 분포를 하며, 상호작용(interaction process)에 의해 생성될 때는 초기 단계에서 음의지수 분포를 하고 단열밀도가 증가함에 따라 대수정규 및 정규 분포를 보여주고 있다. 1지점의 동서조와 3지점의 북동조 및 동서조의 단열들은 신장단열로서 상호작용에 의해 생성되어 높은 밀도를 보여줌으로서 대수정규 분포를 나타내는 것으로 생각된다. 그러나 1지점의 북북서조 단열과 2지점의 북북서조 및 서북서조 단열들의 음의지수 분포는 이 노두를 통해 이들 단열이 생성기구가 단순한 조밀 간격의 전단단열로 나타나는데 따르는 것으로 생각된다. 최한우와 장태우 (1999)는 모량단층 연구에서 전단단열이 지배적인 단층대의 중심에서 음의지수 분포를 합을 보여주고 있다.

단열길이의 누적빈도 분포 그림에서 커브 모양은 분포의 성질을 평가하고 자기 유사성과 스케일 독립(scale independence)을 시험하는데 사용된다(Cladouhos and Marret, 1996; Flodin and Aydin, 2004). 양대수 그래프에서 직선 분절은 멱법칙 공식의 지수로서 이 선의

기울기를 프랙탈 차원이라 부를 때 멱법칙 스케일링(power-law scaling)을 지시한다(Flodin and Aydin, 2004). Cladouhos and Marret(1996)은 출간된 여러 지역의 지질도로부터 추출한 자연 단층군의 멱법칙지수를 보고하였는데 스케일 범위가 $-0.67 \sim -2.07$ 을 보여주고 있다. 본 역의 세 지점에서 단열길이 분포는 누적빈도 그림 (Fig. 6) 중앙의 직선 구간이 1지점 -1.52 , 2지점 -1.01 , 3지점 -1.13 의 지수를 갖는 멱법칙 누적분포를 지시하고 앞의 자연단층군의 멱법칙 지수 범위 내에 들어간다. 그러나 이 지수들은 엄격히 자기 유사한 경우 즉 -2.0 (Odling, 1997)과는 상당히 다르다. 그림의 왼쪽에 나타나는 기울기의 변화는 측정 기법의 적용 한계 혹은, 측정 되지 않았거나 측정할 수 없는 많은 짧은 단열의 존재로 일어날 수 있다(Odling, 1997; Mansfield and Cartwright, 2001; Swanson, 2006). 또 그림의 오른쪽 아랫부분은 커브가 가팔라지는데 이는 구름(rollover)이라 불리우며(Cladouhos and Marret, 1996) 긴 단층들이 측정 노두 면적을 벗어남에 따라 과소평가되어 나타날 수 있다(Swanson, 2006).

Hancock(1985)에 의한 단열망 구조 양식에서 K형, I형, T형은 신장단열로 해석되고 V형, y형, X형은 대부분 혼성단열 혹은 전단단열로 판단한다. 이러한 자료를 토대로 할 때 세 지점에서 모두 전단단열과 신장단열이 분포하지만 전단단열이 훨씬 많은 것으로 나타난다(Table 1). 이점은 1지점과 2지점의 경우는 노두 관찰 결과와 상당히 부합한다고 할 수 있다. 그러나 3지점의 경우는 야외조사에서 대부분의 단열이 신장단열로 판단되었는데도 y형이 매우 많다. 이것은 신장단열도 y형 교차할 가질 수 있음을 이야기하며 신장단열이 분기되며 중지하거나 한 단열이 기존의 다른 단열을 향해 굴곡하며 중지함으로 y형이 생길 수 있을 것이다(Twiss and Moore, 1992). 또 신장단열이 생성되는 과정에서 두개의 평행한 단열이 마주보고 전파될 때 상호작용으로 갈고리 기하(hook geometry)를 가짐으로써 가능할 수 있다(Rives et al., 1992). 나아가서 Dunne and Hancock (1994)에 의하면 단열을 생성시킬 때 작용하는 세 개의 주응력의 크기가 모두 같을 때 K형과 더불어 y형이 특징적으로 신장 단열로 생길 수 있다고 한다. 1지점과 2지점에서 신장단열은 대부분 I형과 T형이며 크기가 작은 것들인데 반해 y형과 X형의 전단단열들은 크기가 상당히 크다. 이렇게 큰 전단단열이 풍부한 것은 인접한 일광단층과 일광단층에서 분기하는 N35E단층이 활동할 때 그 영향권에서 부수 전단단열로 광범하게 수반되었

기 때문으로 생각된다.

각 지점별로 암반의 역학적 성질 및 투수성을 규제하는 요소들을 비교, 검토해 보기로 한다. 1지점은 단열간격이 가장 조밀하고 균질하게 분포하며, 밀도는 세 지점 중 가장 높고 창틀별로도 고른 분포를 나타내며, 단열 간 교차점의 수도 가장 많고 창틀별로 균질하게 분포한다. 이에 반해 2지점은 세 지점 중 단열의 간격은 가장 크고 밀도는 낮으며 교차점의 수는 가장 적고 이들 요소들은 모두가 창틀별로 매우 불균질하게 분포한다. 3지점은 모든 면에서 중간정도이다. 단열의 간격 및 밀도, 단열 간 교차점의 수는 암반에 형성되는 암괴의 크기를 규제하는데(Rives et al. 1992) 노두에서 볼 때 1지점이 가장 작은 크기의 블록을 형성하는 것을 볼 수 있다. 그럼으로, 1지점이 암반의 안정성과 강도가 가장 낮다고 하겠고 2지점이 가장 높다. 사면 안정성 측면에서 단열 발달 정도와 함께 사면에 대한 단열의 배향이 중요 인자가 될 수 있다. 즉 사면의 배향과 사면에 발달하는 단열의 배향이 평행할 때 사면 안정성에 끼치는 영향은 최대가 될 것이다. 1지점에서 사면은 N30E, 50SE이고 단열의 배향은 하나의 우세조가 N20W, 75NE, 다른 조가 N85W, 55S를 가리키고, 2지점에서는 사면이 N20E, 50NW이고 단열의 배향은 우세조가 N60W, 55SW이고 부수조가 N30W, 85SW이며, 3지점에서 사면은 N20W, 45NE를 나타내고, 단열은 우세조가 N45E, 85NW이고 부수조가 EW, 85S를 가리킨다. 이렇게 볼 때 세 사면 모두에서 이들 단열은 사면과 대체로 큰 각을 이룸으로서 사면에 끼치는 영향은 미미한 것으로 생각할 수 있다(Fig. 5).

암반 내 투수성도 단열의 간격 및 밀도, 단열 간 교차점의 수에 영향을 크게 받는다고 할 때 단열의 밀도가 높고 교차점의 수가 가장 많은 1지점(Fig. 8) 투수성이 가장 좋고 다음으로 3지점, 2지점의 순으로 볼 수 있다. 그러나 암석 단열계에서 투수성을 규제하는 중요한 양상 중의 하나는 암석을 통해서 유체 이동의 연속적인 통로 역할을 할 수 있도록 개개 단열이 얼마나 연결되어 있나 하는 점일 것이다. 그럼으로 주어진 지역에서 단열계 기하가 유체이동을 이끌게 되는 능률은 그 지역에서 최대 클러스터에 속하는 총 단열길이의 비율로 평가할 수 있다(Odling, 1997). 각 지점에서 최대 클러스터들은 1지점에서 57%, 2지점에서 62%, 3지점에서 73%를 점하며 모든 지점에서 연결성이 아주 좋은 편이지만 그중에서도 3지점이 전 면적을 통하여 가장 잘 연결되어 있음을 보여준다(Fig. 9). 그렇기 때문에 유체이동의 능률은 단열의 밀도와 단열 간 교차점의 수에 의해 평가한 전술한 결과와는 달리 3지점이 가장 높고 2지점이 그 다음이며 1지점이 가장 낮음을 나타낸다. 나아가서 유체 이동의 능률이 높은 3지점의 단열들은 1지점보다 길이가 긴 것들이 많고 서로 연결되어 형성하는 최대 클러스터가 전 지역에 고루 분포하고 있다(Fig. 9). 이에 반해 1지점은 단열의 밀도도 높고 교차점의 수도 많지만 끝이 막힌(dead-end) 단열들로 이루어진 규모가 작은 클러스터들의 비율이 높기 때문에 유체 이동의 능률이 가장 낮은 것으로 평가 될 수 있다.

한편, Table 7은 기존 RMR값과 본 연구에서 수정 제안된 RMR값을 나타낸 표로서, 점수 차이는 4-16점의 차이를 보인다. Fig. 10은 두 RMR의 상관성을 분

Table 7. Values of the preexisting RMR and the modified RMR for the study area.

Study area	Preexisting RMR						Modified RMR						Difference
	R1 (15)	R2 (20)	R3 (20)	R4 (30)	R5 (15)	RMR (100)	R1 (18)	R2 (61)	R3 (2)	R4 (2)	R5 (17)	Modified RMR(100)	
1	7	13	8	19	15	62	8.4	39.7	0.8	1.3	17.0	67.1	(5.1)
2	12	17	8	17	10	64	14.4	51.9	0.8	1.1	11.3	79.5	(15.5)
3	7	13	8	20	15	63	8.4	39.7	0.8	1.3	17.0	67.2	(4.2)
4	7	17	10	21	7	62	8.4	51.9	1.0	1.4	7.9	70.6	(8.6)
5	4	13	8	13	15	53	4.8	39.7	0.8	0.9	17.0	63.1	(10.1)
6	7	17	8	16	15	63	8.4	51.9	0.8	1.1	17.0	79.1	(16.1)
7	4	3	5	19	15	46	4.8	9.2	0.5	1.3	17.0	32.7	13.3
8	4	3	5	15	15	42	4.8	9.2	0.5	1.0	17.0	32.5	9.6
9	7	3	8	16	15	49	8.4	9.2	0.8	1.1	17.0	36.4	12.6
10	7	3	5	17	15	47	8.4	9.2	0.5	1.1	17.0	36.2	10.8
11	7	3	8	17	15	50	8.4	9.2	0.8	1.1	17.0	36.5	13.5
12	4	13	8	15	15	55	4.8	39.7	0.8	1.0	17.0	63.3	(8.2)
13	4	13	8	10	15	50	4.8	39.7	0.8	0.7	17.0	62.9	(12.9)

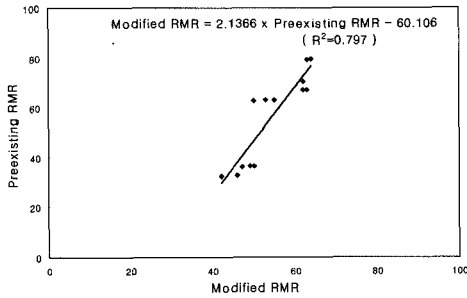


Fig. 10. Correlation between the preexisting RMR and the modified RMR.

석한 것이다. 이들 간의 상관성 분석은 기존의 RMR과 본 연구지역 화산암류 암반에서 수정 제안된 RMR과의 관계를 확인하고, 이를 통해 수정 제안된 RMR의 적정성을 검증할 수 있다.

이를 통해 수정 제안된 RMR과 기존의 RMR의 관계는 Eq. 2와 같다.

$$\text{Modified RMR} = 2.137 \times \text{Preexisting RMR} - 60.106 \quad (R^2 = 0.797) \quad (2)$$

이러한 관계는 극단적인 경우 20점 이상의 차이를 가져올 수 있으며, 이는 건설·시공 지반의 안정성에 중요한 영향을 미칠 수 있을 것으로 생각된다.

결 론

본역 중앙부를 N10E의 주향을 가지고 북북동-남남서로 달리는 일광단층이 발달하며, 기장읍 남쪽에서 일광단층이 분기되는 형태로 N35E의 북서-남서 방향의 단층이 이번 조사에서 기재되었으며 그 외 여러 노두에서 소규모의 조선단층을 포함한 단열들이 큰 단층 부근에 무수히 발달한다.

창틀 맵핑이 수행된 각 노두에서 절리 간격 분포는 신장단열은 대수정규 분포를 보여주고, 전단단열은 음의 지수분포를 보여준다.

단열길이 누적빈도 분포 그림에서 중앙의 직선구간이 1지점 -1.13, 2지점 -1.01, 3지점 -1.52의 지수를 가지며 멱법칙 누적분포를 지시한다.

단열망 구조 양식을 조사해보면 세 지점에서 모두 전단단열을 지시하는 y형이 가장 풍부하게 나타난다. 그러나 3지점의 경우는 대부분 신장단열이면서도 y형 교차를 하는 것으로 판단된다. 1지점과 2지점에서 신장단

열은 대부분 I형과 T형이다. 특히 전단단열은 크기가 상당히 큰 것들인데 반해 신장단열은 매우 작은 크기이다. 전단단열이 각 지점 노두에서 풍부한 것은 인접한 일광단층과 일광단층에서 분기하는 N35E단층이 활동할 때 그 영향권에서 부수 전단단열로 광범하게 수반되었기 때문으로 생각된다.

암반의 역학성을 검토해볼 때 1지점은 단열간격이 가장 조밀하고 밀도는 세 지점 중 가장 높고 창틀별로도 고른 분포를 나타내며, 단열 간 교차점의 수도 가장 많고 창틀별로 균질하다. 2지점은 세 지점 중 단열의 간격은 가장 크고 밀도는 낮으며 교차점의 수는 가장 적다. 3지점은 모든 면에서 중간정도이다. 그럼으로 2지점이 암반의 안정성과 강도가 가장 높다하겠고 1지점이 가장 낮다.

암반 내 투수성도 단열의 간격 및 밀도, 단열 간 교차점의 수에 영향을 크게 받는다고 할 때 1지점이 투수성이 가장 좋고 다음으로 3지점, 2지점의 순으로 볼 수 있다. 그러나 각 지점에서 얻은 최대 클러스터로 평가할 때 유체이동의 능률은 앞의 평가와는 달리 3지점이 가장 높고 2지점이 그 다음이며 1지점이 가장 낮다. 이는 3지점이 상대적으로 단열의 길이가 긴 것들이 많으며 이들이 서로 연결하여 형성하는 최대 클러스터가 높은 비율로 전 지역에 고루 분포하고 있기 때문으로 볼 수 있다.

한편, 대단층이 발달하는 화산암 지역을 대상으로 RMR 분류항목과 사면경사와의 관계를 기본으로 각 항목별 중요도를 산출하고 이를 통해 항목별 배점을 수정하였다. 중요도는 각 분류인자들과 경사도의 인과관계를 분석한 결과 값으로서, RMR분류 인자간의 보정된 배점 값을 의미한다. 이는 기존 RMR로부터 수정 제안하는 RMR의 배점을 나타내는 것으로서, 특이한 점은 RQD의 중요도가 기존 20점에서 61점으로 3배 증가하였고 불연속면 간격과 불연속면 조건은 20점, 30점에서 각각 2점으로 급격히 감소하였다. 이는 대단층 발달지역에서는 불연속면의 간격이 매우 좁고 비슷한 양상을 나타내고 불연속면의 조건 또는 유사한 양상을 나타내므로 변별력이 떨어져 사면경사에 미치는 중요도가 낮은 것으로 해석할 수 있다.

사 사

본 연구는 2006년 한국지질자원연구원이 주 저자에게 지원한 위탁연구과제로 수행되었으며 이에 사의를 표한

다. 야외 자료 수집과 실내 자료 정리를 도와 준 경북대 구조지질학연구실 학생들에게 고마움을 전한다. 또한, 본 연구의 일부 내용은 2007년 한국지질자원연구원 기본사업의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 한국지질도 동태·월내도폭 (1:50,000), 자원개발연구소.
- 채병곤, 김광식, 조용찬, 서용석, 2006, 암반사면을 대상으로 다변량 수량화 기법을 응용한 RMR 인자의 수정 가중치 제안, 지질공학, 16, 85-96.
- Cladouhos, T. T. and Marret, R., 1996, Are fault growth and linkage models consistent with power-law distributions of fault lengths?, J. Struct. Geol., 18, 281-293.
- Dunne, W. M. and Hancock, P. L., 1994, Palaeostress analysis of small-scale brittle structures, In: Continental deformation (edited by Hancock, P. L.), Pergamon press, 101-120.
- Flodin, E. A. and Aydin, A., 2004, Evolution of a strike-slip fault network, Valley of Fire State Park, southern Nevada. Geol. Soc. Am. Bull., 116, 42-59.
- Hancock, P. L., 1985, Brittle microtectonics: principles and practice, J. Struct. Geol., 7, 437-457.
- Mansfield and Cartwright, 2001, Fault growth by linkage: observations and implications from analogue models, J. Struct. Geol., 23, 745-763.
- Odling, N., 1997, Scaling and connectivity of joint system in sandstones from Western Norway, J. Struct. Geol., 19, 1257-1271.
- Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1976, Discontinuity spacings in rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 13, 135-148.
- Ramsay, J. G. and Huber, M. I., 1987, The techniques of modern structural geology, Academic Press, 700p.
- Rives, T., Razack, M., Petit, J. P. and Rawnsley, K. D., 1992, Joint spacing: analogue and numerical simulations, J. Struct. Geol., 14, 925-937.
- Swanson, M. T., 2006, Late Paleozoic strike-slip faults and related vein array of Cape Elizabeth, Maine, J. Struct. Geol., 28, 456-473.
- Twiss, R. J. and Moore, E. M., 1992, Structural geology, W. H. Freeman and Company, 532p.

장태우

경북대학교 자연과학대학 지질학과
702-701, 대구시 북구 산격동 1370
Tel: 053-950-5361
Fax: 053-950-5362
E-mail: twchang@knu.ac.kr

이현우

(주)산하이엔씨
462-120, 경기도 성남시 중원구 상대원동 190-1
Tel: 031-776-0682
Fax: 031-776-0688
E-mail: walktoremember@nate.com

채병곤

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350, 대전시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3052
Fax: 042-868-3415
E-mail: bgchae@kigam.re.kr

서용석

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 12
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-276-9645
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

조용찬

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3059
Fax: 042-868-3415
E-mail: choych@kigam.re.kr