

모량단층 주변 절리의 분포 특성과 프랙탈 해석

Properties and Fractal Analysis of Joints around the Moryang Fault

최 한 우 (Han Woo Choi)
장 태 우 (Tae Woo Chang)

경북대학교 지질학과
경북대학교 지질학과

요약 / ABSTRACT

모량단층 주변에 발달하고 있는 절리의 분포상태를 알아보기 위해 횡단법(橫斷法)과 재고법(在庫法)을 이용하여 절리의 배향, 간격, 밀도 등을 조사하였다. 횡단법에 의한 조사에 의하면 연구지역에서 가장 우세방향의 절리조는 NNE와 EW방향으로 나타나며, 이들 절리들의 간격분포는 단층의 중심부에서 음의 지수분포, 단층에서 먼 지점에서 대수-정규 분포를 보여준다. 재고법의 조사결과에 의하면 각 절리도(節理圖)상에서 우세한 절리조의 방향은 NW와 NE방향이며, 절리밀도는 단층의 중심부로 가까워질 수록 높게 나타난다. 또한 연구지역에서 발달하고 있는 절리망에 대해 박스카운팅법과 캔터의 먼지법을 이용하여 프랙탈 차원을 구하여 정량화시키고 단층주변에서의 분포양상을 살펴보았다. 박스카운팅법에 의해 구한 프랙탈 차원은 1.31~1.70의 범위를 보여주며, 단층의 중심부에 가까워질수록 높게 나타난다. 그리고 박스카운팅법에 의해 구한 프랙탈 차원과 절리밀도를 비교해보면 이들은 서로 비례 관계에 있으나 프랙탈 차원은 동일 밀도지역에서 절리의 분포상태에 따라 달라질 수 있다. 캔터의 먼지법에 의해 구한 프랙탈 차원은 설치하는 축선의 방향에 따라 다양하게 나타나며 이는 절리의 분포가 이방성을 나타냄을 보여준다.

주요어 : 횡단법, 재고법, 프랙탈 차원, 절리분포의 이방성

Joints developed around the Moryang fault were investigated by traverse and inventory methods in order to characterize their orientation, spacing and density. The results of the traverse method show that the orientation of the dominant joint sets of the study area is NNE and EW, and that joint spacing distribution is a negative exponential distribution to the center of the fault and a log-normal distribution to the margin of the fault. The results of the inventory method show that the orientation of the dominant joint sets on joint map is NW and NE, and that joint density tends to increase toward the center of the fault. Fractal dimension was determined by using Box-counting method and Cantor's dust

method to quantify the distribution of joint network and to evaluate the dimension around the fault. The dimension determined by Box-counting method ranges from 1.31 to 1.70 and shows the tendency of increasing value toward the center of the fault. Comparing fractal dimension by Box-counting method with joint density, fractal dimension is directly proportional to joint density. Nevertheless, fractal dimension could be varied due to the different distribution patterns of the joints with same density. The dimensions determined by Cantor's dust method show different values with respect to the orientation of scan lines. This results form the anisotropy of joint distribution.

Key Word : Traverse method, inventory method, fractal dimension, anisotropy of joint distribution.

서 언

프랙탈은 길이의 축척변화에 무관하게 항상 같은 형태를 가지는 자기유사성(self-similarity)을 기본개념으로 하며, Mandelbrot(1983)에 의해 자연계의 복잡한 기하학적인 특성을 규정하기 위해 도입된 이후 지질학 분야에서도 지진, 지하수, 단층(Cello, 1997), 절리망(선우춘, 1989; Velde et al., 1990, 1991; Barton and La Pointe, 1995; Odling, 1997)등에 대해 프랙탈 개념에 관한 연구가 수행되었다. 지금까지는 실제로 야외에서 나타나는 복잡한 형태의 절리망에 대해 배향, 간격, 간극, 충전물 등의 각각의 분포상태로 표현할 수 있었지만 실제 값으로 나타내기는 어려운 점이 있었다. 그러나 절리망에 대한 프랙탈 차원을 구하여 이들을 정량화(定量化)시킬 때 절리망의 공간적인 분포상태를 표현하는 지표로서 응용지질학 분야에 기초자료로 이용될 수 있을 것으로 본다.

본 연구는 단층 주변에 발달하는 절리들에 대해 배향, 간격, 밀도 등을 조사하여 단층작용과 관련한 절리발달 특성을 구명하고, 프랙탈 개념을 적용하여 이 지역 절리망에 대해 프랙탈 차원을 구하여 이들을 상호 비교·검토하는데 그 목적이 있다. 연구대상 단층으로는 양산단층의 서편에 위치하는 모량단층을 선정하였다.

본 연구에서의 야외 절리 조사는 모량단층 주변, 주로 유천층군과 불국사 관입암류의 분포지역 약 110여 군데의 조사지점에서 절리의 배향, 간격 등 절리 특성을 중점적으로 조사하였다. 이 중 48개 지점에서는 계곡을 따라 발달하고 있는 바닥노두를 1×1m의 격자(grid)를 이용해서 스케치하여 실내에서 자취 길이의 배향, 절리밀도, 프랙탈 차원등을

산출하였다. 또한 본역의 절리분포에 있어서 단층에 의한 영향력을 파악하기 위해 각 조사지점들을 크게는 모량단층을 중심으로 동, 서 지역으로 나누고 이를 다시 단층의 주향에 대해 수직인 방향으로 0.5km 이내, 0.5~2km, 2km 이상으로 각각 구분하여 프랙탈 차원, 절리밀도, 절리간격 등을 산출하여 상호 비교하였다. 거리구분은 야외조사와 실내작업 과정에서 거리별 상기 값들의 변화양상으로부터 결정되었다. 연구 범위는 모량단층 서편의 밀양단층과 동편의 양산단층의 영향을 고려하여 전체 거리영역을 8km로 제한하였다.

지 질

연구지역은 백악기 하양층군의 퇴적암류와 유천층군의 화산암류, 불국사 관입암류 등으로 구성되어 있다(Fig. 1). 하양층군의 퇴적암류로는 본역의 북부와 북동부에 각각 함안층과 건천리층이 소규모 분포하고 있으며 이들은 주로 낮은 지형을 이루고 있다. 함안층은 본역의 북동부, 즉 경주시 내남면 일대에 소규모 분포하고 있으며, 1:50,000 모량도폭(김남장·진명식, 1971)에서는 신라통의 대구층으로 기재하였으나, 장기홍(1977)은 함안층으로 불렀다. 본층은 주로 회색 내지 녹회색 세일로 구성되며 불국사 관입암류의 관입으로 그 접촉부에서 혼펠스화되어 있다. 충리면의 주향은 N20°~30°W, 경사는 10°~20°SW를 나타낸다. 건천리층은 하양층군 퇴적암류 중 최상부에 해당되는 지층으로 연구지역의 북부 즉 경주시 건천읍 화천리, 모량리 등에 소규모 분포하고 있다. 주로 흑색 내지 녹회색 세일, 사암 등으로 구성되어 있으며, 모량단층을 중심으로 동편에서는 N15°E/20°NW, 서편에서는 N70°W/12°

모랑단층 주변 절리의 분포 특성과 프랙탈 해석

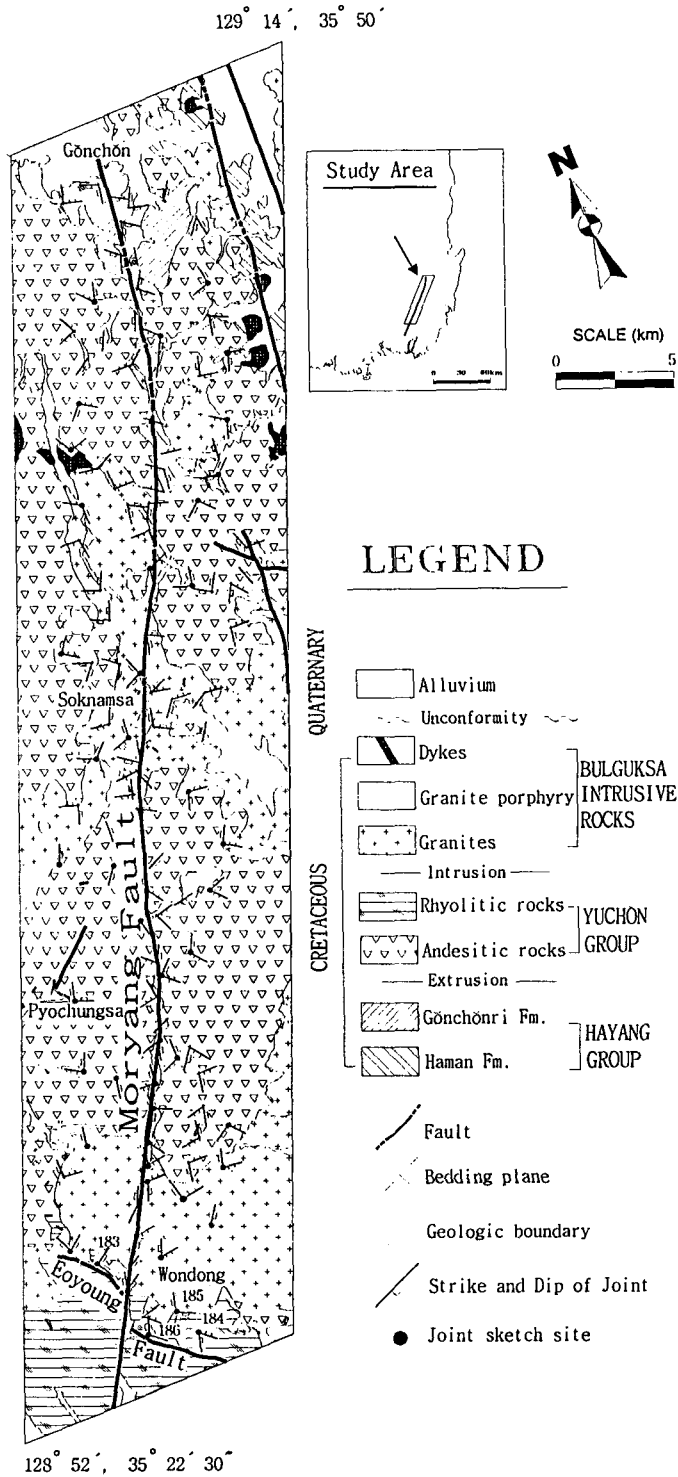


Fig. 1. Geological map of the study area.

SW로 서로 다른 자세를 보여준다. 이 층의 암상도 불국사 관입암류의 관입으로 혼펠스화되어 있다.

유천층군의 화산암류는 본역에서 가장 넓은 분포를 나타내는 암층으로 하부의 안산암질암과 상부의 유문암질암으로 크게 나눌 수 있다. 안산암질암은 전지역에 걸쳐 골고루 분포하고 있으며, 유문암질암은 본역의 남부에 집중적으로 분포한다. 안산암질암은 주로 암록색·녹회색의 안산암, 석영안산암, 안산암질 각력암 등으로 구성되어 있으며, 지역에 따라서 응회암질암류들이 나타나기도 한다. 유문암질암은 주로 유문석영안산암질 각력암, 래피리 응회암 등으로 구성된다. 불국사 관입암류는 불국사 화강암, 언양 화강암 등의 화강암질암류와 반암류 등으로 구성되고 하양층군 퇴적암류와 유천층군의 화산암류들을 관입하여 주로 본역의 중부와 남부에 분포한다. 화강암질암류는 주로 흑운모 화강암, 각섬석 흑운모 화강암으로 나타나며 특히 안산암질암류의 접촉부에 이를 수록 세립 내지 중립의 반상화강암, 미문상 화강암, 화강반암 및 화강섬록암의 암상을 보여준다. 반암류들은 석영반암, 화강반암 등으로 구성되며 대부분이 소규모로 계곡과 산 정상부에 분포한다.

모랑단층과 부수(소)단층

모랑단층은 양산단층의 서편에 위치하고 있으며 김해시에서부터 약 N20°E의 선주향을 가지고 뚜렷한 단층계곡을 형성시키며 북으로 연장 발달하고 있다. 그러나 전반적으로 이 단층은 석남사를 중심으로 그 이남과 이북에서 단층계곡의 표출형태를 달리하고 있다. 석남사 이남지역에서는 이천휴양림 계곡 등의 NNE-SSW 방향의 단층을 따른 계곡의 발달이 현저하고, 실제 야외조사에서도 단층의 증거를 쉽게 발견할 수 있다. 특히 계곡 주변에서는 여러 개의 소단층들의 파쇄대를 관찰할 수 있었는데 양산군 원동면 배태고개, 원동면 선리의 사면노두의 파쇄대에는 약 10~20cm 정도의 두께를 갖는 단층비지(fault gouge)를 발달시키고 있다. 그 외에도 여러 군데 파쇄대가 관찰되었으나 단층비지의 발달은 뚜렷하지 않았다. 비록 단층비지가 생성되었다 하더라도 대부분이 계곡의 하천바닥에 분포하

여 층적층으로 피복되어 육안으로의 노두 확인이 어려웠고, 아마도 단층비지대의 폭은 그리 넓지 않은 것으로 생각된다. 석남사 이북지역에서는 단층계곡의 표출이 현저하지 않고, 단층대의 폭도 다소 좁아지는 등의 단층발달이 다소 약해 보인다. 그러나 건천읍 화천리 부근의 퇴적암 노두에서 단층 파쇄대를 관찰할 수 있었는데, 단층비지는 약 1~5cm의 두께로 비교적 단속적으로 나타난다.

본역에서 측정된 소단층들은 대부분이 노두규모의 것으로 약 50개에 대해 단층면상의 미끄럼선, 2차단열 등을 이용하여 이동감각을 결정하였고, 소단층면의 배향, 선주각(rake), 미끄럼선의 배향 등을 측정하여 소단층의 기하학적 양상을 장미그림으로 나타내었다(Fig. 2). 본역에 분포하는 소단층들의 배향은 다양한 편이긴 하지만 모랑단층과 평행한 약 N10°~30°E의 방향이 가장 우세하게 나타나며 N70°~80°W 방향도 비교적 우세하다. 소단층면의 경사는 대부분 70° 이상의 고각이고 선주각은 대부분 저각(< 45°)으로 주향이동성 운동의 성분이 우세함을 나타낸다. 보다 자세한 소단층의 기하를 분석하기 위해 위의 자료 중 모랑단층운동과 직접 관련있는 것으로 생각되는 단층중심부에서 0.5km 이내의 범위에서 측정된 자료를 가지고 등면적 입체망에서 이들에 대한 슬립리니어(slip linear)(예 : Marshak and Mitra, 1988 ; 장태우 등, 1993)를 그려 보았다(Fig. 3). 이는 전체 소단층의 분석결과와 대동소이하나 좀 더 뚜렷한 NNE 방향의 집중현상을 보이고, 또한 경사이동성 보다는 주향이동성운동이 강했음을 지시하고있다.

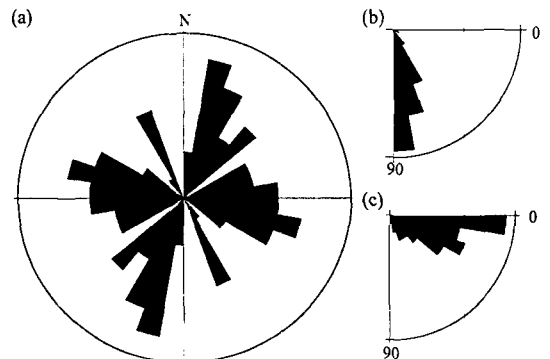


Fig. 2. Rose diagrams of strike (a), dip (b) and rake (c) of minor faults(n=50) around the Moryang fault.

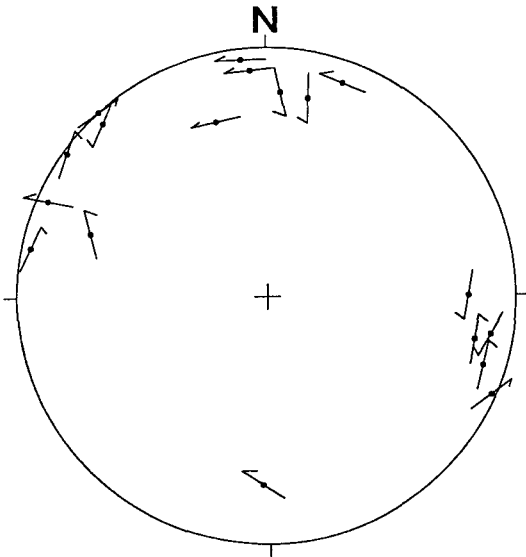


Fig. 3. Slip lines for minor fault data (n=18) collected within 0.5km from the Moryang fault.

절 리

본 논문에서 절리의 야외 자료 수집은 횡단법(橫斷法, traverse method)과 재고법(在庫法, inventory method)을 이용하였다(예: Marshak and Mitra, 1988). 먼저 횡단법의 경우 모량단층 주변에서 약 110여 군데의 노두를 선정하여 각 지점마다 약 20~30m의 측선을 설치한 후 가장 우세한 규칙 절리조들의 배향과 간격을 측정·분석하였다. 이때 절리의 간격은 각 조사지점마다 우세 절리조에 대해 인접한 절리사이의 수직거리를 측정하였다. 그 외에도 각 규칙 절리조들 간의 생성순서를 조사하였다. 다음으로 재고법을 통해 계곡주변의 바다노두만을 선정해서 그 지역을 대표할 수 있다고 판단되어지는 부분을 선택하여 1×1m의 격자를 설정한 후 바다노두를 스케치 하였으며, 이를 통해 48개 지점에 대한 절리도를 작성하여 실내에서 절리의 배향과 밀도를 구하였다. 이때 절리의 배향은 절리도상에서 각 절리자취의 선주향을 측정하였고, 절리밀도는 일정한 면적내의 모든 절리의 길이(L_{total})를 측정하여 그 합을 면적(A)으로 나누어 절리밀도

(D)를 구하는(Davis, 1984) 면적방법(area method)을 이용하여 절리의 밀도를 구하였다.

$$D = \frac{L_{total}}{A} \quad (m/m^2) \dots \dots \dots (1)$$

횡단법에 의한 절리의 특성

절리의 배향

본역에 발달하고 있는 규칙절리들은 대체적으로 모량단층의 주향 방향과 평행한 $N0^{\circ} \sim 30^{\circ}E$ 방향이 가장 많이 분포하고 그 다음으로는 $N80^{\circ} \sim 90^{\circ}W$ 방향의 절리들이 풍부하며, 이들 절리들의 경사는 대부분이 80° 이상의 고각을 이루고 있다(Fig. 4). 특히 NNE와 EW 절리조들은 그 방향성이 모두 규모의 소단층들의 방향과 거의 일치하며 지역에 따라서는 절리면상에 단층운동시 생성되는 미끄럼선이나 2차 단열 등이 관찰되기도 하는 것으로 보아 이들 규칙 절리들은 대부분 전단절리로서 단층운동과 밀접히 연관되어 생성되었음을 시사하고 있다. 대부분의 조사지점에서 두 절리조는 서로 교차하는 양상으로 많이 나타난다. 단층의 주향 방향에 대한 수직거리별 절리배향을 분석한 결과는 Fig. 5와 같으며 모량단층의 서편 2km이상 지역에서는 다양한 방향의 절리조가 분포하는 반면, 동편 2km이상 지역에서는 NNE와 EW 방향의 집중성이 아주 현저하다.

절리의 간격

각 조사지점마다 NNE와 EW 방향의 절리조들에 대해 절리간격을 5cm 구간으로 나누어서 각 구간별 절리간격의 백분율 빈도(percentage frequency)를 구하여 이들을 그래프로 나타내었다(Fig. 6). 단층의 중심부 즉 0.5km 이내에서는 음의 지수분포를 보이며, 단층의 중심부에서 거리가 멀어질수록 즉 0.5~2km, 2km 이상지역에서는 대수-정규 분포를 보여 주고 있다. 특히 서편 2km 이상 지역(Fig. 6a)에서는 동편 2km 이상 지역에 비해 다소 불규칙한 형태를 보여준다. 또한 각 조사지점별 절리간격의 평균값을 구하여 이들을 단층의 주향방향에 대해 수직거리별 분포양상을 그래프로 나타내어 보았다

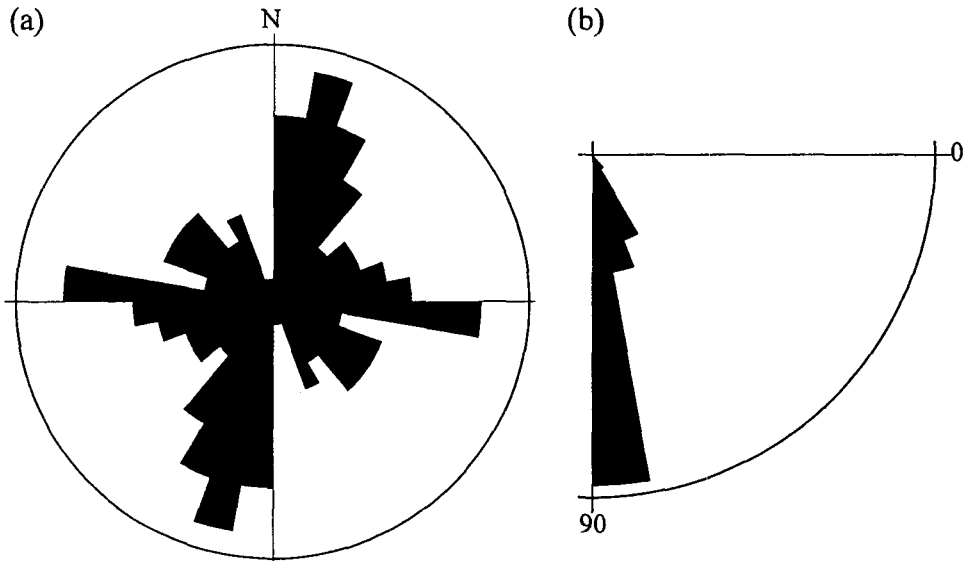


Fig. 4. Rose diagrams of strike (a) and dip (b) of all systematic joints measured around the Moryang fault.

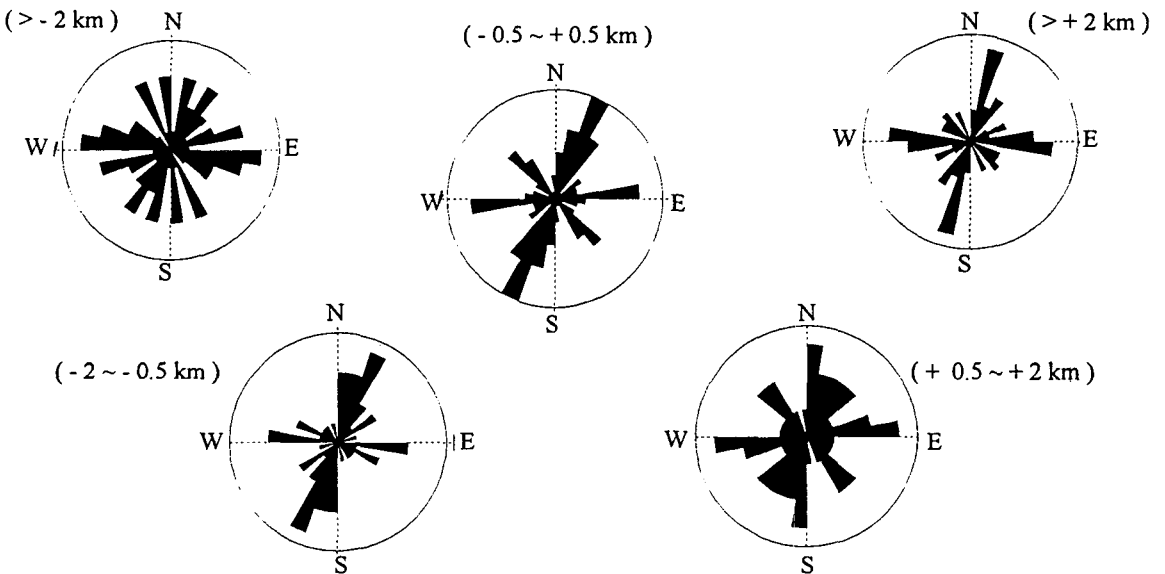


Fig. 5. Rose diagrams of systematic joints in each zone divided by distance from the Moryang fault. (-) sign represents western side and (+) sign represents eastern side of the Moryang fault.

(Fig. 7). 단층의 중심부에서 멀어짐에 따라 절리의 간격이 점차 커짐을 나타내는데, 이를 수치로 보면

평균 절리간격(S_{mean})이 단층의 중심부 0.5km 이내 영역에서 약 8.6cm, 0.5~2km 영역에서 13.9cm, 단

모량단층 주변 절리의 분포 특성과 프랙탈 해석

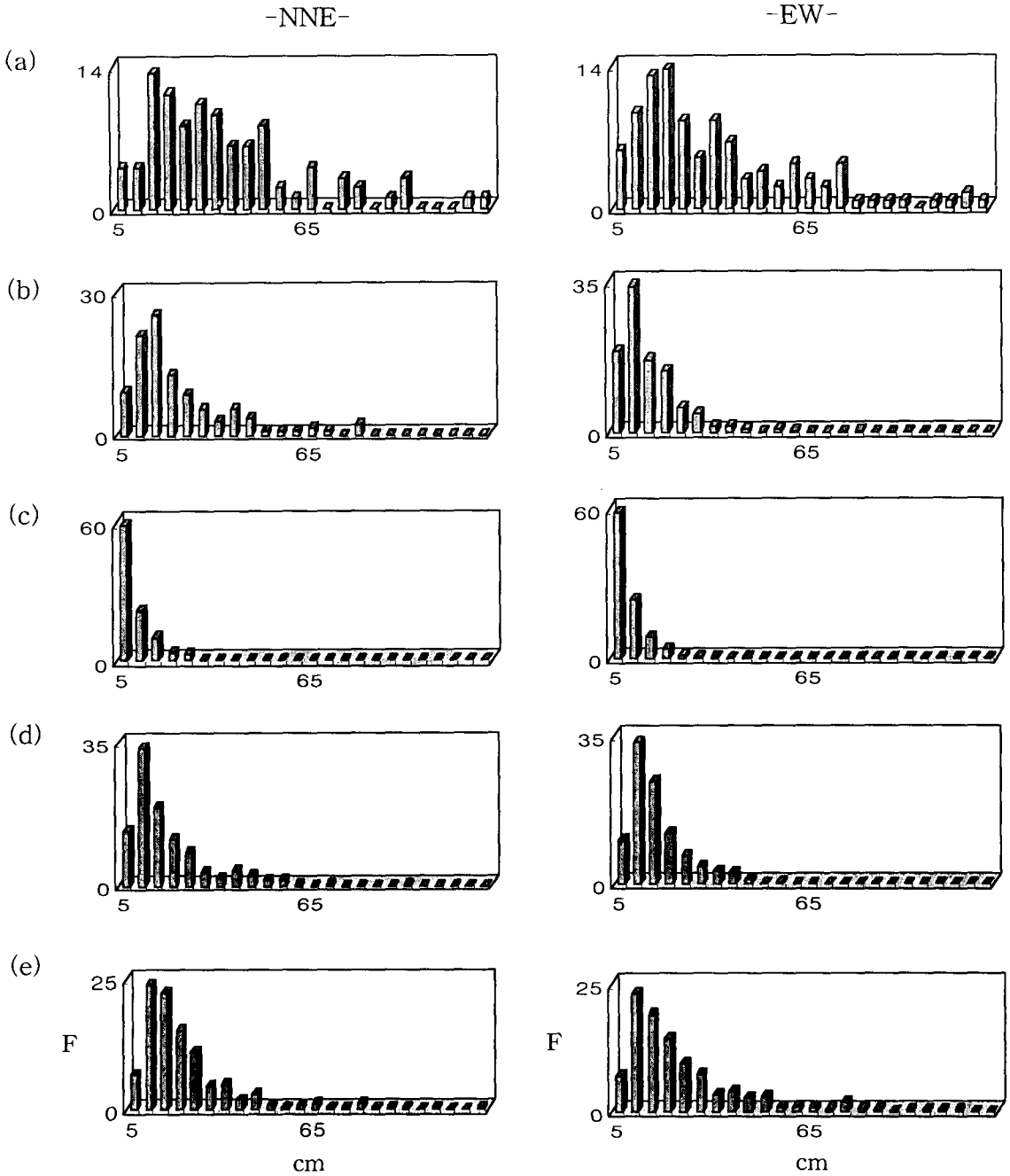


Fig. 6. Joint spacing distributions of each set : (a) over 2km of the western part (b) from 0.5 to 2km of the western part (c) center of the fault (d) from 0.5 to 2km of the eastern part (e) over 2km of the eastern part. Note that (c) shows negative exponential distribution, and (a), (b), (d) and (e) show log-normal distribution.

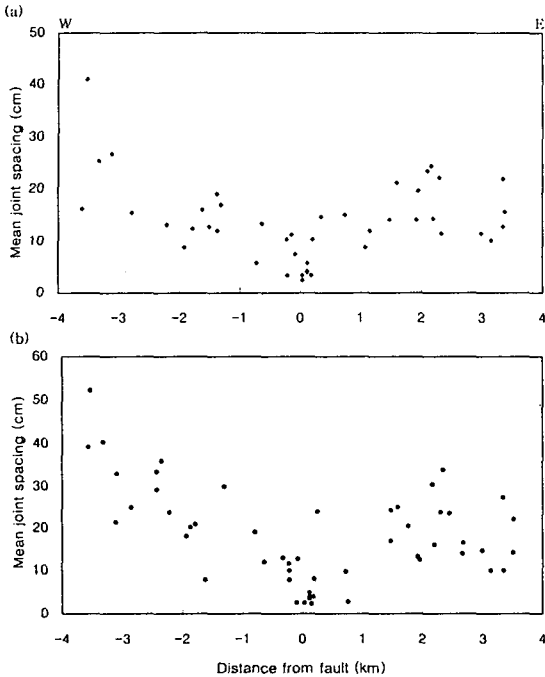


Fig. 7. Mean joint spacing distribution of (a) NNE and (b) EW sets; the values of mean joint spacing tend to decrease toward the fault.

층에서 먼 지점인 2km 이상 지역에서 22.7cm로 나타난다. 이는 단층의 중심부와 단층에서 먼 지점간의 현저한 파쇄정도의 차이를 보여주는 것이다. Fig. 7에서 모량단층에서 동편으로 약 2km 이상 되는 지점에서부터는 평균 절리간격 값들이 거리의 변화에도 불구하고 더 이상 증가하지 않고 그 분포가 다소 산만해지는 경향을 나타내고 있다. 이 그림에서 모량단층을 중심으로 동·서편의 파쇄정도를 비교해 볼 때 약 2km 범위 내에서는 그 파쇄정도가 대칭적이라고 할 수 있으나 그 이상에서는 비대칭적으로, 서편에 비해 동편에서의 파쇄정도가 더 강했음을 나타내고 있다.

재고법에 의한 절리의 특성

절리의 배향

재고법에 의해 측정된 절리들에 대해 방향성의 집중도를 알아보기 위해, 측정된 전체 절리들의 배향을 거리별 영역으로 장미그림을 그려보았다.(Fig. 8). 전영역에서 볼 때 NE와 NW 방향이 공히 우세하게 나타난다. 공히 7.50%의 높은 집중도를 보이

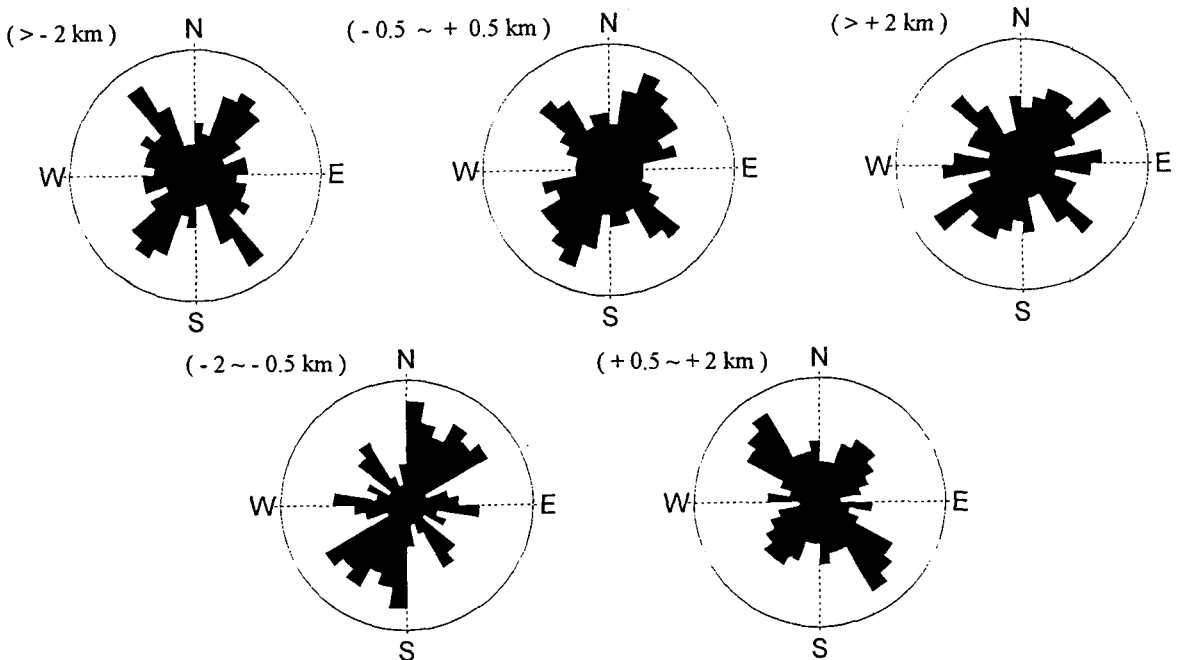


Fig. 8. Rose diagrams of joint orientation measured from each joint map. (-) sign represents western side and (+) sign represents eastern side of the Moryang fault.

고 있다. 이 결과는 횡단법으로 측정된 절리들에 대한 장미그림과 약간 다른 배향을 보여주고 있다. 특히 Fig. 5에서는 전체적으로 뚜렷하게 인지되지 않는 NW방향의 절리조가 재고법에서는 높은 집중도를 보이고 있다.

절리의 밀도

야외에서 각 지점별로 스케치한 절리도를 이용하여 산출한 48개의 절리밀도 자료를(Fig. 9) 모량단층에서 수직인 방향의 거리별로 구분하여 단층과

의 연관성을 살펴보았다. 0.5km 이내 즉 단층의 중심부에서는 평균 절리밀도가 약 0.194m/m², 0.5~2km에서는 약 0.158m/m², 2km 이상 즉 단층에서 먼 지점에서는 약 0.136m/m²으로 나타남으로서 단층의 중심부로 가까워짐에 따라 절리의 밀도가 점차 증가함을 알 수 있다. 단층을 중심으로 동쪽과 서쪽을 비교해 볼 때 동쪽이 서쪽보다 절리밀도가 다소 높게 나타난다. 특히 동쪽 2km 이상에서는 0.140m/m²로 서쪽 2km 이상에서의 0.130m/m² 보다 높게 나타난다.

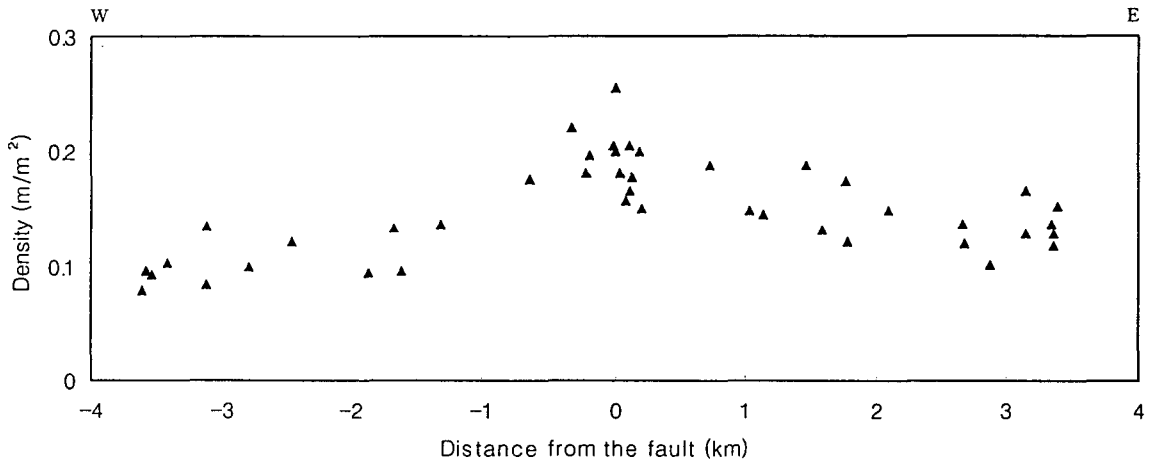


Fig. 9. Joint density distribution. Note that the density tends to increase toward the center of the fault.

프랙탈 차원의 결정

절리의 연구방법에서 기술한 48개의 절리도들을 이용하여 박스카운팅법(Box counting method, F_D)과 캔터의 먼지법(Cantor's dust method, F_C)에 의해 각각 프랙탈 차원을 구하였다. 박스카운팅법은 한 변의 길이가 r인 사각요소(box)를 가진 격자를 절리도상에 겹친 다음 절리를 포함하는 사각요소의 수(n)를 헤아린다. 이러한 작업을 사각요소의 한 변의 길이를 축소시키며 반복하여 시행한다. 이때 일정하게 축소되어지는 길이 r₀을 감소율(reduction factor)이라고 한다. 그리고 각각의 r에 대한 n값을 양대수 방안지(log-log sheet)에 표시하여 나온 곡선 상에서 최소사승법을 이용하여 회귀선을 그었을

때 직선부의 기울기가 프랙탈 차원이 된다. 위의 설명을 다시 간단하게 공식으로 나타내면 계산된 사각요소의 수(n)와 사각요소의 한 변의 길이(r)사이에는 다음과 같은 식이 성립한다(Walsh and Watterson, 1993 ; Barton and La Pointe, 1995).

$$nr^D = 1 \dots\dots\dots(2)$$

이 식을 정리하여 양변에 log값을 취하면,

$$D = \frac{\log n}{\log (1/r)} \dots\dots\dots(3)$$

여기서 D가 구하고자 하는 프랙탈 차원(F_D)이 되고, 이때 F_D값의 범위는 1<F_D<2가 된다. 이 방법으로 총 5개(r₀=1/2 ; r=1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64)의 격자를 만들어 야외에서 스케치한 48개의 절리도상에 겹친 후 총 사각요소(N=4, 16, 64, 256, 1024, 4096)중에서 절리를 포함하는 사각요소의 수

(n)를 찾아내어 각 지점별로 프랙탈 차원(F_D)을 구하였다. 여기서 상관계수(correlation coefficient), R은 0.98이상을 보이므로 높은 신뢰도를 나타낸다.

센터의 먼지법에 의한 분석방법은 먼저 야외에서 스케치한 절리도상에 측정단위 r로 나눈 일정길이의 측선(L)을 설치한 후, 단열을 포함하는 단위 개수(n)를 총 단위 개수(N)로 나눈 확률 'P'를 구한다. 이때 확률 P는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = r^{1-D} \dots\dots\dots(4)$$

그래서 로그 P와 로그 r의 그래프에서의 기울기 $s=1-D$ 가 되고, 이때 D가 프랙탈 차원(F_C)이 된다 (Velde et al., 1990, Merceron and Velde, 1991). 또한 단위길이 r에서 단열을 포함하는 확률은 기울기에 비례한다. 그럼으로 본 연구에서는 감소율을 1/2로 하여 측선을 1/4, 1/8, 1/16, 1/32씩 감소시켜 나가면서 동시에 측선의 방향을 $0^\circ \sim 180^\circ$ 범위에서 15 간격을 주어 각 측선별, 방향별 확률 P를 구하였다. 이를 r값과 더불어 양대수 방안에 나타내어 프랙탈 차원(F_C)을 구하였다.

박스카운팅 법에 의한 프랙탈 차원

각 조사지점별로 프랙탈 차원을 구해본 결과 본역의 F_D 값은 1.31~1.70의 범위를 가진다. 각 조사지점들을 단층의 주향 방향에 대한 수직거리로 F_D 값의 분포도를 작성하였다(Fig. 10a). F_D 값이 단층의 중심부에서 상당히 높게 나타나고, 단층의 중심부에서 멀어질수록 조금씩 감소하는 경향을 보여준다. 모량단층의 동쪽 2km 이상 떨어진 지점에서는 F_D 값이 더 이상 감소하지 않으며 평균 F_D 값에서도 동쪽지역(1.45)이 서쪽지역(1.39)보다 높게 나타난다. 단층 주향에 대해 수직으로 구분한 거리별 F_D 값을 보면 단층의 중심부에 해당되는 0.5km 이내에서는 1.57 정도로 높게 나타났으며, 0.5~2km에서는 1.50, 그리고 단층에서 가장 멀리 떨어진 지역에서는 1.44로 단층 중심부에 비해 훨씬 낮게 나타났다. 조사지점 중 양산군 영포리 어영 부근 182 ($F_D=1.60$), 183 ($F_D=1.60$) 지점과 양산군 내포리 사자목 부근 184 ($F_D=1.55$), 185 ($F_D=1.55$), 186 ($F_D=1.61$) 지점에서는 모량단층의 중심부에서 멀어짐에도 불구하고 F_D 값이 높게 나타나는데(Fig. 10b) 이는 조사지점들이 이 지역을 통과하는 $N50^\circ W$ 방향의 어영단층의 중심부에 있기 때문인 것으

로 판단된다.

센터의 먼지 법에 의한 프랙탈 차원

센터의 먼지법으로 구한 각 조사지점마다 방향별 프랙탈 차원값은 다양하게 나타나는데 이는 프랙탈 차원을 결정함에 있어 측선 방향의 중요성을 말해준다. Velde et al.(1993)은 측선의 방향에 따라 프랙탈 차원의 변화가 큰 원인은 단열분포의 이방성(fracture distribution anisotropy) 때문이라고 하였다. 그래서 본 연구에서는 각 방향별 프랙탈차원들의 최대값(F_{max})과 최소값(F_{min})을 구하고 이들의 차분차원(differential dimension, $\Delta D=F_{max}-F_{min}$; 김을영, 1995)을 계산하여 단층 중심부에서 구분된 거리별로 그 값의 분포를 살펴 보았다. 서편 2km 이상 지역에서는 0.12, 서편 0.5~2km 지역에서는

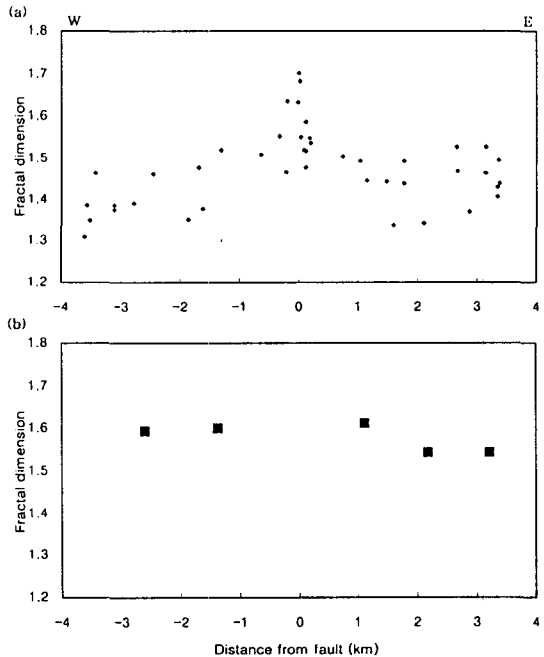


Fig. 10. (a) Distribution of fractal dimensions determined by Box-counting method. The dimensions tend to increase toward the center of the fault. (b) The dimensions influenced by the Eoyoung fault, showing higher fractal dimensions regardless of the distance from the Moryang fault.

모량단층 주변 절리의 분포 특성과 프랙탈 해석

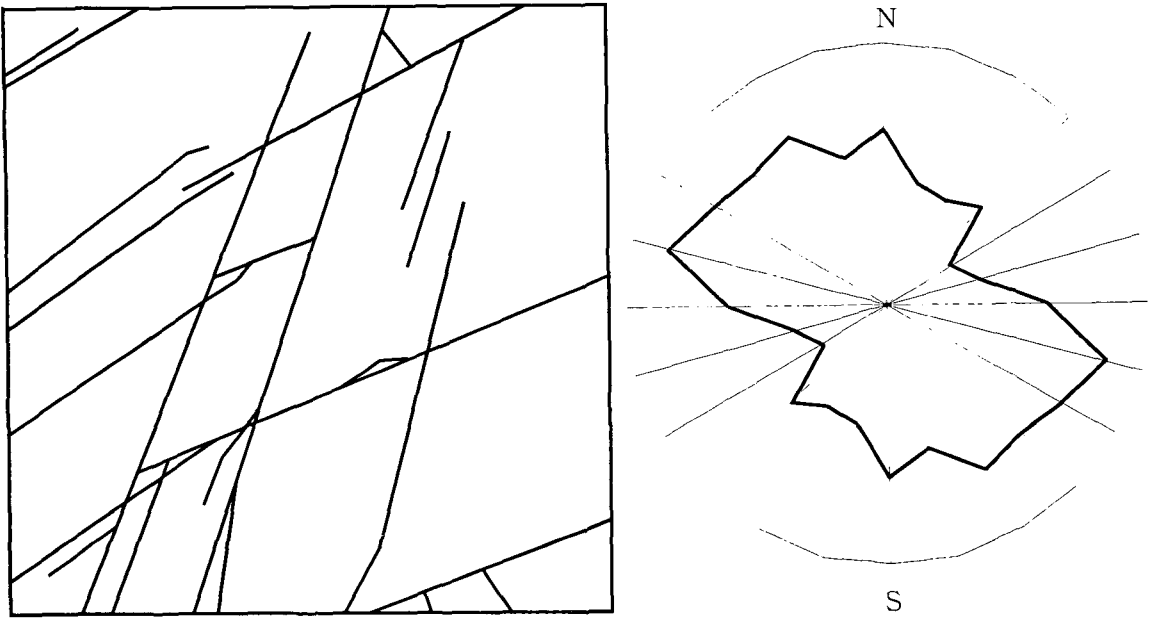


Fig. 11. Orientation of the lowest fractal dimension determined by Cantor's dust method corresponds to the orientation of the dominant joint set of the area.

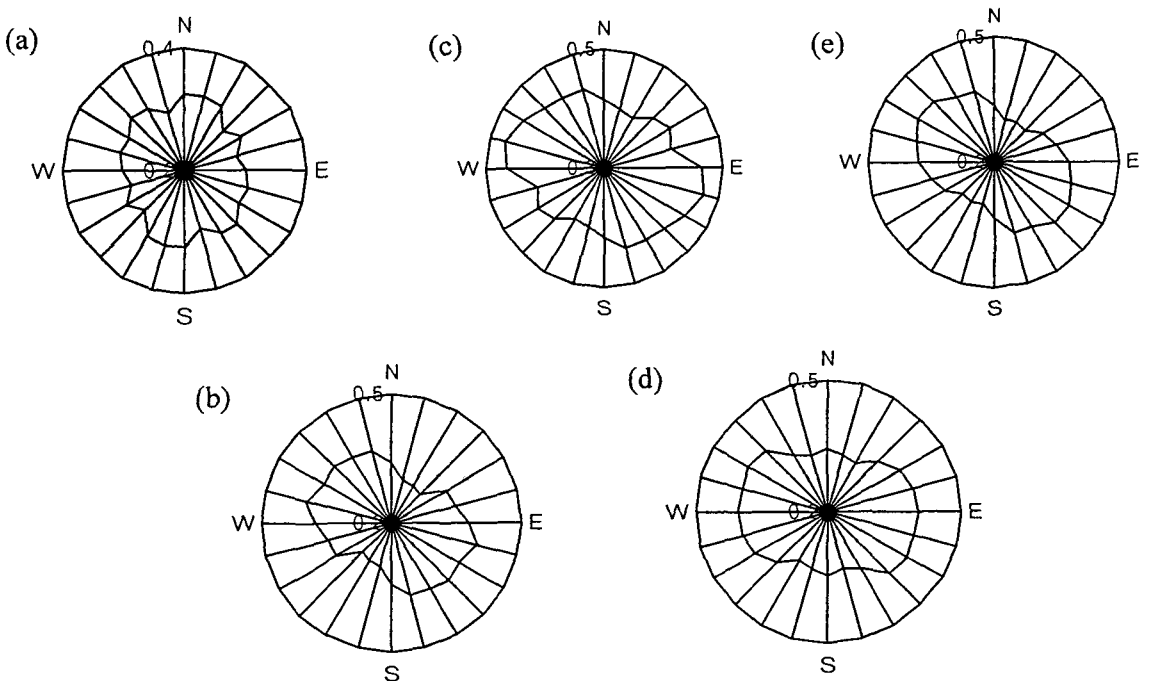


Fig. 12. Anisotropy of fractal dimensions determined by Cantor's dust method in zones divided by distance from the Moryang fault. (a) over 2km of the western part. (b) from 0.5 to 2km of the western part. (c) center of the main fault. (d) from 0.5 to 2km of the eastern part. (e) over 2km of the eastern part.

0.18, 단층의 중심부 0.5km 이내지역에서는 0.30, 동편 0.5~2km 지역에서는 0.22, 동편 2km 이상 지역에서는 0.12로서 단층의 중심부에서 ΔD 가 가장 큰 값을 나타낸다. 그리고 각 조사지점별로 방향에 따른 F_c 값의 분포도를 절리도와 비교·검토해보면 F_c 값이 낮은 부분이 그 지역의 절리계에서의 주 방향을 지시해줌을 알 수 있었다(Fig. 11). 그래서 단층에 수직인 방향으로 구분된 거리별 영역에서 각 방향별 전체 F_c 의 평균값을 보면(Fig. 12) F_c 값이 가장 낮은 방향은 야외에서 측정한 이 지역의 절리계의 우세방향(Fig. 5)과 상당히 일치하고 있다.

토 의

본 연구에서 횡단법과 재고법에 의한 절리의 배향 분석 결과를 보면 차이점을 발견할 수가 있다. 횡단법에 의해 나타난 본역의 우세 절리 배향은 NNE와 EW 절리조로 나타나며, 재고법에 의한 우세 절리 배향은 NE와 NW 절리조로 나타난다. 이러한 차이점의 원인은 두 방법에 의해 실시한 절리의 배향 측정 방법에 있을 것 같다. 횡단법에 의해 측정된 절리들은 실제 야외 각 노두상에서 우세 절리조로 판단되어 측정된 규칙절리들로서 Fig. 2의 소단층들과 거의 비슷한 배향을 가지며 모량단층의 생성과 밀접한 연관이 있는 전단절리 즉 지구조(tectonic)절리들로 해석되어지고, 재고법에 의해 측정된 절리들은 야외에서 절리도 작성 시 1×1m 격자 내에서 인지되는 모든 규칙 또는 불규칙 절리들이 포함되어져 있기 때문에 배향 측정시 야외에서는 혼하게 인지되지 않던 NW 방향의 절리들이 연장성은 짧지만 다수의 절리들로 측정되어 우세방향을 나타내는 것으로 생각된다. 그럼으로 NW 절리들은 대부분 불규칙절리로서 모량단층 운동과는 직접적인 연관성이 없는 이 지역 암석의 용기, 침식 및 기타 지각 외적인 요인과 관련된 비지구조(nontectonic) 절리들이 많이 포함되어 있을 것으로 판단된다.

본역에서 가장 우세한 분포를 보이는 NNE와 EW 규칙 절리조들을 대상으로 절리 간격의 분포를 단층의 중심부와 단층에서 먼 지점으로 구분하여 서로 비교해 볼 때 단층의 중심부에서는 음의

지수분포, 단층에서 먼 지점에서는 대수-정규분포 형태와 유사하다. 특히 Priest and Hudson (1976)이 제시한 불연속면 간격 분포형태에 대비하여 본다면 단층중심부에서는 clustered distribution에 가깝고, 그외 지역은 무작위분포(random distribution)와 어느 정도 일치한다. 이와 같은 형태는 단층운동 시 절리의 발달이 기존 절리 사이의 상호작용이 존재하지 않은 random process로 일어났기 때문에 단층의 중심부로 갈수록 절리 발생 빈도수가 증가하게 되고, 즉 매우 조밀한 절리간격들이 많이 분포하게 되어 분포도에서 음의 지수분포를 보여주는 것으로 해석된다.

절리 밀도값은 단층의 중심부로 갈수록 증가하는 경향을 보였다. 이는 단층운동 시 생성되는 절리들(NNE와 EW 절리조)이 단층의 중심부에서 그 발생 빈도수가 높았다는 것을 말해준다. 이들 값을 이용하여 작성한 3차원 절리밀도 기복도에서도(Fig. 13) 단층의 중심부에서 높은 형태들을 잘 나타내고 있다. 한편 모량단층의 자취(선주향)를 따른 기복 양상을 살펴보면 조사지역의 남서부지역에 비해 북동부지역으로 갈수록 낮아지는 경향을 나타내는데 이는 모량단층의 발달이 북쪽으로 갈수록 점차 약화되는 것과 관련이 있는 것으로 사료된다. 본 연구에서는 2차원적인 절리 밀도값을 구하였지만, 실제로 절리들은 3차원의 공간상에 분포하기 때문에 절리들에 의해 둘러싸인 블록의 밀도값들을 구한다면 구조지질학분야 이외 응용지질학 분야에서도 활용할 수 있는 좀더 실용적인 자료가 될 것으로 생각된다.

각 거리별 영역에서 계산한 절리밀도와 박스-카운팅 법에 의해 구한 프랙탈 차원(F_D)을 서로 비교하여 보면(Fig. 14), 절리밀도는 단층의 중심부에서는 높게(0.19m/m²) 나타나고 단층에서 먼 지역에서는 낮게(0.13m/m²) 나타난다. 프랙탈 차원(F_D , Fig. 10a)도 단층의 중심부에서는 높게(1.57) 나타나고 단층에서 먼 지역에서는 낮게(1.43) 나타남을 알 수 있다. 그럼으로 이번 연구를 통해 프랙탈 차원 F_D 는 절리밀도가 높아질수록 큰 값을 갖는다는 것을 알 수 있었다. La Pointe (1988)도 프랙탈 차원은 단열의 크기, 배향 또는 단열크기의 변화정도 보다 단열의 수 또는 단열블럭(fracture-bounded blocks)의 밀도에 더 영향을 받는다고 하였다. 그러나 프

모량단층 주변 절리의 분포 특성과 프랙탈 해석

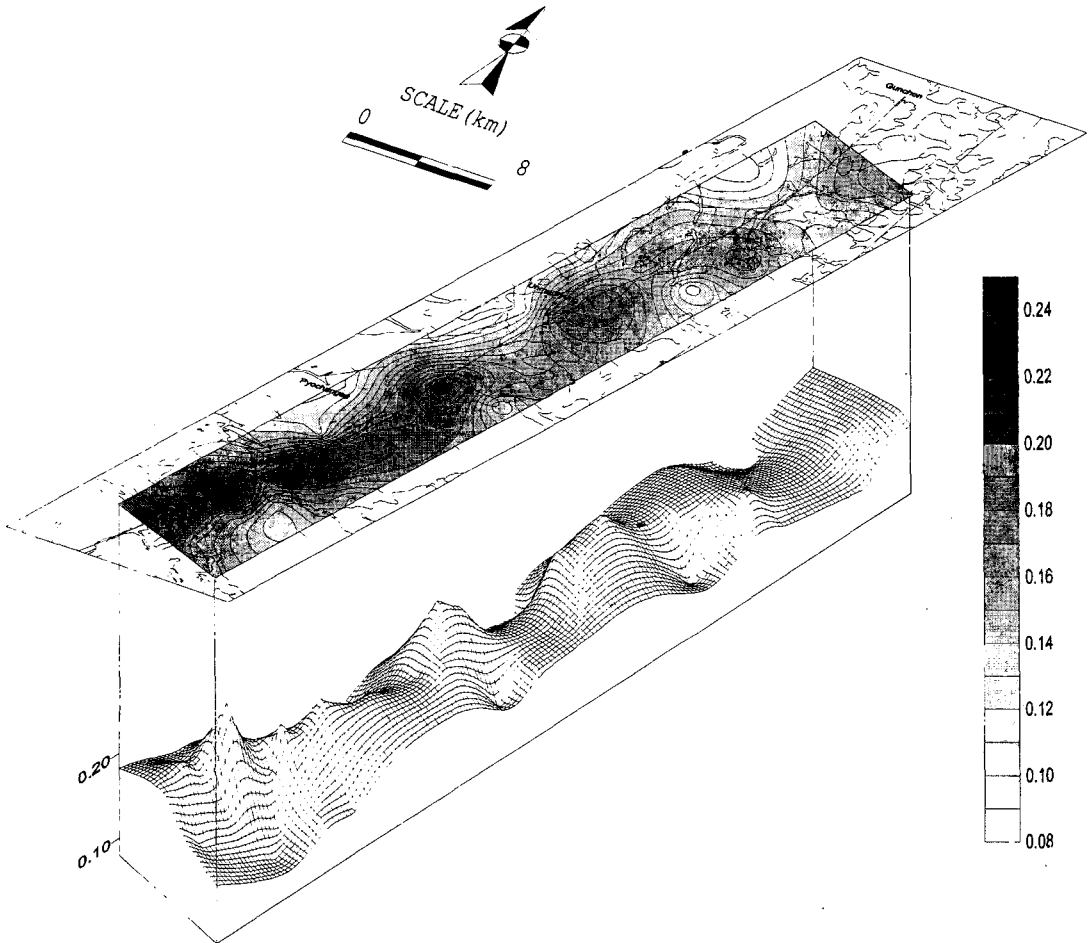


Fig. 13. Relief map of the joint density in the study area.

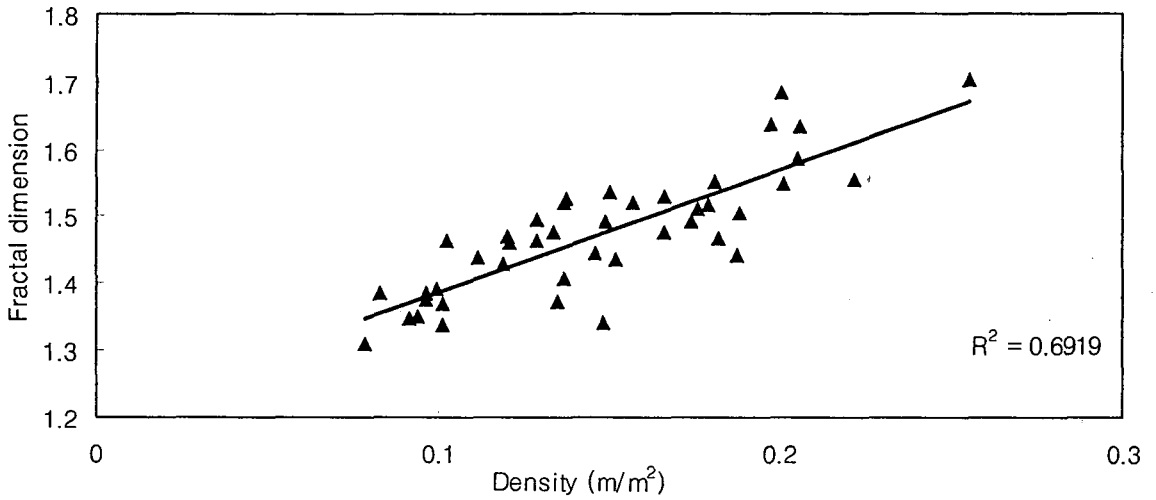


Fig. 14. Comparison of fractal dimensions with joint density.

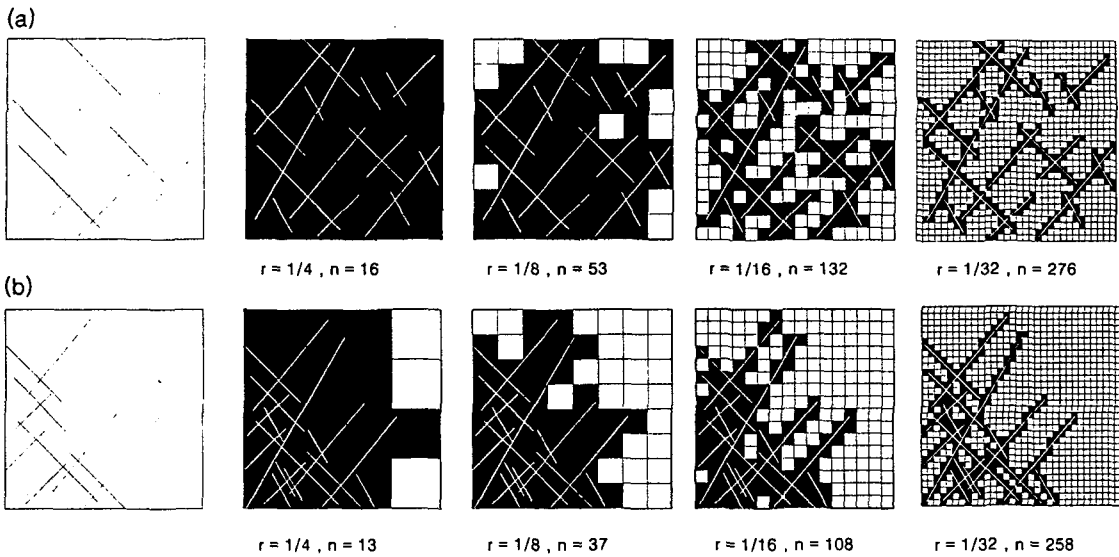


Fig. 15. Illustration of fractal dimension determination of two synthetic joint maps with the same joint density. (a) shows a homogeneous joint pattern while (b) shows an inhomogeneous joint pattern with different box sizes. r : side length of the box, n : number of boxes penetrated by joint.

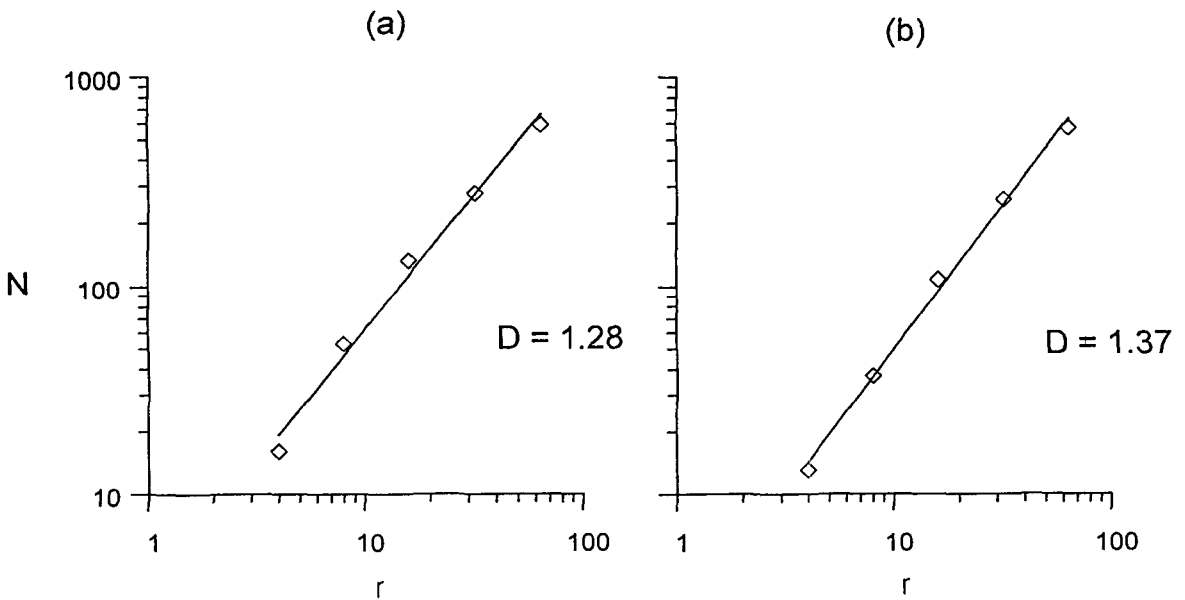


Fig. 16. The fractal dimensions calculated from (a) homogeneous and (b) inhomogeneous synthetic joint maps presented in Fig. 15.

랙탈 차원이 절리밀도 이외의 다른 요인에 의해서도 규제를 받는지를 알아보기 위하여, 단위면적에서 절리의 밀도는 동일하게 주고 분포상태 즉 균질도를 다르게한 인조 절리도를 작성하여 프랙탈 분석을 해보았다. Fig. 15는 같은 절리밀도(0.13)를 갖고 있지만 그 분포상태가 다른 두 인조절리도(a와 b)의 프랙탈 차원을 박스 카운팅법에 의해 구하는 과정을 나타낸 그림이다. 균질한 단열의 분포를 갖는 a의 경우는 프랙탈 차원이 1.28, 단열의 분포가 한곳으로 집중된 불균질한 분포를 갖는 b의 경우는 프랙탈 차원이 1.37로 균질한 단열분포의 경우 보다 높게 나타났다(Fig. 16). 이로부터 절리밀도가 같더라도 그 절리의 분포상태에 따라 프랙탈 차원은 달라질 수 있음을 알 수 있다. 그럼으로 절리의 밀도는 단순히 암반이 깨어져있는 정도만을 표현하는 것이라고 할때 프랙탈 차원은 그것뿐만 아니라 동일 밀도 지역에서는 깨어져있는 상태까지도 암시해줄 수 있는 것으로 본다. 그리고 캔터의 면지법에 의해 결정된 각 방향별 프랙탈 차원값 ΔD 로부터 절리분포의 이방성을 짐작할 수 있다. 단층의 중심부에서 ΔD 가 가장 큰값을 나타내었는데 이는 단층의 중심부에서 절리배향의 집중도 즉 현저한 이방성을 잘 이야기 해준다고 하겠다.

모량단층은 단일면으로 생성된 것이 아니라 파쇄물질을 포함하는 여러 개의 고각 소단층들로 이루어졌으며 이들은 대부분 45°이하의 선주각을 갖는 주향이동성 운동을 한 것으로 판단된다. 일반적으로 단층대는 변형정도, 파쇄정도에 따라 크게 3부분 즉 비지대, 파쇄대, 손상대로 나눌 수 있다(장태우와 추창오, 1998). 모량단층은 단층비지(fault gouge)의 발달이 매우 미약하고, 파쇄대(cataclastic zone)의 범위도 좁게 발달하고 있으며, 상대적으로 손상대(damage zone)의 범위가 비교적 넓은 산출상태를 보여준다. 또 절리의 분포 특성을 분석해본 결과를 토대로 모량단층대를 그 파쇄정도에 따라 구분지을 수 있다. 즉 모량단층 주변 절리의 방향성, 간격, 절리밀도, 프랙탈차원 등을 단층의 주향방향에 대해 직각인 방향의 거리별로 구분하여 고려해 본 결과들을 토대로 모량단층대를 크게 2부분, 즉 가장 심한 파쇄작용을 받은 0.5km 이내의 파쇄대와 0.5~2km 사이의 약한 파쇄작용을 받은 손상대로 나눌 수 있으며 2km 이상지역은 단층운

동의 영향을 거의 직접적으로 받지 않은 것으로 나타난다. 그리고 모량단층에서 동편으로 2km 이상 떨어진 지역에서는 서편의 같은 거리의 지역에 비해 절리들의 방향성 분포가 다르고(Fig. 5), 절리간격(Fig. 7), 절리밀도(Fig. 9), 프랙탈차원(Fig. 11a) 등이 다소 높게 나오는 등 파쇄 정도가 다소 심한 것은 아마도 모량단층 동편에서 변형작용 강도가 상대적으로 강했던 양산단층의 영향으로 생각된다.

결 언

지금까지 살펴 본 모량단층주변에 분포하는 절리들에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

1. 절리는 고각 경사의 NNE 절리조와 EW 절리조가 규칙절리로서 우세한 방향성을 나타내며 이들은 모량단층의 단층운동과 직접 연관이 있는 지구조절리들로 해석된다. 횡단법에서는 드물게 나타나지만 재고법에서는 풍부한 NW 절리조는 불규칙절리들로 짧은 연장성을 가지며 대부분 비지구조절리들로 생각된다.

2. 단층운동의 영향에 의한 절리의 분포 특성을 고려한 결과 절리간격은 0.5km 이내 즉 단층의 중심부에서는 조밀한 간격을 보이는 반면 단층에서 멀어짐에 따라 넓은 간격을 나타내며, 단층의 중심부에서 음의 지수분포를 보이고 단층에서 멀어질수록 대수-정규 분포를 보인다.

3. 절리밀도는 단층에서 먼 지점에서 단층의 중심부를 향하여 그 값이 점차 커짐을 알 수 있다.

4. 박스카운팅법에 의해 결정된 프랙탈 차원 분석결과 본역에 발달하는 절리망의 프랙탈차원은 단층의 중심부에서 높고, 단층에서 멀어질수록 낮아지는 경향을 나타낸다. 프랙탈 차원과 절리밀도는 서로 비례관계에 있으나 동일한 절리밀도를 갖는 경우에는 절리의 분포가 불균질한 경우가 균질한 경우보다 프랙탈 차원이 높게 나타난다. 캔터의 면지법에 의해 결정된 프랙탈차원 분석에 의하면 가장 낮은 프랙탈 차원을 나타내는 방향은 NNE이며, 이는 본역의 우세 절리계의 방향과 잘 일치하고 있다. 또한 단층의 중심부에서 절리분포의 이방성이 가장 높은 것으로 나타난다.

5. 야외조사, 소단층의 기하분석, 절리의 방향성, 간격, 밀도, 프랙탈차원 등을 단층 중심부에서 거리

별로 분석해 본 결과를 토대로 모량단층대를 그 파쇄정도에 따라 크게 파쇄대와 손상대의 2부분으로 나눌 수 있다.

사 사

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비(1998-015-D00277)에 의해 지원되었으며 이에 감사를 표한다.

참 고 문 헌

- 김남장, 진명식, 1971, 모량도폭 지질보고서 (1:50,000), 국립지질조사소.
- 김을영, 1995, 팔공산 화강암체내에 발달한 분리면에 대한 분석; 프랙탈 차원을 이용, 경북 대학교 이학석사 학위논문.
- 선우춘, 1989, 프랙탈 방법에 의한 fracture network의 분포 해석, 지질학회지, 25, 468-473.
- 장기홍, 1977, 경상분지 상부중생세의 층서퇴적 및 지구조, 지질학회지, 13, 76-90.
- 장태우, 장천중, 김영기, 1993, 연양지역 양산단층 부근 단열의 기하 분석, 광산지질, 26, 227-236.
- Barton, C. C. and La Pointe P. R., 1995, Fractals in the earth sciences, Plenum, 265p.
- Cello, G., 1997, Fractal analysis of a Quaternary fault array in the central Apennines, Italy, J. Struct. Geol., 19, 945-953.
- Davis, G.H., 1984, Structural geology of rocks and regions, John Wiley and Sons, 492p.
- La Pointe, P. R., 1988, A method to characterize fracture density and connectivity through fractal geometry, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstract, 22, 421-429.
- Mandelbrot, B. B., 1983, The fractal Geometry of Nature, W. H. Freeman, New York, 468p.
- Marshak, S. and Mitra, G., 1988, Basic methods of structural geology, Prentice Hall, 446p.
- Merceron, T. B. and Velde. B., 1991, Application of Cantor's Method for fractal analysis of Fractures in the Toyoha Mine, Hokkaido, Japan, J. Geophys. Res., 96, 16641-16650, 650p.
- Odling, N. E., 1997, Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western Norway, J. Struct. Geol., 19, 1257-1271.
- Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1976, Discontinuity spacing in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstract, 13, 135-148.
- Velde, B., Dubois. J., Touchard. G. and Badri. A., 1990, Fractal analysis of fracture in rocks: the Cantor's dust method, Tectonophysics, 179, 345-352.
- Velde, B., Dubois. J., Moore. D. and Touchard. G., 1991, Fractal pattern of fracture in granite, Earth Planet. Sci. Lett., 104, 25-35.
- Velde, B., Moore, D., Badri, A. and Ledesert, B., 1993, Fractal and length analysis of fractures during brittle to ductile change. J. Geophys. Res., 98, 11935-11940.
- Walsh, J. J. and Watterson, J., 1993, Fractal analysis of fracture patterns using the standard box-counting technique: valid and invalid methodologies, J. Struct. Geol., 15, 1509-1512.

최한우, 장태우

경북대학교 자연과학대학 지질학과

702-701 대구 북구 산격동 1370

Tel : 053-950-5361

E-mail : twchang@kyungpook.ac.kr