The Journal of Engineering Geology, Vol.19, No.1, March, 2009, pp. 51-61

경주 남산 일대의 단열구조 특성과 양산단층의 분절

김헌주[1] · 장태우[2*]

[1]SK 에너지, [2]경북대학교 지질학과

Fracture Characteristics and Segmentation of Yangsan Fault around Mt. Namsan, Gyeongju City, Korea

Heon Joo Kim[1] and Tae Woo Chang[2*]

[1]SK energy

[2]Department of Geology, Kyungpook National University

경주시 남산 일대에서 양산단층의 활동에 수반된 단열 특성과 양산단층의 분절에 관한 연구가 수행되었다. 절리의 밀도와 프랙탈 차원 값은 양산단층에 가까워질수록 높은 값을 보이는데 이는 단층활동에 따른 단열작용이 단층의 중심에서 더 격렬하게 일어난 탓으로 해석할 수 있다. 양산단층 손상대와 모암 사이의 경계는 단층의 중심에서 약 2.7 km까지로 볼 수 있으며 여기서 더 멀어지면 절리밀도와 프랙탈 차원 값이 현저히 감소하고 절리의 배향도 여러 방향으로 크게 분산된다. 양산단층 손상대 내 소단층들은 우수향이동단층과 좌수향이동단층들로 뚜렷이 구분되는데, 전자는 양산단층이 우수향이동을 할 때 수반된 단층들이고 후자는 좌수향이동 운동 시에 수반된 것들로 간주된다. 연구지역에서 양산단층은 북쪽분절과 남쪽분절로 나누어 질 수 있는데 이는 북쪽분절과 남쪽분절 간 주향의 차이, 북쪽분절 끝부분에서 압축성 '인편팬기하 와 9°, S85°E로 선경사하는 향사의 발달, 남쪽분절 끝부분에서 28°, N4°W로 선경사하는 배사의 발달 등의 증거에 의해 뒷 받침 할 수 있다.

주요어 : 양산단층, 절리밀도, 프랙탈차원, 손상대, 분절

Fractures and segmentation in association with the activities of the Yangsan fault are studied around Mt. Namsan, Gyengju city in the southeastern part of Korea. It is believed that the higher values of joint density and fractal dimension with the approach of the center of the Yangsan fault mean intense fracturing due to the fault activity. The boundary between fault damage zone and host rock is inferred to be placed at about 2.7 km from the center of the Yangsan fault where the values of joint density and fractal dimension abruptly decrease and the orientations of joint are also much dispersed. The small faults within the damage zone of the Yangsan fault are definitely divided into right-lateral and left-lateral strike-slip faults. The former is considered to be formed during the right-lateral movement of the Yangsan fault and the latter during the left-lateral movement. The Yangsan fault is segmented in the study area with obvious evidences as follows: (1) the difference of fault strike between northern and southern segments, (2) The geometry of contractional imbricate fans and syncline plunging 9°, S85°E at the end of northern segment, and (3) anticline plunging 28°, N4°W at the end of southern segment.

Key words : Yangsan fault, joint density, fractal dimension, damage zone, segment

서 언

연구지역은 한반도 남동부의 경주 남산 일대로, 중생대 백악기 퇴적암류와 불국사 화강암으로 이루어져 있으며 연구지역내에는 북북동 방향으로 달리는 양산단층이 발달하고 있다(Fig. 1). 행정 구역 상으로는 경상북도 경주시 내남면과 울산광역시 울주군 두동면 일대이고 경위도 상으로는 북위 35° 49' 48.14"~ 35° 49' 44.74", 동경

*Corresponding author: twchang@knu.ac.kr

129° 11' 14.58"~ 129° 17' 09.90"에 해당되는 지역이다.

연구지역의 지질은 Tateiwa(1929)의 1 : 50,000 경주도폭조사에서 북쪽의 일부가 최초로 조사되었고 남서쪽은 모량도폭(김남장 외, 1971) 조사 시 백악기 지층 및 화강암이 기재된 바 있다. 연구지역에 넓게 분포하는 남산 화강암에 대해서는 암석학 및 지구화학적 연구가 많이 진행되어 왔으며(진명식 외, 1989; 윤성효와 황인호, 1990; 고정선 외, 1996), 연구지역을 거의 남북 방향으로 통과하는 양산단층은 운동 시기(장기홍, 1990; 이희권, 1998; 장태우와 추창오, 1999; 장천중과 장태우, 1998)와 운동 성질(장기홍, 1990; 채병곤과 장태우, 1994; 장천중과 장태우, 2002) 그리고 단층의 연장성(채병곤과 장태우, 1994; 장천중, 2001)과 단층의 분절(장태우 외, 1993; 장천중, 2001)에 대해 개념적인 연구가 진행되어 왔다. 연구지역을 포함하는 한반도 남동부의 선상구조에 대해서는, 이봉주 외(1997)와 권연숙과 장태우(1999)에 의한 연구가 수행된 바 있다.

이번 연구에서는 1 : 20,000 축척의 항공사진을 이용하여 경주 남산 일대의 선상구조를 추출, 분석하고 야외에서 선상구조의 실체를 확인 조사하였다. 또한 양산단층

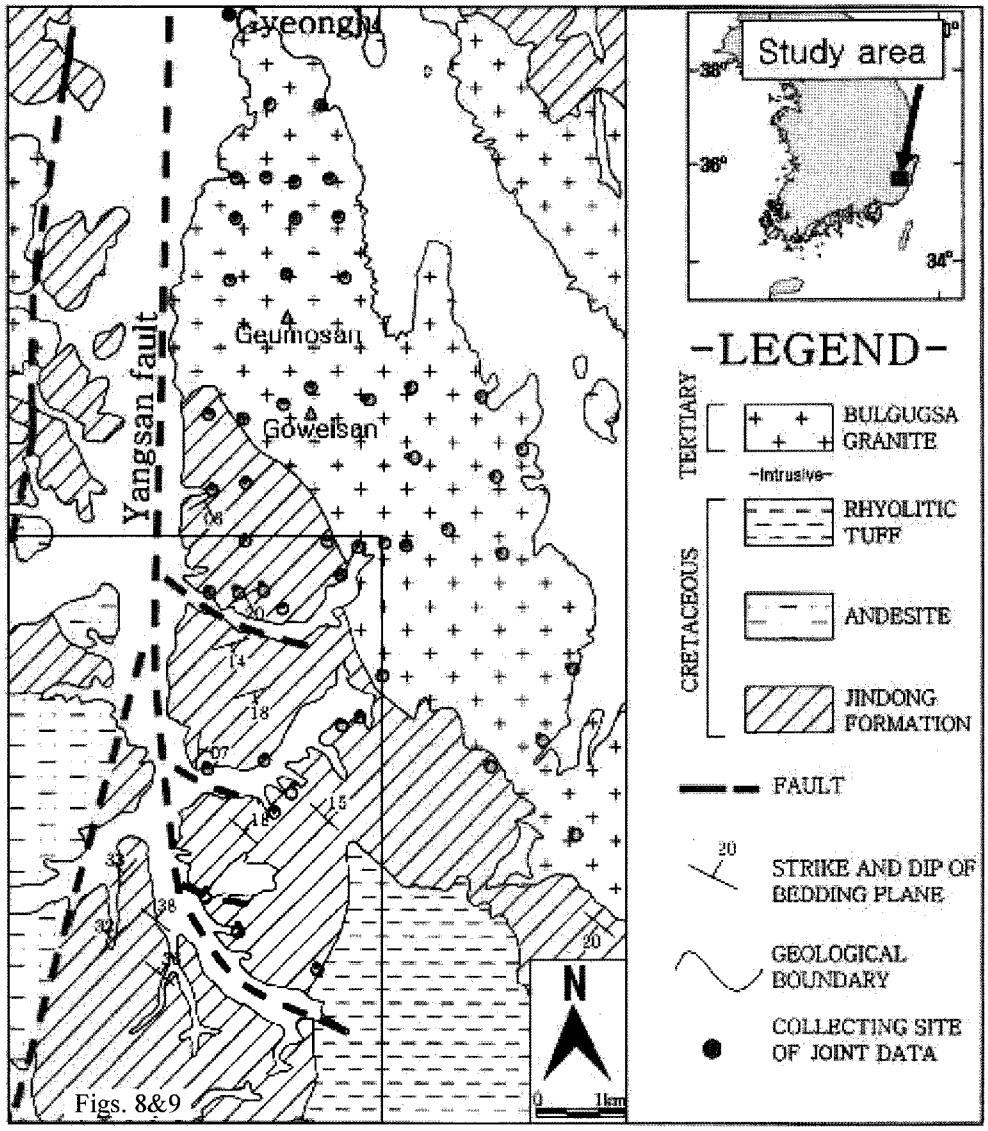

Fig. 1. Geological map of the study area.

운동과 관련한 단열의 특성을 분석하기 위하여 단층에서부터의 거리에 따라 발달하는 바닥노두의 단열도를 작성, 실내에서 Arc View GIS 3.2a를 이용하여 프랙탈 차원을 구하였으며, 그 동안 몇몇 학자들에 의해 연구지역의 서남부에서 언급되어왔던 양산단층의 분절(장태우 외, 1993; 장천중, 2001; 장천중과 장태우, 2002)을 규명하기 위해 이 지역에서 정밀한 지질조사를 실시하였다. 따라서 본 논문의 목적은 양산단층에 인접한 경주 남산 일대에 발달하는 단열구조의 양상을 분석하고 양산단층의 분절과 관련한 구조적 특성을 규명하는데 있다.

지 질

연구지역의 지질은 크게 백악기 하양층군 진동층과 유천층군 화산암류, 고제 3기(진명식 외, 1989)의 불국사 화강암으로 구성된다(Fig. 1). 연구지역에 비교적 넓게 분포하는 진동층은 이 지역의 남부와 양산단층의 서편에 주로 분포하고 있으며, 암회색 내지 청회색 사암과 적색 내지 암회색 이암 및 셰일 등의 쇄설성 퇴적암류로 구성된다. 층리면의 자세는 연구지역의 남동부 가장자리에는 N30~40°W의 주향과 10~20°SW 경사를 나타내고, 연구지역의 중심부에서는 N60°E의 주향과 15~25°SE의 경사를 보이나 남쪽으로 갈수록 N60°W의 주향으로 점차 변하고 경사방향 역시 남동 경사에서 북동 경사로 변한다. 연구지역의 남서쪽 가장자리 지역은 N50~60°W의 주향과 N50~60°E의 주향이 잘 나타나며 경사방향 역시 30~40°NE 와 30~40°NW를 각각 보여준다. 그리고 양산단층에 근접할수록 주향은 많이 교란되고 있으며, 경사는 고각으로 점이한다.

유천층군은 안산암과 유문암질 응회암으로 이루어져 있으며, 안산암은 양산단층 서쪽에 부분적으로 분포하고, 유문암질 응회암은 연구지역의 남쪽에 분포한다. 이들 유천층군의 암석들은 분출하여 진동층을 피복하고 있다. 안산암은 반정으로 사장석을 많이 포함하고 있으며 암회색에서 암녹색을 띠고, 유문암질 응회암은 주로 유백색내지 담회색을 띤다.

불국사 화강암은 연구지역 북동부 경주 남산일대에 넓게 분포하며 하양층군과 유천층군을 관입한다. 불국사 화강암은 연구지역 중심부에서 북서-남동 방향으로 하양층군 진동층과 관입접촉을 하고 있으며 진동층은 화강암과 접촉부를 따라 1km이상의 혼펠스화된 접촉변성대를 형성하고 있다. 불국사 화강암은 담홍색 장석을 포함하는 중립 내지 조립의 알카리 장석 화강암으로 노두에서 흔히 정동구조(miarolitic cavity)를 관찰할 수 있다.

선상구조 분석

추출한 선상구조도는 Fig. 2와 같으며 선상구조의 수는 782개이다. 선상구조들의 최대길이는 4.76 km 이고 최소길이는 각각 0.04 km이며 선상구조들의 총 길이는 254.68 km이다.

선상구조의 방향성은 막대그림 또는 장미그림에 비해 그림의 요철이 적고 진짜 피크를 나타내는 이동평균(running average)을 취하여 나타내었다(Fig. 3). 빈도가 우세한 선상구조의 방향은 N50~70°W, N5~15°E, N45~55°E, N80~90°E로 나타나며, N50~70°W의 군집방향이 최대 빈도를 보여준다 (Fig. 3(a)).

Fig. 3(b)에서는 선상구조의 배향에 대한 누적길이를 나타내었다. 배향에 대한 누적길이가 긴 선상구조의 군집도 N50~70°W, N5~15°E, N35~55°E, N80~90°E로

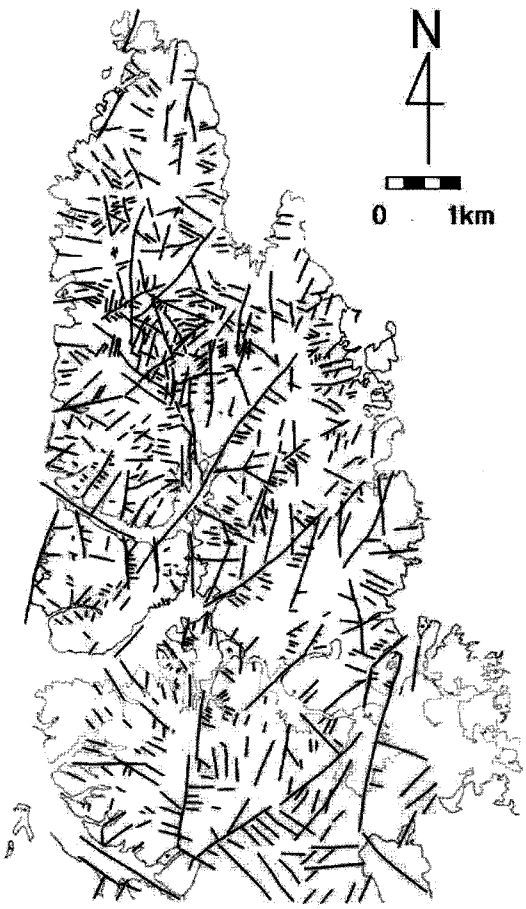

Fig. 2. Lineament map around Mt. Namsan, Gyeongju city in the study area interpreted from aerial photographs of 1 : 20,000 scale.

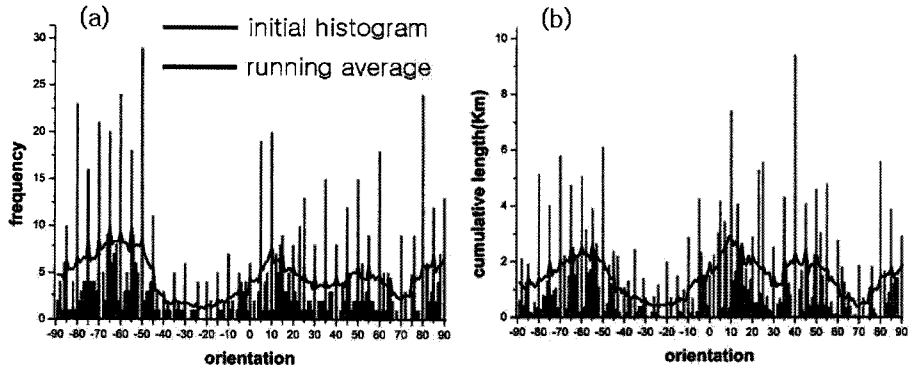

Fig. 3. Running averages showing frequency vs orientation (a) and cumulative length vs orientation (b).

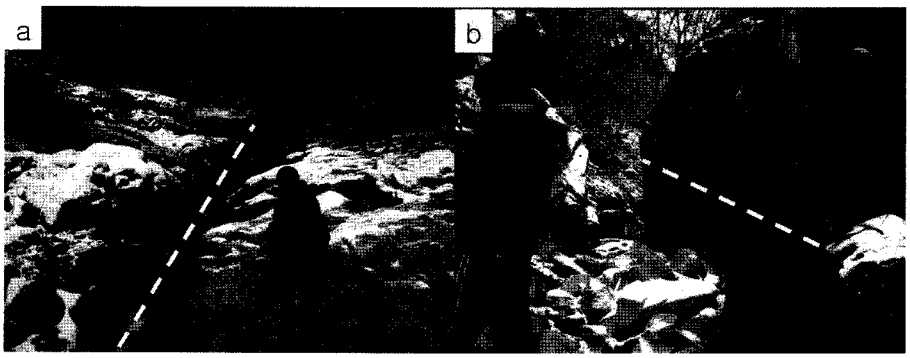

Fig. 4. Field survey of lineaments, representing a fault valley (a) and a fault scarp (b). White lines correspond to lineaments on the aerial photographs.

집도 N50~70°W, N5~15°E, N35~55°E, N80~90°E로 나타나며, 배향에 대한 빈도그림(Fig. 3(a))에서 인지된 양상과 유사한 편이다. 하지만 배향에 대한 빈도 그림에서 최대 우세 군집은 N50~70°W 인데 반해 배향에 대한 누적 길이의 경우는 오히려 N5~15°E 군집이 가장 우세하다. 이는 N50~70°W에 비해 N5~15°E 군집 속에 길이가 긴 단열들이 상대적으로 많이 포함 되어 있음을 나타낸다.

단열구조

단층

야외에서 선상구조들의 실체조사를 통해 이들의 지질학적 의미를 조사하였다. 조사한 다수의 선상구조들은 Fig. 4와 같이 단층계곡, 단층절벽 등을 이루는 것들이 많았으며 일부 길이가 짧은 것은 야외에서 노두로 직접 확인하기 어려웠다.

야외조사 결과, 노두로 직접 확인하지 못한 것들과 지질학적으로 의미를 부여할 수 없는 선상구조들은 전체의 46%에 해당하였고, 나머지 선상구조의 94%는 단층이었으며 6%는 절리로 확인되었다.

단층들은 야외에서 단층면의 자세와 미끄럼선의 선주각을 측정하였고 이동감각을 결정하였다. 이 단층들의 주향을 장미그림으로 나타낸 것이 Fig. 5(a)이며, 주로 N10°W~N20°E, N30~50°E, N60~70°E, N40~60°W 주향의 단층 조들이 우세함을 알 수 있다. 이 단층들을 주향에 따른 운동감각을 분석하여 보면, N30~50°E와 N60~70°E의 단층들은, 우수향 주향이동이 좌수향 주향이동에 비해 월등하게 우세하며, N40~60°W의 주향을 가지는 단층들은 좌수향 주향이동이 우수향 주향이동에 비해 월등하게 우세하다. 그러나 N10°W~N20°E 주향의 단층들은 좌수향과 우수향 주향이동이 비슷한 빈도를 보인다. 또한 이 단층들의 경사와 선주각을 보면(Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)) 대부분의 단층들은 20°이하의 얕은 선주각과 75°이상의 큰 경사를 보여주며 주향이동단층의 성질을 나타낸다. 그리고 단층의 경사와 선주각에 따른 이동감각의 분포를 Fig. 5(d)에서 보여주는 것처럼 대부분

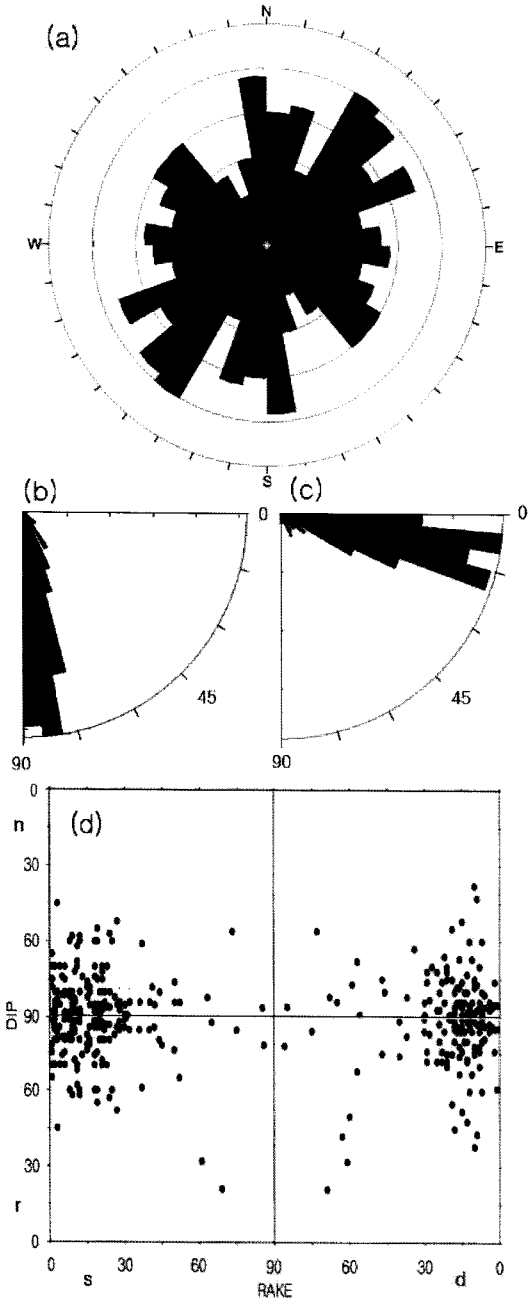

Fig. 5. Distribution of strikes(a), dips(b), rakes(c) and slip senses(d) for faults(n = 238) which are identified in the field.

의 단층은 역시 선주각이 얕은 영역에 분포하며 순수 주향이동 단층에 가깝고 경사이동 단층은 매우 드문 편이다. 주향이동 단층의 운동감각은 좌수향 감각과 우수향 감각의 단층이 비슷하다.

절리

절리 밀도와 프랙탈 차원 분석

양산단층 운동과 관련하여 경주 남산지역에서 노두 규모 단열의 발달 상태를 알아보기 위하여 야외에서 화강암 30개 지점과 퇴적암 20개 지점, 총 50개 지점(Fig. 1)에서의 바닥노두의 절리들을 측정하였다. 절리를 측정할 때 각 지점에서 1 m × 1 m 면적에서 절리의 총 길이를 측정하고 절리들을 스케치 하였다. 각 지점에서의 절리의 밀도를 단위면적당 절리 길이의 총합으로 구하였다. 연구지역 전체에서의 절리 밀도는 0.0078~0.0612의 범위를 보이고 평균은 0.0288이다. 양산단층에서 수직인 방향으로 절리 밀도의 변화는 Fig. 6(a)에서 보여 지듯 양산단층으로부터 약 2.7 km 부근에서 밀도 값이 현저하게 감소하며, 양산단층으로부터 1 km 이내 지점들에서의 절리 밀도 평균은 0.03916이고 1~2.7 km에 분포하는 지점들에서의 절리 밀도 평균은 0.02806이며, 2.7 km 이상에서의 지점들의 평균은 0.01842이다. 양산단층에서 멀어질수록 절리밀도가 낮아짐을 보여준다.

한편 50개 지점의 절리 스케치 그림 자료를 이용하여 박스카운팅 법(Barton and La Pointe, 1995)에 의해 프랙탈 차원을 구하여, 양산단층 운동과의 관련성을 알아보고자 한다. 이를 위해 ARC VIEW GIS 3.2a를 이용하여 야외에서 작성한 바닥 노두에 대한 단열도를 수치화(digitize)한 후, 이를 정사각형의 격자파일(grid file)로 변환하였다. 각각 다른 축소율(reduction factor) r 값에 따라 셀 크기를 변화해 가면서, 즉 r값을 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64,1/128, 1/256, 1/512까지 변화해가며 셀의 누적 개수(N)를 구하였다. 그리고 r에 따른 누적 개수(N)를 도시하였을 때 생성된 추세선의 기울기가 구하고자 하는 프랙탈의 차원 값이 된다.

연구지역의 프랙탈 차원 값은 1.073~1.492의 범위를 보이고, 그 평균은 1.3106으로 나타났다. 프랙탈 차원 값은 절리 밀도와 마찬가지로 양산단층으로부터 약 2.7 km거리에서 그 값이 현저하게 감소하며(Fig. 6(b)), 양산단층으로부터 1 km이내의 지점들에서 프랙탈 차원의 평균값은 1.3831이고 1~2.7 km에 분포하는 지점들에서의 평균값은 1.3130이며, 2.7 km 이상의 거리에 분포하는 지점들에서의 평균값은 1.2210으로써 프랙탈 차원 값은 양산단층에 가까워질수록 커짐을 보여준다.

절리의 배향

앞서 절리 밀도와 프랙탈 차원 값을 구하기 위하여 조사한 50개의 바닥노두로부터 측정한 모든 절리들의 배향을

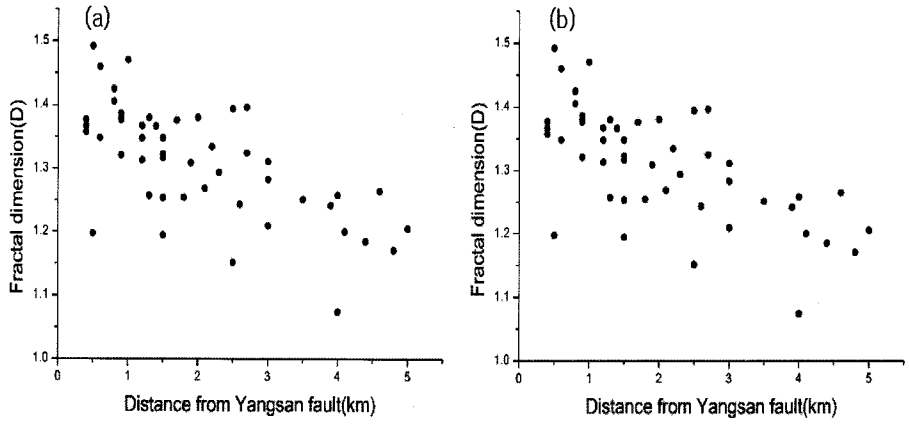

Fig. 6. Distributions of joint density and fractal dimension in the study area.

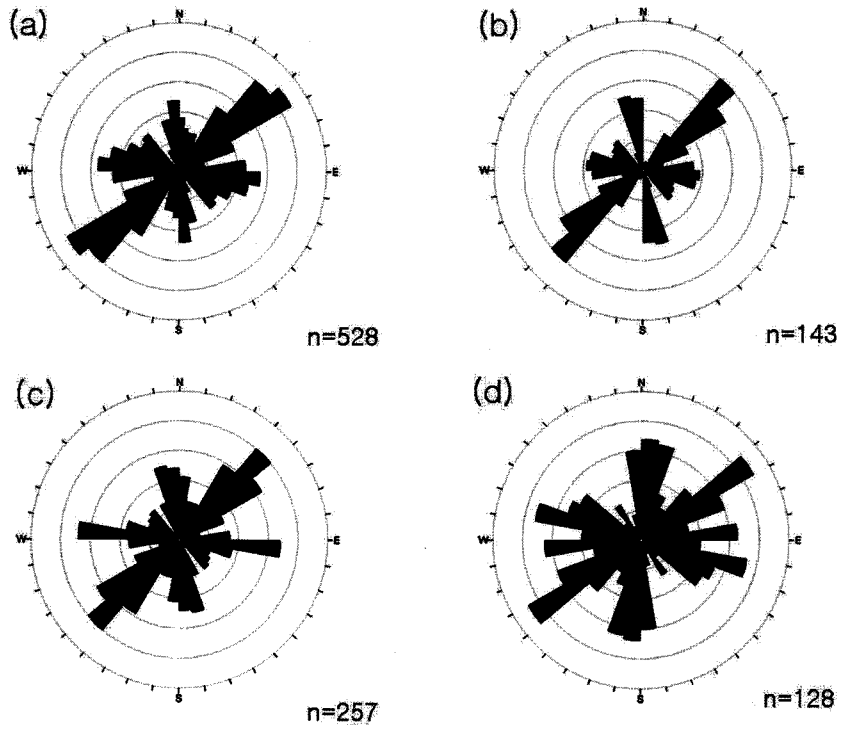

Fig. 7. Rose diagrams show the strike of joint by different distances from Yangsan fault. (a) total, (b) within 1 km, (c) 1~2.7 km and (d) more than 2.7 km.

장미그림으로 나타낸 것이 Fig. 7(a)다. Fig. 7(a)를 보면 N0~10°W, N70~90°W, N40~60°E의 세 조가 우세하게 나타남을 볼 수 있고 그 중 가장 우세한 조는 N40~60°E이다.

한편 절리 밀도와 프랙탈 차원 값을 나타낸 Fig. 6에서 양산단층으로부터 1 km와 2.7 km 부근에서 각각 양 값이 현저히 변화하는 것을 바탕으로, 양산단층의 주향에 수직인 방향에서 거리별 절리의 배향을 알아보았다(Fig. 7). 거리 구간별 우세 절리조의 배향이 대체로 전체 절리의 경우(Fig. 7(a))와 유사하지만 단층에서 1 km이내에서(Fig. 7(b)) N40°~60°E 조가 가장 우세하고 절리조들의 조별 집중도도 아주 현저하며, 2.7 km이상에서는(Fig. 7(d)) N10W°~N20E°의 절리조가 갑자기 우세해지며 조별 집중도가 가장 떨어진다. 즉 양산단층에서 멀어짐에 따라 절리의 배향이 분산되며 다양해짐을 보여준다.

양산단층 분절지역의 지질구조

양산단층의 자취변화

항공사진, 지형도 및 위성사진을 통해 연구지역을 전체적으로 보면, 연구지역의 남서부에서 양산단층은 단층자취가 방향이 바뀌며 두 개의 별개의 단층이 접촉하고 있는 듯한 양상을 나타낸다. 하나는 경주의 북쪽에서부터 거의 N6°E의 자취를 가지고 남쪽으로 내려오다가 접촉지점에서 단층자취의 방향이 갑자기 동쪽으로 크게 휘며 종지한다. 다른 하나는 연구지역 남부의 양산, 언양 지역에서 약 N20°E 방향을 유지하며 거의 직선적으로 올라오다가 연구지역 남서부에 이르는데, 단층대의 폭이 급격히 감소하며 접촉지점에 이른다.

습곡

앞에서 기술한 두 단층의 접촉지점 부근의 퇴적암이 분포하는 지역에서 양산단층의 운동과 기하가 층리면의 자세에 어떤 영향을 주었는지를 세밀히 파악하기 위해 층리면의 야외조사가 이루어 졌고 성형선등고선(form-line contour)을 작성하였다(Fig. 8).

북쪽에서 연장되어 내려오는 양산단층의 동쪽에서는 층리면의 교란과 더불어 향사 습곡구조가 뚜렷하게 발달한다. 향사의 북쪽 날개의 자세는 N61°E, 16SE이고 남쪽 날개의 자세는 N62°W, 22NE이다. 향사의 습곡축의 선주향은 S85°E이고 선경사는 9°이다. 이 습곡은 날개사잇각(interlimb angle)이 147° 정도로 밀착도(tightness)에 의해 분류한다면 완만(gentle)습곡에 해당한다. 그리고 연구지역의 서남부 모서리 지역 즉, 남쪽에서 연장되어 올라오는 양산단층의 동쪽에서는 배사 습곡구조가 인지된다. 배사의 서쪽 날개의 자세는 N65°E, 32NW이고 동쪽 날개의 자세는 N51°W, 36NE이다. 배사의 습곡축의 선주향은 N4°W이고 선경사는 28°이다. 이 습곡도 날개사잇각이 약 145°로 완만습곡에 해당한다. 또한, 양 지역에서 발달하는 향사와 배사의 선주향은 거의 직각에 가까울 정도로 현저히 다름을 보여준다.

역단층

Fig. 9의 각 지점들에서 압축지구조의 산물로 생각되는 역단층이 발견된다. 이들이 발견된 지점들은 양산단층의 북쪽 분절(segment)의 남쪽 종지에 해당되고, 우수주향 이동단층의 끝부분에서 보여주는 압축인편팬(contractional imbricate fan)의 기하를 보여주는 곳이다.

Fig. 9에서 발견된 역단층들은 모두 인편팬을 이루는 두 가지단층의 기하와 일치함을 보여준다. 발견된 역단층들은 주로 50~60°의 비교적 큰 선주각을 보이는 반면, 소수의 역단층들은 20~40°의 비교적 얕은 선주각과 상대적으로 고각의 단층면을 보이며 주향이동성분을 많이 갖기도 한다. 흔히 이들 단층 주변의 층리면이 예인습곡(drag fold)을 발달시키는 것을 볼 수 있으며 퇴적암에서 사암층의 어긋남도 보여준다. 또한 비교적 규모가 큰 역단층들은 단층비지를 포함하는 경우도 있으며, 단층면상에 R 전단단열이나 초생달 모양의 단열(lunate fracture)을 발달시킨다.

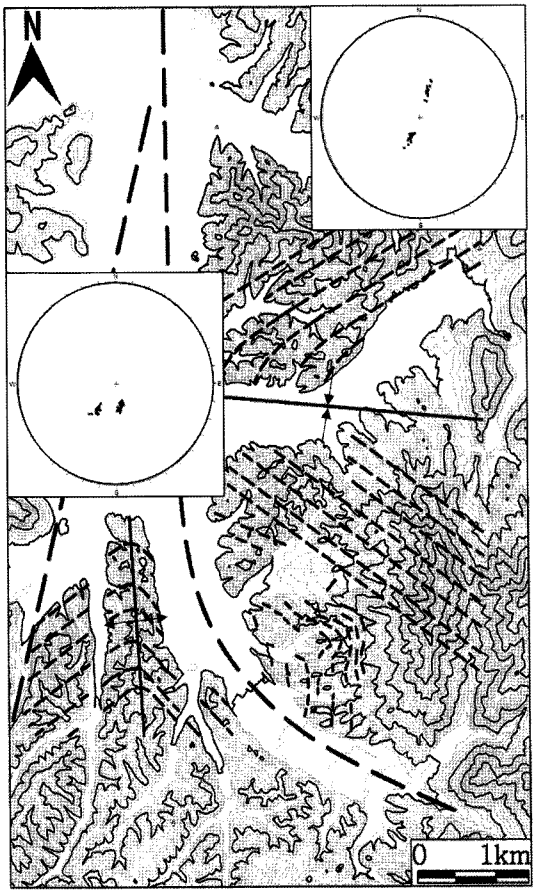

Fig. 8. Form-line contour of bedding planes in the southwestern part of the study area. Long solid lines with arrows represent axial traces of folds. Insets represent lower-hemisphere projections of poles to bedding planes.

토 의

절리 밀도와 프랙탈 차원 값의 계산결과를 보면(Fig. 6),

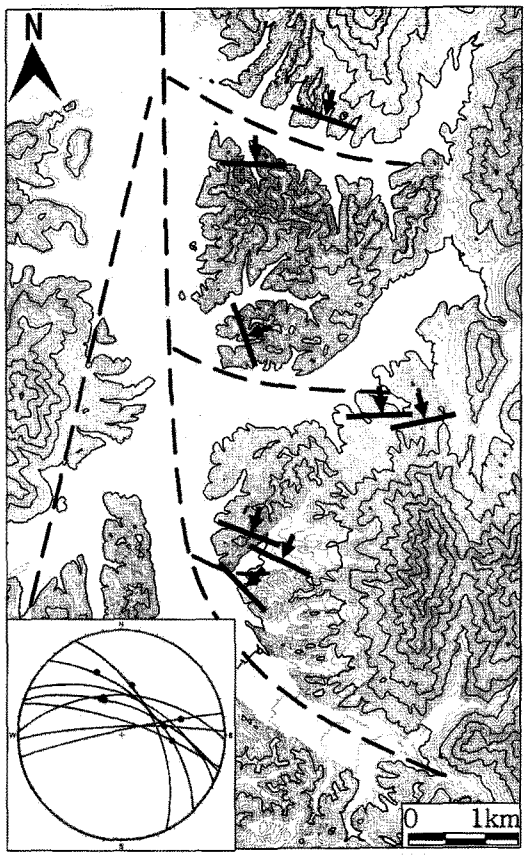

Fig. 9. Termination of northern Yangsan fault with geometry of contractional imbricate fan. Outcrop-scale reverse faults develop around splay faults. Insets represent lower-hemisphere projection of the faults.

양산단층에 가까울수록 점점 절리 밀도와 프랙탈 차원 값은 함께 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는, 단위 면적당 발달하는 단열의 수가 절리 밀도와 프랙탈 차원 값을 구하는 과정에서 가장 큰 영향을 미치기 때문이다. La Pointe(1988)에 의하면 프랙탈 차원 값은, 단열의 크기나 배향의 변화정도보다 단열의 수 또는 단열블럭(fracture-bounded blocks)의 밀도에 더 영향을 받는다고 하였다. 따라서 양산단층에 가까울수록 절리 밀도와 프랙탈 차원 값이 높아지는 이유는 단열의 수 또는 단열 불록이 증가하기 때문이고, 이는 양산단층이 주변 암석에 미친 영향을 보여주며 단층과의 거리가 가까울수록 암석의 파쇄작용이 더욱 심해짐을 말해준다.

절리 밀도와 프랙탈 차원 값은 앞에서 기술한 바와 같이 양자가 유사한 결과를 보이는데, 절리 밀도와 프랙탈 차원 값의 분석에 대한 결과 비교가 어떤 의미가 있는지를 알아보기 위해 최한우와 장태우(1999) 그리고 신정환과 장태우(2001)는, 단위면적에서 절리의 밀도는 동일하게 주고 단열의 분포상태를 다르게 하여 프랙탈 분석을 해 본 결과, 절리 밀도가 같더라도 그 절리의 분포상태에 따라 프랙탈 차원 값은 달라질 수 있음을 인지하였다. 다시 말해서, 비록 단열 밀도가 동일하다 할지라도, 서로 다른 배향을 갖는 두 절리조가 어떤 관계로 발달하느냐에 따라 다른 프랙탈 차원 값을 나타냄을 제시하였다. 따라서 절리 밀도는 단순히 암석이 깨어져있는 정도만을 표현하는 것이라고 할 때, 프랙탈 차원 값은 깨어져있는 단열의 분포상태까지도 내포하는 값이라 할 수 있다. 그러나 실제 야외에서는 발달하는 절리조의 수나 단열망의 방향, 절리들의 접경 또는 교차관계 등 여러 가지 변수가 있기 때문에 프랙탈 차원 값으로 이들의 분포를 역으로 알아내는 것은 어려운 일이다.

Billi(2005)는 단층핵 내 입자크기를 이용한 프랙탈 차원 분석을 통해 단층비지대와 단층각력대를 구분하였다. 본 연구에서도 절리 밀도와 프랙탈 차원 값의 결과를 이용하여 양산단층으로부터 약 2.7 km 지점에서 단층손상대와 변형되지 않은 모암(host rock)의 경계가 존재할 것으로 추정된다. 절리 밀도와 프랙탈 차원 값의 결과를 바탕으로 양산단층으로부터 거리에 따른 절리의 배향을 나타내었을 때(Fig. 7), 1~2.7 km의 지점들에 분포하는 절리들의 배향은 1 km 이내의 절리들의 배향에 비해 상대적으로 약간은 분산된 주향의 분포를 보이지만 배향에 따른 장미그림의 형태는 매우 유사하다. 그러나 2.7 km 이상의 지점들에 분포하는 절리의 배향은 Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)에서 보여 지는 N40~60°E의 가장 우세 배향이 N50~60°E, N10°W~N20°E, N70~100°W로 다양해지며 배향별 집중도 또한 상당히 낮아진다. 따라서 양산단층과의 거리가 멀어질수록 절리의 배향 분포는 분산되며 장미그림의 형태도 Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)에 비해 다른 형태를 갖게 된다. 이러한 결과로 미루어보아, 양산단층운동이 주변 암석에 크게 영향을 미친 범위 즉 손상대와 모암의 경계를 절리의 밀도 및 프랙탈 차원 값의 결과와 결부하여 양산단층의 중심에서 약 2.7 km정도로 생각해 볼 수 있다.

야외에서 조사된 단층들과 양산단층의 운동 간에는 어떤 관계가 있는지를 알아보기 위해서, 조사한 단층들 중 양산단층으로부터 2.7 km 이내의 주향이동단층들만 장미그림으로 나타내었다(Fig. 10). Fig. 10(a)와 Fig.10(b)는 각각 우수향 주향이동단층들과 좌수향 주향이동단층들을 나타낸 것으로 우수향 주향이동 단층들은 N30~40°E와 N60~70°E의 주향이 우세한 배향이며, 좌수향 주향이동

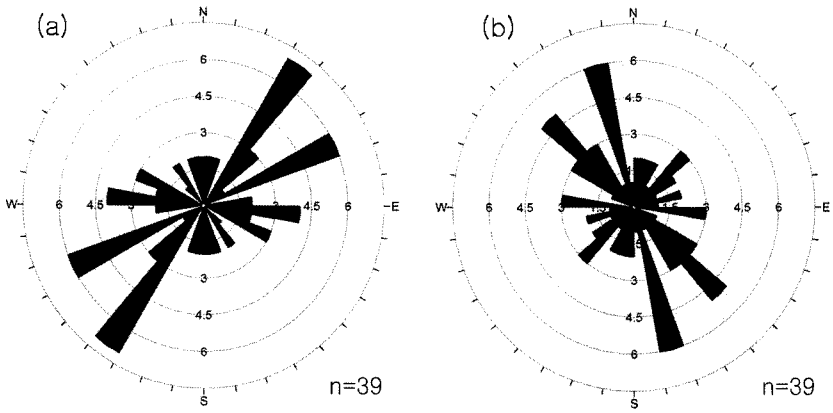

Fig. 10. Rose diagrams showing right-lateral strike-slip faults(a) and left-lateral strike-slip faults(b) within damage zone of the Yangsan fault.

단층들은 N10~20°W와 N40~50°W의 주향이 우세하다. 장천중과 장태우(1998)는 고응력 분석에 의한 양산단층 운동 해석에서 초기에는 주로 ENE-WSW의 압축응력에 의해 양산단층은 우수향 주향이동운동을 하였고 후속되는 지구조 사건인 NW-SE의 압축응력에 의해 양산단층은 좌수향 주향이동을 하였다고 하였는데 이 이야기를 토대로 할 때 본 연구의 우수향 주향이동 단층들은 ENE-WSW 압축응력에 의한 주 양산단층 운동에 수반된 우수단층으로, 좌수향 주향이동 단층들은 NW-SE 압축응력에 의한 양산단층 활동 시에 수반된 우수 단층들로 각각 해석 할 수 있을 것이다.

나아가서 Fig. 10(a)에서 우세한 주향을 보이는 N30~40°E의 우수향 주향이동단층들은 약 N6°E의 양산단층의 주향에 대해 20~30°의 각관계를 보이고 있으며, 다음으로 우세한 N60~70°E의 우수향 주향이동단층들은 N30~40°E의 단층들과 20~30°의 각관계를 보인다. 또한 Fig. 10(b)에서 우세한 주향을 보이는 N10~20°W의 좌수향 주향이동단층들 역시 양산단층의 주향과 비교해 20~30°의 각관계를 보이며, N40~50°W의 단층들 역시 N10~20°W의 단층들과 20~30°의 각관계를 보인다. 이러한 각 관계는 주향이동 단층 운동에서 Moody and Hill (1956)의 차수(order)별 주향이동 단층의 수반 관계로 해석해 볼 수도 있을 것이다.

단층분절(fault segmentation)의 개념은, 단층대에서 대규모 지진을 수반한 큰 슬립사건은 단층의 전체 길이로 볼 때 단지 일부분에 지나지 않는 불연속 구간에 한정된다는 생각으로부터 시작되었으며(Knuepfer, 1989) 분절의 경계는 주 단층의 주향의 변화, 단층수와 단층대의 폭의 증가, 분절경계지역의 복잡함의 증가, 주 분절의 스텝오버(step over) 등으로 구분된다(Crone and Haller, 1991). 경주의 북쪽에서부터 내려오는 N6°E의 양산단층의 북쪽 분절의 자취는 연구지역의 남서부에서 동쪽으로 휘는 기하를 가지며 종지하고, 양산, 언양지역에서 N20°E의 자취를 가지며 거의 직선적으로 연구지역 속으로 연장해 들어오는 양산단층의 남쪽분절은 단층대의 폭이 급격히 감소하며 연구지역의 남서부에서 북쪽분절과 만난다(장태우 외, 1993; 장천중, 2001). 연구지역의 남서쪽에서 양산단층이 분절되었다는 증거는 앞의 연구자들에 의한 자료 이외에 이번 연구에서 확인된 북쪽분절의 압축인편상 팬 종지형태와 관련된 압축성 구조인 다수의 역단층과 습곡을 포함한다(Fig. 8, Fig. 9). 북쪽 분절에 대해서, 채병곤과 장태우(1994)는 양산단층의 북쪽 연장부분은 영일군 청하면 이북지역에서 말꼬리모양으로 분기하며 종지한다고 하였다. 이렇게 볼 때, 북쪽 분절의 남쪽 종지가 바로 본 역의 남서부에 해당된다고 판단된다. Fig. 8에서 양산단층 북쪽 분절의 동쪽에 발달하는 향사와 남쪽 분절의 동쪽의 배사는 축자취가 거의 직교할 정도로 현저히 다르다. 축자취의 배향이 현저히 다른 이유에 대해서, 아마도 주향이동단층 끝부분에서의 변화하는 응력궤적(stress trajectory)에 기인한다고 생각된다. 주향이동단층 끝부분의 응력궤적에 관한 연구는 그동안 몇몇 학자들에 의해 진행되어 왔다(Guiraud and Seguret, 1985; De Ruig, 1990; Odonne and Costa, 1993). 일반적으로 주향이동 단층주변에서 나타나는 응력궤적은, 최대수평주응력이 단층의 신장사분면에 가까울수록 단층에 아수직한 방향으로 작용하고, 단층의 압축사분면으로 갈수록 아평행한 방향으로 작용한다(Nicolas, 1987). 연구지역 내 두 습곡 중 북쪽 분절 종지부분에 위치하는 향사의 축자취는 S85°E로써,

북쪽 분절의 우수향 이동에 관련하여 압축사분면으로 갈수록 단층의 주향과 아평행한 방향으로 작용하는 최대주응력의 응력궤적과 부합되는 방향성을 보인다. 한편 남쪽 분절의 끝부분에 발달하는 배사의 축자취는 N4°W이다. 이는 단층의 신장사분면에서 단층에 아수직하게 작용한 최대주응력의 산물로 생각할 수 있다. 그럼으로 북쪽 분절과 남쪽 분절은 각각 별개의 분절에서 단층운동을 일으켰을 것으로 생각할 수 있다.

결 론

본 연구에서는 양산단층에 인접한 경주 남산일대에 발달하는 단열구조의 양상을 분석하고 양산단층의 분절과 관련한 구조적 특성을 규명하였으며 그 결과는 다음과 같다.

연구지역에 발달하는 선상구조는 N50~70°W 방향의 서북서 선상구조들의 빈도가 가장 우세함을 보이나, 누적길이는 N5~15°E 군집이 더 우세하며 길이가 긴 선상구조가 상대적으로 많이 포함되어 있음을 말해주고 있다. 실내에서 분석한 선상구조를 이용, 야외에서 그 지질학적 의미를 확인한 결과 노두로 직접 확인하지 못한 것들과 지질학적으로 의미를 부여할 수 없는 선상구조들은 전체의 46%에 해당하였고, 나머지는 단층과 절리로 확인되었는데 그중 94%는 단층이었고 6%는 절리로 간주되었다. 이 단층들은 N10°W~N20°E, N30~50°E, N60~70°E, N40~60°W 주향의 단층 조들이 우세하고 대부분이 20° 이하의 얕은 선주각과 75° 이상의 큰 경사를 보여주는 주향이동성단층이다.

절리 밀도와 프랙탈 차원 값은 양산단층에 가까워질수록 높은 값을 보이지만 양산단층에서 먼 약 2.7 Km 밖에서는 현저히 낮은 값을 나타낸다. 절리의 방향성도 약 2.7 Km 밖에서는 주향이 다양하게 분산되며 분포의 집중도가 낮아지는 양상을 보인다. 이를 토대로 양산단층이 주변 암석에 미친 영향범위 즉 손상대의 경계를 약 2.7 Km까지로 간주 할 수 있다.

양산단층 손상대 내의 소단층들 중 우수향 주향이동단층들은 양산단층이 우수향이 동을 할 때에 수반된 우수향단층으로, 좌수향 단층들은 양산단층의 좌수향 이동운동 시에 수반된 단층들로 해석된다.

연구지역 내에서 양산단층은 두 개의 분절로 나누어지는 데, 북쪽 분절과 남쪽 분절 간 주향의 차이, 북쪽 분절 끝 부분에서 압축성 인편괜의 기하 및 9°, S85°E로 선경사하는 향사습곡 과 역단층의 발달, 남쪽분절 끝 부분에서 28°, N4°W로 선경사하는 배사의 발달 등은 양산단층의 분절을 지시해 주는 강력한 증거이며, 양 분절 끝 부분에서 습곡의 축자취가 직교할 정도로 크게 다른 이유는 주향이동단층 끝부분에서 변화하는 응력궤적에 기인한다고 생각된다. 이들로 미루어보아 양산단층의 북쪽 분절과 남쪽 분절은 각각 별개의 분절에서 단층운동을 일으켰으며 한번의 운동으로 발달된 단층이 아니라 서로 다른 응력체계 하에서 다중변형작용을 통해 현재의 모습으로 진화하였을 것이다.

사 사

본 연구의 야외조사 및 실내 자료 정리를 도와준 경북대학교 구조지질연구실 학생들과 선상구조 해석에 사용한 항공사진(1 ; 20,000)을 대여해준 국토지리정보원에게 감사한다. 그리고 이 논문을 심사해준 익명의 심사 위원에게 감사를 표한다.

참고문헌

고정선, 윤성효, 이상원, 1996, 경주 남산일대 A-형 화강암의 암석학 및 지화학적 특성. 암석학회지, 5, 142-160.

권연숙, 장태우, 1999, GIS를 이용한 경상분지 남동부의 선상구조분석. 대한 자원환경지질학회 한국자원공학회 한국지구물리탐사학회 춘계공동학술발표회, 206.

김남장, 진명식, 권영일, 1971, 모량도폭(1 : 50,000) 및 설명서, 국립지질조사 소.

신정환, 장태우, 2001, 포항분지지역에 발달하는 단열의 프랙탈 해석. 한국광물학회 한국암석학회 2001년 공동학술발표회 논문집, 111-114.

윤성효, 황인호, 1990, 경주남산일대의 화강암의 암석학 및 지구화학의 특성. 한국지구과학회지, 11, 51-66.

이봉주, 최위찬, 강필종, 1997, 한반도 동남부지역의 선구조선. 지질학회지, 33, 18-26.

이희권, 1998, 단층 활동시기 결정(양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가 최종보고서), 한국자원연구소, 555-671.

장기홍, 1990, 경상분지 동부 지질 발달사. 1989년도 전국대학 기초과학연구소 지구과학(지질)분야 학술 심포지움, 경북대학교, 1-3.

장천중, 장태우, 1998, 고응력 분석을 통한 양산단층의 구조운동사. 지질공학회지, 8, 35-49.

장천중, 2001, 양산단층의 구조적 특성과 진화. 경북대학교 대학원 이학박사 학위 논문.

장천중, 장태우, 2002,양산단층의 구조적 특성과 운동학적 고찰. 대한지질공학회 학술발표회, 163-171

장태우, 장천중, 김영기, 1993, 언양지역 양산단층 부근 단열의 기하 분석. 광산지질, 26, 227-236.

장태우, 추창오, 1999, 양산단층대의 단층작용 과정과 단층비지의 K-Ar 연령. 한국지구과학회지, 20, 25-37.

진명식, 김성재, 신성천, 1989, K/Ar과 휫션트랙 연령측정에 의해 한국 동남부 화강암류의 지열사와 냉각사 연구. 한국동력자원연구소, 동위원소 지질연구, KR-

89-1C, 65-105.
채병곤, 장태우, 1994, 청하-영덕지역 양산단층의 운동사 및 관련 단열 발달 상태. 지질학회지, 30, 379-394.
최한우, 장태우, 1999, 모량단층 주변 절리의 분포특성과 프랙탈 해석. 지질공학, 9, 119-134.
Billi, A., 2005, Grain size distribution and thickness of breccia and gouge zones from thin(< 1m) strike-slip fault cores in limestone, Jour. Struct. Geol., 25, 1779-1794.
Barton, C. C. and La Pointe P. R., 1995, Fractals in the earth sciences, Plenum. 265pp
Crone, A. J. and Haller, K. M., 1991, Segmentation and the coseismic behavior of Basin and Range normal fault: Example from East-Central Idaho and southeastern Montana, U.S.A., Jour. Struct Geol., 13, 151-164.
De Ruig, M. J., 1990, Fold trends and stress deviation in the Alicante fold belt, southeastern Spain, Tectonophysics, 184, 393-403.
Guiraud, M. and Sequret, M., 1985, In Biddle K. T. & Christie- Blicks, N. (eds.), Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation, Soc. Econ. Paleont. Miner. Spec. Pub., 37, 159-175.
Knuepfer, P. L. K., 1989, Implications of the characteristics of end-points of historical surface fault ruptures for the nature of fault segmentation. U.S. Geol. Surv., Open File Report, USGS-OFR 89-315, 193-228.
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.
Moody, J. D. and Hill M. J., 1956, Wrench-fault tectonics. Geol. Soc. Am. Bull. 67, 1207-1246.
Nicolas A., 1987, Principles of Rock Deformation. D. Riedel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 208pp.
Odonne F., Costa E., 1993, Relationships between strike-slip movement and fold trends in thin-skinned tectonics: analogue models, Tectonophysics, 228, 383-391.
Tateiwa I., 1929, Geological Atlas of Korea, Gyeongju sheet (1 : 50,000), Geological Survey of Korea.

2009년 1월 20일 원고접수, 2009년 3월 23일 게재승인

장태우

경북대학교 자연과학대학 지질학과

702-701, 대구시 북구 산격동 1370

Tel: 053-950-5361

Fax: 053-950-5362

E-mail: twchang@knu.ac.kr

김헌주

SK에너지 E&P 기술그룹

110-110, 서울시 종로구 서린동 99

Tel: 02-2121-5278

Fax: 02-2121-7008

E-mail: seowon@skenergy.com