

자동 선구조 추출 알고리즘을 이용한 경북 의성지역의 선구조 분석

김상완* · 원중선* · 김원균* · 민경덕*

Lineament Analysis in the Euseong Area Using Automatic Lineament Extraction Algorithm

Sang-Wan Kim*, Joong-Sun Won*, Won Kyun Kim* and Kyung Duck Min*

ABSTRACT : In this study, we have estimated lineaments in the Euseong area, Kyungbuk Province, from Landsat TM by applying the algorithm developed by Kim (1998) and Won *et al.* (1998) which can effectively reduce the look direction bias associated with the Sun's azimuth angle. Fractures over the study area were also mapped in the field at 57 selected sites to compare them with the results from the satellite image. The trends of lineaments estimated from the Landsat TM images are characterized as N50°~70°W, NS~N10°W, and N10°~60°E trends. The spatial distribution of lineaments is also studied using a circular grid (6.36 km radius, 9 km × 9 km node interval), and the results show that the area can be divided into two domains: domain A in which NS~N20°E direction is dominant, and domain B in which west-north-west direction is prominent. The trends of lineaments can also be classified into seven groups. Among them, only C (N31°~48°E), D (N3°~31°E) and G (N43°W~EW) trends are found to be dominant based upon Donnelly's nearest neighbor analysis and correlations of lineament densities. In the color composite image produced by overlaying the lineament density map of these C-, D-, and G-trends, G-trend is shown to be developed in the whole study area while the eastern part of the area is dominated by D-trend. C-trend develops extensively over the whole area except the southeastern part. The orientation of fractures measured at 35 points in the field shows major trends of NS~N30°E, N 50°~80°W, and N80°E~EW, which agree relatively well with the lineaments estimated from the satellite image. The rose diagram analysis of field data shows that WNW-ESE trending discontinuities are developed in the whole area while discontinuities of NS~N20°E are developed only in the eastern part, which also coincide with the result from the satellite image. The combined results of lineaments from the satellite image and fracture orientation of field data at 22 points including 18 minor faults in Sindong Group imply that the WNW-ESE trend is so prominent that Gumchun and Gaum faults are possibly extended up to the lower Sindong Group in the study area.

서 론

위성영상자료와 항공사진을 이용한 절리, 단층, 습곡, 암맥, 파쇄대 및 암상의 경계 등에 의해 나타나는 선구조에 대한 연구가 Koike (1995), Mah *et al.* (1995), Karnieli *et al.* (1996) 등 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔으며, 이와 같은 선구조는 원격탐사자료에서 지형의 기복 변화 및 파쇄대와 같은 지형적 특징에 따른 명암차에 의해 구분이 가능하다 (Williams, 1983). 선구조 분석은

광상탐사, 자연재해분석 및 지구조 운동분석 등에서 기초 자료로 많이 활용되고 있다 (Short, Lowman, 1973).

본 연구에서는 산악지형과 함께 총적층시대가 발달하는 지역에 적용 가능하도록 개발된 자동화된 선구조 추출 알고리즘 (김상완, 1998)을 Landsat TM 영상에 적용하여 객관적으로 추출된 선구조를 이용하여 경북 의성 일대의 주요 선구조 판독 및 분석을 실시하였다. 또한, 선구조의 공간 분포특성을 알아보기 위해 격자별 로즈도표 (rose diagram)에 의한 선구조 군집방향분석 및 최인접분석과 선구조 밀도도와 같은 통계적 접근을 통해 구조구의 보다 객관적 분석을 시도하였다. 경상분지의 선구조 연구는 김중환 등 (1976), Kang (1984), 이봉주 등 (1997) 등에

* 연세대학교 지구시스템학과 (Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Korea), E-mail: sangwan@geors.yonsei.ac.kr

의해 수행된 바 있으나 이들 모두 육안 추출에 의한 선구조를 이용하였으며, 김원균 등 (1996)은 Hough 변환을 이용하여 선구조의 주방향성 분석을 실시한 바 있다.

위성영상을 이용한 선구조 분석은 광역적 규모인 반면, 야외에서 노두를 대상으로 하는 불연속면 조사는 국지적 규모이다. 따라서, 인공위성영상에 의해 추출된 선구조는 지형적 특징으로 표현될 만큼 발달하는 비교적 규모가 큰 구조운동에 의한 영향을 받지만, 노두 규모의 불연속면은 이러한 구조운동의 영향을 받아 2차, 3차 절리가 발달되기도 한다. 그럼에도 불구하고 작은 규모의 열극, 절리 등과 같은 불연속면은 대체로 광역적 구조를 반영하는 것으로 알려져 왔다 (Hancock, 1985). 이런 두 자료는 여러 응용분야에서 독자적으로 사용되기도 하지만 많은 연구자들 (Mah *et al.*, 1995; Mabee *et al.*, 1994)에 의해 비교 분석, 상호 보완되기도 하였다. 본 연구에서는 총 57개 지점에서 선형조사를 실시하여 얻은 불연속면 자료를 로드도표로 작성하여 위성영상에 의한 선구조의 방향성과 비교 분석하였으며 특히, 의성군 비안면, 군위군 소보면 일대의 신동층군에 대해서 좀 더 세밀하게 조사된 불연속면 특징의 분석을 통해 가음단층과 금천단층의 연장 가능성에 대하여 고찰하였다.

일반지질

본 연구지역에 분포하는 선캠브리아기의 변성암류는 쥬라기의 청송화강암에 의하여 관입당해 있고 백악기 퇴적암류와는 본 연구지역의 북동부에서 안동단층과 접해 있다 (Fig. 1). 연구지역 전역에 발달하고 있는 경상분지 내의 경상누층군은 대보조산운동 이후 백악기 초기의 육상기원 쇄설성 퇴적물과 화산암으로 이루어진 육성퇴적층과, 후기의 산성 내지 염기성 화산암류의 분출과 이어진 불국사화강암의 관입에 의해 형성되었다 (장기홍, 손진담, 1990). 백악기는 여러 번의 격렬한 지괴의 상승과 이에 따른 육상 퇴적작용이 일어난 시기였으며, 경상분지 형성기간 동안에도 빈번한 지역적 지괴운동과 왕성한 화산활동이 수반되었다 (Lee, 1987). 의성소분지 (원종관 등, 1978)내 백악기 지층들은 하부로부터 신동층군, 하양층군, 유천층군, 불국사관입암류의 순으로 구성되어 있다. 신동층군은 본 연구지역 지질도 (Fig. 1)의 서측부에 위치하고 있으며, 북북동 방향의 곡분을 형성하고 있다. 암색에 따라 하부로부터 비적색층인 낙동층, 적색협재층인 하산동층, 비적색층인 진주층으로 분류되고 있다. 하양층군은 지괴운동과 퇴적분지 확장에 따른 퇴적산물로서 각

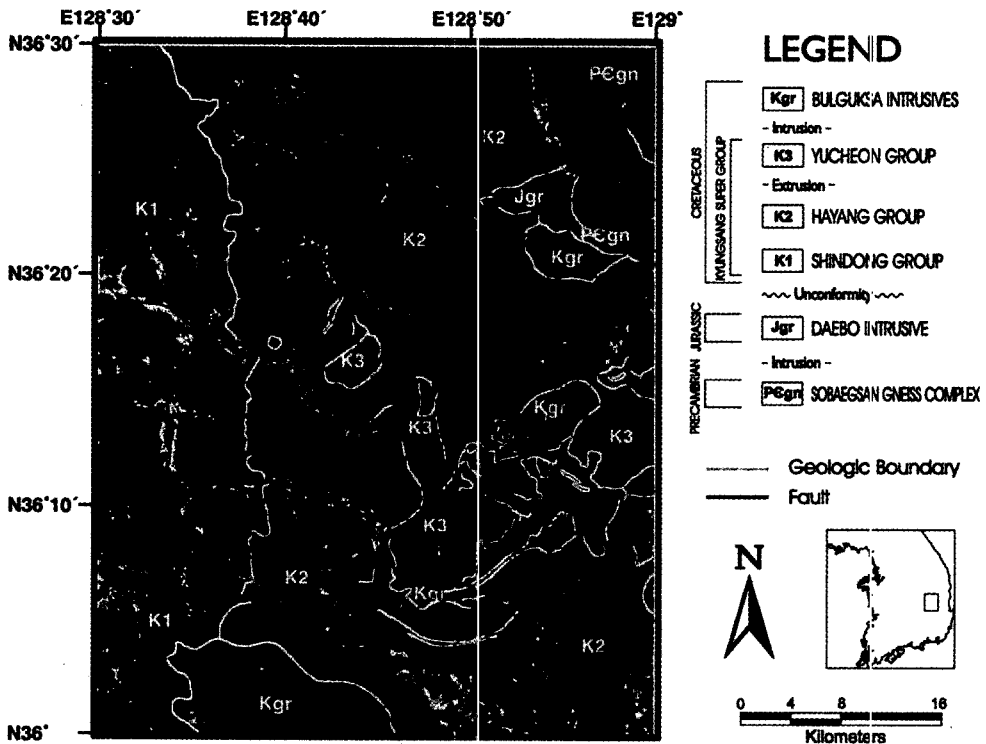


Fig. 1. Geologic map on top of true color composite image of Landsat TM over the Euseong area (after KIGAM, 1996).

소분지별로 층별을 달리하는데 의성소분지 내의 하양층군은 하부로부터 일직층, 후평동층, 점곡층, 사곡층, 춘산층, 신양동층으로 세분된다. 이러한 구분은 암색과 특징적인 역암과 구산동 응회암을 기준층으로 삼고 있다 (장기홍, 손진담, 1990). 유천층군은 하양층군을 경사부정합 (장기홍 등, 1981) 혹은 침식부정합 (장기홍 등, 1977)으로 덮고 있으며, 다량의 화산암류 및 화산쇄설암류와 이들과 호층 또는 교호하는 퇴적암류로 구성되어 있다. 또한, 연구지역의 유천층군은 대부분 연구지역의 중앙부에서 동남방향으로 위치하고 있는 3개의 칼데라를 중심으로 분포되어 있다.

지체구조적인 측면에서 본 연구지역은 불국사변동에 뒤따라 일어난 분괴작용 (fragmentation)에 의하여 형성된 역단층인 안동단층에 의하여 연구지역의 북동부가 경계되고 있으며, 금천, 가음, 우보, 신령단층과 같은 서북서 방향의 좌향 주향이동단층이 연구지역 내에 발달하고 있다. 이들 주향이동단층의 방향은 의성소분지와 밀양소분지를 구분하는 팔공산선과 평행하다. 장기홍 등 (1981)은 이들이 점곡층과 사곡층의 퇴적기간동안 성장단층형의 정단층으로 작용하다가 불국사관입암군의 관입이전 좌향 주향이동단층으로 전환되었다고 하였다. 이러한 좌향 주향이동성단층 외에 금성산-비봉산을 중심으로 하는 금성산 환상단층과 신령도폭의 노고산환상단층과 같은 환형의 정단층이 특징적으로 나타나고 있으며 동서방향의 정단층으로 구산동도폭의 밀골단층이 있다.

선구조 추출

연구지역은 경상분지내 의성소분지 서부지역 (약 45 km×55 km)으로 경도 128°30'~129°00' 와 위도 36°00'~36°30' 에 걸쳐 있다. 지형도는 의성, 군위, 화북, 길안도폭 (1:50,000)에, 지질도는 의성, 천지, 군위, 구산동, 신령, 대울 (1:50,000) 도폭에 해당한다. 선구조 추출을 위해 사용된 위성영상은 1995년 11월 4일 얻어진 Landsat TM (114/35) 자료로 영상의 중심은 동경 129°18' 10", 위도 36°02' 58"이며 태양의 고도각은 31°, 방위각은 144°NE이다. Fig. 1은 연구지역 Landsat TM의 색합성 칼라 영상으로 연구지역 중앙부의 금성산 칼데라와 그 아래의 화산 칼데라 구조 및 연구지역의 주요 구조선인 서북서 방향의 금천단층, 가음단층, 우보단층 그리고 신령단층 등이 영상에서 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

산악지형에서 나타나는 태양의 방위각에 따른 선택적 증감효과를 제거하고 층적층이 함께 발달되어 있는 지형에 적용 가능한 자동 선구조 추출 알고리즘 DSTA,

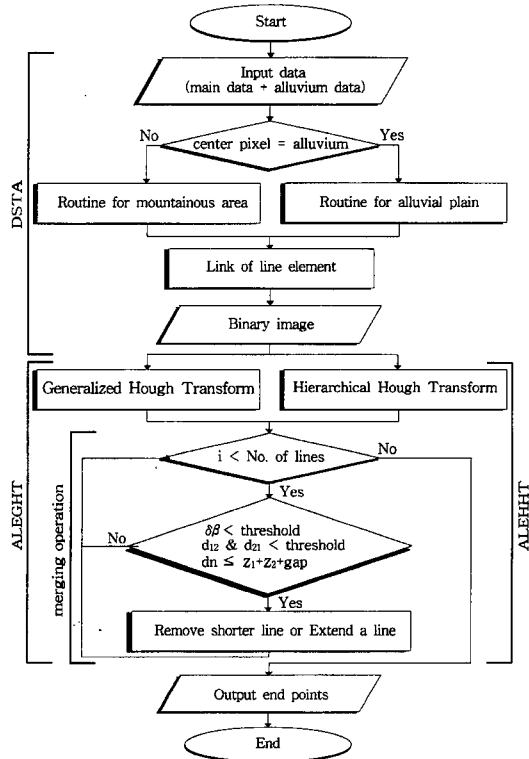


Fig. 2. Flow chart of an automatic lineament extraction algorithm proposed by Kim (1998).

ALEHHT, ALEGHT (김상완, 1998; 원중선 등, 1998)를 적용하여 의성지역 일대의 선구조를 추출하였다. 김상완 (1998)이 제안한 선구조 추출 알고리즘의 흐름도는 Fig. 2와 같다. Fig. 3(a)는 위성영상에 DSTA를 적용한 결과로 선구조 요소와 비선구조 요소로만 구분되어진 이진영상이다. 산악지역 및 층적층 지대에 발달한 선구조 모두 잘 나타나고 있으며, 태양방위각에 평행한 서북서 방향의 경계를 또한 잘 드러나 있다. 이러한 이진영상으로부터 ALEGHT, ALEHHT 알고리즘을 이용하여 1 km 이상의 연장성을 갖는 선구조의 시작점과 끝점을 추출하였다. 자동 추출 알고리즘에 의해 추출된 선구조 중 인공구조물에 의한 선구조는 위성영상 위에 선구조를 중첩한 후 수동적으로 제거하였다. 연구지역 내에서 최종적으로 추출된 벡터화된 선구조는 Fig. 3(b)와 같다. 추출된 선구조의 총수는 1054개, 총길이는 2488 km이며, 평균길이는 약 2360 m이다.

선구조의 방향분석

본 연구에서는 선구조의 방향 특성을 알아보기 위해 선

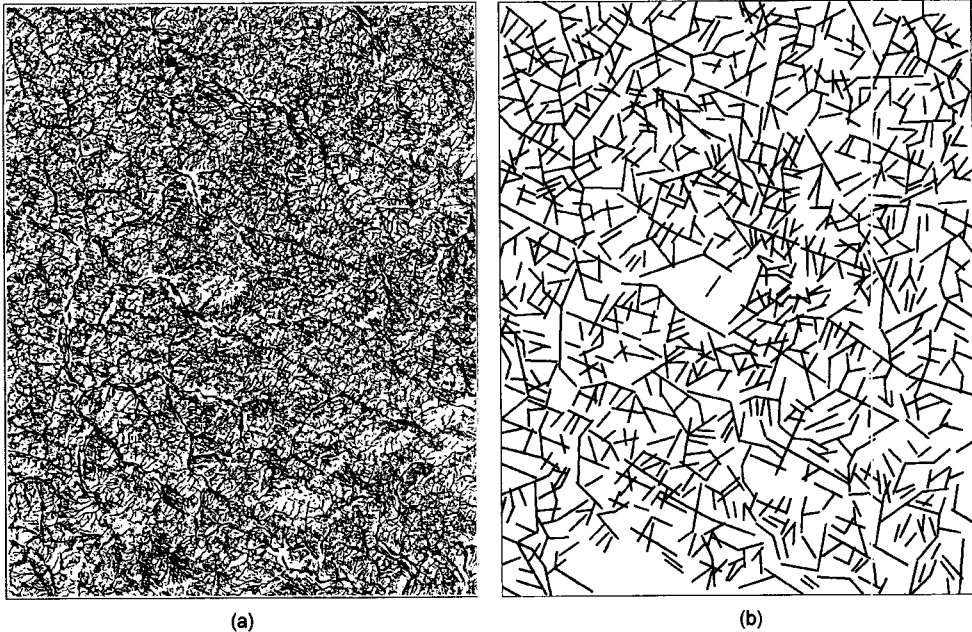


Fig. 3. (a) binary image obtained by applying DSTA to Landsat TM data, and (b) the resulting lineament map of the study area.

구조의 빈도 분석과 선구조의 연장성에 대한 정보를 가지고 있는 각 선구조의 빈도에 길이를 가중치로 곱한 길이 분석을 함께 실시하였으며, 이들은 자기 로즈도표로 표현되었다. 일반적인 선구조 분석은 영상자료로부터 벡터화된 선구조를 추출한 후 이들을 이용한 정량적 분석이 사용되고 있으나, 원래 영상자료 또는 영상자료로부터 선구조 요소들을 추출한 이진영상을 Hough 변환 (Duda, Hart, 1972) 등과 같은 공간 변환을 실시한 후 변환된 공간의 특징을 이용한 정성적 분석 방법도 있다. 후자는 특정 길이 이상의 선구조만을 추출한 벡터화된 선구조와는 달리 선구조 요소로 인정되는 모든 화소를 반영하고 신속하게 결과를 구할 수 있는 반면에 정량적인 분석이 어렵다는 단점이 있다.

Fig. 4(a), (b)는 Fig. 3(a)의 이진영상에 Hough 변환을 적용하여 구한 로즈도표이다. 즉 우선 이진영상을 Hough 변환한 후 Hough 공간을 표준 정규분포화시킨다. 그 다음 가장 지질학적 선구조가 존재할 것으로 예상되는 뚜렷한 선구조들의 주방향분석을 위해 표준 정규분포화된 Hough 공간에서 상위 2.5%, 1%의 값만을 남긴 후 0축으로 합한 값을 10°간격으로 표현한 것이다. 연구지역의 벡터화된 선구조 (Fig. 3(b))의 로즈도표 (Fig. 4(c), (d))를 보면 N50°~70°W 방향을 극점으로 하는 서북서 방향군이 가장 우세하며, N10°~30°E의 북북동방향과 N

50°~60°E의 북동방향 그리고 NS~N10°W 방향이 뚜렷한 극점을 형성한다. 이진영상에 의한 로즈도표에서도 N 50°~80°W의 극점과 남북방향의 극점은 뚜렷하게 나타나지만 북동방향 극점의 형성은 미약하며 반면 EW방향의 극점이 나타나는데, 이러한 차이는 선구조 요소 화소 중 북동방향의 선구조 요소 화소들이 상대적으로 연장성이 좋았으며 EW방향은 매우 짧은 선구조들이 많았다는 것을 의미한다. 비록 약간의 차이는 있지만 이진영상을 이용한 로즈도표도 선구조 방향 해석에 있어서 보조자료로 사용할 수 있을 것으로 해석된다. Table 1에는 각 분석방

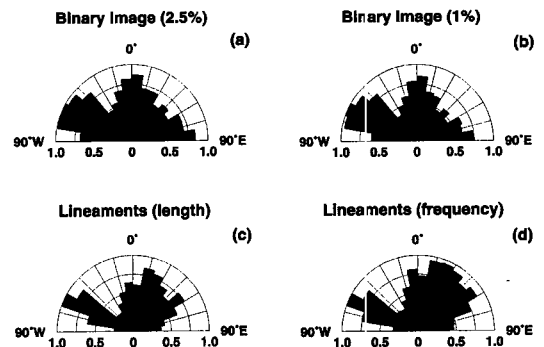


Fig. 4. Rose diagram of lineaments in the study area: (a), (b) result from Hough Transform of binary image; (c), (d) rose diagram of lineaments vectorized in this study.

Table 1. Summary of major trends of lineaments over the study area.

Method	Trends of Lineaments
Binary image	N50°~80°W, N10°W~N10°E, N80°E~EW
Lineaments	N50°~70°W, NS~N10°W, N10°~30°E, N50°~60°E

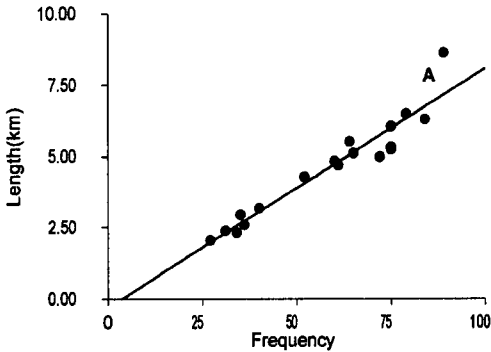


Fig. 5. Cross-plot of frequency versus length for lineaments in the study area.

법에 의한 연구지역 선구조의 주방향성이 요약되어 있다. 선구조의 빈도와 길이의 상관관계 (Fig. 5)에 의하면 각도별 선구조의 빈도와 길이는 점 "A"를 제외하고 좋은 선형관계에 놓여 있으며, 이는 이 지역의 선구조 특성이 방향에 상관없이 비슷한 연관성을 가지고 있음을 나타낸다. Fig. 5에서 점 "A"는 N60°~70°W 방향으로 연구지역에 발달하는 가슴, 금천, 신령, 우보단층과 같은 대규모의 서북서 방향의 주향이동단층에 의한 영향인 것으로 보이며, 이는 매우 연관성이 좋은 선구조임을 시사한다.

선구조의 지역별 방향특성

선구조의 광역적인 분포양상을 규명하고, 이에 따른 지역별 선구조의 방향특성 분석을 위하여 연구지역을 격자로 분할하고 격자별로 선구조를 통계 처리하여 로즈도표화한 후 이를 비교하는 방법과 선구조를 군집방향별로 분류하고 각 군집방향별 선구조 및 선구조 밀도의 통계적 특성값을 이용하여 선출된 군집방향의 선구조 밀도도를 칼라 영상 중첩에 의한 연구지역의 영역화를 실시하였다.

격자별 로즈도표에 의한 방향특성

지역별로 편중되는 선구조선의 공간적 분포 특성을 규명하기 위하여 정사각형의 격자로 연구지역을 분할한 다음 격자별로 로즈도표를 작성하여 이를 비교분석하는 방

법이 일반적으로 사용된다. 격자의 경계에 걸치는 선구조는 각 격자의 경계선을 기준으로 분할된 후 통계분석되었다. 본 연구에서는 지역분할을 위해 사용하는 단위격자를 최근에 Hardcastle (1995)에 의해 제안된 원형의 격자를 채택하였다. 원형격자는 사각형 격자가 로즈도표 계산을 위한 선구조 요소 취합지역이 격자의 중심점에서 동일한 거리 안에 있지 않다는 단점을 보완하고 인접원과 중첩되게 함으로써 보다 자료를 유연화할 수 있다.

원의 중심점 (node)간의 간격이 약 9 km×9 km이고 대각선에 놓여있는 노드의 원이 서로 접하도록 반경이 6.36 km인 격자를 생성하고, 격자별로 선구조의 빈도와 총 길이를 구하여 각각의 로즈도표를 Fig. 6과 같이 작성하였다. 연구지역 내에 생성된 격자의 총개수는 30개로서 로즈도표는 10° 단위로 계산되었으며, 각 격자의 로즈도표는 최대 빈도와 최대 길이에 의하여 정규화시켰다. Fig. 6의 각 격자에서 상반구 로즈도표는 길이 분석에 의한, 하반구 로즈도표는 빈도 분석에 의한 선구조의 방향을 표시한 것이다. 연구지역의 최대 선구조 군집 방향인 서북서 방향군의 선구조는 연구지역의 동부일대를 제외하고 고루 분포되고 있으며, NS~N30°E 방향의 선구조가 동부 지역에 발달하고 있는 것이 특징적이다. N30°~70°E 방향의 선구조는 특별하게 지역적 특징을 보이지 않는다. 따라서, 격자별로 작성된 로즈도표 분석에 의해 연구지역은 크게 서북서 방향군이 미약하게 발달하고 NS~N30°E 방향의 선구조가 특징적으로 나타나는 도메인 (domain) A와 서북서 방향의 선구조가 크게 발달하고 있는 도메인 B로 구분되어질 수 있다. 도메인 B의 북서부 일부지역에서는 NS~N10°W 방향의 선구조가 특징적으로 나타나기도 한다.

군집방향별 선구조 밀도에 의한 방향특성

격자별 로즈도표를 이용한 선구조의 방향별 분포영역 특성화는 시각화라는 측면에서 넓은 지역을 대상으로 하여 많은 격자에 의해 작성된 로즈도표를 비교분석하기에는 여전히 어려움이 있다. 또한, 각 격자별로 작성된 로즈도표는 일반적으로 최대 방향값에 의해 정규화되기 때문에 단위 격자 안에서 선구조의 방향별 상대적 값의 변화만을 알 수 있다. 이에 군집방향별로 선구조를 분리하고, 분리된 선구조의 통계적 특징을 이용한 다음과 같은 방법을 적용, 선구조의 방향별 분포양상을 해석하였다.

Fig. 4(c), (d)의 로즈도표만으로는 연구지역의 선구조를 방향별로 분리하기가 어려워 Fig. 7의 카테시안 히스토그램을 이용하였다. Fig. 7의 카테시안 히스토그램

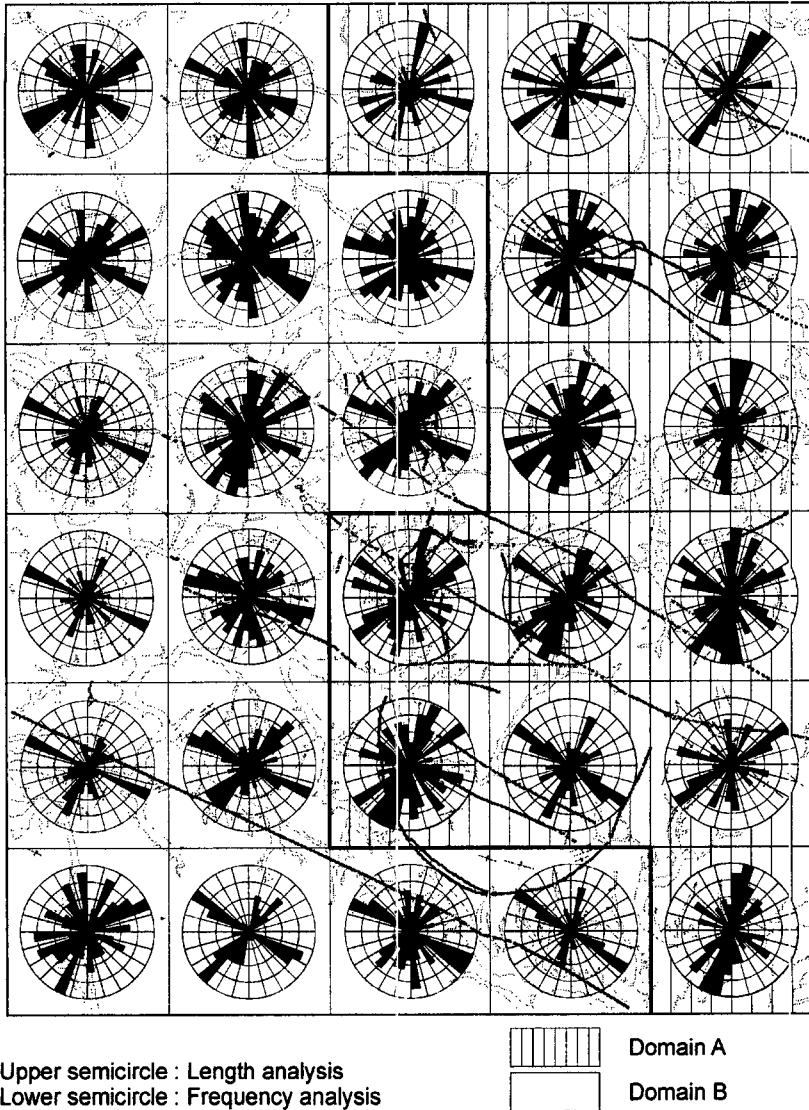


Fig. 6. Rose diagram of lineaments within each grid.

에서 1° 간격으로 나타낸 자료는 많은 극점을 가지고 있어 전체적인 경향이 잘 나타나지 않아 원래의 자료를 7° 단위의 구간별로 두 번 이동 평균을 한 후 이 자료의 극점을 이용하여 군집방향을 구하였다. 빈도 분석 결과 Fig. 7(a)와 길이 분석 결과인 Fig. 7(b) 모두 극점의 형성이 뚜렷하고 위치도 일치하나 비교적 극점의 형성이 더 나은 Fig. 7(b)를 이용하여 모두 7개의 군집방향을 구분하였다. 선구조의 공간분포 특징을 알아보기 위한 방법으로 Dacey (1967)의 최인접분석과 random walk sampling line 방법 등이 있다. Dacey (1967)의 최인접분석은 선 위의 임의의 점을 선택하고 그 점에서 다른 모

든 직선에 그은 수선의 길이 중 가장 작은값을 이용한 방법인데, 7개의 군집방향별 선구조 도면에 적용한 결과 D, G 트렌드를 제외한 나머지 A, B, C, E 그리고 F 트렌드에서 수선이 존재하지 않는 경우가 발생하였다. 이는 선구조의 수가 적고 특히 같은 방향별로 군집된 선구조 즉 거의 평행하게 발달되어 있는 선구조이기 때문으로 생각된다. 빙하흐름 복원에 대한 Clark *et al.* (1994)의 연구와 마찬가지로 본 연구에서의 분석대상 선구조 역시 방향이 일정하게 분류된 것이므로 선구조의 중점을 이용하여 공간상에서 점의 분포특징을 결정하는 Pinder, Witherick (1972) 최인접분석을 적용할 수 있다. Pind-

Table 3. Correlation coefficients between significant lineament families.

Trend	A 0°~13°	B 13°~42°	C 42°~59°	D 59°~87°	E 87°~111°	F 111°~133°	G 133°~180°
A	1.000						
B	0.074	1.000					
C	0.180	-0.135	1.000				
D	-0.085	0.040	-0.282	1.000			
E	-0.026	0.260	0.045	-0.224	1.000		
F	0.106	0.066	0.110	0.053	-0.049	1.000	
G	-0.195	0.105	0.125	-0.266	0.589	-0.035	1.000

-0.266으로 비교적 높은 음의 상관관계를 보이고 있는데 이는 두 선구조의 발달지역이 서로 상이함을 말한다. D 트렌드와 C 트렌드도 -0.282로 연구지역 내에서 높은 음의 상관관계를 보이고 있다. 최인접분석 결과와 선구조 밀도간의 상관관계를 종합하여 최인접분석에서 'cluster'에 가깝고 선구조 밀도의 상관관계가 높은 음의 상관관계를 가지며, 마지막으로 연구지역에서 발달정도를 기준으로 C, D, G 트렌드를 선택하여 각각의 밀도도를 구하였다. 최인접분석에서 A 트렌드가 가장 'cluster'에 가깝지만 연장길이의 비율이 4.62%, 빈도수의 비율이 5.12%로 연구지역에서 매우 미약하게 발달하고 있어 제외하였다. 식 (3)에 의한 밀도도 및 서로 다른 세 개의 도면에서 절대값에 의한 밀도를 비교 분석하기 위해서 정규화되지 않은 격자당 선구조 수와, 선구조 총길이에 의한 밀도도를 구하였다. C, D, G 트렌드의 밀도값의 최대, 최소, 평균값은 Table 4와 같다.

Fig. 8은 C (42°~59°) 트렌드 밀도를 청색, D (59°~87°) 트렌드를 녹색, 그리고 G (133°~180°) 트렌드를 적색으로 하는 색합성 칼라 영상이다. Fig. 8의 맨 위 영상은 식 (3)에 의해 구한 선구조의 상대밀도를 중첩한 것이고, 가운데 영상은 선구조 수에 대한 절대밀도를, 그리고 최하단의 영상은 선구조 총길이에 의한 절대밀도를 중첩한 것이다. 선구조 수와 총길이의 색합성 칼라 영상은 비슷한 결과를 보여주고 있는데 D 트렌드가 우세하게 발달한 동부가 녹색으로 나타나고 있으며, 그 의

지역에서는 붉은색의 G 트렌드가 우세하게 발달하고 있다. 여기서 C 트렌드 (청색)의 영향은 거의 나타나고 있지 않은데, 이는 D, G 트렌드에 비해 연구지역에서 차지하는 비율이 낮기 때문이다. 상대밀도의 색합성 칼라 영상 역시 동부지역에서 D 트렌드의 발달로 녹색을 보이고 있으나 북동부와 남서부 일부지역에서 발달한 C 트렌드의 영향에 의한 청색이 나타나고 있으며, 그 외의 지역에서는 G 트렌드와 더불어 C 트렌드의 발달로 붉은 보라색을 보이고 있다. 이러한 선구조 밀도도의 색합성 칼라 영상 중첩의 결과는 격자별 로즈도표에 의한 지역별 방향특성과 잘 일치하고 있으며 연구지역의 방향별 선구조의 절대적 및 상대적 발달 상황까지 매우 잘 나타내고 있다.

Table 4. Summary of lineament analysis.

Trend	No. of lineaments per grid			Length of lineaments per grid (km)		
	Min-imum	Max-imum	Mean	Min-imum	Max-imum	Mean
C	1.108	14.667	7.744	1.670	27.303	14.312
D	4.889	24.324	14.284	11.505	46.044	28.268
G	8.556	28.994	18.839	20.054	54.850	38.983

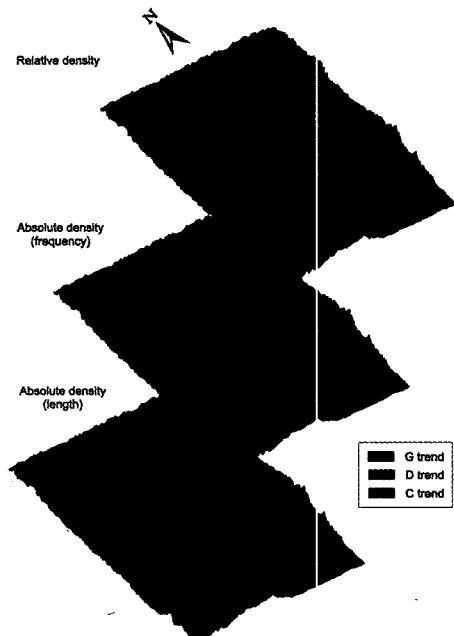


Fig. 8. Color composite image by using lineament densities of C, D and G trends.

야외조사자료 분석

본 연구지역 내의 야외조사를 통한 불연속면 특성조사는 선형조사를 실시하였으며, 위성영상의 선구조와 비교 분석을 목적으로 하였기 때문에 불연속면의 방향성만을 측정하였다. 45 km×55 km의 넓은 연구지역에 비해 비록 적은 수이긴 하지만 광범위하게 측정된 35개 지점 (Fig. 9(a))의 불연속면 조사자료를 이용해 위성영상 선구조에 의해 분류된 도메인과 특징을 비교하였다. 한편, 기존 지질도폭에 따르면 남동부의 신령도폭에서 신령단층이 대울도폭에서 백학동 단층으로 신동층군의 최하부 층인 낙동층이 분포하는 지역까지 연장돼 있을 뿐 동부 중앙의 군위도폭에 발달하고 있는 우보단층은 진주층 중부, 가음단층은 진주층 하부, 그리고 금천단층은 하양층군의 하부층이 분포하는 지역까지에 그치고 있다. 그러나 전술한 바와 같이 연구지역 내의 위성영상에 의한 선구조 연구결과에 의하면, 연구지역의 서부에 분포하고 있는 신동층군까지도 서북서 방향의 선구조가 넓게 영향을 미치고 있으며, 가음단층과 금천단층의 서측 연장부에서 선구조가 연속되고 있는 것이 관찰되어 가음단층과 금천단층의 연장선상에 놓여있는 의성군 비안면, 군위군 소보면 일대를 소지역 (a; 12.5 km×17.6 km)으로 선정해 좀 더 조밀하게 Fig. 9(b)에 나타난 22개의 지점에서 불연속면

조사를 실시하였다.

불연속면 분석방법

불연속면의 가장 중요한 특성은 방향성으로 방향성자료를 도시적으로 표현하는 방법에는 로즈도표 (Atte-well, Farmer, 1976; Cawsey, 1977)를 이용한 방법과 평사 투영법 (Duncan, 1981; Priest, 1993)이 가장 널리 이용된다. 본 연구에서는 위성영상에 의한 선구조와 비교 분석의 용이성을 위해 로즈도표를 이용하였다. 선형조사에 의해 측정된 절리의 방향에 따른 빈도수는 조사선과 불연속면사이의 예각 (δ)에 따라 오차가 발생하기 때문에 다음과 같은 가중치, w 를 할당하여야 한다.

$$w = \frac{1}{\sin\delta}, \quad \delta < 90^\circ \tag{4}$$

본 연구에서는 상용프로그램인 Georient를 이용해 측선의 방향벡터와 불연속면의 방향벡터 사이의 각을 고려하는 3D 기하보정을 하였다. 또한, 여러 지역의 불연속면 자료를 종합분석하기 위한 로즈도표는 조사선과 불연속면의 주향사이의 각을 고려한 2D 기하보정을 실시하였으며 과보정을 방지하기 위해 최대 δ 를 15° 즉 최대 허용 가중치를 3.86으로 설정하였다.

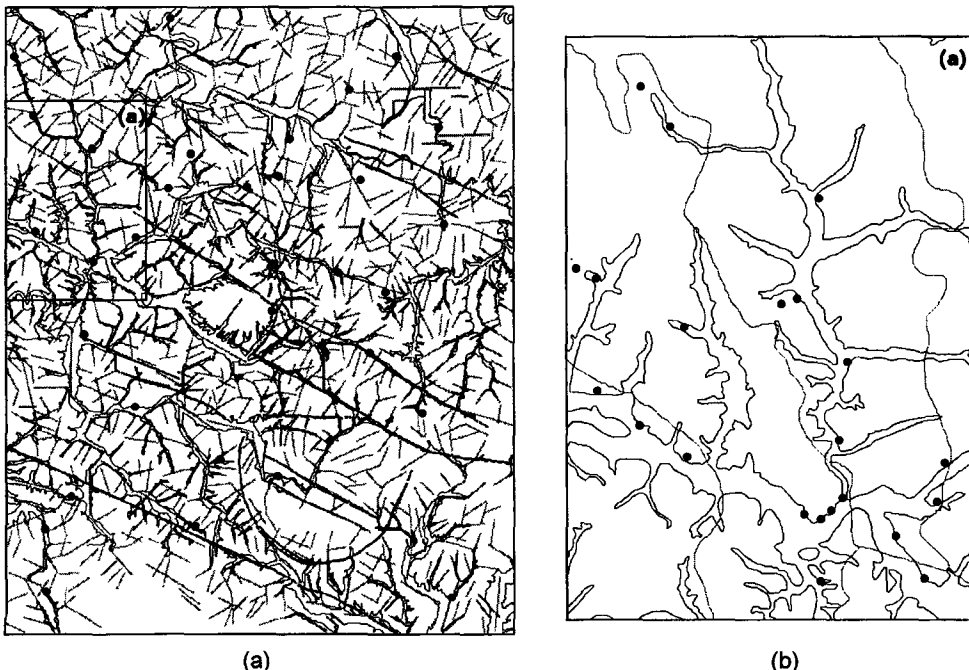


Fig. 9. Sample site map: (a) in the whole study area, and (b) in the area "a".

불연속면 분석결과 및 TM으로부터 해석된 선구조와의 비교

연구지역 전체 불연속면 자료를 이용하여 위성영상에서 추출된 선구조의 주방향과 비교하기 위해서는 연구지역 전체를 하나의 도메인으로 가정하고 35개 지점의 자료를 합해야 한다. 그러나 이때 각 지점에서 측정된 불연속면의 빈도가 실제의 산출빈도 보다는 노두의 위치 및 크기에 따라 좌우된다는 점을 주의하여야 한다. Fig. 10(a)는 어떠한 가중치도 없이 단순히 자료를 합하여 로즈도표로 작성한 것이고, (b)는 각 지점마다 2D Terzaghi 보정을 한 값을

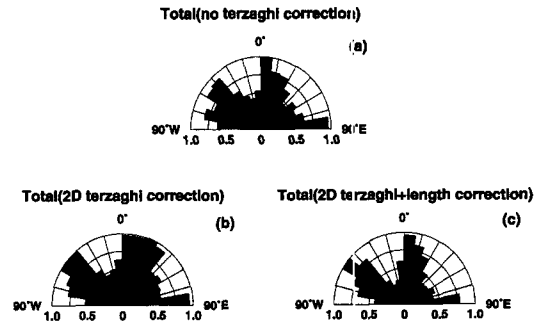


Fig. 10. Rose diagram of field fracture data from the whole study area.

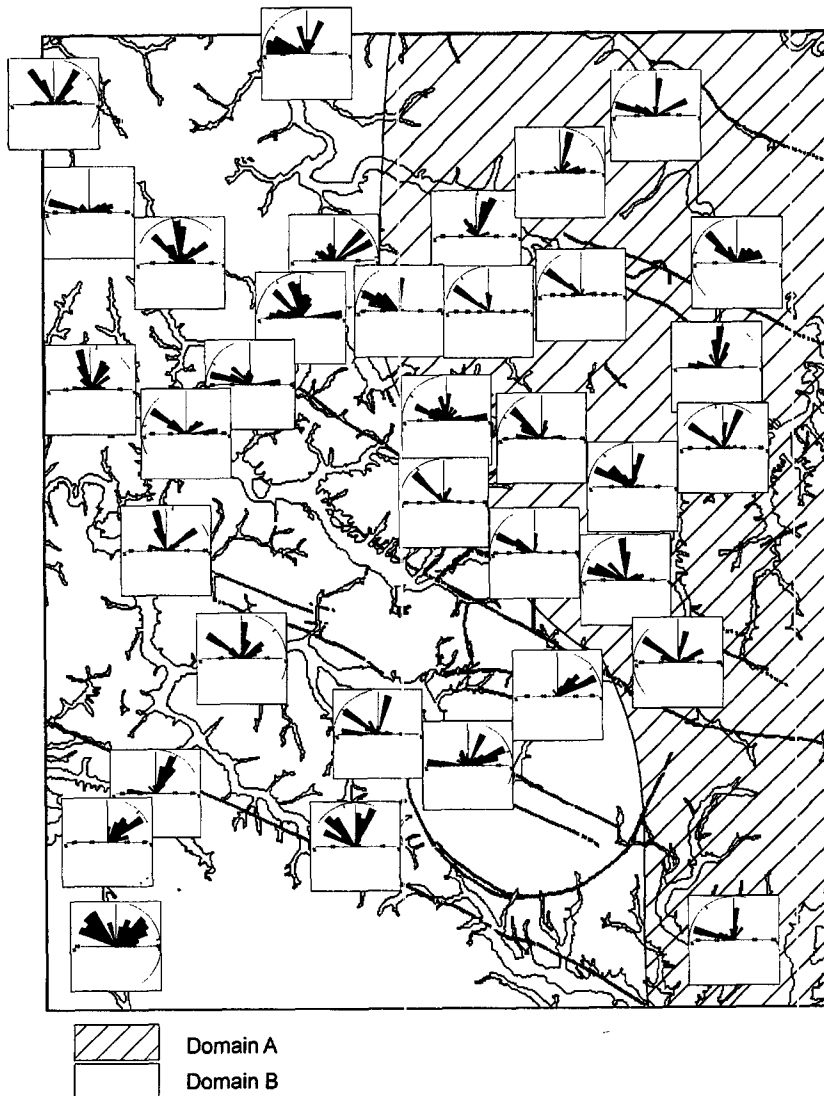


Fig. 11. Rose diagrams of fracture shown at each sample site on the base map.

합하여 로즈도표화 한 것이다. Fig. 10(c)는 2D Terzaghi 보정 및 노두의 크기 즉 여기서는 조사선의 길이에 따른 가중치까지 고려한 것이다. 조사선의 길이에 따른 가중치는 다른 지점에 비해 길이가 매우 긴 측선이 전체결과에 과도하게 영향을 미치는 것을 방지하기 위해서이지만 이는 연구지역 내에서 각 측점이 균일한 분포를 하고 있을 때만 의미가 있다. 여기서는 35개의 조사자료의 위치가 완전히 균일하지는 않지만 어느 정도 균일하기 때문에 이에 대한 비교를 위해 조사선의 길이에 따른 가중치를 설정하여 계산해 보았다. Terzaghi 보정을 한 결과가 좀 더 뚜렷한 군집방향을 형성하고 있지만 어떤 방법이든 대체적으로 NS~N30°E 방향과 N50°~80°W 그리고 N80°E~EW방향의 불연속면이 크게 발달하고 있음을 알 수 있다. 이는 N80°E~EW방향을 제외하고 위성영상에 의한 선구조의 연구결과와 매우 잘 일치하고 있다. 또 한가지 흥미로운 사실은 선구조 요소 화소를 이용한 로즈도표 (Fig. 4(a), (b))에서 극점이 형성된 EW방향의 선구조가 우세하게 나타났다는 것이다. 전술한 바와 같이 위성영상으로부터 얻어진 최종 선구조도에 의한 로즈도표 (Fig. 4(c), (d))와 선구조 요소 화소를 이용한 로즈도표의 비교분석에 의해 EW방향의 선구조는 매우 연장성이 짧을 수 있음이 시사되었는데, 노두 규모의 불연속면에서 이러한 EW방향이 우세한 것으로 나타났다는 것은 선구조 분석시 일차적으로 선구조 요소 화소만으로 구분된 이진영상의 Hough 변환에 의한 정량적 분석에 의미를 주고 있다.

연구지역 내에서 지역별로 불연속면 자료의 변화 양상을 보기 위해 불연속면 조사를 시행한 각 지점의 자료를 조사선의 방향에 따라 3D 기하보정을 한 로즈도표를 위치별로 나타내어 보았다 (Fig. 11). 북서방향의 불연속면은 연구지역 전체에 고루 발달하고 있으며, NS~N20°E 방향의 불연속면은 대체적으로 연구지역의 동부지역에서, 그리고 NS~N20°W 방향의 불연속면은 연구지역 북서부지역에서 잘 나타나고 있는데, 이러한 경향 역시 위성영상을 이용한 선구조 분석결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 연구지역 동부일대 뿐만 아니라 남서부 일부지역에 NS~N20°E 방향의 불연속면이 발달하는 점에서 위성영상 분석결과와 다소 차이를 보이고 있다. 연구지역을 크게 동부 16개, 서부 19개 지점으로 분할하여 동부를 도메인 A, 서부를 도메인 B로 하고 도메인 별로 작성된 로즈도표 (Fig. 12)를 보면 도메인 A에서는 N50°~60°W, NS~N20°E 그리고 동서방향이 우세하게, 도메인 B에서는 북동방향과 동서방향 그리고 북서방향의 불연속면이 발달하고 있는 것을 알 수 있다. 전체적으로 선구조와 불연속면이 잘 일치하고 있는 것으로 생각되나, 다만 연구지역의 면적에 비해 불연

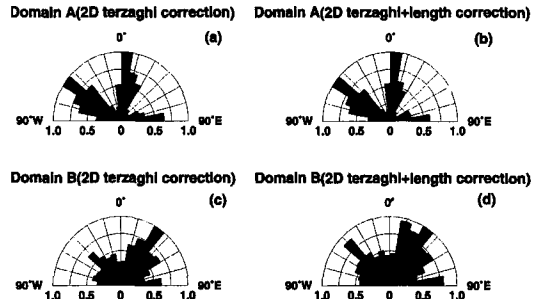


Fig. 12. Rose diagram of field fracture data from domain A and domain B in Fig. 11.

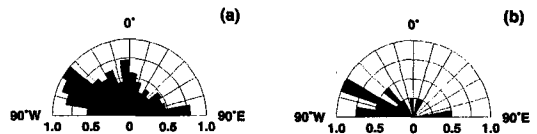


Fig. 13. (a) rose diagram of field fracture data from the area "a" in Fig. 10, and (b) minor faults directional rose diagram of the area "a".

속면 자료의 수가 너무 적으므로 좀 더 정확한 비교를 위해서는 많은 자료가 필요할 것으로 사료된다.

다음으로 소지역 "(a)" 지역 (Fig. 9) 안에서 측정된 22개 지점의 불연속면 자료를 각각 2D Terzaghi 보정을 실시한 후 합하여 로즈도표로 분석한 결과 (Fig. 13(a))는 전체지역의 불연속면의 로즈도표와 매우 유사하게 N50°~80°W, NS~N10°W, EW 방향이 나타나고 있는데, N50°~80°W가 가장 밀집된 군집방향을 형성하는 것과 N20°~30°W 방향의 불연속면의 극점이 나타나는 점에서 다르다. "(a)" 지역에서 N20°~30°W 및 EW 방향의 불연속면의 발달은 의성도폭 설명서 (김봉균 등, 1977)에서도 언급되고 있다. 즉 의성도폭 설명서에 따르면 의성도폭 북서부에 발달하는 불연속면은 대체로 N45°~60°E, N20°~30°W 및 EW 방향의 불연속면이 주방향이다 (김봉균 등, 1977). Fig. 12의 북서쪽 가장자리에 있는 로즈도표는 이러한 특징을 잘 반영하고 있다. 하지만 "(a)" 지역에서의 로즈도표 (Fig. 13(a))는 강한 서북서 방향의 불연속면의 발달을 보여주고 있으며 또한 "(a)" 지역에서 관찰된 18개의 소규모의 단층들을 방향분석한 결과 (Fig. 13(b))역시 서북서 방향을 보이고 있어 금천단층과 가음단층과 같은 서북서 방향의 좌수향 이동단층은 신동층군 발달 지역까지 연장되었을 가능성이 매우 높은 것으로 생각된다.

토 의

선구조 주방향분석은 일반적으로 벡터화된 선구조를

이용하지만 이진영상으로부터 선구조 추출은 여러 가지 입력변수, 특히 선구조로 인지할 최소 연장길이에 의해 많은 영향을 받는다. 따라서 선택적 증감효과가 보정된 이진영상을 김원균 등 (1996)의 Hough 변환을 이용한 주방향분석 방법을 적용, 연구지역의 주방향성을 분석해 보았다. 이 결과는 벡터화된 선구조의 주방향분석 결과와 비교적 일치하고 있으나 약간의 상이점이 나타난다. 그러나 이진영상의 Hough 변환 결과가 오히려 불연속면 자료의 분석결과와 매우 유사한 것으로 나타나고 있다. 이것은 특정 길이 이상의 선구조만을 추출한 벡터화된 선구조의 주방향분석과는 달리 이진영상의 Hough 변환은 모든 크기의 선구조에 의한 결과이기 때문에 모두 규모의 불연속면의 방향성과 더 관련성이 있는 것으로 생각된다. 하지만 이러한 이진영상에서 추출한 주방향과 불연속면의 주방향과의 관계성은 차후의 선구조 연구에서 좀 더 밝혀진 후 유용한 선구조 분석방법으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

격자별 로즈도표에 의한 지역별 선구조의 방향특성 분석과 선구조 밀도 분석에 있어서 사용되는 단위격자로 원형의 격자를 채택하였다. 이러한 원형의 격자는 사각형 격자가 중심점으로부터 동일한 거리에 있지 않는 선구조를 취합하는 통계적 단점을 보완한다. 본 연구지역에 원형과 사각형 격자를 적용한 결과 역시 원형의 격자가 보다 좋은 결과를 보였다. 또한, 단위격자의 크기에 대해서는 명확히 연구 검증된 결과는 없지만 Wise *et al.* (1985)은 선구조 밀도분석시 선구조 조의 수를 포함할 경우 격자당 선구조의 수가 평균 약 15개 이상일 때 의미 있는 통계값을 산출할 수 있다고 하였다. 본 연구에서는 지역별 선구조 방향특성의 전체적인 경향 파악을 위해 9 km×9 km의 단일 크기만을 사용하였지만 앞으로의 연구에서 몇 단계의 격자 크기를 이용해 격자의 크기의 변화에 따른 특성 변화를 분석하고 이들 결과를 적절한 방법으로 중첩한다면 격자의 크기에 따른 분석시의 오차를 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

결 론

연구지역인 경북 의성 일대에서 얻어진 위성영상자료를 이용하여 추출된 선구조의 주방향분석 결과 N50°~70°W, NS~N10°W, N10°~60°E방향의 선구조가 우세한 것으로 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 보조적으로 분석된 김원균 등 (1996)의 방법에 의한 이진영상의 Hough 변환 결과인 N50°~80°W, N10°W~N10°E, N80°E~EW와 비교해 볼 때 서북서방향과 남북방향은 백

터화된 선구조의 분석 결과와 잘 일치하고 있으나 북동방향의 선구조의 발달이 미약한 반면 동서방향의 선구조가 우세하다는 점에서 상이점이 나타난다.

반경 6.36 km, 노드간격이 약 9 km×9 km의 원형격자를 이용한 격자별 로즈도표에 의한 선구조의 지역별 방향 특성은 크게 서북서방향의 발달이 미약하고 NS~N20°E 방향의 선구조가 특징적으로 나타나는 도메인 A와 서북서방향의 선구조가 크게 발달하고 있는 도메인 B로 구분된다. 보다 시각적으로 선구조의 방향별 분포양상을 해석하기 위하여 선구조를 군집방향별로 분류하였다. 분류된 7개의 트렌드 중 Donnelly (1978)의 최인접분석 및 선구조 밀도의 상관관계 분석을 통해 선택된 C (N31°E~N48°E), D (N3°E~N31°E), G (N43°W~EW) 트렌드의 선구조 밀도도의 칼라영상 중첩에 의해 연구지역내 주요 선구조의 지역별 방향특성을 좀 더 뚜렷하게 표현할 수 있었다. 분석결과 G 트렌드의 선구조는 연구지역 전체에 걸쳐 고루 분포하고 있으며, D 트렌드는 연구지역 동부에서 우세하게 발달하고 있는 것으로 나타났다. C 트렌드는 남동부일대를 제외한 전 지역에서 발달하고 있다.

위성영상으로부터 추출된 선구조와의 비교분석을 위해 야외조사를 통하여 얻어진 연구지역 35개 지점의 불연속면 자료는 선형보정을 거쳐 로즈도표로 표현하였으며, 로즈도표 분석 결과 불연속면의 주방향은 NS~N30°E, N50°~80°W, N80°E~EW방향으로 위성영상에 의해 추출된 선구조와 유사하게 나타나고 있다. 또한, 조사지점별 불연속면의 로즈도표 분석 결과, 대체적으로 서북서방향의 불연속면은 연구지역 전반에 걸쳐서 나타나고 NS~N20°E 방향의 불연속면은 연구지역의 동부지역에서 발달하고 있는 것도 유사하다.

위성영상 선구조에서 신동충군 하부 분포지역까지 금천단층과 가음단층의 서측 연장부가 관찰되었으며, 이 일대 지역인 의성군 비안면, 군위군 소보면의 신동충군에서 조사된 22개 지점의 불연속면 자료와 18개의 소규모 단층의 방향 분석결과 역시 서북서 방향의 불연속면이 주요하게 발달하고 있다. 이러한 결과를 볼 때 서북서방향의 좌수향 이동단층인 금천단층과 가음단층은 신동충군 하부 분포지역까지 연장되었을 가능성이 매우 높은 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 1996년도 연세대학교 연구비에 의해 수행된 연구 결과로서 이에 감사드립니다. 또한 연구 수행에 많은 조언과 도움을 아끼진 않으신 연세대학교 지구시스템

과학과 지구물리·원격탐사 연구실의 모든 분들께 감사드립니다.

참고문헌

김상완 (1998) 자동화된 선구조 추출 알고리즘 개발과 이의 경북 의성지역에의 적용 연구. 연세대학교 석사학위논문, p. 8-41.
 김원균, 원중선, 김상완 (1996) 원격탐사자료와 수치표고모형을 이용한 지질학적 선구조 분석기술: 경상분지 의성지역을 중심으로. 원격탐사학회지, 12권, p. 139-154.
 김중환, 강필중, 임정용 (1976) Landsat-1영상에 의한 영남 지역 지질구조와 광상과의 관계 연구. 지질학회지, 12권, p. 78-89.
 원중관, 강필중, 이상헌 (1978) 경상분지의 구조해석과 Igneous pluton에 관한 연구. 지질학회지, 14권, p. 79-92.
 원중선, 김상완, 민경덕, 이영훈 (1998) 지질학적 활용을 위한 Landsat TM 자료의 자동화된 선구조 추출 알고리즘의 개발. 원격탐사학회지, 14권 2호, p. 175-195.
 이봉주, 최위찬, 강필중 (1997) 한반도 동남부지역의 선구조 선. 지질학회지, 33권, p. 18-26.
 장기홍, 고인석, 이재영, 김상욱 (1977) 한국지질도 구산동 지질도폭 설명서. 자원개발연구소, 25p.
 장기홍, 손진담 (1990) 경상분지 야외지질조사. 한국석유개발공사, p. 29-47.
 장기홍, 이윤중, 박병권 (1981) 한국지질도 군위 지질도폭 설명서. 자원개발연구소, 20p.
 Attewell, P.B. and Farmer, I.W. (1976) Principle of engineering geology. Chapman & Hall, London.
 Cawsey, D.C. (1977) The measurement of fracture patterns in the Chalk of southern England. Engineering Geology, v. 11, p. 210-215.
 Clark, C.D. and Wilson, C. (1994) Spatial analysis of lineaments. Computers & Geosciences, v. 20, p. 1237-1258.
 Dacey, M.F. (1967) Description of line patterns. Northwestern Studies in Geography, v. 13, p. 277-287.
 Donnelly, K.P. (1978) Simulations to determine the variance and edge effect of total nearest neighbor distance. Cambridge Univ. Press, p. 91-95.
 Duncan, A.C. (1981) A review of Cartesian coordinate construction from a sphere, for generation of two-dimensional geological net projections. Computers & Geosciences, v. 7, p. 367-385.
 Duda, R.O. and Hart, P.E. (1972) Use of the Hough

transform to detect lines and curves in pictures. Communications ACM, v. 15, p. 11-15.
 Hancock, P.L. (1985) Brittle microtectonics : Principles and Practice. Jour. of Struct. Geol., v. 7, p. 437-457.
 Hardcastle, K.C. (1995) Photolineament factor: A new computer-aided method for remotely sensing the degree to which bedrock is fractured. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 61, p. 739-747.
 Kang, P.C. (1984) A study on remote sensing application for the tectonic-framework of the Korea Peninsula. Ph D., Korea.
 Karnieli, A., Meisels, A., Fisher, L. and Arkin, Y. (1996) Automatic extraction and evaluation of geological linear features from digital remote sensing data using a Hough transform. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 62, p. 525-531.
 Koike, K., Nagano, S. and Ohmi, M. (1995) Lineament Analysis of Satellite Images using a Segment Tracing Algorithm(STA). Computers & Geosciences, v. 21, p. 1091-1104.
 Lee, D.S. (editor) (1987) Geology of Korea. Geological Soc. Korea.
 Mabee, S.B., Hardcastle, K.C. and Wise, D.U. (1994) A method of collecting and analyzing lineaments for regional-scale fractured-bedrock aquifer studies. Groundwater, v. 32, p. 884-894.
 Mah, A., Taylor, G.R., Lennox, P. and Ballia, L. (1995) Lineament analysis of Landsat Thematic Mapper images, Northern Territory, Australia. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 61, p. 761-773.
 Pinder, D.A. and Witherick, M.E. (1972) The principles, practice and pitfalls of nearest-neighbour analysis. Geography, v. 57, p. 277-288.
 Priest, S.D. (1993) Discontinuity analysis for Rock Engineering. Chapman and Hall, 473p.
 Short, N.M. and Lowman P.D., Jr. (1973) Mineral resources, geological structure and landform surveys. Proc. of third earth resources symposium, v. 2, p. 147-168.
 Williams, R.S., Jr. (1983) Geological applications. Amer. Soc. for Photogrammetry, p. 1667-1953.
 Wise, D.U., Funicello, R., Parotto, M. and Salvini, E. (1985) Topographic lineament swarms: Clues to their origin from domain analysis of Italy. Geol. Soc. Amer. Bull., v. 96, p. 952-967.