

우리나라 단열구조의 특성

Characteristics of Fracture Systems in Southern Korea

장 태 우(Tae-Woo Chang)*

경북대학교 지질학과

김 천 수(Chun-Soo Kim)

한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부

배 대 석(Dae-Seok Bae)

한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부

요약 / ABSTRACT

우리나라의 광역단열도가 작성되었다. 단열들에 대해 장미그림을 그려보면 북북동, 북서, 서북서의 세 조의 우세 배향을 보여준다. 단열의 밀도는 태백산 광화대 지역이 가장 높게 나타나고, 태백산지역에서 서울까지 지역, 문경-보은탄전지역과 진안지역, 충남탄전지역, 고령-함안지역, 양산단층 및 가음단층지역 등이 밀도가 높은 편이다. 사천-지리산-전주선의 서남부 지역이 밀도가 가장 낮다. 지질별로는 조선누층군, 평안누층군, 대동누층군, 경상누층군 등 비변성 퇴적암 지역이 선캠브리아 기반암과 주라기 화강암 분포지역에 비해 단열 발달 밀도가 높다. 또 주라기 화강암에 비해 선캠브리아 기반암에서 단열발달 빈도가 상대적으로 높다.

우리나라의 광역단열을 길이를 토대로 F_1 , F_2 , F_3 , F_4 의 4등급으로 분류하였다. 등급별 단열의 배향은 자기유사(self-similar)하다고 하겠고 단열의 길이에 대한 누적 수 사이엔 누승법칙(power law) 분포를 지시한다. 지구조 구역별로 볼 때 단열은 경기육괴 지역과 경상분지 지역에서는 F_1 에서부터 F_4 까지 모든 등급 단열이 발달하나 그 외 지역은 F_1 단열이 거의 발달되지 않는다. 양산단층을 포함한 대규모 단열들은 대부분 일회의 단층운동에 의해 지금의 연장을 가졌다기보다는 다중변형작용을 통한 변위의 집적으로 지금과 같은 길이를 이루었다고 보아야할 것이다. F_1 단열을 제외한 다른 등급의 단열은 우리나라 전 지역을 통해 고르게 발달한다고 볼 수 있다. 또 단열의 밀도는 옥천비변성대에서 가장 높게 나타나고 충남분지와 경상분지도 비교적 높다.

주요어 : 단열, 옥천비변성대, 자기유사, 누승법칙 분포, 지구조 구역, 다중변형작용

According to the data analysis of the regional fracture systems in southern Korea, the fracture orientations show three dominant sets : NNE, NW and WNW. A NNE set is the most abundant and

* Corresponding author: twchang@knu.ac.kr

includes most of the largest fractures. The highest fracture density is shown in the Taebaegsan mineralized area corresponding to Ogchon nonmetamorphic belt and the lowest one in the southwestern area of southern Korea. In addition, the density is higher in nonmetamorphic sedimentary rocks such as Choseon Supergroup, Pyeongan Supergroup, Daedong Supergroup and Kyeongsang Supergroup than in Precambrian basements and Jurassic granites.

The regional fractures in southern Korea can be classified into four orders designated F₁, F₂, F₃ and F₄ on the basis of their trace length. It is quite significant that fractures of each order are self-similar with respect to orientation and the combined fracture length distribution indicates a power-law distribution with an exponent of -2.04. As fractures were analyzed based on the tectonic provinces, Gyeonggi Massif and Kyeongsang Basin have all orders of fractures from F₁ to F₄. Most of the large scale faults may be ascribed to the products of slip accumulation through multiple deformation. Others besides F₁ fractures are thought to be evenly distributed through the whole area of southern Korea.

Key Words : fracture, Ogchon nonmetamorphic belt, self-similar, power-law distribution, tectonic province, multiple deformation

서 언

우리나라의 단열조사 연구는 1920년대에 시작된 1대 50,000 축척의 지질도 작성과정에서 각 지역에서 관찰, 인지되는 단층이 지질도상에 기재됨으로서 시작되었다. 그 후로 각종 지하자원 탐사를 위한 광상 지질조사와 여러 가지 지질조사 시 해당 지역 내에 발달되는 단층들이 기재되어 왔다. 이들 자료들은 1대 1,000,000 지질도와 1대 250,000 지질도가 발간될 때 수합됨으로써 한반도의 중요 단층들이 많이 알려지게 되었다. 그러나 이들 단층들에 대해서 직접적이고 집중적인 조사연구가 제대로 이루어지지 못함으로서 각 단층들의 운동학적 및 기하학적 성질, 생성시기 등이 정돈되어 있지 못한 실정이다. 물론 이와 같은 연구는 많은 인력, 경비, 시간 등이 소요되어야 할 문제이다. 그러나 최근에는 수자원 개발 및 유지 관리, 도로, 터널, 항만, 빌딩건설, 나아가서 지진운동과 관련하여 한반도 지각의 안정성 문제가 원자력발전소, 핵폐기물 처분장 등 국가 중요 기간시설물의 안전과 관련하여 크게 부각되면서 취성 단열구조 연구가 활기를 띠고 있다.

시간과 인력이 많이 소요되는 야외 직접적인 단열 인지 조사의 전단계로서 실내에서 항공사진,

인공위성사진, 레이더 사진, 음영기복도 등에 의한 단열성 선상구조 해석은 넓은 지역에 대한 단열구조의 예비적인 정보를 빠른 시간에 얻을 수 있다. 이와 같은 선상구조는 야외의 현지조사에서 그 정체가 지질학적으로 구명되었을 때 학술적인 의미를 갖게 된다. 우리나라에서 전국적인 규모의 단열성 선상구조 연구는 남기영(1970), Kang (1979)에 의해 이루어진 바 있으며 국지지역에 대한 연구는 김종환 외(1976), 원종관 외(1978), 이봉주 외(1997), 권연숙(1998)에 의한 것 등이 있다.

본 연구는 지역적인 야외지질조사에서 인지되어 각종 지질도에 수록된 단층들을 총망라 추출하여 우리나라의 단층도를 작성하고, 음영기복도 및 항공 자력탐사도를 이용하여 단열성 선상구조를 해석하여 선상구조도를 작성한 후 양자를 결합함으로써 우리나라의 종합 광역단열도를 작성하였다. 나아가서 광역단열 분류체계를 설정하고 이 체계의 분류기준을 이용하여 광역단열계를 분석하여 우리나라 단열의 분포 특성을 파악하는데 연구의 목적이 있다.

단열 자료 도출

먼저 기존 지질도로부터 중요 단열구조의 하나인 단층구조를 도출해냈다. 여기에 사용된 지질도는 남한 전역을 망라하여 작성 발간된 1대

250,000 지질도(국립지질광물연구소, 1973)와 1945년 전 일본인에 의해 조사되기 시작하여 최근까지도 한국지질자원연구원에 의해 수행되고 있는 1대 50,000 축척의 지질도가 주로 이용되었다. 1대 50,000 지질도는 남한 전역에 대해



Fig. 1. Faults extracted from geological maps of 1 : 50,000 and 1 : 250,000 scales which were published by Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.

약 350매 중 이미 조사 발간된 220여 매의 지질도(면적으로는 남한 전역 80% 이상을 차지함)로부터 단층구조를 취합하였고 이 자료에 1대 250,000 지질도의 자료를 결합하여 단층도를 작성하였다(Fig. 1).

본 연구에서는 한국지질자원연구원에서 태양 고도 각을 평면으로부터 30°를 주고 태양 방위를 045와 315 방향에 있을 때를 가정하고 작성한 전산 음영기복도를 남한 전역에 대해 1대 250,000 축척과 1대 500,000 축척의 것을 사용



Fig. 2. Lineaments interpreted from shaded relief maps of 1 : 250,000 and 1 : 500,000 scales.

우리나라 단열구조의 특성

하여 단열성 선상구조를 해석하였다(Fig. 2). 또한 경북대 전자계산소 소장 수치 지형고도 자료도 태양 방위를 045와 315 방향을 주어 1대 500,000 축척으로 출력하여 상기 선상구조 해석 자료를 보완하는데 사용하였다.

항공자력탐사도는 한반도 동남부 경상분지 지역에 대해 한국지질자원연구원이 조사 작성한 1대 250,000 축척 탐사도를 단열성 선상구조 해석에 참고 자료로 활용하였다.

기존 지질도로부터 도출해낸 종합단층도와 여

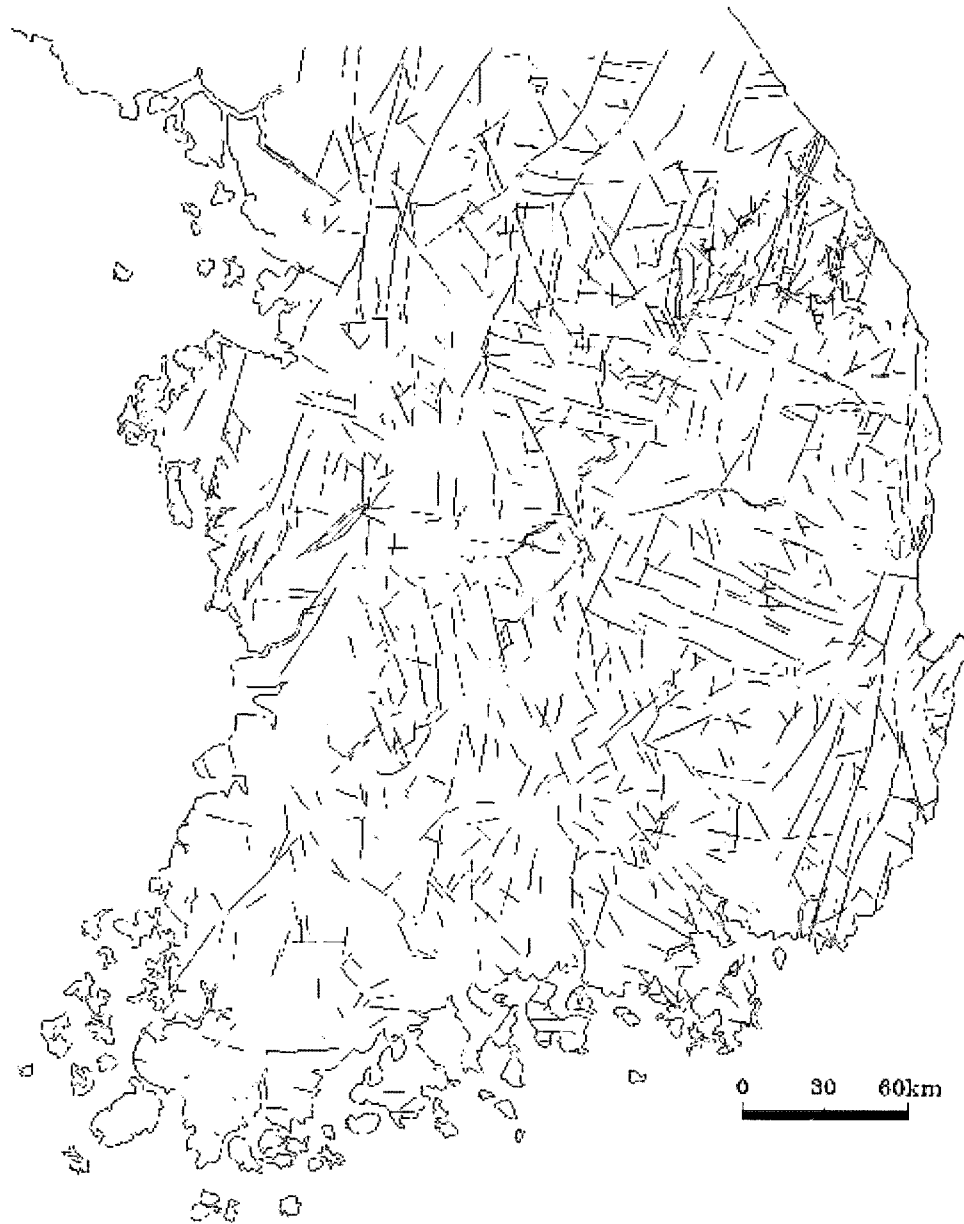


Fig. 3. Fracture map of southern Korea compiled from fault and lineament maps.

러가지 음영기복도로부터 분석 도출해낸 단열성 선상구조도를 결합하여 종합 광역단열도를 완성하였다(Fig. 3). 이때 1대 50,000 지질도의 단층들은 본 연구에서 지질분포, 지형형태, 음영기복도의 단열성 선상구조의 발달 상태 등과의 관계를 고려하여 상당한 정제가 이루어졌다.

연구 결과 및 토의

광역단열도 분석

Fig. 1의 단층도를 보면 단층이 태백산광화대 지역, 경상분지지역, 평택-수원지역등에 지역적으로 편중되어 발달하는 느낌을 주고 있다. 이는 그 지역에 특히 단층이 많이 발달하고 있기 때문이기도 하나 한편 조사자에 따른 단층에 대한 인식의 차이 및 도폭마다 조사자가 다르기 때문이기도 할 것이다. Fig. 2의 음영기복도로부터 해석되어진 단열들은 그 경사가 비교적 고각도인 45°이상인 단열들이 주종을 이룰 것임을 간과해서는 안 될 것이다. 왜냐하면 평탄지가 아닌 지형 기복이 심한 지역에서 45°이하의 낮은 경사를 갖는 단열들은 단열 자취가 불규칙하여 선상단열

로 인지되기가 어렵기 때문이다. 그럼으로 경사가 작은 단열들은 야외에서 많이 발달하더라도 선상구조로 추출되기가 어려우므로 선상구조로 추출된 단열들은 대부분 경사각이 큰 주향이동 단층이기가 쉽다

Fig. 3은 우리나라의 종합 광역단열도이다. 대규모 단열의 경우는 추가령 지구대를 포함하는 서울-경기-강원 지역, 조선누층군-평안누층군이 분포하는 태백산 광화대 지역, 충남탄전 부근 지역, 양산단층이 포함되는 경상분지 지역 등에서 발달하고 있다. 바꾸어 말하면 한반도 서남부지역 즉 덕유산-지리산을 포함하는 호남지역에선 광주 단층을 제외하고는 대규모 단열이 관찰되지 않는다. 이에 비해 소규모 단열은 경작이 활발히 이루어지고 있기 때문에 인지하기가 어려운 평야 지대(예를 들면 호남평야, 나주평야 등)를 제외하고는 그 발달이 전국적으로 고루 이루어지고 있음을 알 수 있다.

이들 단열들의 배향 분포를 장미그림을 통해 알아볼 수 있다(Fig. 4). 장미그림은 주요 단열조의 배향을 나타내는데 있어서 가장 좋은 방법이다(Prost, 1994). 또 장미그림은 길이가중(length-weighted) 장미그림과 빈도가중

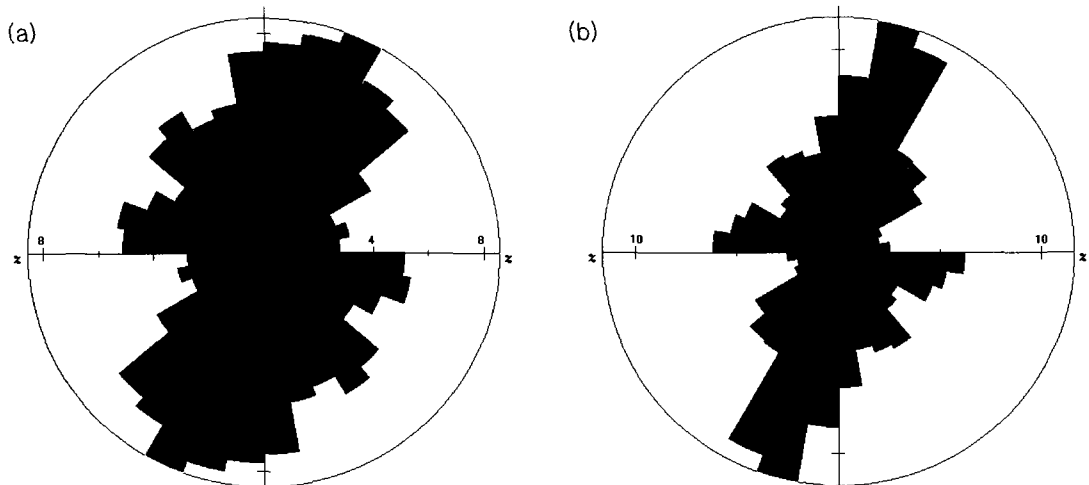


Fig. 4. Rose diagrams for whole fractures. (a) Frequency-weighted rose diagram, (b) length-weighted rose diagram.

우리나라 단열구조의 특성

(frequency-weighted) 장미그림으로 각각 그릴 수 있는데 빈도가중 장미그림은 모든 단열이 같은 중요성을 갖기 때문에 짧은 단열의 중요성이 과장 강조될 수 있다. 길이가중 장미그림은 긴 단열에 대해 무게를 더 실어 주게 되는 그림이다. Fig. 4a의 빈도가중 그림을 보면 전역에 대해서

N10°W~N50°E(북북동조), N30°W~N50°W(북서조), N60°W~EW(서북서조)의 세 조가 선명한 편은 아니나 우세 배향을 나타낸다. 특히 N10°W~N50°E 조는 범위가 넓은 편이긴 하나 대부분의 단열이 여기에 포함된다. Fig. 4b의 길이가중의 경우에도 세 조가 우세 조를 형성하나 빈도가중

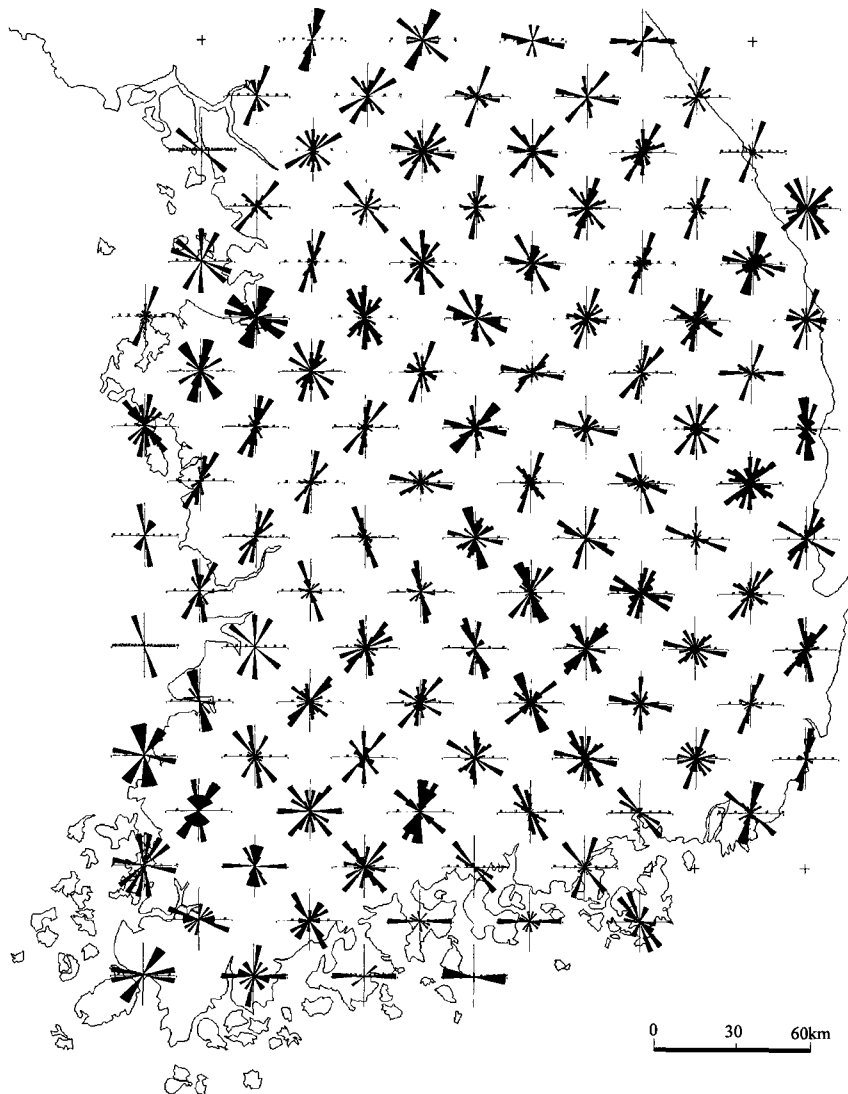


Fig. 5. Rose diagrams showing local distribution of fracture orientation.

그림의 N10°W~N50°E의 넓은 범위가 여기서는 좁아져서 NS~N30°E의 좁은 우세배향을 뚜렷이 보여준다. 이는 이 방향의 범위에 길이가 긴 대규모 단열들이 많이 포함됨을 이야기해 준다. 즉 북북동 방향의 단열들은 우리나라에서 빈도뿐만 아니라 길이가 긴 단열들도 대부분 이 방향으로

발달하고 있음을 말해주고 있다.

단열의 배향분포를 공간적으로 알아보기 위해 연구지역(남한)을 45km×45km격자로 분할하고 지역별 단열의 장미그림을 그려보면 Fig. 5와 같다. 지역별로는 우리나라 서남단 지역 즉 사천-지리산-전주선의 서남 지역과 태안반도, 평택, 서

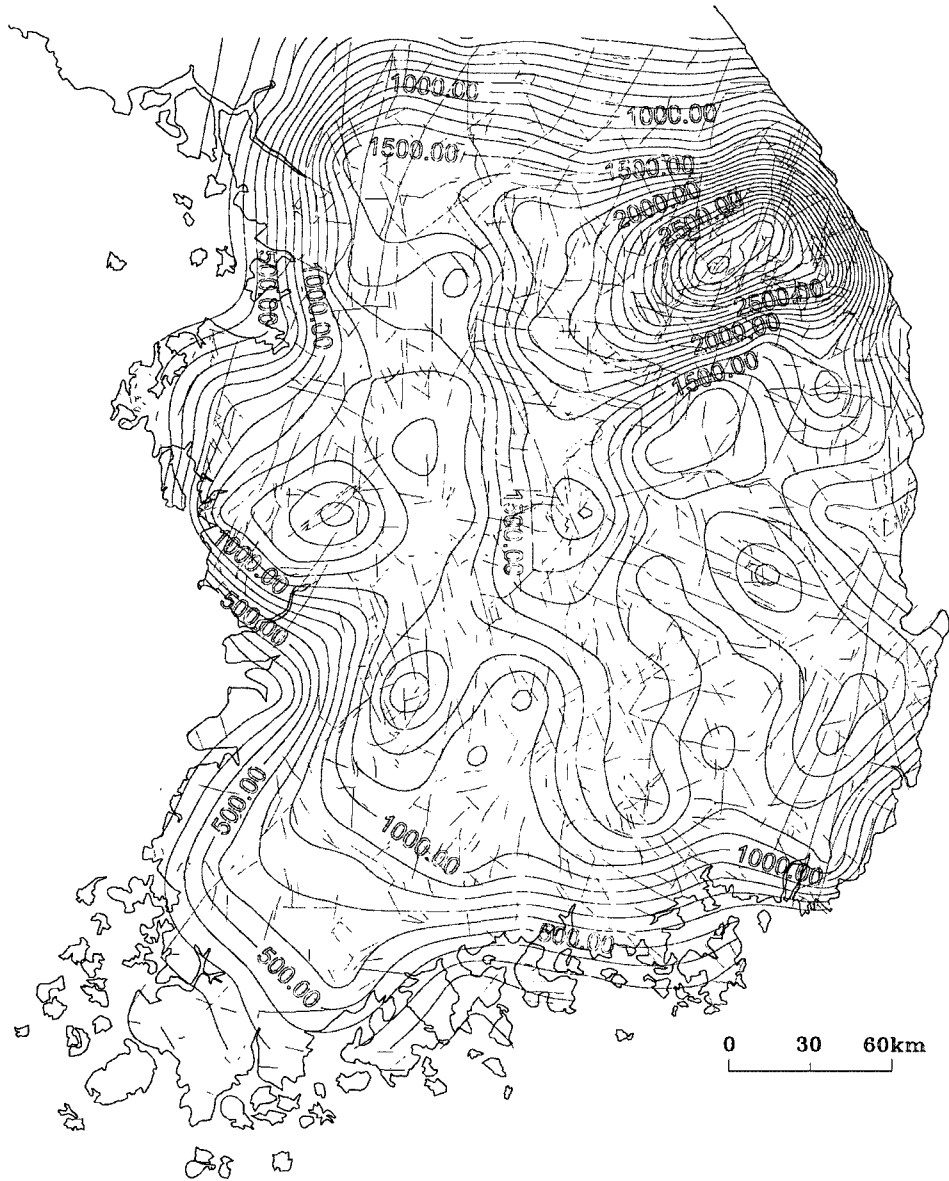


Fig. 6. Fracture density map.

우리나라 단열구조의 특성

울, 원주, 춘천을 포함하는 지역에서는 대체로 여러 방향의 단열들이 고루 분포하고 있고, 서남부 경남과 덕유산-금산지역에선 북서 단열이, 팔공산, 군위, 의성, 상주지역에선 서북서 단열이, 충남탄전 지역과 동해안을 따른 전 지역에선 북북동의 단열이 우세하게 발달되어 있음을 보여서, 서북서, 북서, 북북동의 세 방향은 남한 전역 장미그림에서 우세 배향을 형성하는 기반이 되는 것으로 보인다. 특히 북북동 방향은 태백산 광화대 지역, 충남탄전 지역, 양산단층 지역에서 현저히 우세방향을 나타내고 있다.

연구지역을 격자로 나누고 격자의 교점에서 지름 45km의 원을 그려 원 속에 포함되는 단열길이의 합을 면적으로 나눈 밀도 값으로 단열의 밀도그림을 그렸다(Fig. 6). 그림에 의하면 단열이 가장 조밀하게 발달하는 지역은 태백산 광화대 지역으로 특징적이다. 이는 이 지역에 물리적으로 연약한 성질을 갖는 암질인 함탄층을 포함하는 평안누층군이 분포하는 지역이란 점과 단열을 따라 배태한 금속광상이 역시 무수히 발달하고 있는 지역이란 점에서 그 까닭을 찾을 수 있다. 그 외 밀도가 높은 지역은 태백산 지역에서 서북서 방향으로 서울까지의 지역, 또 태백산 지역에서 남서 방향으로 문경-보은 탄전을 거쳐 진안까지의 지역, 고령-함안 지역(경상분지 서남부지역), 충남탄전 지역, 가음단층 및 양산단층지역 등이 밀도가 높은 편이다. 이에 반해 사천-지리산-전주선의 서남부 지역이 가장 밀도가 낮다. 태백산 지역 남서방의 문경-보은탄전 지역과 공주함몰대를 포함하는 충남탄전 지역의 밀도가 높은 것은 이 곳도 물리적으로 연약한 함탄층을 포함한다는 공통점이 있다. 양산단층지역과 가음단층지역은 양지역에서 서로 평행한 여러 개의 단층이 밀접한 간격으로 세트를 이루고 발달하고 있기 때문에 밀도가 비교적 높은 경향을 보인다고 할 수 있을 것이다.

위에서 언급한 단열밀도가 높은 지역 중 태백산지역에서 서울까지의 지역을 제외한 타 지역의 경우, 즉 태백산광화대지역과 문경-보은탄전지역은 조선누층군, 평안누층군, 대동누층군 등이 주로 분포하는 지역이고, 공주함몰대를 포함하는 충남탄전 지역은 대동누층군과 경상누층군이, 진안

지역, 고령-함안지역, 가음단층지역 및 양산단층지역은 모두 경상누층군이 분포하는 지역이다. 이렇게 볼 때 포괄적으로 이야기한다면, 우리나라에 분포하는 지질 중 신캠브리아 기반암과 쥘라기 화강암(양자의 분포 면적은 남한 전체 면적의 5분의 3 정도를 차지)을 제외한 조선누층군, 평안누층군, 대동누층군, 경상누층군 등 비변성 퇴적암 지층들이 분포하는 지역에서 단열발달 밀도가 높다고 하겠다.

단열계의 등급별 특성

단열의 분류

구조지질학적인 측면에서 단열 분류는 단열면에서 변위의 유무, 상대적인 이동, 단열을 발생시킨 주응력의 방향, 단열의 생성시기 등을 토대로 이루어진다. 이외에 단열을 학술적인 의미는 적지만 크기 즉 길이에 따라 분류할 수도 있다. 단열은 그 길이가 현미경적인 크기에서부터 수십 내지 수백 km로 연장되는 대규모에 이르기까지 그 크기 범위가 매우 넓다. 이 범위의 단열을 10°의 길이로 구분하여 여러 가지 명칭이 Price and Cosgrove(1990)에 의해 제시된 바 있다. 그러나 단열의 길이를 토대로 한 분류 안은 단순히 단열의 크기를 등 간격으로 구분하여 각 등급의 명칭을 부여한 것과 특정 상황과 목적에 유용하게 활용하기 위해 즉, 그 목적에 적절히 부합하도록 물리적 값을 임의로 한정하여 구분된 수치를 부여할 수도 있다(Pusch, 1994; Black et al., 1994). 실제 단열의 크기와 중요성은 단열을 분류하고자 하는 목적에 따라, 지역과 지질, 나아가서 그 지역에 일어난 지구조 운동에 따라 매우 다양할 수밖에 없다.

단열을 길이에 따라 등급별로 분류하는데 있어서 중요한 요소는 단열의 연장 즉 길이 이외, 간격, 폭, 변위, 지구조적 역할 등도 고려할 수 있다. 분류에 사용되는 이들 요소들 중 단열의 길이는 가장 기본적으로 그 추적 길이를 측정할 수 있는 요소이지만 그 외의 요소들은 손쉽게 특정 자료를 얻기가 어렵다. 특히 광역적인 분류체계에서는 더욱 그러하다. 그러나 단열의 길이, 폭, 변

위 간에는 어느 정도 선형 상관관계가 있음이 야외에서의 많은 실측조사와 실내 실험연구의 결과로 알려져 있다 (Marrett and Almendinger, 1989). 본 연구의 단열 분류는 이들이 광역적으로 조사되고 해석되어 얻어진 광역 자료이기 때

문에 변위나 폭에 대한 자료가 거의 없다. Table 1은 남한지역에서 해석된 모든 단열을 길이와 배향에 대한 단열의 수를 나타낸 것이다. 길이에 따른 배향분포는 1km 이하에서는 무작위하다고 볼 수 있으나 1km에서 40km까지는 북북동 방

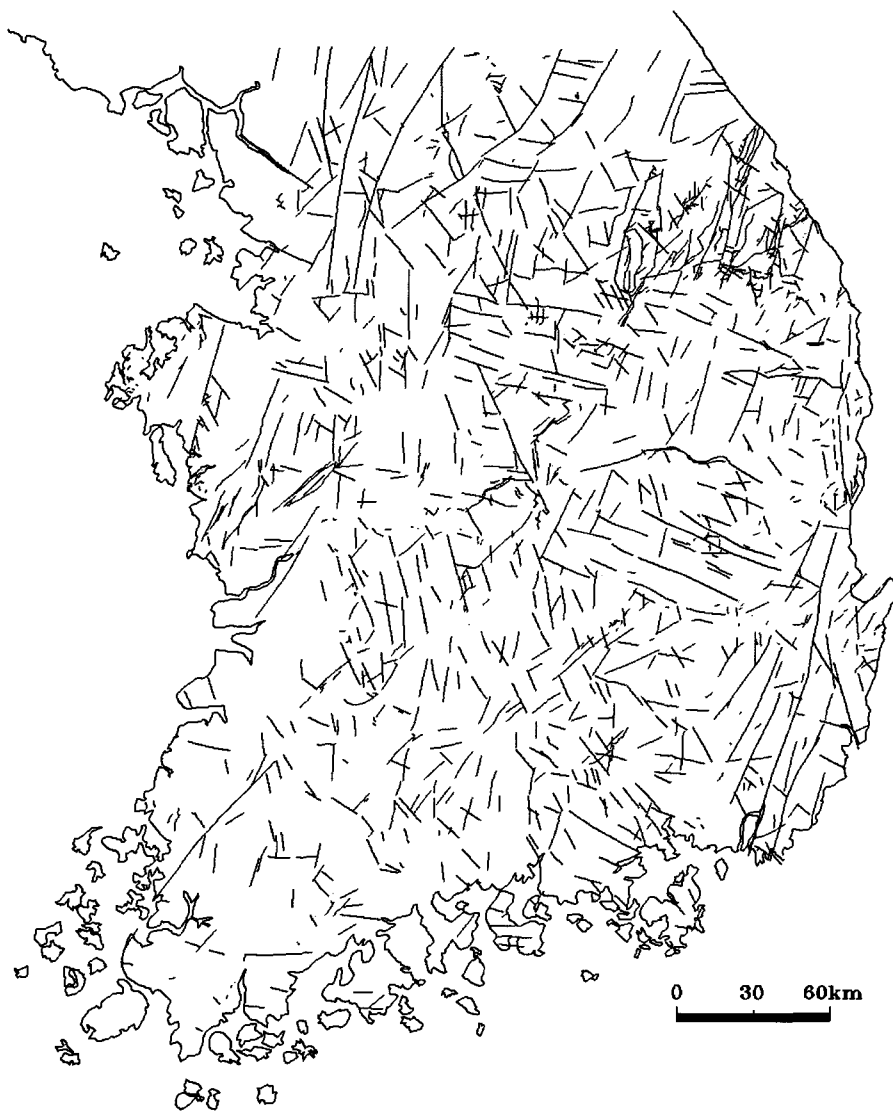


Fig. 7. Fractures showing distribution by orders (blue : 1st order (F1), green : 2nd order (F2), red : 3rd order (F3), greenish blue : 4th order (F4)).

우리나라 단열구조의 특성

Table 1. Fracture numbers with respect to length and orientation.

	80W	70W	60W	50W	40W	30W	20W	10W	N	10E	20E	30E	40E	50E	60E	70E	80E	90E
<1km	4	6	5	3	2	6	4	4	5	6	5	11	7	9	7	1	2	1
~10km	46	49	41	41	67	60	47	61	85	62	65	80	82	73	49	27	39	28
~20km	20	20	12	6	10	18	24	13	20	29	26	16	12	12	9	8	4	9
~30km	1	2	4			1	1	1	5	3	10	7	3	2	3	2		
~40km	1	1		2				2	1	1	4	5	1	2				
~50km	2		1								1	1	1	1	1			
~60km			1				1			1		3						
~70km																		
~80km	1															1		
~90km																		
~100km											1							
~110km												1						
>110km													1					

향에 몰려 있는 경향이 있다. 여기서 볼 때 단열의 길이별 분포는 40km이상, 20-40km, 1-20km, 1km이하로 단계별 발달빈도 차이를 잘 나타내주며 이는 전체 단열 길이 범위에서 균등 간격을 나타낸다고 볼 수 있다. 단열의 수가 1km 이하에서 현저히 적은 것은 단열 도출이 광역적인 축척에서 이루어졌기 때문이며 야외 노두에서 조사가 이루어졌다면 이 길이의 단열의 수는 엄청난 수로 가장 많이 기재될 수 있을 것이다.

그래서 우리나라의 광역단열을 4등급으로 구분하고자 하며 큰 등급에서 작은 등급을 향해 F₁, F₂, F₃, F₄ 등급으로 명시한다.

등급별 단열의 특성

남한의 광역단열도의 단열 자료를 가지고 크기(길이)를 토대로, 40km 이상 단열을 F₁ 단열, 20-40km를 F₂ 단열, 1-20km를 F₃ 단열, 1km 이하를 F₄ 단열의 네 등급으로 구분하고(Fig. 7) 등급별 특성을 알아보려고 한다.

Fig. 8은 단열을 등급별로 장미그림으로 나타낸 것이다. F₁ 단열의 장미그림(Fig. 8a)과 F₂

단열의 장미그림(Fig. 8b)에서는 우리나라 전체 단열의 장미그림(Fig. 4)에서 인지된 북북동조, 북서조, 서북서조 중에서 북북동조와 서북서조는 인지되나 북서조는 나타나지 않는다. 그러나 F₃ 단열의 장미그림(Fig. 8c)과 F₄ 단열의 장미그림(Fig. 8d)에서는 북북동조, 북서조, 서북서조의 단열이 공히 인지되고 있다. 대체적으로 볼 때 등급별 단열의 배향은 자기유사(self-similar)하다 하겠다.

F₁, F₂, F₃에 속하는 단열을 가지고 길이에 대한 수의 누적 분포를 로그-로그 그래프로 나타내었다(Fig. 9). 이와 같은 도시는 단열 길이 분포의 스케일링(scaling)과 관련하여 최근 논문에 많이 등장한다(예: Odling, 1997 ; Koukouvelas et al., 1999). 그래프를 보면 단열 길이가 감소함에 따라 측정된 단열의 수는 체계적으로 감소하는 특징을 나타낸다. 그래프는 가파른 경사의 직선을 이루는데 단열 길이와 누적 수간에 -2.04의 지수를 갖는 누승법칙(power law) 분포를 지시한다.

F₁ 단열들은 다수가 경기육괴의 추가령지구대 지역과 경상분지 지역에 발달하고 있으며 특히

경상분지 지역에 가장 많은 수의 F₁ 단열이 발달하고 있으며 우리나라 서남부 지역엔 광주단층만이 이 등급에 속하는 단열이다 (Fig. 7). F₁ 단열 중 추가령지구대 지역의 동두천 단층과 경상분지의 양산단층은 연장이 150 km 이상에 달하는 특별히 큰 단열이다. 양산단층을 포함한 대규모 단열들은 대부분 일희의 단층운동에 의해 지금의 연장을 가졌다기보다는 다중변형작용을 통한 변

위의 집적으로 지금과 같은 길이를 이루었다고 보아야 할 것이다(장천중과 장태우, 1998). F₁ 단열의 배향은 남한 전체 단열의 가장 우세 배향과 평행하게 북북동을 가리키는 것들이 가장 많고 서북서를 가리키는 단열들도 볼 수 있는데, 전자에 속하는 단열들은 추가령지구대 지역과 경상분지 양산단층 지역에 집중 분포하고 있으며 후자에 속하는 단열들은 경상분지 중 의성 소분지에

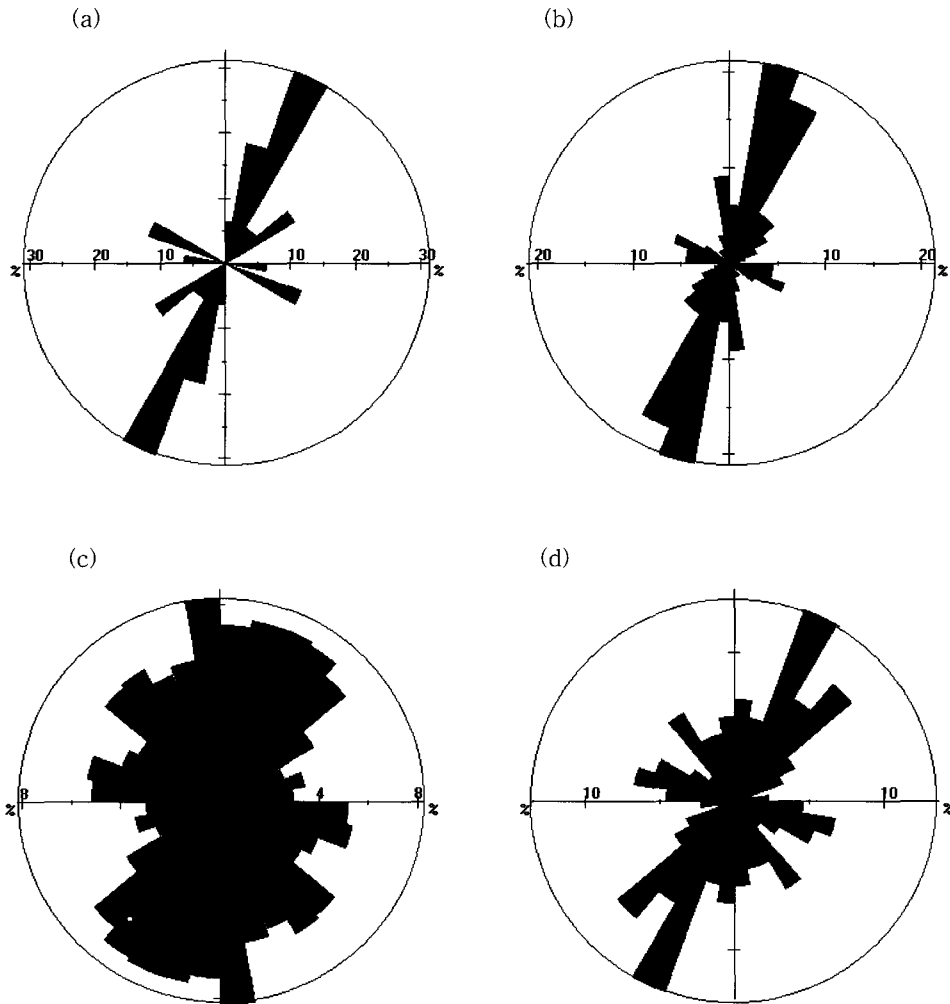


Fig. 8. Rose diagrams of fractures by orders. (a) 1st order (F₁), (b) 2nd order (F₂), (c) 3rd order (F₃), (d) 4th order (F₄).

우리나라 단열구조의 특성

평행한 조(가음단층조)를 이루며 발달하고 있다. 추가령지구대의 F_1 단열들은 정단층 운동의 산물로 간주되고(Lee et al., 1987) 경상분지의 양산단층조와 가음단층조들은 주향이동 단층들이다. 경상분지의 퇴적암과 기반암의 접촉부를 따라 발달하는 안동단층과 일월산단층은 충상 단층이다.

F_2 단열은 한반도 남서부 지역 즉 사천-지리산-전주선 그 남서부 지역을 제외하고는 연구 지역 전역에서 비교적 고루 발달하고 있다. 그 중에서도 태백산 광화대 지역과 충남탄전 지역에서 더 집중적으로 발달하는데(Fig. 7) 이는 탄전이 분포하는 이 지역의 지질 발달과 밀접한 연관이 있는 것으로 판단되고 충상단층이 주종을 이룬다. F_2 단열의 배향은 전체적으로 볼 때 F_1 단열의 배향

과 평행하게 북북동조와 서북서조가 인지되는데 북북동조가 압도적으로 우세한 배향이다(Fig. 8). 북북동조의 F_2 단열은 태백산 광화대 지역과 충남탄전 지역에서 현저한 편이나 그 외 배향의 단열들은 특정 지역에 편중해 있다고 할 수 없다.

F_3 단열은 호남평야, 나주평야 등 지형적인 평탄성과 인공적인 토지 경작의 영향으로 단열 인지가 어려운 지역을 제외하고는 우리나라 전역에 고루 분포하고 있으며 광역단열도에서 가장 풍부한 단열 등급이다(야외 노두에선 F_4 가 가장 풍부하게 발달하여 있겠지만). 이 등급의 단열도 특히 태백산 광화대 지역에서 가장 조밀한 발달 상태를 보이고 충남탄전 지역과 옥천구조대에서 약간 발달 빈도가 높은 편이다. F_3 단열의 배향은 F_1

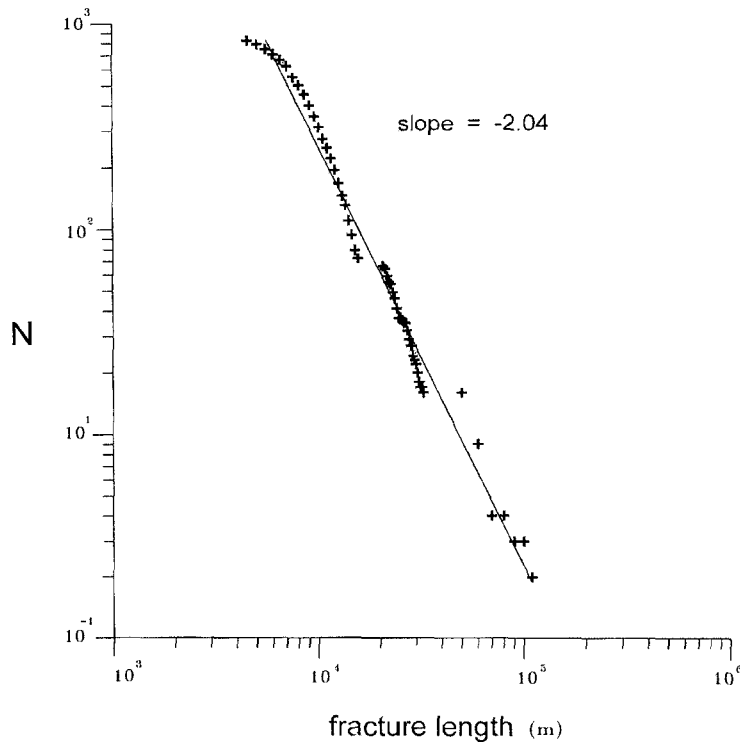


Fig. 9. Number of fracture as a function of length.

및 F₂와 마찬가지로 북북동조 및 서북서조를 갖는 것 외에 북서조를 더 갖는다. 즉 우리나라 전체 단열 분포 배향과 매우 유사하다(Fig. 8). 특히 북북동 조는 N10°W에서 N50°E까지 우세 배향의 범위가 매우 넓다. 또 세 조 간에는 빈도의 상대적 차가 크지 않고 우세 배향의 구분이 명확하지 않은 편이다. 그러니까 동북동 방향을 제외한 모든 방향에서 단열들이 비교적 고루 분포한다고 볼 수도 있다.

F₄ 단열은 그 길이가 1 km이하로 짧은 것들이기 때문에 즉 노두 규모의 단열이기 때문에 1대 250,000 및 1대 500,000 음영 기복도에서는 잘 검색될 수 없었던 단열이며, 광역단열도에서 F₄ 단열은 단지 1대 50,000 지질도에서 추출한 단열들이다. 그럼으로 이들은 광역단열도에서는 아주 소량 분포하는 것처럼 보이는 것이다. 광역단열도상 F₄ 단열의 배향도 북북동 방향이 가장 우세하고 서북서조와 북서조도 존재한다. 여기서도 동북동 방향의 단열은 매우 소수이다.

우리나라의 단열작용 및 지구조 구역별 특성

우리나라의 지각변동에 따른 단열작용

우리나라의 지각변동은 수회의 선캄브리아기 변동, 송림변동, 대보조산운동, 불국사변동, 연일변동으로 구분될 수 있는데, 대보조산운동을 포함한 그 이전의 변동은 보다 지각의 심처에서 강한 수평 압축응력 하에서 습곡과 층상단층작용을 일으켰고, 그 정도가 일정하지는 않지만 광역 변성작용을 수반한데 반해, 불국사변동과 연일변동은 보다 지각의 천처에서 준조산운동 즉 조륙운동과 관련한 취성 변형작용의 산물인 단층, 절리 등의 단열을 발달시키며 광역 변성작용은 전혀 수반하지 않은 특징을 갖는다. 특히 현생이연의 지각변동은 고생대엔 매우 조용하였던데 반해 중생대에 들어오면서 인접 지역인 중국, 일본과 더불어 매우 격렬하게 일어났으며 신생대에서는 다시 약한 지각변동의 지역으로 변했다고 볼 수 있다(星野, 1985; Hsu et al., 1990; Li, 1994).

선캄브리아 변동 혹은 조산운동은 선캄브리아 암층이 높은 정도의 광역 변성작용을 받아 다양한 암상을 보이고 여러 번에 걸친 복잡한 변형작용의 영향으로 지질구조 요소들이 다양하고 혼란스럽게 중첩되어 있기 때문에 변동의 순서를 일목요연하게 정돈할 수는 없으나 퇴적작용, 변성작용, 변형작용, 심성 관입활동 등이 적어도 4회 이상 순환하여 일어났을 것으로 생각되고 있다(Reedman and Um, 1975; 김정환 외, 1981; 장태우와 이상용, 1982; 김형식, 1998). 이와 같은 지각변동은 광역적으로 지하 심처에서 높은 온도의 변성작용과 함께 일어났을 것으로 간주한다면 이들 변동은 현재 지표에 노출되어 있는 기반암에 발달하는 단층과 절리 등 취성의 단열구조들과는 그다지 상관성이 없을 것으로 판단된다. 설령 이때에 발생한 단열들이 곳에 따라 존재했다더라도 그 후의 송림변동, 대보조산운동을 거치면서 단열들이 아몰어 지워지거나 그렇지 않은 것들은 후의 단열들에 의해 복잡하게 중복, 간섭되고 재활됨으로서 선캄브리아 단열을 인지하고 단열계를 정립하는 일은 대단히 어려운 일이다.

한반도에서 송림변동은 북한 지역과 요동 반도 일대를 교란시킨 큰 지구조운동으로 알려져 있으며 평남분지에서는 송림변동에 의한 습곡에 수반되어 층상단층이 동서 내지 서북서 방향성을 보이며 다수 형성되어 있다. 남한에서 송림변동은 그 흔적이 뚜렷하지 않으며 다만 태백산 지역에서 동서 방향의 함백산대향사가 송림변동의 산물일 것이라 견해가 있다(Kim, 1972).

대보조산운동은 중생대에 한반도에서 일어난 가장 격렬한 지각변동으로 한반도 중남부에서 넓은 폭을 가지고 북동 방향으로 달리는 한반도 지구조의 중추에 해당하는 옥천구조대를 형성시켰다. 대보조산운동의 산물인 단열구조는 습곡을 수반하는 층상단층이 지배적이며 압도적으로 북동 방향성을 보여준다. 특히 비변성대인 옥천대의 동북부지역이 변성대인 서남부지역에 비해 습곡보다도 층상단층을 압도적으로 많이 발달시키며(Fig. 1) 여기에 거의 수직인 주향이동성의 인렬단층(tear fault)과 더불어 단열계를 형성한다. 충남단전지역과 문경단전지역에서도 층상단층이 많이 발달한다.

우리나라 단열구조의 특성

불국사변동과 연일변동은 습곡이나 엽리등 연성 변형작용의 지질구조보다는 지각의 천처 변형작용의 산물인 단층과 절리 등의 단열구조를 발달시켰으며 한반도 동남부지역의 경상누층군 및 제 3기 지층 분포지에서 잘 관찰할 수 있다. 불

론 한반도 동남부지역 이외에도 단열을 발달시키는 경상누층군 암층들이 지역적으로 혹은 산점상으로 분포하는 것을 볼 때 불국사변동의 단열들은 경상누층군 이전의 제 3기 암층에도 두루 생성되었으며 경우에 따라서는 기존 단열구조에 중복되

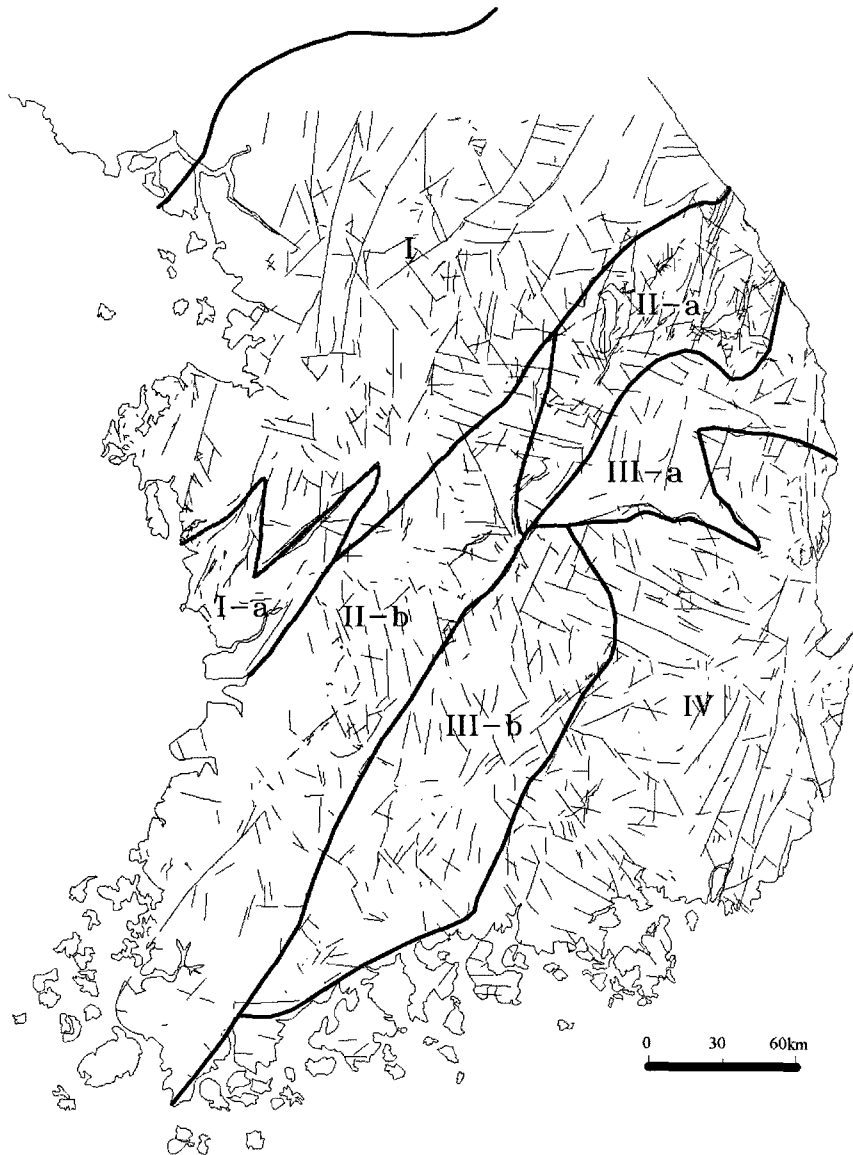


Fig. 10. Fracture map superimposed on tectonic provinces. I, Gyeonggi Massif (I-a Chungnam Basin). II, Ogchon Belt (II-a, nonmetamorphic belt. II-b, metamorphic belt). III, Ryeongnam Massif (III-a, Sobaegsan Block. III-b, Jirisan Block). IV, Kyeongsang Basin.

어 발달하고 있다고도 보아야할 것이다. 불국사변동 및 연일변동의 단열은 주향이동단층 및 정단층이 주도적인 구조이고 전체적으로 볼 때 남북 내지 북북동 방향이 가장 우세하나 지역적으로는 서북서방향, 북서방향 등 다양한 방향성을 갖는다. 특히 규모가 큰 단층들 중에서 북북동 방향을 달리는 것들이 다수를 점한다. 가끔 충상단층도 주향이동단층의 끝부분 및 퇴적분지의 연변에서 관찰되나 발달빈도는 낮다. 연일변동의 단열은 불국사변동의 단열에 비해 크거나 발달빈도가 적은 것으로 나타난다(Chang and Shin, 2003).

지구조 구역별 특성

크게 보아 남한의 지구조 구역은 대보조산운동의 중심대에 해당하며 한반도 지구조의 허리에 해당하는 옥천구조대를 중심으로 북서부에 경기육괴와 남동부에 영남육괴가 골격을 형성한다(Fig. 10). 양 육괴는 다중 변형작용과 고도 변형작용의 산물인 선크브리아 편마암 및 편암 복합체로 이루어진다. 경기육괴 남서부에 중생대의 공주합몰지를 포함한 충남분지를 포함한다. 영남육괴는 변성퇴적암이 더 풍부한 북동부의 소백산지괴와 화강편마암이 주축인 남서부의 지리산지괴로 나눌 수 있다. 옥천구조대는 구성 지층이 변성작용을 받은 정도가 약한 북동부의 옥천 비변성대와 변성작용의 정도가 약간 높은 남서부의 옥천 변성대로 나누어진다. 한반도 동남부에 또 하나의 중요 지구조 구역의 하나인 백악기 경상분지가 위치하며 비변성의 경상누층군이 분포한다.

경기 육괴

충남분지를 포함하는 경기육괴에서의 단열 분포는 여러 등급의 단열이 고루 분포하지만(Fig. 10) F₁ 단열은 북서부에만 발달하고 있는 반면 F₂ 단열과 F₃ 단열은 옥천구조대 경계 지역에서 더 조밀 간격으로 분포한다. 전체적인 단열의 밀도는 북서부 쪽으로 가면서 낮아진다. 단열의 배향은 충남분지를 제외한 육괴의 중서남부 지역에선 다양한 배향의 단열 발달을 보여주나 북부 일부지역과 동부 일부지역 및 충남분지에선 북북동 방향의 단열이 우세하게 분포한다.

옥천구조대

옥천구조대에는 광주단층을 포함하여 한두 개를 제외하고는 F₁ 등급의 단열이 발달하지 않는다. 특히 옥천 비변성대에는 F₂ 단열과 F₃ 단열이 지구조구역 중 가장 높은 발달 빈도를 보여준다(Fig. 10), 양 등급의 단열 중엔 다른 어느 지구조구역에서 보다는 충상단층을 많이 포함한다. 또 옥천 비변성대에서 단열의 배향은 북북동 방향을 가장 우세하게 보여주는데 남쪽엔 동서 내지 서북서 방향의 단열이 약간 포함된다. 이에 반해 옥천 변성대에는 F₂ 단열은 드물고 대부분 F₃ 등급 단열이 분포한다. 또 이 대의 남서부 지역은 단열 발달이 빈한한데 이는 평탄한 호남평야와 나주평야의 발달로 인해 단열 발달을 인지하기가 어려운 탓으로 보아야할 것이다. 단열의 배향은 변성대의 동북쪽은 북북서 방향이 우세한 편이나 남서쪽은 대체로 다양한 배향을 나타낸다.

영남 육괴

영남육괴에도 F₂ 단열은 간혹 발달하고 대부분의 단열이 F₃ 크기이다(Fig. 7, Fig. 10). 소백산지괴에서 단열발달 밀도가 현저히 낮게 보이는 지역은 안동, 영주의 저이한 지형을 발달시키는 주라기 화강암 저반 분포 지역이다. 단열의 배향은 소백산 지괴에서는 여러 방향으로 다양하고, 지리산지괴 지역에서는 동북부 지역에서 북북서조가 우세하며 서남부 지역에선 역시 여러 배향의 단열이 혼재 분포한다.

경상분지

경상분지에서 단열은 F₁에서 F₄까지 여러 등급의 단열이 모두 분포하며 단열의 우세 배향도 지역별로 다르다. F₁ 단열은 분지의 동부인 양산단층 지역에서 서로 평행하게 북북동 방향으로 발달하며 의성 지역에서는 가음단층조가 서북서 방향으로 달리고 있다. F₂ 단열은 분지의 동부에서 어느 정도 관찰되나 그 밖의 지역에선 드문드문 분포한다. F₃ 단열은 분지 내에서 고루 발달하나 남서부와 북동부에 훨씬 조밀하게 분포한다(Fig. 7, Fig. 10). 단열의 배향은 분지 동부에서는 북북동이 우세하고, 남서부에선 북서 방향, 중서부에선 다양한 방향, 의성 지역에선 서북서 방향,

우리나라 단열구조의 특성

북동부에서 다양한 방향을 각각 나타낸다. 전체적으로 단열의 밀도는 북동부지역, 서남부의 함안지역, 양산단층지역, 가음단층지역이 높게 나타난다 (Fig. 6).

결 언

우리나라의 광역단열도가 1대 50,000 및 1대 250,000 지질도, 음영기복도, 항공자력탐사도의 자료로부터 작성되었다. 단열들에 대해 장미그림을 그려보면 북북동, 북서, 서북서의 세 조의 우세 배향을 보여준다. 북북동조는 태백산 광화대지역, 양산단층지역, 충남탄전지역에서 우세배향을 나타내고 북서조는 경상분지 서남부지역과 덕유산-금산지역에서, 서북서조는 의성소분지 지역에서 우세하게 발달하고 있다. 단열의 밀도는 태백산 광화대 지역이 가장 높게 나타나고, 태백산지역에서 서울까지 지역, 문경-보은탄전지역과 진안지역, 충남탄전지역, 고령-함안지역, 양산단층 및 가음단층지역 등이 밀도가 높은 편이다. 사천-지리산-전주선의 서남부 지역이 밀도가 가장 낮다. 지질별로는 조선누층군, 평안누층군, 대동누층군, 경상누층군 등 비변성 퇴적암 지역이 선캄브리아 기반암과 쥘라기 화강암 분포지역에 비해 단열 발달 밀도가 높다. 또 쥘라기 화강암에 비해 선캄브리아 기반암에서 단열발달 빈도가 상대적으로 높다.

우리나라의 광역단열을 4등급으로 분류하였다. 등급별 단열의 배향은 자기유사하다고 하겠고 단열의 길이에 대한 누적 수 사이엔 누승법칙 분포를 지시한다. F₁ 단열은 추가령지구대 지역과 경상분지 지역에 주로 발달하고 있으며 특히 경상분지 지역에 가장 많은 수가 분포한다. F₁ 단열의 배향은 북북동 방향이 가장 우세하고 서북서 방향도 나타난다. F₂ 단열은 우리나라 서남부 지역을 제외하고는 전역에 비교적 고루 발달하고 있다. 그 중에서도 태백산 광화대 지역과 충남탄전 지역에서 더 집중적으로 발달한다. F₂ 등급 단열의 배향은 F₁ 단열과 마찬가지로 북북동조와 서북서조가 우세하다. F₃ 등급은 전역에 고루 분포하고 있으며 광역단열도에서 가장 풍부한 단열

등급이다. F₃ 단열의 배향은 F₁과 F₂ 단열의 북북동조와 서북서조 외에 북서조를 더 갖는다. F₄ 등급의 단열은 노두 규모의 크기로 모두 1대 50,000 지질도에서 추출된 단열이다. F₄ 단열의 우세 배향도 북북동, 북서, 서북서의 세 조가 인 지된다.

지구조 구역별로 볼 때 단열은 경기육괴지역과 경상분지 지역에서 F₁에서부터 F₄까지 모든 등급 단열이 발달하나 그 외 지역은 F₁ 단열이 거의 발달되지 않는다. 또 단열의 밀도는 옥천비변성대에서 가장 높게 나타나고 충남분지와 경상분지도 비교적 높다.

우리나라에 발달하고 있는 단열구조는 대보조산운동, 불국사변동, 연일변동의 산물이 혼재 분포하고 있는 것으로 생각되고 이를 구분하는 것은 아주 어려운 문제이다. 이중 대보조산운동은 비교적 광역적이며 어느 정도 심쳐 환경에서 일어난 곳에서는 취성의 단열구조가 잘 수반되지 않으나 옥천대 동북부 지역과 같이 비교적 천층에서 일어난 곳에서는 충상단층과 주향이동 단층들이 많이 수반되었다. 그러나 전국적으로 볼 때 대부분의 단열구조들은 백악기에 들어와 퇴적분지의 발달과 그 후 광역적인 조륙운동의 영향과 더불어 생성되었다고 보아야 할 것이다.

사 사

본 연구는 1997년도 한국원자력연구소의 위탁 연구과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 연구 수행 시 실내작업을 도와준 조용찬군 그리고 심사위원들에게 사의를 표한다.

참 고 문 헌

- 국립지질광물연구소, 1973, 1:250,000 지질도.
- 권연숙, 1998, GIS를 이용한 경상분지남동부의 신상구조 분석, 경북대학교 대학원 석사학위 논문, 88p.
- 김정환, 박석환, 이병주, 1981, 한국지질도, 1:50,000 청평도폭, 한국동력자원연구소.

- 김중환, 강필중, 임정웅, 1976, Landsat-1 영상에 의한 영남지역 지질구조와 광상과의 관계 연구, 지질학회지, 12권, 79-89.
- 김형식, 1998, 변성작용, 한국의 지질, 시그마프레스, 서울, 481-521.
- 남기영, 1970, 1:250,000 기복 지도에 나타난 한반도의 지체구조, 지질학회지, 6권, 53-60.
- 이봉주, 최위찬, 강필중, 1997, 한반도 동남부 지역의 선구조선, 지질학회지, 33권, 18-26.
- 원종관, 강필중, 이상헌, 1978, 경상분지 구조해석과 Igneous pluton에 관한 연구, 지질학회지, 14권, 79-92.
- 장천중, 장태우, 1998, 고응력분석을 통한 양산 단층의 구조운동사, 지질공학, 8권, 35-49.
- 장태우, 이상용, 1982, 한국지질도, 1:50,000 서산-모항도폭, 한국동력자원연구소.
- 星野一男, 1985, Korea 반도의 조구조운동의 개략, 地質뉴스, 일본지질조사소, 366호, 28-42.
- Black, J., Dershowitz, W., Alexsson, K.L., Doe, T., and Been, K., 1994, Review of SKB framework for the geoscientific characterization of sites for deep repository, SKB project report, PR 44-94-001, SKB.
- Chang, T.W., and Shin, J.H., 2003, Fracture analysis in the Cretaceous basement and the Tertiary Yeonil Group in and around Pohang basin, southeastern Korea, Abstracts for the annual meeting of the Tectonic Research Group of Japan, 24-25.
- Hsu, K.J., Jiliang, L., Haihong, C., Qingchen, W. and Shu, S., 1990, Tectonics of south China: Key to understanding west Pacific geology. Tectonophysics, v. 183, 9-39.
- Kang, P.C., 1979, Geological analysis of Landsat imagery of south Korea(1), Jour. Geol. Soc. Korea, v. 15, 109-126.
- Kim, O.J., 1972, Precambrian geology and structure of the central region of south Korea, J. Kor. Inst. Mining Geol., v. 5, 231-240.
- Koukouvelas, I. K., Asimakopoulos, M. and Doutsos, T.T., 1999, Fractal characteristics of active normal faults: an example of the eastern Gulf of Corinth, Greece, Tectonophysics, v. 308, 263-274.
- Lee, K., Kwon, B.D. and Chang, T.W., 1987, Seismicity of the Korean Peninsula. 3. Seismicity of the Kyeonggi massif, J. Geol. Soc. Korea, v. 23, 257-276.
- Li, Z.X., 1994, Collision between the North and South China blocks: A crustal-detachment model for suturing in the region east of the Tanlu fault, Geology, v. 22, 739-742.
- Marrett, R.A. and Allmendinger, R.W., 1989, Practical application of fault slip methods. In: Short course manual on quantitative interpretation of joints and faults, presented on the occasion of the annual meeting of the Geol. Soc. Am., eds., Allmendinger, R. W., Ayden, A., Engelder, T. and Pollard, D. D., 26-41.
- Odling, N., 1997, Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western Norway, J. Struct. Geol., v. 19, 1257-1271.
- Price, N.J. and Cosgrove, J.W., 1990, Analysis of geological structure, Cambridge Univ. Press, 502p.
- Prost, G.L., 1994, Remote sensing for geologists, Gordon and Breach Science Publishers, 321p.
- Pusch, R., 1994, Waste disposal in rock, Elsevier, 490p.
- Reedman, A.J. and Um., S.H., 1975, Geology of Korea, Geological and Mineral Institute of Korea, 139p.

우리나라 단열구조의 특성

투 고 일	2003년 3월 18일
심 사 일	2003년 3월 19일
심사완료일	2003년 4월 28일

장태우(Tae Woo Chang)
경북대학교 지질학과
702-701, 대구광역시 북구 산격동 1370
Tel: 053-950-5361
E-mail: twchang@knu.ac.kr

김천수(Chun Soo Kim)
한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부
305-353, 대전광역시 유성구 덕진동 150
Tel: 042-868-8197
E-mail : ncskim@kaeri.re.kr

배대석(Dae Seok Bae)
한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부
305-353, 대전광역시 유성구 덕진동 150
Tel: 042-868-2030
E-mail : ndsbae@kaeri.re.kr