

제주도의 제 4기 지구조운동

황재하* · 이병주* · 송교영*

Quaternary Tectonic Movement on Cheju Island

Jae Ha Hwang*, Byung Joo Lee* and Kyo Young Song*

ABSTRACT: Cheju Island was formed by volcanic activity probably related to the inferred geodynamics in the early Quaternary times. Paleostress analysis, in spite of a few fault slip data collected near Sanbangsan trachyte dome (dated 0.87 Ma) represents an extensional tectonic event with the direction ENE-WSW. Joint analyses in the vicinity of Seahwa reveal three extensional tectonic events of directions NW-SE, NE-SW and ENE-WSW. Especially the extensional event with the direction ENE-WSW affected the whole Cheju area during the most recent time.

서 언

극히 일부지역을 제외한 거의 전역이 제 3기 이전의 지질시대를 가지는 고기암체로 구성되는 한반도에서, 신구조운동 (Neotectonic)을 연구하기 위해서는 상당한 어려움이 있음이 사실이다. 반면 제 4기 초의 화산활동으로 형성된 (이동녕 외, 1988) 제주도는 이러한 관점에서 매우 흥미있는 곳이다. 제주도에 기록되어 있는 조구조요소들을 해석하는 것은 곧 제주도 뿐만 아니라 최소한 한반도 남부의 제 4기 이후의 지구조운동을 밝히게 될 수 있을 것이기 때문이다.

본 연구는 이러한 관점에서 제주도내에서 단층, 절리 등을 측정, 수집하여 정량적, 정성적인 분석과 고응력장을 복원, 해석을 하여 보았다.

지질일반

제주도는 현무암질 화산암류들로 이루어지는 화산도이다. 섬 중앙의 백록담 중앙화구와 동북동-서남서향으로 배열된 다수의 기생화산군들의 화산활동의 산물들이 본 역의 지질을 지배한다.

용암들의 용류에 의해 형성된 용암대지는 다양한 현무암들로 이루어져 있으며 (김동학 외, 1986), 국부적으로는 현무암질 분석, 현무암질 응회암이 분포하고 있다. 또 해안 일부지역에는 함화석 사질암 (서귀포층), 현무암질 사암 혹은 역암 (신양동층)이 노출되고 있으며, 신양동층과 유

사한 암상을 가지는 저고결 퇴적암층의 잔해들이 섬의 남부 혹은 동부 해안 일부지역에서 관찰되고 있다.

세화지역 (구좌읍 일대)에서는 저평한 현무암 용암대지가 넓게 형성되어 해안에 이르며, 현무암질 응회암으로 이루어지는 두산봉응회환과 현무암질분석들로 이루어지는 은월봉, 지미봉이 독립고봉을 이루고 있다 (임정웅 외, 1993, Fig. 1B). 산방산지역 역시 현무암용암류들이 세화지역에 비해서 고각도의 구배를 보이며 조사지역의 기저를 형성하고 있으며, 조면암이 산방산체를 형성하고 있다. 조면암 돔의 남부로는 현무암 용암류에 의해 그 원형이 파괴되어 일부 잔해만 남아있는 응회환 혹은 응회구의 응회암들이 분포하며 (Fig. 1A), 산방산체에 근접하는 응회암의 상부에는 조면암 돔을 구성하는 것과 동일한 성분의 조면암질 암설들로 이루어지는 고기 산록층이 두텁게 형성되어 있다.

지질시대

제주도에는 화강암 (김동학 외, 1986) 혹은 산성화산암류 (임정웅 외, 1993)로 구성되는 기반암들 위에 함화석 퇴적층으로 서귀포층이 서귀포시 남부해안에 연하여 국부적으로 노출되고 있다. 또한 도내 곳곳에서 지하수 탐사 (농업진흥공사, 1971~1978) 또는 온천수 탐사 (임정웅 외, 1993)를 위하여 이루어진 시추결과에서도 현무암류 하부에 이들 서귀포층에 대비될 것으로 보이는 함화석 사질암부분이 확인되고 있다. 이러한 서귀포의 서귀포층에 대한 고생물학적, 고지자기학적 연구들은 이들의 지질시대가 플라이오-플라이스토세에 해당하는 것임을 알려주고 있다

* 한국지질연구소 (Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 30 Gajeong-dong, Taejeon 305-350, Korea)

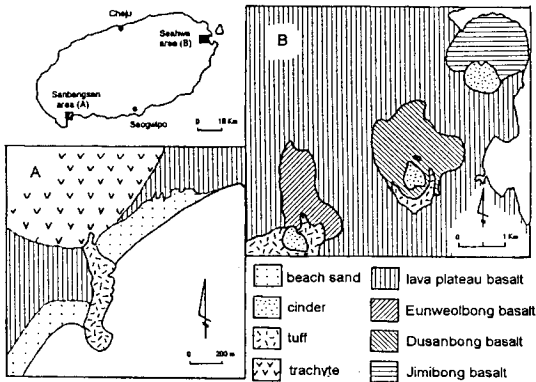


Fig. 1. Location and geological maps. A; Sanbongsan area (modified from Kim et al., 1986). B; Seahwa area (modified from Lim et al., 1993).

(김봉균, 1969; 이동영 외, 1988).

도내 전역에 분포하는 현무암들은 제주화산의 분출사에 따라 다양한 지질시대를 보이게 된다. 이동영 외 (1988)에 따르면 이들 현무암은 대체로 0.94–1.20 Ma (K-Ar)의 지질시대를 지시하고 있으며, 또한 산방산을 이루는 조면암은 0.87 ± 0.02 Ma를 지시하고 있다 한다. 응회암 혹은 응회구를 형성하는 응회암에 대하여는 산방산 이남에 위치하는 용머리의 응회암에 대한 간접자료가 있다. 이들 응회암에 포함된 휘석현무암편의 K-Ar법에 의한 년대측정결과가 1.20 ± 0.05 Ma를 지시함으로써 이들 응회암은 이 시대보다 고기의 것이 될 수는 없음을 시사하고 있다. 이와 함께 이 일대에서 이루어진 응회암에 대한 고지자기 측정결과 이들은 적어도 0.73 Ma 이전에 형성된 것으로 나타나고 있다(이동영 외, 1988).

지질구조 요소

제주도의 지질구조적 요소들은 그 성인적으로 크게 두 가지로 대별될 수 있다. 하나는 제주도의 성인과 관련된 화산활동에 따른 지질구조가 있으며, 다른 하나는 직접적인 화산활동보다는 광역적인 지구구조변형에 따른 구조들이 있을 수 있을 것이다. 화산활동과 관계되는 것으로는 화산화구라든가 용암의 용류에 따른 구조들, 응회암이나 응회구의 형성에 따른 구조 등을 말하며, 후자들은 광역적인 지각운동에 의한 단층이나 절리 등의 구조를 말하며 이들이 급변 연구대상이었다.

단 층

제주도에서 관찰되는 단층은 대체로 두 가지로 나뉘어질



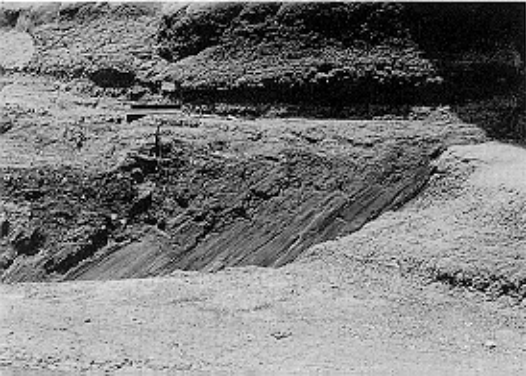
Fig. 2. Fault surface shows normal sinistral slip sense.

수 있다. 하나는 단순히 중력에 기인하는 것이며, 다른 하나는 지구구조 변형에 의한 것들이다. 두산봉, 일출봉, 단산봉 등의 응회암이나 응회구에서 쉽게 관찰되는 것들(김동학 외, 1986)은 대부분 퇴적동시성(Kim D. H. et al., 1986) 중력지배 단층들이다. 예컨대 퇴적물의 누층으로 증가되는 수직응력에 의해 높은 함수율 등에 따라 운환성이 강하여진 약화된 면을 따라 일어난 퇴적물 지괴의 단순한 미끄럼에 의해 형성되는 불연속 면들이 이에 속한다. 이들은 따라서 부분적으로 신장열극 혹은 소규모의 정단층의 형태를 발달시키나 일반적으로 기하학적 규칙성이 결여되는 발달상을 보이는 것이 특징이다.

이와 달리 지구구조 변형에 의한 단층들은 제주도내에서는 관찰이 용이하지 못하다. 그러나 이들은 일반적으로 규칙적인 단층발달형태를 보이므로 전술한 중력 지배단층들과는 쉽게 구분될 수 있다. 제주 남서부의 산방산과 용머리봉간에서 관찰되는 단층들은 이러한 특징을 잘 보여준다. 아평행한 수조의 단층들이 발달되며, 이들 중 일부는 단층경면을 잘 노정하고 있다(Fig. 2). 단층경면에는 단층조선들을 잘 발달시키고 있어 정상좌수향(Normal sinistral) 혹은 정상우수향(Normal dextral)의 단층이동방향도 잘 지시하고 있음을 볼 수 있다. 이들은 하위의 응회암 뿐만 아니라, 그 상위의 산방산 조면암 돛의 암설들로부터 이루어진 고기 산록층까지도 변위시키고 있어(Fig. 3) 단층 활동의 상대 시기를 잘 지시하여 주고 있다.

절 리

주로 신장절리들로 이루어지는 제주도의 절리는 현무암내에 잘 발달됨을 볼 수 있다. 그러나 이들 중 대부분은 현무암 용암류의 냉각에 따른 냉각절리(Cooling joint)들이다. 이들은 곳에 따라 주상절리를 잘 발달시키기도 하나



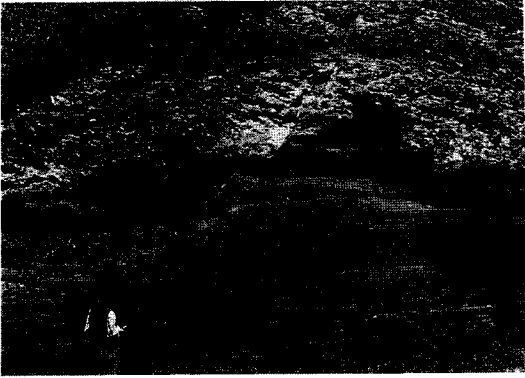


Fig. 3. Fault cuts basaltic hyaloclastic tuffs and old colluvium composed with same trachyte of Sanbongsan trachyte dome.

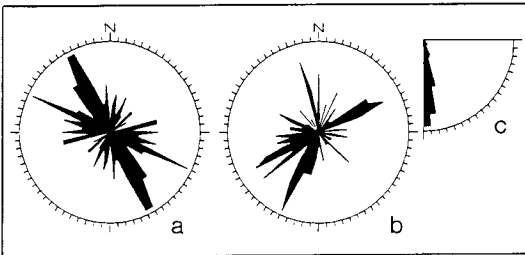


Fig. 4. Orientation of joints of Seahwa area. a; strike, b; dip direction, and c; angle of dip. Number of data; 186.

일반적으로 폐각상 혹은 호상으로 발달되며 규칙적인 발달형태를 보여주지 못하나 이들 중 일부는 보다 기하학적인 규칙성을 보이며 평탄하고 연장성이 좋은 형태적 특징을 보여주어 이들은 후기의 광역적 지구조운동에 수반된 것일 가능성을 시사하고 있다.

이와 같이 규칙성을 잘 보이는 절리들은 대체로 북북서-남남동 혹은 서북서-동남동향의 주향을 보이는 것들이 우세하게 나타난다. 경사방향은 남서향이 가장 우세하게 나타나며, 경사각은 대부분 75도 이상 고각을 이룬다 (Fig. 4).

고응력 복원

산방산 남부에서 단층들은 주향 N57°E 경사 20°SE를 보이는 응회암과 그 상위의 고기 산록층 중에서 잘 나타난다. 단층들은 북북동 내지 북북향 혹은 북북서향의 주향을 가지며 서쪽 혹은 동쪽으로 경사한다 (Fig. 5a). 단층면 상에는 단층조건들이 잘 발달하여 (Fig. 2) 이들 단층들의 운동방향들이 쉽게 인식되는 바, 정상좌수향 혹은

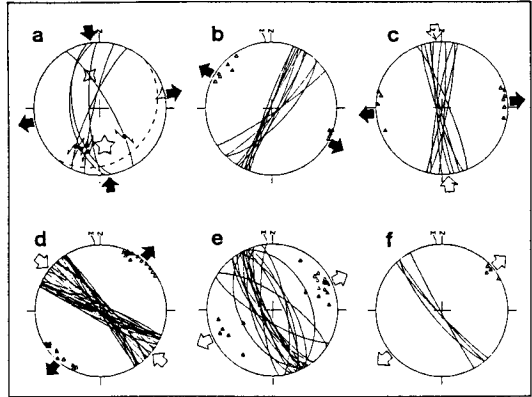


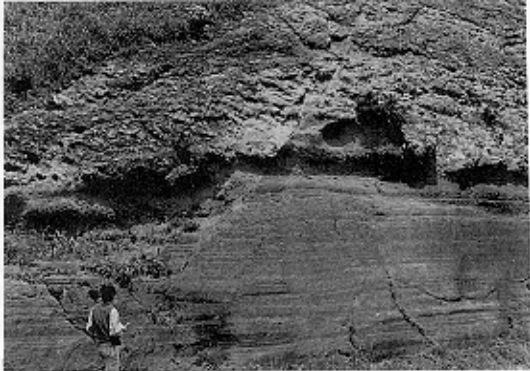
Fig. 5. Analysis of fault and joint sets (Schmidt's projection of lower hemisphere). a; faults in Sanbongsan area. b, c, d, e and f; joints in Seahwa area. N; geographic north. M; magnetic north. Black (calculated) and open (estimated) large arrows indicate directions of extension (divergent) and compression (convergent). The 3, 4, and 5 branches stars in the diagram "a" represent computed paleo-stress axes σ_3 , σ_2 , and σ_1 respectively. Broken line (diagram "a") means projection of bedding plane. Small triangles are poles of joint.

정상우수향의 운동방향을 지시하여주고 있다.

이들 단층들을 Angelier의 Direct Inversion 방법 (1989)에 의해 고응력 텐서를 구하여 고응력축 방향을 복원하여 보았다. 최대응력축 (σ_1)은 172/43, 최소응력축 (σ_3)은 078/04로 계산되며, 이는 0.299의 $\Phi(\sigma_2 - \sigma_3/\sigma_1 - \sigma_3)$ 와 6.81의 Angle값을 나타낸다. 이러한 결과는 대체로 북북서-남남동향의 압축응력을 수반하는 동북동-서남서향의 신장응력축 방향을 가지는 고응력장이 이 지역을 규제하였던 것을 지시하여 주며, 또한 이 지역은 동-서향의 축방향을 가지며 남쪽으로 지괴의 경동 (Block Tilting)이 일어났을 가능성도 시사하여 준다 (Fig. 5a).

세화지역에서는 현무암 중에 발달되는 절리군들을 조사하였다. 전사동과 상도리간의 도로변과 종달리 북부의 도로변의 절개면에서 130여 절리면들이 측정 수집되었으며 이들에 대하여 기하학적 분석을 하여 보았다. 절리들은 다양한 방향의 주향을 가지나 대체로 150 내지 115 방향의 것이 우세하게 나타나며 (Fig. 4a), 경사각은 주향, 경사방향에 관계없이 대부분 75도 이상의 고각도를 보인다 (Fig. 4c).

이들 중 냉각절리로 추정되는 것들을 제외하면 주로 북서-남동 혹은 남북향의 것들과 일부 북동-남서향의 것들 (Fig. 5b,c,d)은 예각의 공역전단각 (Conjugate shear angle; 20)을 가지는 공역 (conjugate)관계를 보이는 절리계 (joint



set)의 발달이 빈번하며, 익상구조 (plume) 등의 신장구조의 발달이 관찰되지 않는다. 따라서 이들 절리들은 본역의 구조운동에 수반된 45° 미만의 공액전단각을 가지는 공액 하이브리드 전단절리 (conjugate Hybrid shear joint; Hancock, 1987) 군들로 사료된다. 이러한 결과는 또한 단층자료의 해석 결과에서 볼 수 있는 수평에 준하는 최대, 최소응력축 (σ_1 , σ_3)을 가지는 고응력장으로 쉽게 이해될 수 있다.

이들에 의해 추정할 수 있는 신장응력 방향들은 각각 북동-남서, 동-서 혹은 북서-남동향을 지시하고 있다. 그러나 일부 북북서-남남동향의 주향을 가지는 절리들 중에는 정절리 (Normal joint)의 특성을 보이며 동북동-서남서향의 신장응력을 지시하는 것들도 있다 (Fig. 5e,f).

토 의

제주도는 섬의 형성이 제 4기초 (이동영, 1988)에 있었던 화산활동에 의한 것으로 그 형성기구 자체가 지각운동과 상당한 관련이 있다. 당연히 섬을 구성하는 지질은 제 4기초 이후의 지구조운동들만을 기록할 수 밖에 없다. 따라서 제주도에서 밝혀지는 지구조현상들은 모두 제 4기 이후의 것들로 광역적인 지구조운동에 관련되었던지 혹은 극히 국부적인 지구조운동에 관련된 것이든간에 우리나라에서 기록될 수 있는 가장 최근의 고지구조운동들로서, 한반도의 지구조운동을 정리하는데는 매우 중요한 자료를 제공하게 될 것이다. 금번에 밝혀진 몇 가지 결과들은 이러한 뜻에서 그 의미가 한층 강조된다.

정량적인 분석을 위한 량적인 제한은 있으나, 산방산 부근에서 관찰되는 단층들의 고응력장 해석에 의하면 이들은 대체로 북북서-남남동향의 압축응력 방향을 수반하는 동북동-서남서향의 신장응력 방향을 지시하고 있음을 볼 수 있다.

세화 부근의 절리해석에서는 대체로 3방향의 신장응력 방향이 추정된다. 즉 북서-남동, 북동-남서 그리고 동북동-서남서향 들이다. 이들 중 마지막 동북동-서남서향의 신장응력 방향은 단층해석 결과와도 잘 일치되고 있음을 볼 수 있어, 북북서-남남동향의 압축응력축 방향을 포함하는 동일방향 (동북동-서남서향)의 신장응력은 일부지역에 국한되는 것이 아니고 최소한 제주전역에 걸친 지구조운동이었을 가능성이 짙다.

경상분지와 옥천대 연변의 일부 백악기 소분지들에서 고응력복원에 의해 설정된 한반도 남부의 지구조운동사 (Hwang, J.H. and Angelier, J., 1992)에 의하면 한반도 남부지역에서 지금까지 인지되는 최후의 지구조운동은

신장응력기로 그 방향은 북서-남동 혹은 남-북향을 지시하고 있으며 그 지질시대는 마이오세 이후로만 알려진다. 세화 부근의 절리해석 결과를 이와 비교하여 보면 세화 부근에서 나타나는 북서-남동향의 신장응력은 경상분지의 마지막 지구조운동기의 그것과 잘 일치되고 있는 듯 하다. 그러나 북동-남서향의 신장응력과 북북서-남남동향의 압축응력축 방향을 포함하는 동북동-서남서향의 신장응력은 경상분지를 중심으로 한 한반도 남부에서는 인지되지 않았다. 따라서 북북서-남남동향의 압축응력축 방향을 수반하는 동북동-서남서향의 신장응력축 방향을 보이는 응력기는 경상분지의 최후의 신장응력기 (북서-남동향)보다 더 후기에 있었던 신장응력기를 지시하는 것일 가능성이 있다.

이 신장응력기를 지시하는 단층들이 현무암질 응회암 뿐 아니라 그 상위의 조면암질 고기 산록층까지도 변위시키고 있음이 잘 관찰된다. 이 고기산록층을 구성하는 산방산 조면암의 지질시대가 후기 하부 프라이스트세 (0.87 Ma)로 밝혀진 바 있어 (이동영, 1988), 이들 단층과 관련된 신장응력기의 지질시대는 후기 하부 프라이스트세 이후로 그 시대적 하한이 뚜렷해 진다. 따라서 이 신장응력기가 우리나라에서 현재까지 인지되는 가장 최근의 광역 고지구조 운동기가 될 가능성이 짙다.

참고문헌

- 김동학, 황재하, 황상규, 김영범 (1986) 제주도 화산활동 연구. 과학기술처, KR-86-(B)-4, p. 35.
- 김봉균 (1969) 제주도 신양리 및 고산리 지구의 신양리층에 대한 층서 및 고생물학적 연구. 지질학회지, 5권, p. 103-122.
- 농업진흥공사 (1971-1978) 제주도 지하수 보고서.
- 이동영, 윤상규, 김주용, 김윤종 (1988) 제 4기 지질조사연구; 제주도 제 4기 지질조사연구. 국토이용지질조사연구, KR-87-29, 한국동력자원연구소, p. 233-278.
- 임정웅, 이종민, 이병주, 황재하, 이철우, 김옥환, 이승구 (1993) 온천자원 평가조사 보고서: 제주 종달지구. 한국자원연구소, p. 189.
- Angelier, J. (1989) From orientation to magnitude in paleostress determinations using fault slip data. J. S. G., v. 11, p. 37-50.
- Hancock, P. L. (1987) Neotectonic fractures formed during extension at shallow crustal depths. Mem. Geol. Soc. China, v. 9, p. 201-226.
- Hwang, J. H. and Angelier, J. (1993) Polyphase tectonism in continental brittle crust: Late Mesozoic-Cenozoic evolution of southern Korea as revealed by paleostress fields in Cretaceous basins. EUG VII, Terra abstracts, Terra Nova, v. 5, p. 219.
- Kim, D. H., Hwang, J. H., Hwang, S. K., Howells, M. F. and Reedman, A. J. (1986) Tuff rings and cones on Jeju Island, Korea. J. Geol. Soc. Korea, v. 22, p. 1-9.