

고응력의 지시자로서 방해석 쌍정 분석연구

박영석¹ · 장보안² · 김정빈³ · 강성승^{4*}

¹조선대학교 자원공학과, ²강원대학교 지구물리학과, ³순천대학교 과학교육과, ⁴순천대학교 기초과학연구소

Analysis of Calcite Twins as Indicators of Paleostress History

Young-Seog Park¹, Bo-An Jang², Cheong-Bin Kim³ and Seong-Seung Kang^{4*}

¹Department of Resource Engineering, Chosun University

²Department of Geophysics, Kangwon National University

³Department of Science Education, Suncheon National University

⁴Research Institute of Basic Sciences, Suncheon National University

A temperature of deformation and the state and direction of paleostress at that time when twins in calcite grains had been produced were observed, using analysis of calcite twins as indicators of paleostress history. The study was performed with the target of carbonate rocks distributed randomly small size in the southern area of south Korea. Considering the appearance of twins (thin or thick straight twins with one or two twin sets), average twin strain (1.235-7.453%), thickness (0.77-1.94 μm) and intensity (25.26-41.99 twins/mm) from the results of calculated calcite twins, it is estimated that calcite twins were produced under temperatures lower than approximately 150-200°C. In the magnitudes and directions of principal strains, the maximum shortening strain axis ($\epsilon_3 \leftrightarrow \sigma_1$) is approximately N-S direction in the GS-1 area in the southern Gyeongsang Basin as well as in the BS-1 area in the southern Yongnam Massif, whereas E-W direction in the NR-1 area in the southwestern Ogcheon Fold Belt. In case of the maximum extension strain axis ($\epsilon_1 \leftrightarrow \sigma_3$), it is oriented in NW-SE and NE-SW directions in the GS-1 and BS-1 area, respectively, and in N-S direction in the NR-1 area. That is, it is suggested that the paleostress which produced the calcite twins may be applied at least more than two times in the study area.

Key words : Paleostress, Calcite twin, Deformation temperature, Principal strain, Maximum shortening

고응력사의 지시자로서 방해석 쌍정 분석법을 이용하여 방해석내 쌍정이 생성될 당시의 변형온도와 고응력장의 상태 및 방향 등을 살펴보았다. 연구는 한반도 남부지역에 소규모로 불규칙하게 분포하고 있는 석회질 암석을 대상으로 수행되었다. 분석 결과에서 쌍정의 형태(한 방향 또는 두 방향의 얇고 두꺼운 직선형 쌍정), 변형률(1.235-7.453%), 두께(0.77-1.94 μm), 치밀도(25.26-41.99 twins/mm) 등을 고려하여 추정된 연구지역에서의 방해석 쌍정에 의한 변형온도는 약 150°-200°C 이하로 나타났다. 주변형률의 크기와 방향에서 최대수축변형률($\epsilon_3 \leftrightarrow \sigma_1$)의 방향은 경상분지 남부에 해당하는 GS-1와 영남육괴 남부에 해당하는 BS-1 지역에서 N-S, 그리고 옥천습곡대 서남부에 해당하는 NR-1 지역에서는 E-W 방향을 보였다. 최대인장변형률($\epsilon_1 \leftrightarrow \sigma_3$)의 경우 GS-1과 BS-1 지역은 NWW-SEE ~ NNE-SSW, 그리고 NR-1 지역은 N-S 방향으로 나타났다. 즉, 연구지역에는 방해석 쌍정의 생성과 관련된 서로 다른 고응력장이 최소한 두 번 이상 작용했을 가능성을 시사한다.

주요어 : 고응력, 방해석 쌍정, 변형온도, 주변형률, 최대수축

1. 서 론

옥천습곡대는 한반도의 중앙부에 위치하며 북쪽은

경기육괴와 접하고 남쪽은 중국 방향을 보이는 호남전 단대와 옥동단층을 지질경계로 영남육괴와 접한다(Fig. 1; Cluzel *et al.*, 1990, 1991a, 1991b; Cluzel, 1992;

*Corresponding author: kangss67@yahoo.co.kr

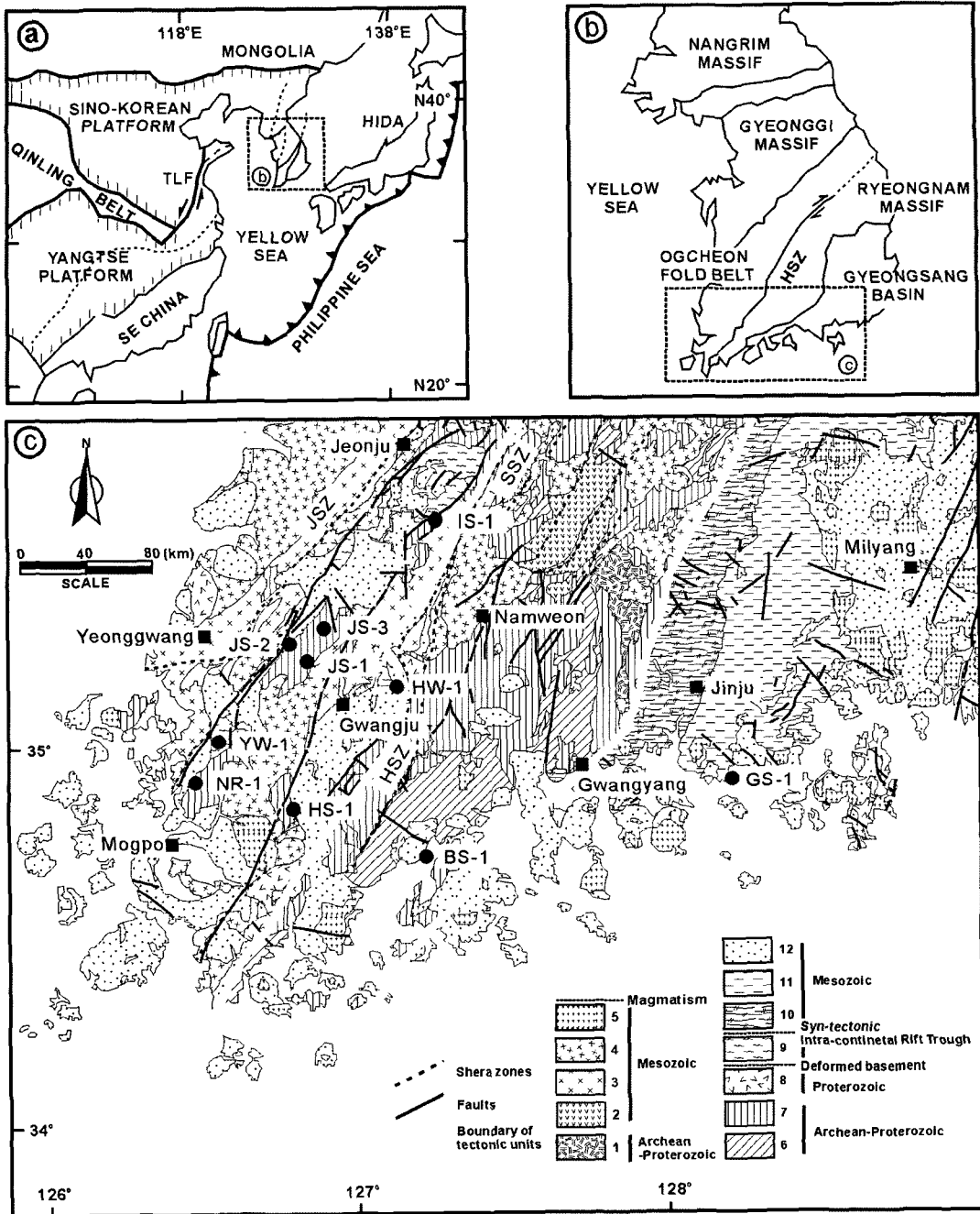


Fig. 1. Geological map of study area and sampling locations. TLF: Tan-Lu Fault, HSZ: Honam Shear Zone, JSZ: Jeonju Shear Zone, SSZ: Sunchang Shear Zone, HSZ: Hwasun Shear Zone. 1: Buncheon and Hongjesa granites, 2: Hyesan and Pyonggang complexes, 3: Foliated granite, 4: Daebo granite, 5: Bulgusa granite, 6: Porphyroclastic gneiss, 7: Jirisan metamorphic complex, 8: Chuncheon, Yeoncheon and Yulri groups, 9: Yeongdong, Neungju and Jinan groups, 10: Sindong, Seson and Sujin groups, 11: Hayang and Bonghwasan groups, 12: Yucheon and Jaedeok groups.

Kim *et al.*, 1994; Oh *et al.*, 1995). 옥천습곡대는 대표적인 중국방향의 지질구조를 보여주며 그 지질시대

와 대비하여 많은 논란이 되어 왔다(So and Kim, 1975; Kim, 1976; Reedman and Flecher, 1976;

Lee, 1987; Kim and Yoon, 1980; Chough *et al.*, 2000). 몇몇 연구자들에 따르면, 옥천습곡대는 임진강대와 함께 남중국판과 북중국판의 충돌대인 Qinling Belt의 연장선일 가능성이 있으며, 또한 일본의 Hida Belt와도 연결될 가능성이 있다고 보고 한바 있다 (Hara, 1982; Nakazawa *et al.*, 1982; Hong and Lee, 1989; Cluzel *et al.*, 1990; Yin and Nie., 1993). 옥천습곡대는 암상과 변성 정도에 따라 북동부의 태백분지와 남서부의 옥천분지 등 두개 분지로 나눌 수 있다. 태백분지가 비변성대에 속하며 화석을 포함하고 있는 변성을 받지 않았거나 약한 변성을 받은 고생대에서 중생대 초기의 퇴적암으로 구성되어 있는 반면, 옥천분지는 변성대에 속하며 화석을 포함하지 않은 낮거나 중간 정도 변성도의 변성퇴적암과 변성화산암으로 구성되어 있다. 옥천습곡대의 지구조적 진화사 규명은 한반도 자체의 지구조사 뿐 만 아니라 주변지역과의 지구조적 연관성을 이해하는데 있어서 매우 중요하다. 이러한 이유 때문에 국내외 연구자들에 의하여 옥천습곡대 동북부와 중부지역을 중심으로한 다양한 연구들(Kim, 1968; Son, 1970; Kim, 1971; Cluzel, 1992; Cluzel *et al.*, 1990, 1991a, 1991b; Kihm *et al.*, 1996; Kim and Cho, 1999; Cho and Kim, 2002)의 시작으로, 이후 옥천습곡대 서남부지역 및 호남전단대에 대한 연구들(Hong and Lee, 1989; Kim *et al.*, 1994; Kwon *et al.*, 1993; Kim *et al.*, 1995; Oh *et al.*, 1995; Lee and Min, 1995; Kwon and Ree, 1997)도 활발하게 이루어졌다.

본 연구에서는 고응력사의 지시자로서 잘 알려진 방해석 쌍정 분석법을 이용하여 옥천습곡대 서남부지역, 영남육괴 남부지역, 경상분지 남부지역 등 한반도 남부지역에 소규모로 불규칙하게 분포하고 있는 석회질 암석을 대상으로 고응력사를 살펴보고자 한다. 측정된 방해석 쌍정 데이터는 NCSG(New Calcite Strain Gauge) 프로그램을 사용하여 쌍정의 평균 두께, 평균 치밀도, 변형률, 압축 및 인장응력 방향, 주변형틀의 크기와 방향 등이 일괄적으로 처리되어 계산된다. 이렇게 계산된 자료를 근거로 하여 쌍정이 생성될 당시의 변형온도를 추정하고 고응력장의 상태와 방향을 밝히 고자 한다.

2. 지질개요

연구지역은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 옥천습곡대 서남부, 영남육괴 지리산지구, 경상분지의 일부분을 포

함하고 있는 한반도 남부지역에 해당하며 각각은 편마암복합체를 기저로 이를 관입하는 수차례의 화성활동과 지구조운동으로 복잡한 지질양상을 보인다. 연구지역의 지질계통은 크게 선캠브리아기 압충에서 석탄기-페름기 평안층군, 트리아스기 변성석영반암, 쥐라기 화강암류, 백악기 퇴적암류, 화산암류, 관입암류, 그리고 제4기 충적층이 전 지층을 피복하고 있다. 본 지역은 선캠브리아기의 편마암류 및 편암류에서부터 제4기 충적층까지 다양한 암석이 분포하나 목포·여수도폭에 해당하는 지역에서는 고생대의 조선누층군과 제3기 퇴적암류나 화산암류는 분포하지 않는다(Choi *et al.*, 2002). 연구지역은 지구조적으로 한반도의 영남육괴와 옥천습곡대의 경계를 이루는 소위 호남전단대가 NNE-SSW 방향성을 가지고 폭 0.2-4 km 규모로 약 400 km의 연장성을 보인다(Yanai *et al.*, 1985). 호남전단대는 순창전단대와 화순전단대로 구분되며 이들은 연성전단작용을 수반한 우수향이동단층 운동으로 형성되었으며, 우리나라 뿐 만 아니라 동아시아의 지구조사를 해석하는데 중요한 구조선중의 하나이다(Kim and Kee, 1991; Kee and Kim, 1992; Lee, 1992). 더욱이 본 연구지역에는 함탄층을 포함하는 평안분지와 백악기말의 화산암질퇴적암과 관입암질로 구성된 경상분지가 포함되며, 지질시대를 달리하는 각종 화성암류가 골고루 분포하여 각 지질시대별로 화성활동과 지구조운동이 활발했음을 시사한다. 연구지역에서 암석의 분포 형태는 대체로 NNE-SSW의 방향성을 보이며, 이러한 방향성은 연구지역에 발달해 있는 단층이나 전단대 등의 지구조선들과 일치한다.

3. 연구방법

본 연구는 한반도 남부지역에 분포하고 있는 석회질 암석을 대상으로 수행되었다. 한반도의 지체구조해석에 있어서 옥천습곡대가 가지는 중요성이 크기 때문에, 주로 옥천습곡대 서남부지역에 집중해서 8개(IS-1, JS-1, JS-2, JS-3, HW-1, YW-1, NR-1, HS-1), 그 외 석회질 암석이 관찰되는 영남육괴 남부지역에서 1개(BS-1), 그리고 경상분지 남부지역에서 1개(GS-1) 등 총 10개의 암석정향시료를 채취하였다(Fig. 1). 채취한 시료로부터 방해석내의 쌍정을 측정하기 위하여 각 시료마다 남북방향에 평행하면서 수평한 박편 1개와 동서방향에 평행하면서 수직인 박편 1개 등 쌍정 관찰용 특수박편을 2개씩 제작하였다(Kang *et al.*, 2002). 박편은 쌍정을 용이하게 측정하기 위하여 15 μm , 9 μm , 1 μm 등

의 다이아몬드 연마제를 이용하여 박편 표면을 순차적으로 연마하였으며 두께는 약 5 μm 로 제작되었다. 쌍정은 4축 만능재물대(4-axis universal stage)와 미세눈금자(micrometer ocular)가 장착된 광학용 암색 편광현미경을 이용하여 각 시료에서 50개 이상의 방해석 입자를 무작위로 선택하여 방해석 c-축의 방향 및 경사, 쌍정면의 방향 및 경사, 쌍정의 개수 및 두께, 그리고 방해석 입자의 크기 등을 측정하였다.

측정된 쌍정의 자료는 Evans and Groshong(1994)이 개발한 방해석 변형률 측정(Calcite Strain Gauge, CSG)법을 기초로 하여 새로운 포트란언어로 작성된 NCSG(New Calcite Strain Gauge) 방해석 변형률 계산 프로그램을 이용하여 처리한 후 압축 및 인장응력의 방향, 쌍정의 평균 두께(μm), 평균 치밀도(twins/mm), 총변형률(%), 그리고 주변형률의 크기와 방향 등을 구하였다. 방해석 쌍정이 생성될 당시의 변형온도는 온도에 따라 쌍정의 형태를 분류한 Burkhard(1993)와 석회암층에서 탄화반사도(virtrinite reflectance)와 일라이트 결정도(illite crystallinity)를 이용하여 측정된 속성온도와 쌍정의 변형률, 두께, 치밀도 등을 비교하여 쌍정이 생성될 당시의 온도를 결정(Ferrill, 1991; Ferrill *et al.*, 2004)한 연구결과를 본 연구결과와 비교하여 추정되었다. 쌍정을 형성시킨 압축 및 인장응력의 방향은 각각의 쌍정면에서 압축 및 인장응력의 방향을 계산한 후 각 방향을 평사투영하여 최적의 압축 및 인장응력의 방향을 계산하는 Turner(1953)의 Dynamic Analysis를 적용하였다. 주변형률의 크기와 방향은 최소자승법(least square method, $\sqrt{J_2}$)에 의한 Groshong(1972)의 Strain Gauge Technique를 이용하여 구하였다. 여기서, J_2 는 $-(e_1e_3+e_3e_1+e_1e_2)$ 로 계산될 수 있으며, e_1 , e_2 , e_3 은 최대, 중간, 최소 주변형률의 크기를 각각 나타낸다(Jaeger and Cook, 1979). 한 시료에서

쌍정의 평균 두께는 측정된 쌍정의 총 두께를 쌍정의 전체 개수로 나누어 계산된 각 쌍정 세트들의 평균값을 다시 평균함으로써 구할 수 있다. 또한, 쌍정의 평균 치밀도도 쌍정에 수직인 방해석 입자의 넓이를 쌍정의 전체 개수로 나누어 구한 각 쌍정 세트들의 평균값을 다시 평균함으로써 구할 수 있다.

측정된 쌍정과 계산된 응력장의 적합성을 검증하기 위하여 양의 기대값(Positive Expected Value, PEV(%))과 음의 기대값(Negative Expected Value, NEV(%))으로 나눈다. 양의 기대값은 측정된 쌍정이 계산된 응력장과 일치하는 쌍정인 반면, 음의 기대값은 측정된 쌍정이 계산된 응력장과 일치하지 않은 쌍정으로서 계산된 응력하에서는 생성되지 않았음을 지시한다. 일반적으로 측정 오차 등으로 인하여 소수의 방해석 입자에서 음의 기대값이 나타난다. 하지만, 하나의 시료에서 40% 이상의 음의 기대값이 나타난다면 그 시료에 대해 2번 이상의 응력장이 작용했음을 지시한다(Groshong, 1972; Teufel, 1990). 이러한 경우에는 양의 기대값을 보이는 쌍정과 음의 기대값을 나타내는 쌍정을 분리하여 계산함으로써 두 방향의 응력장을 구할 수 있다. 또한, 음의 기대값이 10%-30% 범위 일 때, 전체 쌍정에서 가장 큰 편차를 보이는 20%의 쌍정을 제거하면 향상된 결과를 얻을 수 있다 (Groshong *et al.*, 1984).

4. 측정 결과

채취한 10개 시료의 박편으로부터 방해석내의 쌍정을 관찰한 결과 7개의 시료 중 IS-1과 JS-1의 시료에서는 극소수의 쌍정만이 관찰되었으며 JS-2, JS-3, HW-1, YW-1 그리고 HS-1 시료에서는 쌍정이 관찰되지 않았다. 다만, 나머지 3개의 시료(NR-1, BS-1, GS-1)에서는 방해석 쌍정을 용이하게 측정할 수 있을 정도

Table 1. Results of calculated calcite twins. N and n are the number of measured twins and twins analyzed after 20% removal of the twin sets with large NEV. NEV is negative expected value of strain. t_{ave} is average twin thickness. $\sqrt{J_2}$ is average twin intensity. ρ_{ave} is total twin strain by twinning (Jaeger and Cook, 1979) and J_2 is calculated from the three principal strains, namely, $J_2 = -(e_1e_3 + e_3e_1 + e_1e_2)$. e_1 , e_2 and e_3 are percent elongations and orientations of principal strain axes are given as trend/plunge of their axes.

Sample	N/n	NEV (%)	t_{ave} (μm)	ρ_{ave} (twins/mm)	$\sqrt{J_2}$ (%)	Strain and orientation of principal axes			Standard error
						e_1	e_2	e_3	
GS-1	52/42	24	1.94	41.99	7.453	6.463 100°/68°	1.690 261°/21°	-8.153 353°/6°	1.363
BS-1	106/85	27	0.99	40.43	2.457	2.661 249°/26°	-0.479 134°/41°	-2.182 1°/38°	0.434
NR-1	56/45	7	0.77	25.26	1.235	0.985 358°/17°	0.400 119°/60°	-1.385 260°/25°	0.142

로 발달상태가 양호하였다. 쌍정이 관찰되지 않은 7개의 시료는 약 10 MPa 이상의 낮은 차응력(differential stress)하의 역학적 변형에 의해서 생성되는 방해석 쌍정의 생성조건에 부합되지 않은 지구조적 환경에 놓여 있었을 가능성을 지시한다(Turner, 1953; Tullis, 1980). 측정된 방해석 쌍정의 계산 결과를 정리하면 Table 1과

같다. 측정 결과로부터 각 시료에서의 방해석 쌍정에 대한 변형온도와 고응력장을 살펴보면 다음과 같다.

4.1. 쌍정의 형태 및 변형온도

쌍정은 동일한 전단응력하에서도 생성온도에 따라 형태와 두께가 달라진다. Groshong(1974)과 Heard

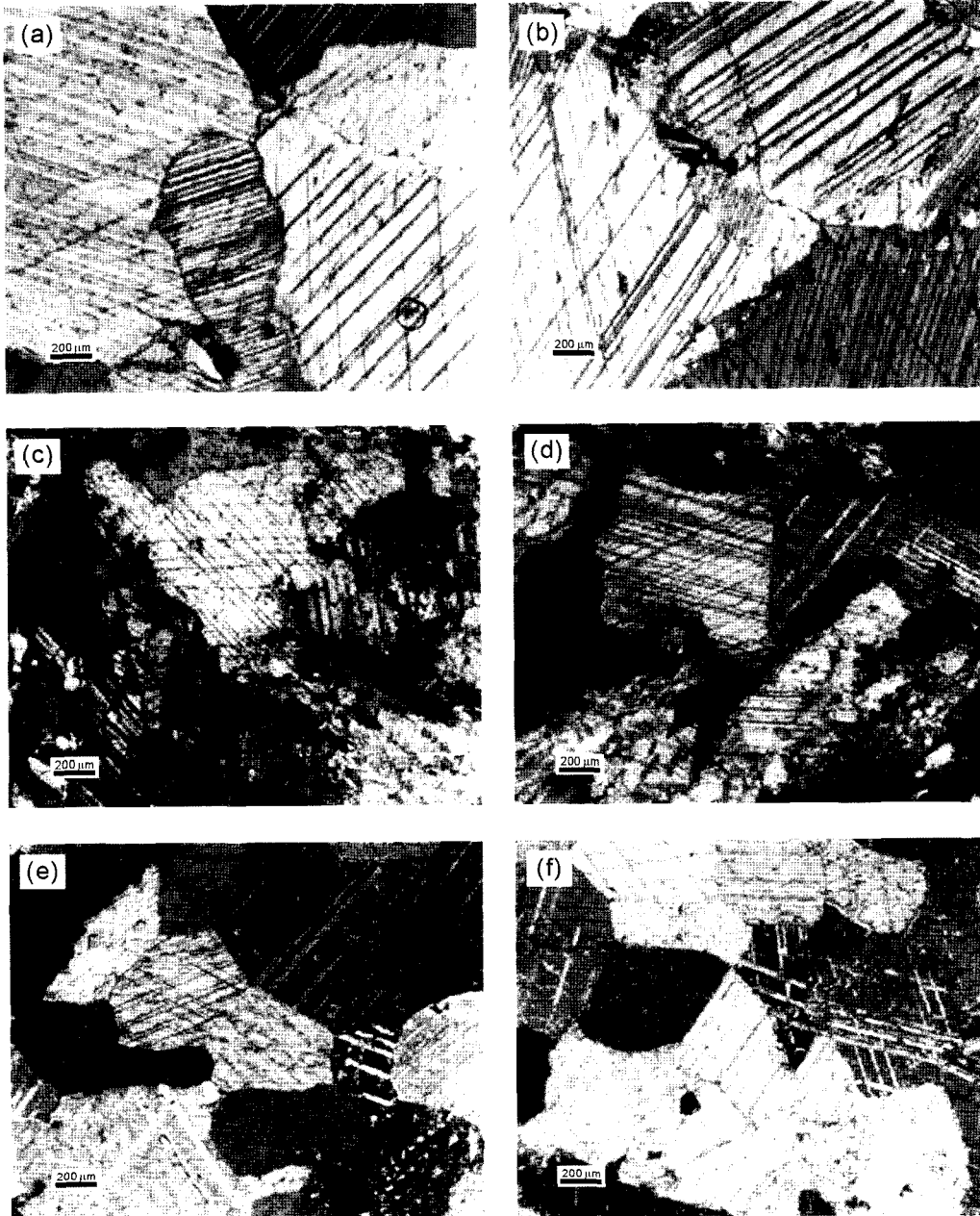


Fig. 2. Results of observed and measured calcite twins. Microphotographs of calcite twins (a) and (b) from GS-1, (c) and (d) from BS-1 and (e) and (f) from NR-1.

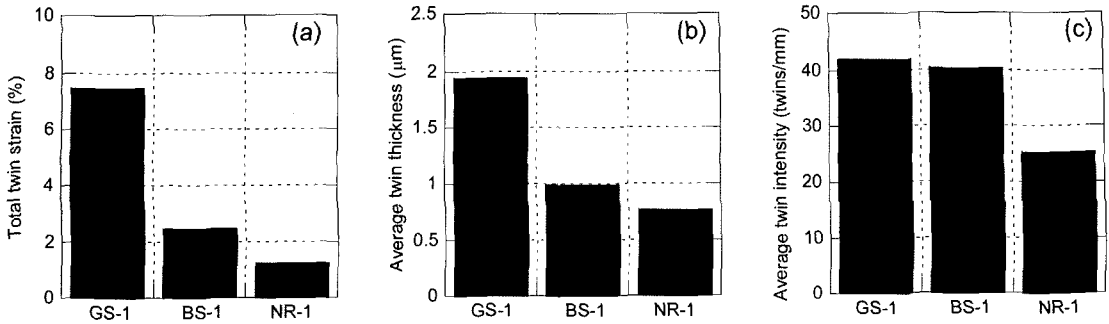


Fig. 3. Results of calculated (a) total twin strain, (b) average twin thickness, (c) average twin intensity from samples GS-1, BS-1 and NR-1.

(1963)의 실내실험 결과에 따르면 낮은 온도에서 생성된 방해석 쌍정은 여러개의 얇은 쌍정이 생성되는 반면, 높은 온도에서는 소수의 두꺼운 쌍정이 생성되는 것으로 나타났다. 연구지역 방해석내의 쌍정을 관찰한 결과, 쌍정의 형태는 모든 시료에서 주로 한 방향 또는 두 방향을 갖는 직선형의 얇거나 두꺼운 쌍정이 우세하게 관찰되었다(Fig. 2). 이것은 쌍정이 150°C 이하의 높지 않은 온도 환경에서 생성되었음을 지시한다 (Burkhard, 1993). Ferrill(1991)에 의하면 쌍정의 변형률(total twin strain)은 약 190°C까지는 10% 이하로 거의 변화가 없다가 그 이상의 온도에서는 10% 이상의 값을 보이고, 평균 쌍정의 치밀도(average twin intensity)는 150°C 이하에서는 분산된 형태를 보이나

그 이상의 온도에서는 50 twin/mm 이하의 값을 보이는 것으로 보고하였다. 평균 쌍정의 두께(average twin thickness)는 150°C 이하에서는 1μm 이하, 150-190°C 사이에서는 1μm~3μm, 그리고, 200°C 이상에서는 3μm 이상의 값을 보여 방해석 쌍정의 두께가 온도와 밀접한 관계가 있음을 보였다.

각 지역에서의 변형률, 두께, 치밀도 크기를 Fig. 3에 표시하였다. Table 1과 Fig. 3으로부터 알 수 있듯이 경상분지 남부에 해당하는 GS-1 지역에서 관찰되는 방해석 쌍정의 평균 변형률은 7.453%로 영남육괴 남부에 해당하는 BS-1 지역의 2.457%와 옥천습곡대 서남부에 해당하는 NR-1 지역의 1.235%보다 3-6배 이상 높게 나타났다. 쌍정의 평균 두께 또한 GS-1 지

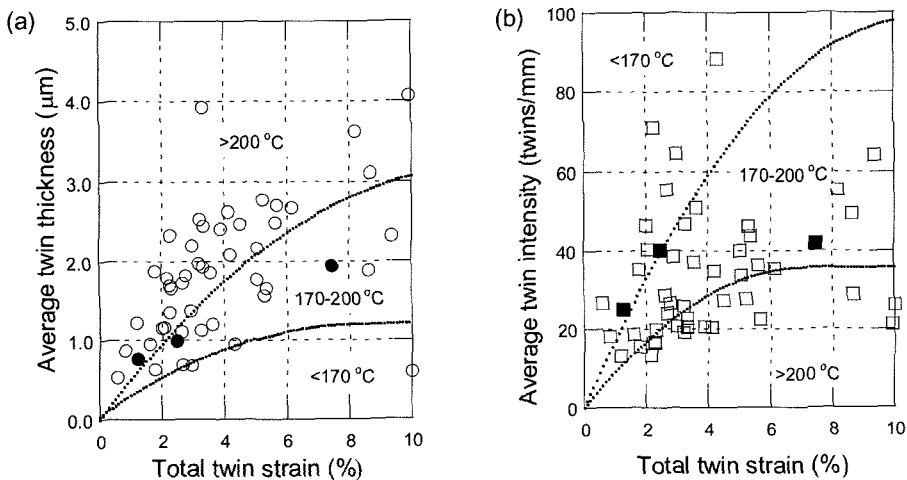


Fig. 4. Graphs of twin parameters for deformation temperature from relationships of (a) average twin thickness versus total twin strain, (b) average twin intensity versus twin strain, (c) average twin intensity versus average twin thickness, (d) product of average twin thickness and average twin intensity (ratio of twinned to untwinned crystal) versus total twin strain. Plots include data from this study and Ferrill *et al.* (2004). Closed circles, rectangles, triangles and diamonds stand for results from this study, and each open symbol stands for those from Ferrill *et al.* (2004).

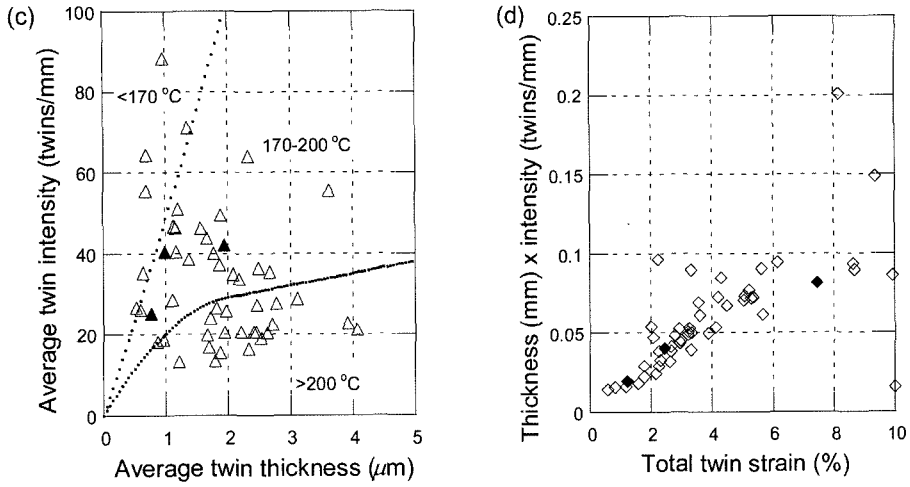


Fig. 4. Continued.

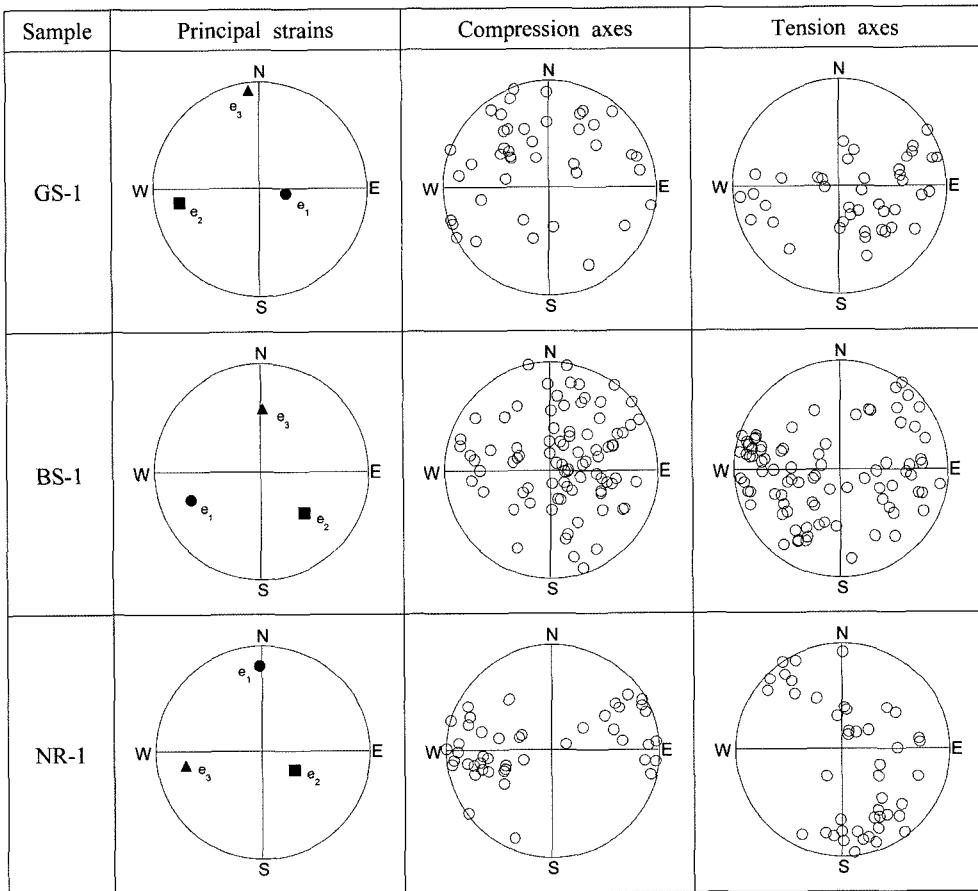


Fig. 5. Stereographic projection of the directions of the principal strain axes and compression and tension axes on a lower hemisphere equal-area Schmidt stereonet.

역(1.94 μm)에서 가장 높게 나타난 반면, BS-1 지역 (0.99 μm)과 NR-1 지역(0.77 μm)에서는 상대적으로 낮

았다. 그리고 쌍정의 평균 치밀도는 NR-1 지역(25.97 twins/mm)을 제외한 나머지 두 지역(GS-1: 41.99

twins/mm, BS-1: 40.43 twins/mm)에서는 비슷하게 높은 값을 보였다. 본 연구의 결과를 Ferrill *et al.* (2004)의 변형률-두께-치밀도에 대한 연구결과와 Fig. 4에 함께 도시하였다. 쌍정의 변형률-두께 사이의 관계를 살펴보면 쌍정의 두께는 변형률의 증가와 함께 두꺼워지는 비례관계를 보였다. 쌍정의 변형률-두께-치밀도의 관계로부터 연구지역 쌍정이 생성될 당시의 온도를 추정해 보면 주로 200°C 이하의 범위에 속함을 알 수 있다. 이 온도 범위는 쌍정의 형태에 의해 추정된 온도와 대체적으로 일치한다. 이상의 쌍정의 형태, 변형률, 두께, 치밀도 등의 관계를 종합적으로 고려하여 변형온도를 추정해 볼 때, 본 연구지역에서 관찰되는 방해석 쌍정은 약 150-200°C 이하의 온도에서 생성되었을 것으로 판단된다.

4.2. 주변형률 및 고응력장

주변형률 및 압축응력과 인장응력 방향을 등면적 한반구 투영법을 이용하여 Fig. 5에 도시하였다. 최대수축변형률($e_{3 \leftrightarrow \sigma_1}$)의 경우 경상분지 남부에 해당하는 GS-1 지역과 영남육괴 남부에 해당하는 BS-1 지역에서는 대체적으로 N-S 방향과 일치한 반면, 옥천습곡대 서남부에 해당하는 NR-1 지역은 E-W에 근접한 방향을 보였다. 최대인장변형률($e_{1 \leftrightarrow \sigma_3}$)의 경우 GS-1 지역은 NW-SE, BS-1 지역은 NE-SW, 그리고 NR-1 지역은 N-S 방향으로 일어났음을 알 수 있다. 이들 방향은 압축 및 인장응력 방향과 잘 일치하였다. Amadei and Stephansson(1997)는 응력의 상태로부터 단층의 형태를 추정하였는데, 정단층(normal fault)은 최대주응력의 방향이 수직($\sigma_v = \sigma_1$)이고, 중간 및 최소주응력의 방향이 수평($\sigma_H = \sigma_2$, $\sigma_h = \sigma_3$)일 때, 드러스트단층(thrust fault)은 최대 및 중간주응력의 방향이 수평($\sigma_H = \sigma_1$, $\sigma_h = \sigma_2$)이고 최소주응력의 방향이 수직($\sigma_v = \sigma_3$)일 때 발생한다. 주향이동단층(strike-slip fault)은 최대 및 최소주응력의 방향이 수평($\sigma_H = \sigma_1$, $\sigma_h = \sigma_3$)이고, 중간주응력의 방향이 수직($\sigma_v = \sigma_2$)일 때 발생한다. 방해석 쌍정으로부터 계산된 응력상태만을 고려하여 연구지역의 단층 형태를 추정해 보면, GS-1 지역은 최대수축방향($e_{3 \leftrightarrow \sigma_1}$)이 거의 수평이고 중간응력방향($e_{2 \leftrightarrow \sigma_2}$)은 약간의 수평경사를, 최대인장방향($e_{1 \leftrightarrow \sigma_3}$)은 거의 수직경사를 보여주어 드러스트단층의 양상을 보인다. BS-1 지역은 최대인장방향이 약간의 수평경사, 최대인장방향과 중간응력방향이 보통의 수평경사를 보여주어 뚜렷한 단층형태를 추정할 수는 없으나 주향이동단층의 성격과 대비된다. NR-1 지역은 최대수축방향과 최대인장방향

이 거의 수평경사, 중간응력방향이 수직경사를 보여주어 주향이동단층의 양상을 보인다.

5. 토 의

한반도의 지체구조 발달사를 체계화하기 위한 일환으로 한반도 서남부지역을 포함한 남동부지역에 대한 다양한 연구들이 이루어졌다(Hong and Lee, 1989; Kim *et al.*, 1994; Kwon *et al.*, 1993; Hwang, 1994). Hong and Lee(1989)는 옥천습곡대 서남부의 전단대에 분포하는 순창 엽리상 화강섬록암의 미구조연구로부터 중생대말기에 옥천습곡대는 유라시아판의 동측 연변부에 작용한 N-S방향의 압축응력을 수반한 지각운동의 결과인 좌수향 취성변형을 받았으며, 이 작용은 중국의 Tan-Lu 단층대와 대비되어질 가능성이 크다고 보고하였다. 이 연구에서 압축응력장의 방향은 이 지역에 해당하는 본 연구의 BS-1 지역에서 얻어진 최대수축 변형률의 방향과 일치한다. 호남전단대에 분포하는 엽리상 화강암류의 성인에 대해 발표한 Kim *et al.* (1994)에 따르면, 호남전단대의 엽리상 화강암류는 두 지괴의 충돌로 압축응력장이 형성되었고 주향이동 단층과 드러스트단층 운동에 수반된 화성활동으로 생성된 송림화강암류가 후에 쥬라기의 대보운동에 의하여 NE-SW 방향의 압쇄엽리를 생성시켰다고 보고하였다. Kwon *et al.*(1993)은 옥천대의 주요 단층대에 대한 연구로 해남과 무안지역에서 추정단층선에 대하여 중력탐사를 실시한 결과, NE-SW 방향의 단층대는 고경사의 정단층 운동에 의해 형성되었으며 그 형성 시기는 무안지역은 백악기 이후, 해남지역은 쥬라기 이후로 추정하였다. 이 연구의 결과는 이 지역에 해당하는 본 연구의 NR-1 지역에서 얻어진 최대수축변형률의 방향과 응력상태에 의해 추정한 단층 형태와 다르게 나타나며, E-W 방향은 오히려 Jang and Kang (1998)이 발표한 송림변동시기에 작용한 고응력장과 일치한다. 그리고, Hwang(1994)는 단층과 절리 등의 취성변형요소들을 이용하여 백악기초 이후 한반도 남동부에 작용한 고응력장을 해석하였다. 그의 연구에 의하면, 경상분지 지역은 N-S 신장 \Rightarrow E-W 신장 \Rightarrow N-S 압축 \Rightarrow NE-SW 신장 \Rightarrow WNW-ESE 압축 \Rightarrow NE-SW 압축 \Rightarrow NW-SE 신장 응력기 순으로 지체구조 변형을 받았던 것으로 나타났다. 특히, NE-SW 신장 응력기는 백악기 말에서 제3기초에 걸쳐 이러한 지체구조 변형을 지배했을 것으로 판단하였다. 이 연구지역에 해당하는 본 연구의 GS-1 지역에서 나타난 최대수축변형

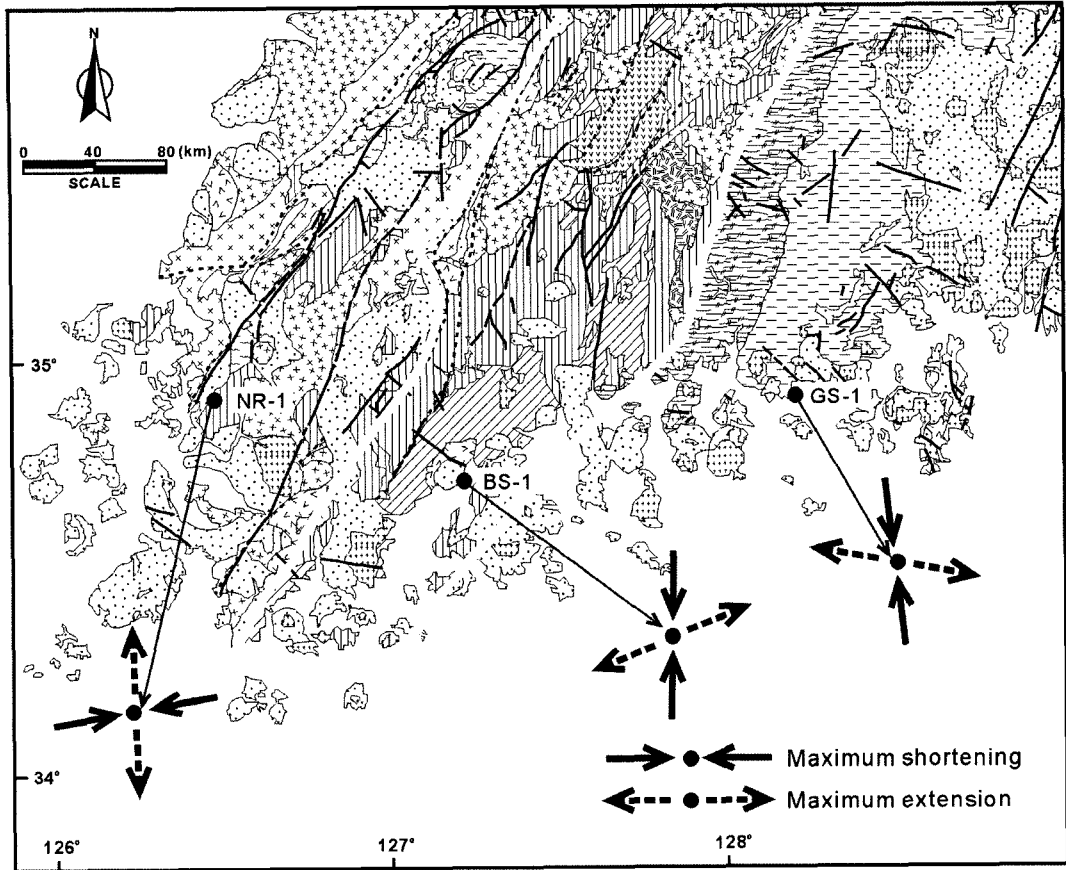


Fig. 6. Orientations of the maximum shortening and extension axes at each sampling location.

률은 이 연구의 N-S 압축응력장의 방향과 일치한다.

본 연구지역에서 얻어진 최대수축변형률($\epsilon_{3\sigma}$)의 방향은 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 대체적으로 서부의 경우 E-W, 남부의 경우 N-S 방향으로 두 개의 다른 응력장 형태를 보여 연구지역에는 최소한 두 번 이상의 서로 다른 고응력장이 작용했을 가능성을 시사한다. 하지만, 이러한 고응력장이 광역적인 지구조 운동의 결과인지 아니면 국지적인 지구조 운동과 관련해서 나타난 결과인지는 명확하게 결론지을 수 없다. 더군다나 넓은 연구지역에 비해 분석된 시료의 개수가 적으므로 본 연구에서 얻어진 결과만으로 한반도 남부지역의 전체적인 고응력장을 해석하기에는 다소 무리가 있다. 따라서, 방해석 쌍정 분석법을 포함한 단층조사 분석법이나 이분미세균열법 등과 같은 다른 고응력 분석 방법들을 함께 적용하여 그 결과를 서로 비교하고 검토하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 연구지역의 경우 극히 제한된 지역에서만 소규모로 불규칙하게 관찰되는 석회질암의 분포상태를 고려

한다면 고응력장의 데이터 개수가 적다할지라도 연구 지역의 고응력장을 해석하는데 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 사료된다.

6. 결 론

한반도 남부지역에 소규모로 불규칙하게 분포하고 있는 석회질 암석의 방해석 쌍정을 측정하여 쌍정이 생성될 당시의 변형온도를 추정하고 고응력장의 상태와 방향성을 분석하였다. 그 주요 결과는 다음과 같다.

연구지역의 방해석내 쌍정의 형태는 주로 한 방향 또는 두 방향을 갖는 직선형의 얇거나 두꺼운 쌍정이 우세하였다. 이러한 쌍정의 형태는 쌍정이 150°C 이하의 환경에서 생성되었음을 지시한다. 또한, 쌍정의 생성 온도와 밀접한 관계가 있는 변형률-두께-치밀도 등의 관계로부터 연구지역의 쌍정에 의한 변형온도를 추정해 보면 200°C 이하로 나타난다. 결과적으로 쌍정의 형태, 변형률, 두께, 치밀도 등의 관계를 고려하면 연구지역에서

나타나는 방해석 쌍정의 변형온도는 약 150-200°C 이하에서 생성되었을 것으로 추정된다.

방해석 쌍정으로부터 계산된 주변형틀의 크기와 방향에서 고응력장의 상태를 살펴보면, 경상분지 남부에 해당하는 GS-1와 영남육괴 남부에 해당하는 BS-1 지역에서 최대수축변형률($\epsilon_{3\leftrightarrow\sigma_1}$)의 방향은 대체적으로 N-S와 일치한 반면, 옥천습곡대 서남부에 해당하는 NR-1 지역에서는 E-W 방향을 보여준다. 최대인장변형률($\epsilon_{1\leftrightarrow\sigma_3}$)의 경우 GS-1과 BS-1 지역은 NW-SE와 NE-SW, 그리고 NR-1 지역은 N-S 방향을 각각 보여준다. 이상의 고응력장의 결과만을 고려할 때, 연구지역에는 최소한 두 번 이상의 서로 다른 고응력장이 작용했을 것으로 판단된다. 하지만, 이들 고응력장이 어느 지구 조 운동과 관련된 결과인지를 밝히기 위해서는 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 교육인적자원부 한국학술진흥재단 2005년도 학술연구교수지원사업(과제번호: KRF-2005-050-C00012)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드린다.

참고문헌

- Amadei, B. and Stephansson, O. (1997) Rock stress and its measurement. Chapman and Hall, London, Chapter 2, p. 23-94.
- Burkhard, M. (1993) Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review. *Journal of Structural Geology*, v. 15, p. 351-368.
- Cho, M. and Kim, H. (2002) Metamorphic evolution of the Ogcheon metamorphic belt: Review of recent studies and remaining problems. *Journal of the Petrological Society of Korea*, v. 11, p. 121-137.
- Choi, P.-Y., Hwang, J.-H., Koh, H.J., Kim, J.C., Choi, H.I., Kee, W.S., Kim, Y.B., Song, K.Y. and Choi, Y.S. (2002) 1:250,000 Explanatory note of the Mokpo and Yeosu sheets. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Chough, S.K., Kwon, S.T., Ree, J.H. and Choi, D.K. (2000) Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view. *Earth-Science Reviews*, v. 52, p. 175-235.
- Cluzel, D. (1992) Ordovician bimodal magmatism in the Ogcheon belt (South Korea): Intercontinental rift-related volcanic activity. *Journal of Southeast Asian Earth Science*, v. 7, p. 95-209.
- Cluzel, D., Cadet, J.P. and Lapiere, H. (1990) Geodynamics of the Ogcheon belt (South Korea). *Tectonophysics*, v. 183, p. 41-56.
- Cluzel, D., Lee, B.J. and Cadet, J. (1991a) Indonesian dextral ductile fault system and synkinematic plutonism in the southwest of the Ogcheon Belt (South Korea). *Tectonophysics*, v. 194, p. 131-151.
- Cluzel, D., Lee, B.J. and Cadet, J. (1991b) Early middle Paleozoic intraplate orogeny in the Ogcheon Belt (South Korea): A new insight on the Paleozoic buildup of East Asia. *Tectonics*, v. 10, p. 1130-1151.
- Evans, M.A. and Groshong Jr, R.H. (1994) Microcomputer techniques and applications: a computer program for the calcite strain gauge technique. *Journal of Structural Geology*, v. 16, p. 227-281.
- Ferrill, D.A. 1991, Calcite twin widths and intensities as metamorphic indicators in natural low-temperature deformation of limestone. *Journal of Structural Geology*, 13, 667-75.
- Ferrill, D.A., Morris, A.P., Evans, M.A., Burkhard, M., Groshong Jr, R. H. and Onasch, C. M. (2004) Calcite twin morphology: a low-temperature deformation geothermometer. *Journal of Structural Geology*, v. 26, p. 1521-1529.
- Groshong Jr, R.H. (1972) Strain calculated from twinning in calcite. *Geological Society of America Bulletin*, v. 83, p. 2025-2048.
- Groshong Jr, R.H. (1974) Experimental text of least-squares strain gage calculation using twinned calcite. *Geological Society of America Bulletin*, v. 85, p. 1855-1864.
- Groshong Jr, R.H., Teufel, L.W. and Gasteiger, C. (1984) Precision and accuracy of the calcite strain-gauge technique. *Geological Society of America Bulletin*, v. 95, p. 357-63.
- Hara, I. (1982) Evolutional processes of paired metamorphic belts: Hida Belt and Sangun Belt. *The Memoirs of the Geological Society of Japan*, v. 21, p. 71-89.
- Heard, H.C. (1963) The effect of large changes in strain rate in the experimental deformation of the Yule marble. *Journal of Geology*, v. 71, p. 162-195.
- Hong, Y.K. and Lee, B.J. (1989) Geochemical and microstructural studies on the Sunchang foliated granulite at a shear zone in the SW part of the Ogcheon fold belt, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 25, p. 294-311.
- Hwang, J.-H. (1994) Reconstitution of paleostress in the southeastern Korean peninsula since the Early Cretaceous. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 30, p. 27-34.
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W. (1979) *Fundamentals of Rock Mechanics*. 3rd Ed., Chapman and Hall, London, p. 9-52.
- Jang, B.-A. and Kang, S.-S. (1998) Paleostress measurements from calcite twin in the Jeongseon limestone of the Joseon Supergroup. *Journal of Korean Society of Engineering Geology*, v. 8, p. 75-86.
- Kang, S.S., Jang, B.A., Kang, C.W., Obara, Y. and Kim, J.M. (2002) Rock stress measurements and the state of stress at an open-pit limestone mine in Japan. *Engineering Geology*, v. 67, p. 201-217.
- Kee, W.S. and Kim, J.H. (1992) Shear criteria mylonites from the Soonchang shear zone, the Hwasun coalfield, Korea, v. 28, p. 426-436.
- Kihm, Y.H., Kim, J.H. and Koh, H.J. (1996) *Geology of*

- the Deogsan-myeon area, Jecheon-gun, Chungcheongbuk-do, Korea: contact between the Choseon and Ogcheon supergroups. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 32, p. 483-499.
- Kim, O.J. (1968) Stratigraphy and tectonics of the Okchon System in the area between Chungju and Munkyeong. *Journal of Korean Institute Mining Geology*, v. 1, p. 35-46.
- Kim, H.S. (1971) Metamorphic facies and regional metamorphism of Ogcheon metamorphic belt. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 7, p. 221-256.
- Kim, H.S. (1976) Biotite from metapelites of the Ogcheon-Goesan district, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 12, p. 189-206.
- Kim, H. and Cho, M. (1999) Polymetamorphism of Ogcheon Supergroup in the Miwon area, central Ogcheon metamorphic belt, South Korea. *Geosciences Journal*, v. 3, p. 151-162.
- Kim, J.H. and Kee, W.S. (1991) Tectonic significances of the Soonchang Shear Zone, the Hwasun coalfield, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 27, p. 642-655.
- Kim, I.S., Min, K.D. and Chun, H.Y. (1995) Palaeomagnetism of the Taedong Supergroup in the Mungyong area (II): Tectonic and stratigraphic implications. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 31, p. 382-392.
- Kim, Y.J., Park, Y.S. and Kang, S.W. (1994) The study on geochronology and petrogenesis of foliated granites in the Honam Shear Zone, South Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 27, p. 247-261.
- Kim, O.J. and Yoon, J.S. (1980) Study on lithology and tectonic interpretation of the upper Okchon members. *Journal of Korean Institute Mining Geology*, v. 13, p. 91-100.
- Kwon, B.D., Joo, J.A. and Kwon, J.H. (1993) Geophysical studies on major faults in the Ogcheon belt: gravity survey on the faults at Muan and Haenam areas. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 29, p. 281-290.
- Kwon, S.-T. and Ree, J.-H. (1997) A note on the age of the Honam Shear Zone. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 33, p. 183-188.
- Lee, D.S. Edition (1987) *Geology of Korea*. Kyohak-sa, Chapter 9.
- Lee, B.J. (1992) Deformation related to dextral ductile strike-slip movement at the northern part of Hwasun coal field. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 28, p. 40-51.
- Lee, Y.S. and Min, K.D. (1995) Paleomagnetic study for tectonism on the Okcheon Zone since Mesozoic. *Economic and Environmental Geology*, v. 28, p. 493-501.
- Nakazawa, K., Yu, K.M. and Tokuoka, T. (1982) The Ogcheon geosynclinal belt and the Hida metamorphic belt. *The Memoirs of the Geological Society of Japan*, v. 21, p. 91-101.
- Oh, C.W., Kim, S.T. and Lee, J.H. (1995) The metamorphic evolution in the southwestern part of the Okchon metamorphic belt. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 31, p. 21-31.
- Reedman, A.J. and Flecher, C.J.N. (1976) Tillites of the Ogcheon Group and their stratigraphic significance. *Journal of Geological Society of Korea*, v. 12, p. 107-112.
- So, C.S. and Kim, S.M. (1975) Geochemistry origin, metamorphism of mafic metamorphic rocks in the Ogcheon Geosyncline Zone. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 11, p. 115-138.
- Son, C.M. (1970) On the geologic age of the Ogcheon Group. *Journal of Korean Institute Mining Geology*, v. 3, p. 9-16.
- Teufel, L.W. (1980) Strain analysis of superposed deformation using calcite twin lamellae. *Tectonophysics*, v. 65, p. 291-309.
- Tullis, T.E. (1980) The use of mechanical twinning in minerals as a measure of shear stress magnitude. *Journal of Geophysical Research*, v. 85, p. 6263-6268.
- Turner, F.J. (1953) Nature and dynamic interpretation of deformation lamellae in calcite of three marbles. *American Journal of Science*, v. 251, p. 276-98.
- Yanai, S., Park, B.S. and Otoh, S. (1985) The Honam shear zone (South Korea): Deformation and tectonic implication in the Far East. *Scientific papers College Arts and Science, University of Tokyo*, v. 35, p. 181-210.
- Yin, A. and Nie, S. (1993) An indentation model for the North China and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault system, East Asia. *Tectonics*, v. 12, p. 801-813.