

# 조선 누층군 정선 석회암내의 방해석 쌍정에 나타난 고응력장 연구 Paleostress Measurements from Calcite Twin in the Jeongseon Limestone of the Joseon Supergroup

장 보 안 (Bo An Jang)  
강 성 승 (Seong Seung Kang)

강원대학교 지구물리학과  
Komamoto University

## 요약 / ABSTRACT

조선누층군의 정선석회암에서 18개의 정향시료를 채취하여 쌍정이 잘 발달한 10개의 시료에 대하여 방해석 c-축의 방향 및 경사, e 쌍정면의 방향 및 경사, 쌍정의 평균 두께 및 갯수, 방해석 입자의 크기 등을 측정하였다. 측정된 자료들은 Calcite Strain Gauge(CSG) 프로그램에 입력되어 쌍정의 변형률, 평균 두께, 치밀도 및 고응력장의 상대적 크기 및 방향 등을 계산하였다. 쌍정의 변형률은 0.801%~10.927%, 평균 두께는 0.43 $\mu$ m~2.03 $\mu$ m, 치밀도는 33.5~113.4쌍정/mm의 범위를 보인다. 쌍정의 변형률, 치밀도 및 두께에 의한 변성온도 계산결과 대부분의 시료에서 70 $^{\circ}$ C 이하를 보여, 정선 석회암내의 방해석 쌍정들은 2.3km 보다 낮은 심도에서 생성된 것으로 판단된다. 응력장의 방향은 5개의 시료에서 2방향을 보이는 반면에 5개의 시료에서는 한 방향을 보이고, 대부분의 시료에서 최대 주응력이 수평이고 최소 주응력이 수직이어서 역단층을 유발하는 응력장과 동일하다. 압축응력은 E-W와 NW-SE의 방향성이 가장 우세하고 N-S와 NE-SW의 방향성도 보인다. 본 연구에서 측정된 고응력장과 연구지역 인근에서 지질구조나 다른 방법에 의하여 규명된 고응력장과 비교할 때 E-W 방향의 고응력장은 고생대 사이루리아기에서 중생대 트라이아스기까지 장기간에 걸쳐서 작용한 고응력장을 반영하거나 사이루리아기부터 송림변동이전까지 작용한 고응력장을 나타낼 두가지의 가능성을 보여준다. NW-SE 방향의 최대 수평 응력은 쥬라기에 발생한 대보조산운동의 기간 중의 고응력장을 반영하는 것으로 사료된다.

Eighteen oriented samples from the Jeongsun limestone of the Joseon Supergroup are collected. The orientations of C-axis of calcite and e twin plane, the average thickness, numbers of twins and the widths of calcite grains in 10 samples are measured. Then, the twin strain, mean width, intensity of twin and relative magnitude and orientations of principal stresses are calculated using Calcite Strain Gauge program. Twin strain, mean width and intensity range between 0.801%~10.927%, 0.43 $\mu$ m~2.03 $\mu$ m and 33.5~113.4twim/mm, respectively. Metamorphic temperatures calculated from twin show below

70°C, indicating that twins were developed within 2.3km depth. In five samples, two events with different orientations of principal stress produced calcite twins, while only one event produced calcite twins in five samples. The direction of the maximum stress is almost horizontal and the minimum is almost vertical, indicating that the stress regime is identical with thrust fault. E-W and NW-SE are the most dominant directions of compressive stress and N-S and NE-SW directions are also shown. Comparison between paleostress orientations measured in the study and others indicates that the maximum horizontal stress oriented to E-W may represent the paleostress of period either from the Silurian to the Triassic or from the Silurian to the Permian. Paleostress oriented to NW-SE may be the major direction of stress during the Daebo orogeny.

### 서론

결정질 석회암내에서 매우 흔하게 관찰되는 방해석 쌍정은 약 10MPa의 매우 낮은 차응력(differential stress)하에서 역학적 변형에 의하여 생성된다(Turner, 1953; Tullis, 1980). 이때 생성되는 방해석 쌍정은 원자나 이온층의 상대적 변위를 유발하는 입자내 이동(intercrystalline gliding)의 결과로, 방해석 자체와는 다른 결정축을 가지게 된다. 따라서 방해석 쌍정은 현미경하에서 소광축이 다르게 되어 쉽게 판별된다.

방해석 쌍정의 이동은 결정면의 기호가  $[01\bar{1}2]$ 인 e면내에 한정되며, 이동의 방향은 e면과 결정면 기호가 r인  $[10\bar{1}1]$  면이 만나서 이루는 선을 따라서 발생하고(그림 1) 이때 발생하는 변형률은 부피의 변화가 없는 단순 전단변형으로 취급된다. 단순 전단변형은 크기가 같은 압축응력과 인장응력이 직각으로 작용할 때 압축응력 및 인장응력 축과 45°의 각도를 이루게 된다. 또한 방해석 입자에 작용한 응력과 e면의 수직선, 이동의 방향 및 방해석의 결정의 c-축은 한 평면에 존재하게 되며 각각의 관계는 그림 2와 같다.

Turner(1953)는 위의 관계를 이용하여 각각의 쌍정면에서 압축응력 및 인장응력의 방향을 계산한 후, 압축응력 및 인장응력의 방향을 평사투영하여 최적의 압축응력 및 인장응력의 방향을 계산하는 Turner Dynamic Analysis(TDA)를 개발하였고, 많은 연구자들에 의하여 고응력장의 연구에 TDA법이 이용되었다(Friedman and Conger, 1964; Friedman and Stearns, 1971, Rowe and Rutter, 1990). TDA가 개발한 이후 더욱 진보된 고응력장 및 변형을 측정법들이 개발되었는데, Spang(1972)

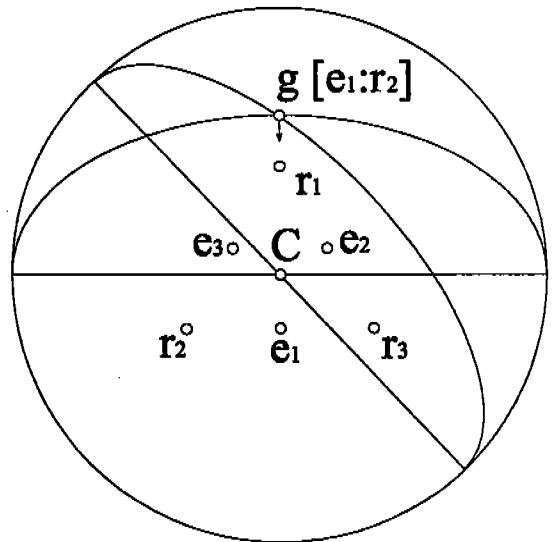


Fig. 1. Crystallography of twin glide in calcite. C is the optic axis of calcite and  $e_1, e_2$  and  $e_3$  are poles of e  $[01\bar{1}2]$  plane and  $r_1, r_2$  and  $r_3$  are poles of the r  $[10\bar{1}1]$  plane. Twin glide occurs parallel to g, the line of intersection of the e and r plane.

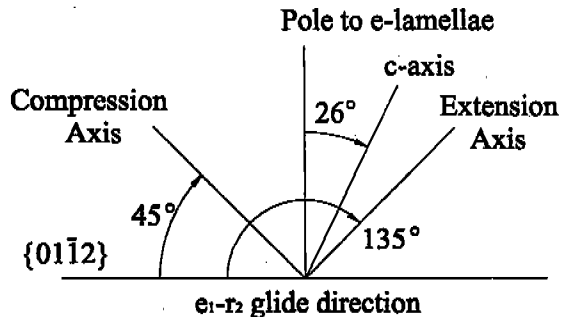


Fig. 2. Relationship of the principal stress axes to the geometry of the calcite twin lamellae.

은 텐서를 이용한 Numerical Dynamic Analysis에 의한 주응력의 상대적인 크기와 방향을 결정하는 방법을 개발하였으며, Groshong(1972)은 쌍정의 두께 및 갭수를 이용하여 쌍정이 생성되면서 발생한 전단 변형률의 주변형률 크기와 방향을 Strain Gage Technique을 이용하여 계산하였다. 또한 최근에는 쌍정이 생성된 방해석 입자와 쌍정이 생성되지 않은 입자의 방향을 측정하여 응력장의 절대적인 크기를 측정하려는 시도도 되고 있으나 실험실 수준의 개발단계로 앞으로 더 연구가 필요한 부분이다(Jamison and Spang, 1976; Laurent et al., 1981; Laurent et al., 1990; Lacombe and Laurent, 1992).

쌍정은 동일한 전단응력하에서도 생성온도에 따라 형태가 달라지거나 두께의 차이가 발생한다. 실내실험에 의한 연구 결과 낮은 온도에서 생성된 방해석 쌍정은 여러개의 얇은 쌍정이 생성되는 반면에 높은 온도에서 생성되는 쌍정은 소수의 두꺼운 쌍정이 생성된다(Groshong, 1974, Heard, 1963). Ferrill(1991)은 프랑스 동부의 Subalpine Chain 석회암층에서 탄화 반사도(vitrinite reflectance)와 일라이트 결정도 (illite crystallinity)를 이용하여 측정된 속성온도와 쌍정의 변형률, 평균 두께 및 평균 치밀도를 비교하여 쌍정이 생성될 당시의 온도를 추정하였다.

본 연구에서는 하부고생대의 조선누층군 정선석회암내의 방해석 쌍정을 측정하여 쌍정의 생성에 작용한 고응력장의 방향과 쌍정이 생성될 당시의 온도를 규명하고자 한다. 방해석 입자의 c-축과 쌍정 e [01̄12] 면을 분석하여 고응력장의 방향성을 규명하였으며 쌍정의 평균 변형률, 두께 및 치밀도 등을 계산하여 쌍정의 생성 온도를 추정하였다. 본 연구에서 쌍정을 이용하여 규명된 고응력장을 기 연구된 고응력장의 방향성과 비교하여 연구지역에서의 방해석 쌍정을 생성시킨 고응력장의 시기를 규명하였다.

### 응력장 계산의 배경이론

방해석에 서로 직각인 압축응력과 인장응력이 작용할 때 발생하는 단순 전단변형률을 모아원으로

나타내면 그림 3과 같고, 이때의 전단변형률을 압축응력과 인장응력의 기준좌표축에 나타내면 제2차 텐서의 형태로 나타난다.

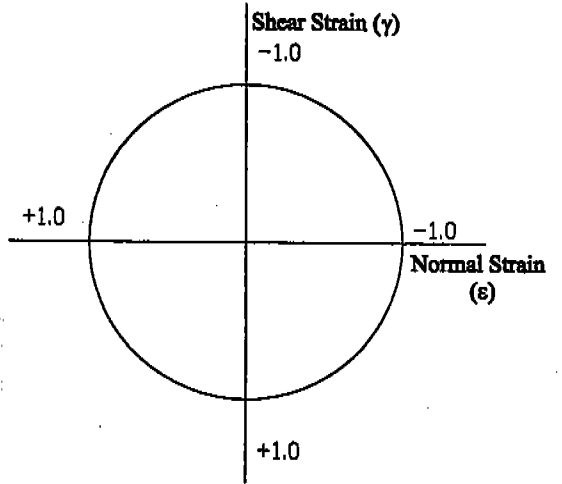


Fig. 3. Mohr circle of infinitesimal strain for calcite twin lamellae: compression = positive, extension = negative, right-hand shear = positive, left-hand shear = negative. Figure was taken from Spang(1972).

$$\epsilon_{\alpha\beta} = \begin{vmatrix} +1.0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

(1) 식은 좌표축이 압축응력과 인장응력인 경우에 표시한 전단변형률이므로, 박편에서 쌍정의 측정에 이용된 좌표축으로 전단변형률을 나타내기 위해서는 좌표축을 회전시켜야 한다. (1)식은 제2차 텐서이므로 텐서의 회전을 이용하여 박편의 좌표축에서 계산된 전단변형률은

$$\epsilon_{ij} = \begin{vmatrix} p^2 - p'^2 & pq - p'q' & pr - p'r' \\ pq - p'q' & q^2 - q'^2 & qr - q'r' \\ pr - p'r' & qr - q'r' & r^2 - r'^2 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

로 표시된다. 단 p, q, r은 압축응력의 좌표계에 대

한 방향 코사인이고,  $p'$ ,  $q'$ ,  $r'$ 은 인장응력의 좌표계에 대한 방향 코사인이다. (2)식은 하나의 입자에서 측정된 쌍정의 전단변형률이다. 그러나 하나의 시료에서 일반적으로 50개 이상의 입자를 측정하게 되므로, 식 (2)와 같은 행렬이 50개 이상 만들어지게 되어 50개 이상의 압축응력 및 인장응력의 방향이 나오게 된다. 그러나 시료에 작용한 응력은 한 방향이므로 (2)식에서 계산된 응력장의 최적값을 찾아야된다. Spang(1972)은 각각의 입자에서 계산된 식 (2)의 모든 행렬을 합한 후 쌍정 세트의 수로 나누어 전체 응력 텐서 (bulk stress tensor)를 만들었다. 이러한 전체 응력 텐서는 주응력의 상대적 크기와 방향을 나타내는 타원이 되며, 주응력의 상대적 크기와 방향은 고유 값(eigenvalue)과 고유 벡터(eigenvector)를 이용하여 구한다.

### 변형률 계산의 이론적 배경

방해석 쌍정에 발생한 변형률 계산은 주로 Groshong(1972)에 의하여 이루어 졌으며, 본 연구에서 사용된 CSG 프로그램의 변형률 계산의 이론적 배경이다. 만약 직각인 방해석이 응력을 받아 그림 4와 같이 변형되었다면 쌍정이 생성되면서 발생한 전단변형률은

$$\Gamma = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^n t_i \tan \frac{\alpha}{2} = \frac{0.347}{t} \sum_{i=1}^n t_i \dots (3)$$

가 된다. 단  $t$ 는 방해석 입자의 폭이고,  $t_i$ 는 쌍정의 두께이며,  $\alpha$ 는 쌍정과 원래 광물이 이루는 각으로 Handin and Griggs(1951)에 의하면 38.17°이다. 이때 하나의 쌍정 세트에서 측정된 전단변형률,  $\Gamma_{eg}$ 를 박편에서 쌍정의 측정에 이용된 좌표축상에 표시하면

$$\begin{aligned} \Gamma_{eg} = & (l_e l_g - n_e n_g) \epsilon_x + (m_e m_g - n_e n_g) \epsilon_y \\ & + (l_e m_g + m_e l_g) \Gamma_{xy} + (m_e n_g + n_e m_g) \\ & \Gamma_{xy} + (n_e l_g + l_e n_g) \Gamma_{zx} \end{aligned} \dots (4)$$

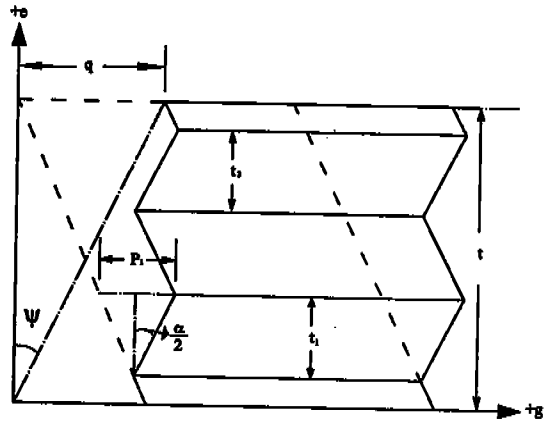


Fig. 4. Shear strain in a twinned calcite grain. The values  $t_1$  and  $t_2$  are the widths of the twins;  $t$  is the widths of the host grain perpendicular to the twin planes;  $\alpha$  is the angle of rotation of the grain edge from the untwinned position.  $\psi$  is the change of an original right angle.

이 된다. 단  $(l_e, m_e, n_e)$  과  $(l_g, m_g, n_g)$ 는 각각  $e$ 와  $g$  축의 방향 코사인이다(그림 1). 위의 식 (4)에서 구하고자 하는 값은 변형률  $\epsilon_x, \epsilon_y, \Gamma_{xy}, \Gamma_{yz}, \Gamma_{zx}$ 로 5개의 쌍정을 측정하면 정확한 해를 구할 수 있다. 그러나 방해석 쌍정의 측정에서는 하나의 시료에서 50개 이상을 측정하므로 유일해가 존재하지 않는 방정식(overestimated equation)이 되고, 쌍정이 생성되면서 발생한 변형률의 최적값은 최소자승법(least square method)를 이용하여 구한다.

각각의 쌍정 세트에서 측정된 변형률을

$$\Gamma_i = \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \beta_4 x_{i4} + \beta_5 x_{i5} \dots (5)$$

의 형태로 나타내면,  $\Gamma_i$ 는 쌍정 세트  $i$ 에서 측정된 전단변형률이고,  $\beta_1 = \epsilon_x, \beta_2 = \epsilon_y, \beta_3 = \Gamma_{xy}, \beta_4 = \Gamma_{yz}, \beta_5 = \Gamma_{zx}$ 이며,  $x_{ij}(j=1 \sim 5)$ 는 쌍정 세트  $i$ 에서 측정된 방향 코사인의 값들이다(식 4 참조).

하나의 시료에 대하여 50개의 쌍정을 측정하게

되면, 50개의 식(5)를 얻게되어 50×5의 행렬이 계산되며 최소자승법을 이용하여 구한 쌍정의 변형률은

$$\beta_i = (X'X)^{-1}X'Y \dots\dots\dots (6)$$

로 나타난다. 단 X는 식 (5)의  $x_{ij}$ 로 이루어진 행렬이고, Y는 측정된 변형률,  $\Gamma_i$ 로 이루어진 행 행렬(column matrix)이며, X'는 행렬 X의 전치행렬(transpose)이고, 역첨자 -1은 역행렬(inverse)를 나타낸다. 식 (6)를 풀면 쌍정에 의한 변형률이 구해지고 주변형률의 크기 및 방향은 아래의 식 (7)의 행렬에서 고유 값 및 고유 벡터를 이용하여 구한다.

$$\begin{vmatrix} \epsilon_x & \Gamma_{xy} & \Gamma_{xz} \\ \Gamma_{yx} & \epsilon_y & \Gamma_{yz} \\ \Gamma_{zx} & \Gamma_{zy} & \epsilon_z \end{vmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

### 지 질 개 요

정선형 조선누층군은 하부고생대 조선누층군의 5 가지 형태중의 하나로 두꺼운 탄산암암으로 구성되어 있으나, 화석이 거의 존재하지 않고 암상의 차이로 인하여 다른 형의 조선누층군과는 충서적으로 잘 대비되지 않는다. 정선형 조선누층군은 오도비스기의 정선 석회암층과 행매층, 사일루리아기의 회동리층으로 이루어져 있으며, 상부고생대의 평안계 퇴적암이 부정합으로 피복하고 있다(그림 5). 연구지역 인근인 여량-임계지역의 지질구조에 의하면 정선형 조선누층군은 퇴적된 이후 여러 번의 지구조 운동에 의하여 습곡작용을 포함한 많은 변형작용이 일어났음을 보여준다(김 정환외, 1996)

정선 석회암층은 층리가 잘 발달된 회색 내지 청회색의 결정질 석회암으로 구성되어 있으며, 회색과 암회색의 돌로마이트질 석회암을 협재한다. 이 지층의 두께는 복잡한 지질구조 때문에 정확히 측정하기는 어려우나 300m 이상으로 추정된다. 행매층은 정선 석회암층을 정합적으로 피복하고 있으며 담황갈색의 역질 석회암으로 구성되어 있다. 이 지층 내에는 백색 내지 청회색의 세립 석회암층이 협

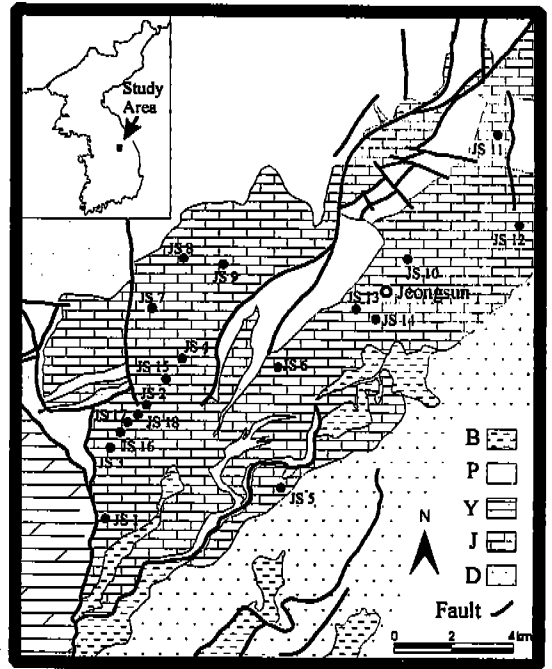


Fig. 5. Geological map of the study area and the locations of sampling. B : Jurassic Bansong formation, P : Pyeongan Supergroup, Y : Yeongweol type Joseon Supergroup, J : Jeongsun type Joseon Supergroup, D : Duwibong type Joseon Supergroup.

재되어 있으며 소량의 점판암, 사암, 석회암의 역이 포함되어 있다. 회동리층은 행매층을 정합적으로 피복하고 평안계 퇴적층에 의하여 부정합으로 덮혀 있다. 주로 청회색, 담회색 내지 유백색의 세립질 석회암으로 구성되어 있으며 수매의 돌로마이트질 석회암이 협재되어 있다.

### 연구 방법

정선석회암의 노두로부터 18개의 시료를 채취 하였으나 단지 10개의 시료에서만 쌍정이 관찰되었다(그림 5). 시료채취는 연구지역을 대표할 수 있도록 시료채취 지역을 가능한 한 골고루 분산시켰으며, 시료를 노두에서 채취하기전에 편평하고 평행하지 않는 두 면의 주향과 경사를 측정하여 시료의 방향을 노두에서와 같이 유지하는 정향시료법

(oriented sampling)을 이용하였다. 또한 시료 채취 시 층리면의 주향과 경사를 측정하여 층리면의 수평에 이용하였다. 각각의 시료에서 수평방향과 수직방향의 2개의 박편을 제작하였다. 박편의 두께는 쌍정을 용이하게 측정하기 위하여 일반박편의 1/3 ~ 1/4 두께인 7~10 $\mu\text{m}$ 으로 하였으며, 다이아몬드 연마계를 이용하여 박편의 표면을 깨끗하게 연마하였다.

쌍정의 측정은 일본 Nikon사 제품의 4-축 만능 재료대(Universal stage)를 이용하였으며, 수평 및 수직의 박편에서 25개씩의 입자를 선정하여 총 50개의 입자에 발달한 쌍정을 측정하였다(Groshong, 1974). 방해석 쌍정을 이용한 고응력장의 방향 및 변형률의 분석은 Georgia Southern University의 M.A. Evans에 의하여 개발된 Calcite Strain Gauge(CSG) 프로그램을 이용하였다(Evans and Groshong, 1994).

CSG 프로그램을 이용한 쌍정의 분석은 측정된 자료의 입력, 결과 출력 및 자료의 보정으로 나뉘어진다. CSG 프로그램에 입력되는 측정변수는 각각의 방해석 입자에서 측정된 c-축의 방향 및 경사, 쌍정면의 주향 및 경사, 한 입자에 생성된 쌍정의 갯수 및 평균 두께, 방해석 입자의 크기이며, 쌍정의 갯수 및 두께는 두께가 1 $\mu\text{m}$  이상의 두꺼운 쌍정과 1 $\mu\text{m}$  이하의 얇은 쌍정을 구별하여 입력한다. 또한 쌍정은 수평과 수직으로 제작된 서로 직각인 두개의 박편에서 서로 다른 기준의 좌표축상에서 측정되었다. 그러므로 수직의 박편에서 측정된 자료와 수평의 박편에서 측정된 자료를 종합하기 위해서는 수직의 좌표축에서 측정된 자료에 대하여 방향 및 경사의 수정이 필요하게 되고, 이러한 방향의 수정은 수직의 박편에 적용된 좌표축의 방향 코사인을 이용하여 실시한다.

위의 입력자료에 의하여 계산되어 출력되는 결과는 크게 4 부분으로 구성되어 있다. 첫번째 부분은 자료입력의 정확성을 확인하기 위하여 입력된 자료를 출력하는 부분이며, 두번째 부분은 각 입자의 c-축의 방향, 쌍정면의 수직선의 방향, c-축과 쌍정면의 수직선이 이루는 각도, 각각의 쌍정에서 계산된 압축응력의 방향 및 인장응력의 방향으로 구성되어 있다. c-축과 쌍정면의 수직선이 이루는 각도는 쌍정과 c-축 측정의 정확성을 지시하여, 만

약 이 각도가  $26.5^{\circ} \pm 3^{\circ}$ 를 이루지 못하면 이 입자에서 측정된 자료는 다시 측정하거나 폐기되어야 한다. 세번째 부분은 각각의 입자에서 측정된 응력장의 방향에서 Spang(1972)의 수치해석(numerical dynamic analysis)에 의한 주응력의 상대적 크기 및 방향과 Groshong(1974)의 최소자승법(least square analysis)에 의한 주변형률의 크기 및 방향, 쌍정의 변형률(twin strain), 쌍정의 평균 치밀도(mean twin intensity) 및 쌍정의 평균두께(mean twin width)에 대한 결과로 이루어져 있다. 쌍정의 변형률, 평균 치밀도 및 평균 두께는 쌍정이 생성될 때의 온도를 추정하는 자료로 이용된다(Ferrill, 1991). 네번째 부분은 세번째 부분에서 계산된 응력장과 생성된 쌍정의 적합성 여부를 검증하는 부분으로, 양의 기대값을(Positive Expected Value, PEV) 가지는 쌍정은 계산된 응력장과 일치하는 쌍정이나, 음의 기대값을(Negative Expected Value, NEV) 보이는 쌍정은 계산된 응력장하에서는 생성되지 않았을 쌍정임을 지시한다. 일반적으로 측정 오차 등으로 인하여 약간의 입자에서 NEV는 나타나지만, 만약 하나의 시료에서 NEV를 보이는 쌍정이 40%에 가까운 값을 나타내면 2번 이상의 응력장이 작용하였음을 지시한다(Groshong, 1972; Teufel, 1990). 이러한 경우에는 PEV를 보이는 쌍정과 NEV를 나타내는 쌍정을 분리하여 다시 계산하여 2번 이상 작용한 응력장들을 구별할 수 있다. 일반적으로 NEV를 나타내는 쌍정의 숫자가 10~30% 정도인 경우, 전체 쌍정에서 가장 큰 편차를 보이는 20%의 쌍정을 제거하면 결과가 향상되고(Groshong, 1974; Groshong et al., 1984) CSG 프로그램에서는 자동적으로 이러한 기능을 수행한다.

## 방해석 쌍정의 측정 결과

대부분의 시료에서 한 방향의 쌍정과 두 방향의 쌍정이 관찰되는 방해석이 혼재하고 있으나 JS15 시료에서는 한 방향의 쌍정만 발달한 방해석이 대부분이다. 또한 두께가 1 $\mu\text{m}$  이하인 얇은 쌍정만 발달한 방해석과 두께가 1 $\mu\text{m}$  이상인 두꺼운 쌍정만 발달한 방해석이 혼재하고 있으나 얇은 쌍정과 두꺼운 쌍정이 동시에 발달한 방해석도 부분적으로

분포한다 (그림 6). 쌍정의 형태는 낮은 온도를 지시하는 직선형의 쌍정이 거의 대부분이나 부분적으로 높은 온도를 지시하는 조각형의 쌍정도 관찰된다(Burkhard, 1984).

표 1은 CSG 프로그램에 의한 변형을 분석 결과이다. 5개의 시료에서 40% 정도의 NEV 값을 보여, 이들 시료에 대해서는 PEV를 보이는 쌍정과 NEV를 나타내는 쌍정을 분리하여 분석하였다. 변형을 ( $\sqrt{J_2}$ )은 0.80%~10.92% 범위를 보이나, JS1을 제외한 대부분의 시료에서 2%~6% 범위에 속한다. 쌍정의 평균 두께는 0.43 $\mu\text{m}$ ~2.03 $\mu\text{m}$ 이나 1 $\mu\text{m}$  이하의 두께를 보이는 쌍정이 우세하고, 쌍정의 치밀도는 33.5~113.4 쌍정/mm이나 대부분의 시료에서 60 쌍정/mm 이하를 보여 조선누층군 풍촌석회암내에 발달한 방해석 쌍정에 비하여 높은 변형율과 넓은 두께를 나타낸다(장보안과 강성승, 1998).

응력장은 5개의 시료에서 (JS2, JS4, JS7, JS15 및 JS16) NEV 값이 40%이하인 반면에 5개의 시료에서는 (JS1, JS6, JS9, JS13 및 JS14) NEV 값이 40%에 가까운 값을 보여 최소한 두번 이상의 응력장이 방해석 쌍정을 생성시켰음을 지시한다. 전체적으로 모든 시료에서 응력장의 방향은 상당한 경사를 보이나, 6개의 응력장은 최대 압축 응력이, 5개의 응력장에서는 중간 압축 응력이, 2개의 응력장에서 최소 압축 응력이 30° 이하의 낮은 경사각을 보여 상당히 복잡한 응력장이 작용하였음을 보여준다. 전체적으로 최소 압축 응력이 가장 급한 경사를 보여 (15개의 응력장에서 9개의 응력장) 역단층을 유발하는 응력장이 우세하게 작용하였음을 나타낸다.

그림 7은 30° 이하의 경사를 보이는 최대 수평

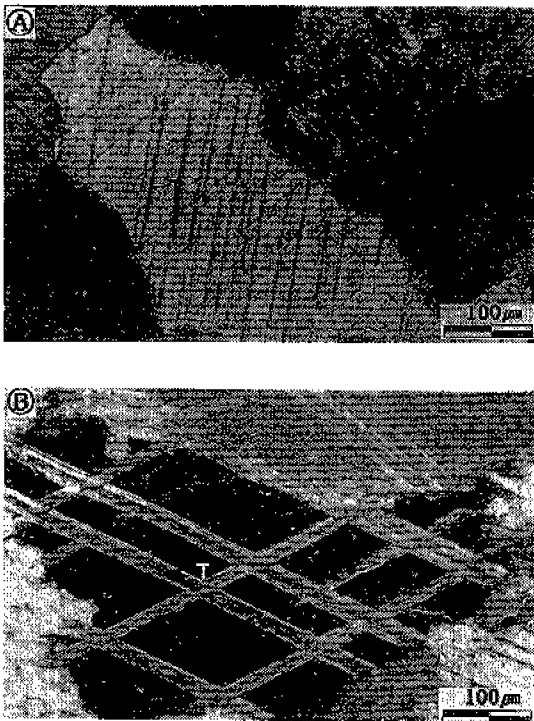


Fig. 6. Microphotograph of twins in the Jeongsun limestone, showing twins developed along two directions (A) thin twins and (B) thick twins.

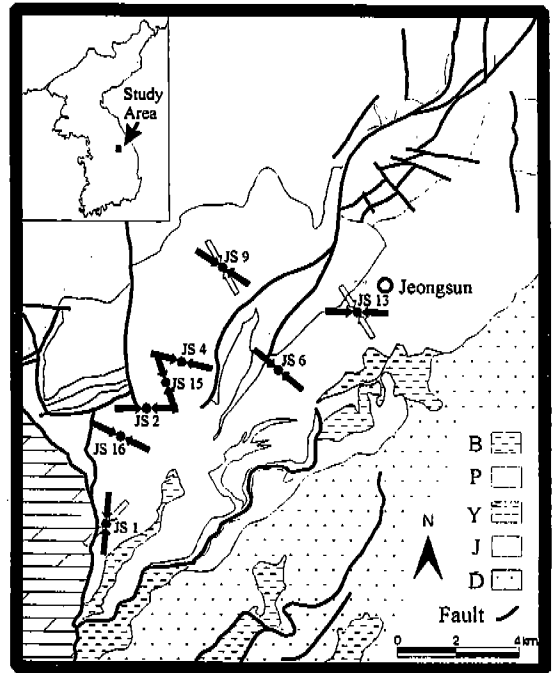


Fig. 7. Orientations of the maximum horizontal stress. E-W and NW-SE are the most dominant directions. Solid arrows indicate orientations measured from LDR and PEV twins. Open arrows indicate orientations measured from NEV twins

주응력을 시료채취 지점에 표시한 것으로 5개의 응력장은 E-W의 방향을, 4개의 응력장은 NW-SE 방향을 보이나 시료 JS-1에서는 N-S와 NE-SW의 최대 수평 주응력의 방향을 보인다. JS-1 시료는

다른시료에 비하여 매우 높은 쌍정의 변형율을 보이고 또한 응력장의 방향이 상이하여 후기에 작용한 변형작용의 영향으로 사료된다 (표 1 참조).

Table 1. Calcite twin data.  $e_1$ ,  $e_2$  and  $e_3$  are percent elongations for the maximum, intermediate and minimum elongation directions, respectively. CP refers to the cleaning procedure: LDR= 20% largest deviations removed, PEV=positive expect values, NEV=negative expected values.  $\sqrt{J_2}$  is the square root of the second invariant of strain.

Sample	CP	Principal Strain (%)			Direction of Principal Stress			Width ( $\mu\text{m}$ )	Intensity (twin/mm)	$\sqrt{J_2}$
		$e_1$	$e_2$	$e_3$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$			
JS1	PEV	8.11	2.86	-10.92	115/34	5/26	247/45	2.03	67.4	9.83
	NEV	8.41	1.02	-9.44	225/18	323/24	102/59	1.35	46.1	8.98
JS2	LDR	2.37	1.26	-3.64	89/19	192/34	336/49	0.56	90.2	3.21
JS4	LDR	6.02	0.02	-6.04	231/56	104/22	3/25	1.47	57.7	6.03
JS6	PEV	3.21	0.80	-4.02	214/34	310/09	52/54	1.42	33.5	3.69
	NEV	0.86	-0.05	-0.80	311/42	108/45	207/14	0.43	35.5	0.83
JS7	LDR	2.86	0.50	-3.36	299/37	182/31	65/37	0.75	46.7	3.15
JS9	PEV	4.63	0.47	-5.10	303/21	184/52	46/30	0.54	113.4	4.49
	NEV	1.31	0.28	-1.60	42/39	151/22	263/43	0.28	75.3	1.48
JS13	PEV	4.85	1.39	-6.24	173/33	271/13	19/54	1.21	51.8	5.68
	NEV	1.96	0.20	-2.16	328/13	63/22	210/65	0.57	41.4	2.07
JS14	PEV	3.63	-1.13	-2.50	255/35	129/40	10/30	0.90	41.8	3.23
	NEV	3.16	0.33	-3.50	325/56	121/32	218/11	0.59	40.0	3.35
JS15	LDR	3.54	-0.02	-3.52	342/28	80/15	195/57	0.53	90.2	3.53
JS16	LDR	6.17	0.61	-5.56	115/29	319/59	211/11	0.99	89.6	5.90

### 방해석 쌍정의 생성 온도

Ferril(1991)에 의하면 쌍정 변형률은 약 190°C까지는 10% 이하로 거의 변화가 없는 반면에 190°C이상의 온도에서는 10% 이상의 값을 보인다. 또한 평균 쌍정의 치밀도는 150°C 이하의 온도에서는 분산된 형태를 보이나 150°C 이상의 온도에서는 50 쌍정/mm 이하의 값을 보이며, 평균 쌍정의 두께는 150°C 이하의 온도에서는 1 $\mu\text{m}$  이하의 값을 보이는 반면에 150~190°C 사이의 온도에서는 1~3 $\mu\text{m}$  정도의 값을, 200°C 이상의 온도에서는 3 $\mu\text{m}$  이상의 값을 보여 온도에 의한 영향을 매우 잘 보여준다.

본 연구에서 측정된 쌍정의 두께, 집중도 및 변

형률은 표 1에 나타나 있으며, 그림 8은 Ferrill(1991)과 동일한 형태의 그림으로 정선 석회암에서의 쌍정의 변형률, 평균치밀도 및 평균 두께와 석회암층의 매물에 의한 변성 온도의 관계를 보여준다. 모든 시료에서 변성온도는 150°C 이하를 지시하며, 약 5개의 시료에서 하나 내지 두개의 항목에서 70°C~150°C 범위를 보이나 다른 항목에서는 70°C~150°C의 범위를 보이지는 않아서 대부분의 시료는 70°C 이하의 온도에서 방해석 쌍정이 생성되었음을 지시한다. 70°C의 쌍정 생성 온도는 정상적인 지온증온을 30°C/km를 가정하면 쌍정은 약 2.3 km보다 얇은 심도에서 생성되었음을 지시한다.



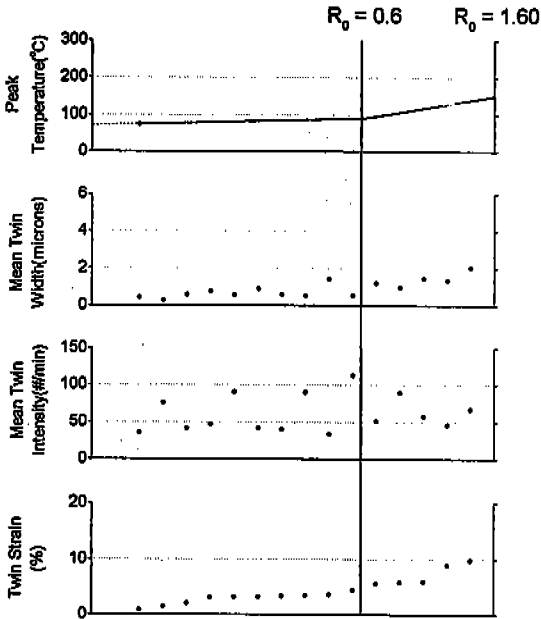


Fig. 8. Relationship between metamorphic temperature, twin strain ( $\sqrt{J_2}$  in table 1), mean twin intensity and mean twin width in each sample.  $R_o$  is vitrinite reflectance value.  $R_o=0.6$  and  $R_o=1.6$  represent that metamorphic temperatures are about  $70^\circ\text{C}$  and  $150^\circ\text{C}$ , respectively.

### 고응력장의 방향과 작용 시기

정선 석회암내의 방해석 쌍정을 생성시킨 고응력장은 E-W 및 NW-SE 방향의 최대 수평 응력이 가장 우세하게 작용하였고 부분적으로 N-S의 최대 주응력 및 NE-SW의 최대 수평 주응력이 작용하였다(그림 7).

퇴적물이 퇴적되어 침강할 때 응력장은 일반적으로 정수압을 보인다. 이러한 응력장에서는 방해석 쌍정은 생성되지 않으며 또한 퇴적물이 고결되기 이전의 상태이므로 지구조적인 응력장은 각각의 입자에 전달되지 않는다. 그러나 퇴적층이 고결된 후 상부의 퇴적층에 침식이 발생하면 정수압 상태를 유지하지 못하고 수평방향으로 압축응력이 발생하게 된다. 침식에 의하여 발생하는 수평방향의 압

축응력의 크기는  $\Delta\sigma = \left(\frac{\nu}{1-\nu}\right)\Delta\sigma_v$ 로 계산된다.

단  $\nu$ 는 포아송 비이고  $\Delta\sigma_v$ 는 수직응력의 변화량으로  $-\rho gh$  ( $\rho$ : 밀도,  $g$ : 중력가속도,  $h$ : 깊이)이다. 만약  $\nu=0.25$ ,  $\rho=2600\text{kg/m}^3$ 로 가정하면 약 1.2km의 침식은 퇴적층내에 약 10MPa의 차응력을 유발한다.

Lee and Ko(1995)에 의하면 평안누층군이 퇴적되기 전에 두위봉형의 조선누층군에는 최소한 1 km의 침식이 발생한 것으로 보고하고 있다. 정선 석회암의 상부층인 회동리층의 퇴적시기가 사이루리아기 초기이며, 후기 석탄기에 퇴적된 평안누층군과는 약 100 My 이상의 시간차가 존재하고 또한 정선형 조선누층군의 구성암석이 풍화에 취약한 석회암이므로 정선형 조선누층군 또한 두위봉층과 같이 약 1.2km 정도의 침식을 받았다고 가정하여도 타당한 것으로 판단된다. 그러므로 정선 석회암 상부층이 1.2km 정도의 침식을 받았다면, 정선 석회암내에는 10 MPa 이상의 차응력이 생성되고, 10 MPa의 차응력은 방해석에 쌍정을 생성시키기에 충분한 응력이므로, 정선석회암의 방해석 쌍정은 이 시기부터, 즉 사이루리아기 후기 내지 데본기 초기부터 생성되기 시작할 것이다. 또한 Zhai et al. (1988)은 중국의 Tongbai mountain 지역의 Ar/Ar 분석을 통하여 남중국 판과 북중국판의 충돌은 사이루리아기부터 시작되었다고 주장하였다. 남중국 판과 북중국판의 충돌은 압축응력장을 발생시키고, 침식에 의한 압축 응력장과 지구조적인 압축 응력장이 합쳐진다면 방해석 쌍정을 생성시키기에 충분한 응력이 될 것으로 사료된다.

고희재(1995)는 괴산지역의 옥천습곡대 지질구조를 통한 고응력장의 연구에서 트라이아스 말기에는 E-W, 주라기 초기에서 중기의 기간에는 NW-SE, 백악기 말기에는 N-S 방향의 주응력이 작용하였다고 주장하였고, 임순복(1981)은 여량지역에서의 드러스트 단층 및 습곡구조의 연구를 통하여 북북서 주향의 드러스트 단층들은 송림변동시에 생성되었고 북동방향의 단층들은 대보 조산운동시에 생성되었음을 보고하여, 송림변동시의 최대 수평 주응력은 동북동인 반면에 대보조산운동시의 최대 수평 주응력의 방향은 북서임을 밝혀내었다. 또한 장보안과 김정애(1996)과 장보안(1995)은 옥천습곡대 및

경기육괴내의 중생대의 화강암에 분포하는 아문 미세균열 및 유체포유물의 측정을 통하여 180Ma 이전에는 E-W의 최대수평 주응력이, 180Ma~100 Ma 사이의 기간에는 NW-SE의 최대수평 주응력이 작용하였다고 발표하였다. 반면에 김정환의 (1996)는 여랑-임계 지역의 지질구조를 통하여 송림변동과 대보조산운동시의 응력장의 방향은 동일하며, 최대 압축응력은 북서방향이라고 주장하였다.

본 연구에서 방해석 쌍정을 통하여 측정된 고응력장의 방향들은 E-W 및 NW-SE의 두 방향이 혼재되어 나타나고 있다. 위의 여러 연구와 본 연구에서 밝혀진 고응력장을 비교하면 NW-SE 방향의 최대압축응력은 대보조산운동을 지시하는 방향임이 확실하다. 그러나 E-W 방향의 최대 압축응력이 작용한 시기는 다음과 같은 두 가지의 가능성을 보인다.

만약 고희재(1995) 및 임 순복(1981)이 주장하는 바와 같이 송림변동시에 E-W 방향의 최대 압축응력이 작용하였다면 1) 석탄기에서 페름기에 걸쳐 퇴적된 평안누층군이 조선누층군과 평행부정합을 이루고 있으며, 2) 석탄기에서 페름기까지는 특별한 구조운동이 보고된 바 없으므로 테본기에서 트라이아스기의 송림변동시까지 동일한 응력장이 장기간에 걸쳐서 작용하였을 가능성이 있다. 그러므로 E-W 방향을 나타내는 방해석 쌍정은 사이루리아기부터 생성되기 시작하여 송림변동시에 가장 우세하게 생성된 것으로 생각된다. 그러나 김 정환의 (1996)가 주장하는 바와 같이 송림변동시에 NW-SE 방향의 최대 압축응력이 작용하였다면 E-W 방향의 최대압축응력은 송림변동 이전 즉 사이루리아기에서 페름기까지의 응력장의 방향을 지시할 가능성이 있다. 이 때 발생한 압축응력은 침식에 의하여 생성되는 압축응력이 가장 큰 영향을 작용할 것이고, Zhai et al.(1998)이 주장하는 바와 같이 남중국 판과 북중국 판의 충돌에 의한 압축응력 또한 E-W 방향일 것으로 사료된다.

## 결 론

조선누층군 정선석회암내의 방해석 쌍정을 측정하여 쌍정이 생성될 당시의 온도와 변형을 일으킨

고응력장을 규명하였다. 10개의 시료에 대하여 방해석 c-축의 방향 및 경사, e 쌍정면의 방향 및 경사, 쌍정의 평균 두께 및 갯수, 방해석 입자의 크기 등을 측정하여, 측정된 자료들을 Calcite Strain Gauge(CSG) 프로그램을 이용하여 쌍정의 변형률, 평균 두께, 치밀도 및 고응력장의 상대적 크기 및 방향등을 계산하였다. 쌍정의 변형률은 0.801% ~ 10.927%, 평균두께는 0.43 $\mu$ m~2.03 $\mu$ m, 치밀도는 33.5~113.4 쌍정/mm의 범위를 보인다. 쌍정의 변형률, 치밀도 및 두께에 의한 변성온도 계산결과 대부분의 시료에서 70 $^{\circ}$ C 이하를 보여, 정선 석회암내의 방해석 쌍정들은 2.3km 보다 낮은 심도에서 생성된 것으로 판단된다. 응력장의 방향은 5개의 시료에서 2방향을 보이는 반면에 5개의 시료에서는 한 방향을 보이고 최대 주응력이 수평이고 최소 주응력이 수직이어서 역단층을 유발하는 응력장과 동일하다. 압축응력은 E-W와 NW-SE의 방향성이 가장 우세하고 N-S 및 NE-SW의 방향성도 보인다. 측정된 고응력장과 연구지역 인근에서 지질구조나 다른 방법에 의하여 규명된 고응력장과 비교할 때 E-W 방향의 고응력장은 사이루리아기에서 트라이아스기 까지 장기간에 걸쳐 작용한 고응력장의 방향을 지시하거나, 사이루리아기에서 송림변동 이전까지의 고응력장을 지시할 가능성이 있다. NW-SE 방향의 최대 수평 응력은 주라기에 발생한 대보조산운동기 작용한 고응력장을 나타내고 있다고 판단되며, N-S 및 NW-SE 방향의 응력장은 비이상적으로 높은 변형율을 고려할 때 국지적인 현상으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(BSRI-95-5403)에 의하여 연구되었고 이에 감사드린다.

## 참 고 문 헌

고희재, 1995, 괴산지역 육천누층군의 지질구조와 구조운동에 관한 연구. 서울대학교 대학원 박사학위논문, 282p.

- 김 정환, 기원서, 서상기, 1996, 태백산지역 북부 여랑-임계지역의 지질구조, 지질학회지, 32, 1-15.
- 임순복, 1981, 정선탄전 남평지역의 지질구조, 지질학회지, 17, 165-168.
- 장보안, 1995, 옥천습곡대 동북부 지역의 화강암체 내에 분포하는 아문 미세균열에 의한 중생대 고응력장. 한국과학재단보고서, 57 p.
- 장보안, 김정애, 1996, 월악산-속리산 일대의 화강암체내에 분포하는 아문 미세균열 및 유체포유물에 의한 중생대 백악기 고응력장, 32, 291-301.
- 장보안, 강성승, 1998, 방해석 쌍정을 이용한 조선 누층군 풍촌석회암의 고응력장 연구, 자원환경지질 (원고준비중)
- Evans, M. A. and Groshong, R. H. Jr., 1994, Microcomputer techniques and applications : a computer program for the calcite strain-gauge technique, J. Struct. Geol., 16, 277-281.
- Ferrill, D. A., 1991, Calcite twin widths and intensities as metamorphic indicators in natural low-temperature deformation of limestone, J. Struct. Geol., 13, 667-675.
- Friedman, M. and Conger, F. B., 1964, Dynamic interpretation of calcite twin lamellae in a naturally deformed fossil, J. Geol., 72, 361-368.
- Friedman, M. and Stearns, D. W., 1971, Relations between stresses inferred from calcite twin lamellae and macrofractures, Teton Anticline, Montana, Geol. Soc. Amer. Bull., 82, 3151-3162.
- Groshong, R. H., Jr., 1972, Strain calculated from twinning in calcite, Geol. Soc. Amer. Bull., 82, 2025-2038.
- Groshong, R. H., Jr., 1974, Experimental text of least-squares strain gage calculation using twinned calcite, Geol. Soc. Amer. Bull., 85, 1855-1864.
- Groshong, R. H., Teufel, L. W., and Gasteiger, C., 1984, Precision and accuracy of the calcite strain gage technique, Geol. Soc. Amer. Bull., 95, 357-363.
- Handin, J. W., and Griggs, D., 1951, Deformation of Yule marble, Predicted fabric changes, Geol. Soc. Amer. Bull. 62, 863-886.
- Heard, H. C., 1963, The effect of large changes in strain rate in the experimental deformation of the Yule marble, J. Geol., 71, 162-195.
- Jamison, W. R. and Spang, J. H., 1976, Use of calcite twin lamellae to infer differential stress, Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 868-872.
- Lacombe, O. and Laurent, P., 1992, Determination of principal stress magnitudes using calcite twins and rock mechanics data, Tectonophysics, 202, 83-97.
- Laurent, P., Bernard, P., Vasseur, C. and Etchecopar, A., 1981, Stress tensor determination from the study of e-twins in calcite, a linear programming method. Tectonophysics, 78, 651-660.
- Laurent, P., Tournet, C. and Laborde, O., 1990, Determining deviatoric stress tensors from calcite twins, applications to monophased synthetic and natural polycrystals. Tectonics, 9, 379-389.
- Lee, Y. I. and Ko, H. K., 1995, Illite crystallinity and fluid inclusion analysis across a paleozoic disconformity in central Korea. submitted in J. Sed. Pet.
- Rowe, K. J. and Rutter, E. H., 1990, Paleostress estimation using calcite twinning, experimental calibration and application to nature, J. Struct. Geol., 12, 1-17.
- Schmid, S. M., Paterson, M. S. and Boland, J. N., 1980, High temperature flow and dynamic recrystallization in Carrara Marble, Tectonophysics, 65, 245-280.
- Spang, J. H., 1972, Numerical method for dynamic analysis of calcite twin lamellae, Geol. Soc. Amer. Bull., 83, 467-472.
- Teufel, L. W., 1990, Strain analysis of experimentally superposed deformation using calcite twin lamellae, Tectonophysics, 65, 291-309.

- Tullis, T.E., 1980, The Use of mechanical twinning in minerals as a measure of shear stress magnitude, *J. Geophys. Res.*, 85, 6263-6268.
- Turner, F. J., 1953, Nature and dynamic interpretation of deformation lamellae in calcite of three marbles, *Am. J. Sci.*, 251, 276-298.
- Zhai, X., Day, H.W., Hacker, B.R. and You, Z., 1988, Paleozoic metamorphism in the Qinling orogen, Tongbai mountains, central China, *Geology*, 26, 371-374.

---

장 보 안

(200-701) 강원도 춘천시 효자동 192

강원대학교 자연대학 지구물리학과

TEL : 0361) 250-8583

FAX : 0361) 244-8580

email : bajang@cc.kangwon.ac.kr

강 성 승

Graduate School of Science and Technology,  
Komamoto University,

2-39-1 Kurokami, Komamoto, 860 Japan

TEL : 81-96-344-2111(ext 3697)