

月岳山北側 古雲里層 方解石 雙晶을 利用한 推定差應力 分析

任明赫* · 金英嚴** · 張泰雨*

Inferred Differential Stress from Twinning in Calcite of Gounri Formation in the Northern Area of Worak-san, Korea

Myeong Hyeok Ihm,* Young Eom Kim** and Tae Woo Chang*

ABSTRACT : Ogchon Supergroup directly contacts with Choseon Supergroup in the northern area of Worak-san, where evidences indicating thrust-fault formed during D_2 -deformation are observed. On footwall of thrust fault, calcite veins in Gounri Formation belonging to Choson Supergroup may be deformed during thrust faulting(D_2). Calcite veins are parallel to axial plane cleavage(S_2) of F_2 fold and truncate slaty cleavage(S_1). Therefore, we can use deformation twins in calcite grains of the veins as a marker for inferred differential stress operated upon thrust faulting. The inferred differential stresses are estimated at 190 Mpa from K_1 sample. The stress from K_1 sample close to the contact between Ogchon Supergroup and Choseon Supergroup shows a higher value than K_2 - K_6 samples, probably having an important influence upon thrust faulting. The differential stress reveal again high value at K_7 sample, which may suggest the presence of another thrust fault.

序 言

Turner (1953)에 의해 方解石 變形作用雙晶(deformation twins)을 利用한 古應力(paleostress) 方向에 대한 力學的인 分析(dynamic analysis)을 試圖한 以來로 많은 學者들에 의해 構造運動과 關聯하여 古應力을 解析하려는 試圖가 많이 行하여왔다 (Cater and Raleigh, 1969; Friedman and Stearns, 1971; Groshong, 1972; Spang, 1972; Tullis, 1980; Barker, 1990; Borradaile and McArthur, 1990; Rowe and Rutter, 1990).

특히 Rowe and Rutter (1990)에 의해서 方解石內의 變形作用雙晶의 數, 頻度 및 面積이 差應力과 體系的인

關係가 있음이 實驗에 의해 證明되었으며, 그들은 이러한 體系的인 樣相을 數式化하고 檢證하였다.

本 論文의 目的은 直接的인 野外 證據와 더불어 方解石 變形作用雙晶을 推定差應力(inferred differential stress)의 指示者로 利用하여 沃川累層群과 朝鮮累層群 境界가 衝上斷層임을 뒷받침하고 方解石 變形作用雙晶이 衝上斷層을 隨伴한 地域에서의 構造解析의 間接的인 指示者가 될수 있음을 나타내는데 있다.

이러한 目的을 達成시키기 위해 本 研究地域(以下 本域 이라함)을 衝上斷層이 推定되는 沃川構造帶 北東部 地域 月岳山 北側의 沃川累層群과 朝鮮累層群의 境界 地域 中에서도 衝上斷層의 下盤인 朝鮮累層群의 古雲里層을 差應力 分析의 對象으로 삼았다 (Fig. 1).

*慶北大學校 地質學科(Department of Geology, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea)

**農漁村 振興公社(Rural Development Cooperation, Taegu, Korea)

地質構造

本域은 任明赫 外 (1991)와 金英嚴 (1991)에 의해 地

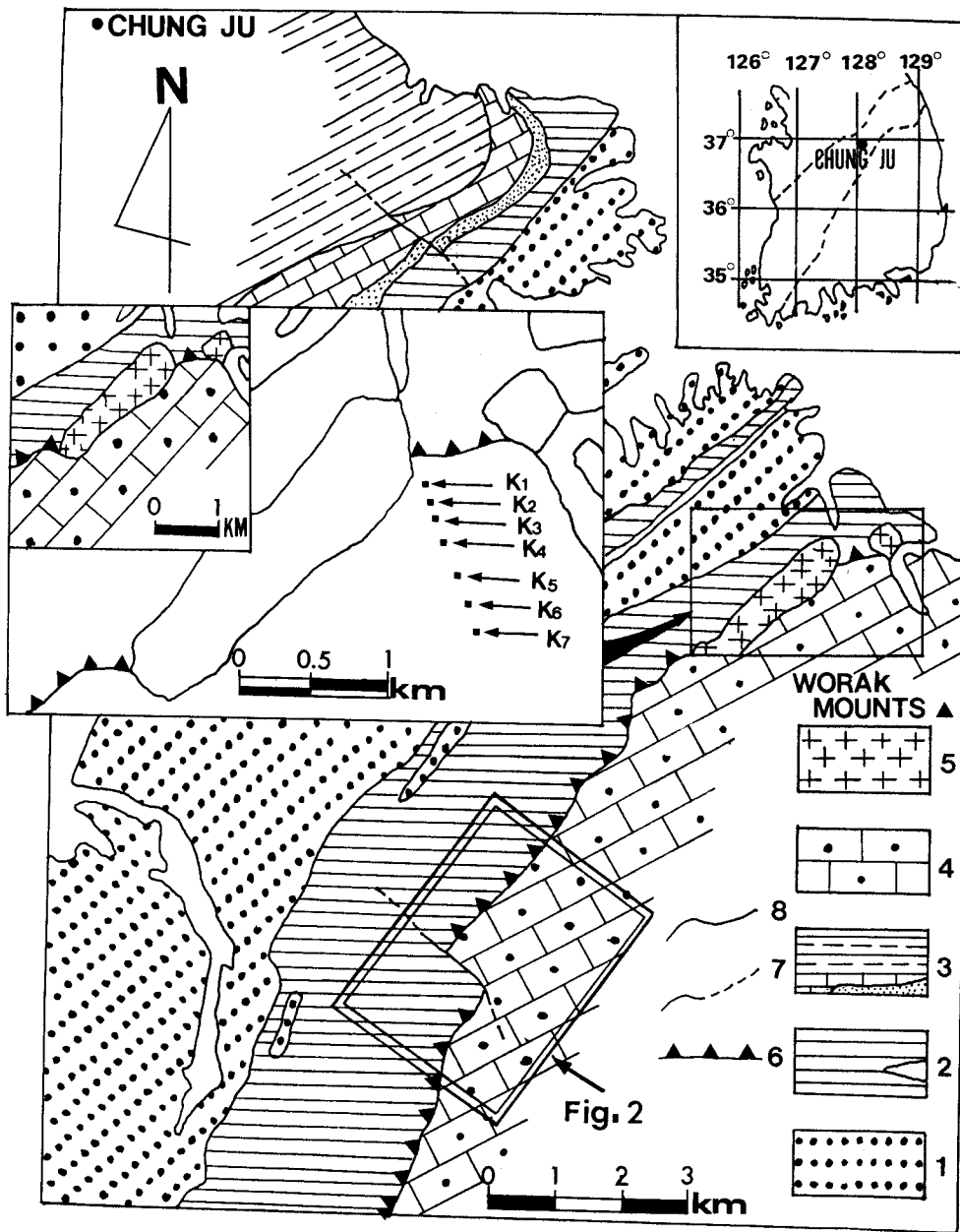


Fig. 1. Geological and sample locality map of the study area.
 1; Hwanggangri Formation, 2; Munjuri Formation, 3; Gyemyongsan Formation, 4; Gounri Formation, 5; Jurassic granite, 6; Thrust fault, 7; Fault, and 8; Geological boundary. Sample locality map is enlarged in the middle section of the Figure (modified from Kim, 1991). Double frame marks the location of Fig. 2.

質構造, 變形分析 및 變形作用史가 研究되었는데 이들에 의하면 沃川累層群의 黃江里層을 最下位로 하여 文周里層 및 鷄鳴山層이 褶曲作用에 의해 N50°E 走向으로 反復分布하며 沃川累層群이 朝鮮累層群의 古雲里層을 D₂ 變形作用의 末期 產物로서 衝上하고 있다 (Fig. 1).

이 衝上斷層의 野外證據는 水安堡 附近의 여러 露頭에서 小規模 衝上斷層을 觀察할수 있는데 (Fig. 2), 沃川累層群의 文周里層 千枚岩이 朝鮮累層群의 古雲里層 石灰岩內 發達하는 F₂ 褶曲軸面을 切斷하면서 직접 衝上하기도 하고 (Fig. 2-1), 衝上斷層의 下반인 古雲里層內의 石灰岩에서 S₁ 葉理와 平行한 石英脈을 切斷하는 衝上斷層 (Fig. 2-2) 및 F₂ 褶曲軸面과 平行한 S₁ 葉理를 따라서 衝上하는 樣相이 觀察된다 (Fig. 2-3). 또한 中原郡 아홉살이 뒷산 露頭에서 沃川累層群內의 石灰岩은 칼집褶曲 (sheath fold)을 보이는데 이 또한 thrust에 隨伴된 構造로 解析할 수 있다 (Fossen and Rykkelid 1990). 中原郡 古雲里의 沃川累層群과 朝鮮累層群 境界

部에서 역시 衝上斷層이 觀察되는데 이는 文周里層의 千枚岩에서 底角의 'flat'를 가지며 朝鮮累層群과 境界 郡에서 高角으로 'ramping'함을 보인다 (Fig. 3-2).

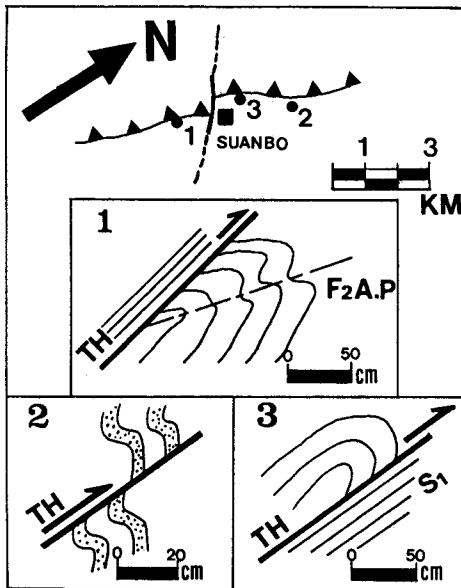


Fig. 2. Sketches of the meso-scale thrust-faults (TH) near the major thrust zone. 1 is schematic, 2 and 3 are traced from photographs. Stippled domains in 2 are quartz veinlets parallel to S₁. S₁ cleavages in 3 are parallel to F₂ - axial plane cleavage.

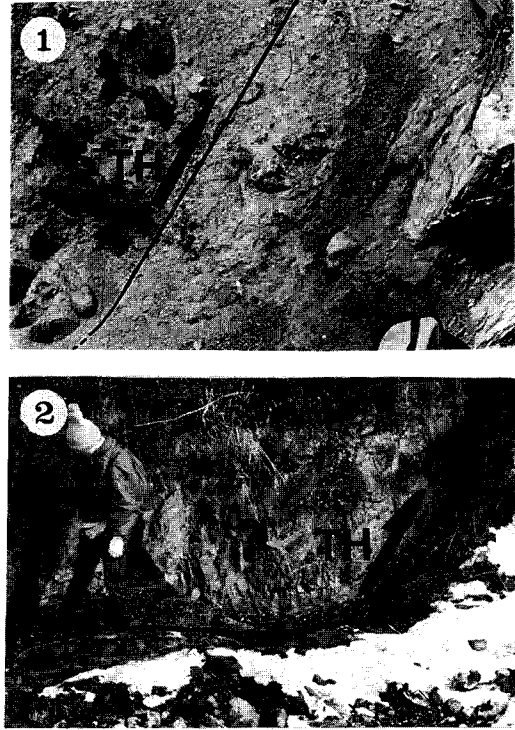


Fig. 3. Photographs showing the thrust-fault at the contact between Ogchon Supergroup and Choson Supergroup. 1; near Ahopsali village and 2; at Gounri village.

推定 差應力 分析

實驗에 의하면 差應力에 대해 方解石이 가장 敏感하게 영향을 받고 twin gliding의 機構 (mechanism)로 方解石雙晶이 生成, 發達되며 (Spang, 1972; Spang, 1974), 이때에 生成된 雙晶을 變形作用雙晶이라고 말한다 (Barker, 1990). 보통 方解石의 變形作用雙晶은 1組 (1 set) 내지 2組로 形成되며 심한 경우에는 3組까지 發達하는 경우도 있는데 (Rowe and Rutter, 1990) 本域의 경우는 대체로 2組로 發達한다 (Fig. 4). 또한 方解石雙晶의 끝이 粒子內에서 終止할 경우 一次雙晶 (primary



Fig. 4. Deformation twins which have 1 set or 2 sets in calcite of Gounri Formation. Scale bar is 100 μ m.

twin)의 끝은 뭉뚱하게 끝나지만 변형작용雙晶의 생성은 변형작용시의 온도, 변형속도 (strain rate) 및 封壓 (confining pressure) 또는 流體壓 (fluid pressure)과는 關聯이 적고 주로 單純剪斷應力 (simple shear stress)의 크기에 따라 변형작용雙晶의 頻度 및 크기가 決定된다. 또한 方解石 變形作用雙晶은 탄산염 광물이 90% 이상이면 strain partitioning이 작게 일어나서 가장 민감하게 差應力을 反映한다 (Marshak and Engelder, 1985). 따

라서 方解石 變形作用雙晶은 差應力 決定의 重要한 열쇠가 되며, 특히 單純剪斷力 下에서 形成된 變形作用雙晶일수록 適用이 容易하다. 즉 thrust를 隨伴한 地域에서 構造分析의 間接的인 指示者가 될수 있다 (Jamison and Spang, 1976).

測定 方法

本域에서 沃川累層群과 朝鮮累層群을 境界짓는 衝上斷層을 基準으로하여 古雲里層의 石灰岩內에서 方解石 脈 (> 95% 方解石)을 試料로 採取하였다. 이들 方解石 脈은 本域에 發達하는 F_2 - 褶曲軸面 (S_2)에 平行하고 S_1 -粘板劈開를 切斷하면서 發達하고 있다. 또한 本域에 發達하는 衝上斷層은 本域의 變形作用史 중 D_2 變形作用에 該當된다 (金英嚴, 1991; 任明赫 等, 1991). 따라서 衝上斷層의 下盤에 該當되는 古雲里層과 關聯된 差應力의 指示者로 使用할수 있을것이다.

試料는 沃川累層群과 朝鮮累層群 境界部에서부터 K_1 로 하여서 衝上斷層의 走向 (N50°E)에 垂直으로 橫斷 (K_1-K_4 : 각 50m 間隔, K_4-K_5 : 각 100m 間隔, K_5-K_7 : 각 50m 間隔)하여 K_7 까지 設定하였다 (Fig. 1). 採取한 試料를 薄片 製作하여 顯微鏡下에서 各 試料를 測定分析하였다.

薄片當 350개 以上の 方解石粒子를 測定하였고 粒子 크기에 따라 分類하여 (Fig. 5) 雙晶의 組別 갯수 및 각

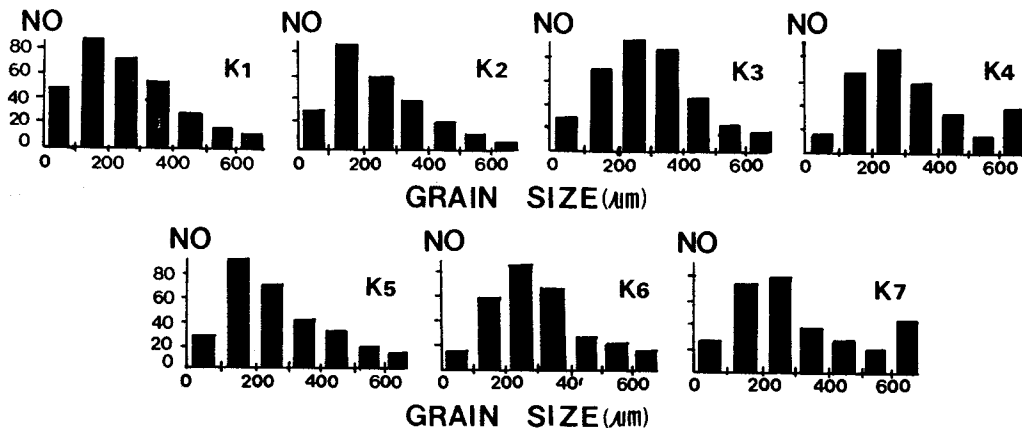


Fig. 5. Grain size distribution for K_1 - K_7 . The shape of the histograms shows the relative number of grains in each division (Note 100 μ m - 400 μ m division).

Table 1. Inferred differential stress values (Mpa) for each grain classes by It, Dt and V (%) methods of the calcite deformation twins.

Sample No.	Grain Size (μm)	Twinning-Incidence		Twin-Density		Volume % Twinning	
		It(%)	Mpa	Twins/mm	Mpa	V(%)	Mpa
K1	200-300	71.28	189.61	13.46	141.18	33.51	234.42
	300-400	83.54	183.09	13.11	139.22	48.23	239.88
	400-500	81.36	148.88	11.51	129.49	28.22	239.88
MEAN	346.95	75	165	15	149	38.95	218.78
K2	200-300	44.74	129.92	10.35	121.66	28.32	218.77
	300-400	83.33	181.71	10.75	124.34	39.54	218.77
	400-500	80.48	153.60	10.98	126.05	47.58	213.79
MEAN	311.94	61	144	15.3	151	30.95	204.17
K3	200-300	59.59	156.92	15.96	153.84	42.77	257.12
	300-400	83.33	181.71	17.62	161.19	41.41	223.87
	400-500	80.48	153.60	18.12	163.27	47.23	223.87
MEAN	370.3	74	157	22.3	179	43.76	218.78
K4	200-300	72.88	189.34	16.40	155.86	36.17	239.87
	300-400	77.63	168.83	14.59	147.17	42.40	223.87
	400-500	86.27	166.49	17.87	162.24	37.56	194.98
MEAN	376.9	83	174	21.5	176	38.92	213.79
K5	200-300	70.12	183.61	12.01	132.71	36.63	239.88
	300-400	78.35	171.58	13.44	141.07	35.91	213.79
	400-500	86.32	165.99	13.81	143.09	30.42	181.97
MEAN	375.8	96	202	15.4	151	33.59	186.21
K6	200-300	83.33	211.58	16.88	157.12	62.10	288.40
	300-400	100.00	218.34	16.27	155.27	46.28	234.42
	400-500	100.00	194.05	16.87	157.96	51.52	218.78
MEAN	390.4	95	199	20.7	173	51.23	223.8
K7	200-300	87.50	213.84	16.46	156.13	52.25	275.42
	300-400	88.46	193.01	16.45	156.99	48.23	239.88
	400-500	100.00	194.61	16.46	156.13	44.36	208.93
MEAN	348.8	91	198	24.6	186	43.38	218.78

MEAN: 測定된 粒子들 전체의 (0 μm - 700 μm)의 算術 平均 값.

組別 雙晶의 面積을 구하였으나, 200 μm 以下の 粒子크기는 粒子內에서의 測定이 不正確한 理由로 많은 error를 隨伴하고, 500 μm 이상의 크기를 갖는 粒子는 測定數가 작은 關係로 (Fig.5) 測定값이 신장, 또는 縮小되므로 例外시켰다 (Table 1).

分析方法 考察

Rowe and Rutter (1990)는 실험에 의해서 雙晶 頻度

(Twinning incidence: It), 雙晶 密度 (Twin density: Dt) 및 面積比 (Volume fraction: V%)들이 差應力과 相對的으로 갖는 關係를 아래와 같이 表現하였다. 雙晶頻度は 주어진 單位別 粒子크기에서 雙晶을 포함하는 粒子數의 比率로 표시한다.

즉,

$$It = \frac{\text{雙晶을 가지는 方解石粒子數}}{\text{전체 方解石의 粒子數}} \times 100(\%) \text{ 이고}$$

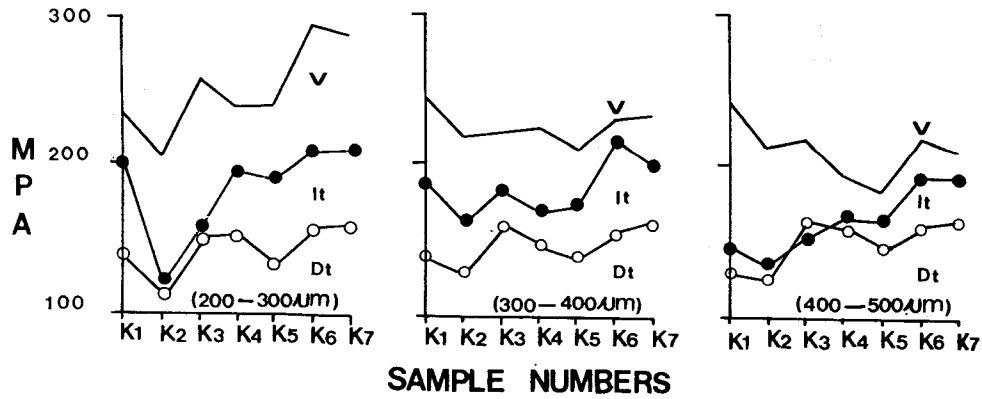


Fig. 6. The correlation of results by Volume fraction method (V%), twinning incidence method (It) and twin density method (Dt) with grain size classes (Note It method at 200µm - 300µm class).

It는 온도와 變形速度 (strain rate)에는 無關하고 단지 差應力에만 左右된다 (Rowe and Rutter, 1990). It를 이용한 方法은 다음과 같다.

$$\sigma = 523 + 2.13 It - 204 \log(d)$$

이때 σ : 差應力 (Mpa),

d : 平均 粒子크기 (µm)이고 標準偏差는 31 Mpa이다.

이 式은 自然界 變形岩에서 1회의 變形作用을 받았거나 重複變形作用 일지라도 coaxial한 경우에 보다 적절하다 (Borradaile and McArthur, 1990). 本域의 경우 한번의 變形作用은 아닐지라도 K₁ - K₇ 試料는 D₂ 變形作用과 D₂ 보다는 相對的으로 약한 D₃ 變形作用을 받은 것으로 생각되므로 큰 誤差는 없을 것으로 여겨진다. K₁ 試料에서는 190 Mpa로서 비교적 큰 차응력을 보이거나, K₂ 시료에서는 130 Mpa에서 K₇ 시료로 갈수록 210 Mpa (Table 1)로서 점차 增加하는 樣相을 보인다 (Fig. 6).

雙晶密度 (Twin density: Dt)에 의한 方法은 雙晶의 長軸 (twin lamellae trace)에 垂直으로 粒子直徑을 測定하고 이때 나타난 雙晶의 數를 계산하였다. 즉, Dt는 mm당 雙晶갯수로 表示한다. 따라서 雙晶密度는 粒子크기와 無關하고 差應力에 따라 增加한다 (Rowe and Rutter, 1990).

$$\sigma = -52.0 + 171.1 \log(D)$$

이때 D : 雙晶密度,

標準偏差: 43 Mpa로 나타낼수 있다.

雙晶密度에 의한 方法의 長點은 重複 變形을 받은 지역에서도 適用可能하다는 점이나 (Rowe and Rutter, 1990) 雙晶頻度나 面積比에 의한 方法보다는 다소 過少評價된다는 점이 短點이라고 할수 있다. 本域에 適用結果 150 Mpa - 180 Mpa의 값으로서 다른 두 方法에 의한 값보다 낮음을 알수 있다 (Table 1).

面積比 (Volume fraction: V%)에 의한 方法은 單位別 粒子面積에 대한 雙晶의 面積比로 計算한다.

즉,

$$V(\%) = \frac{\text{雙晶面積}}{\text{單位別 粒子面積}} \times 100(\%) \text{으로 나타낼}$$

수 있고, 差應力은 다음 式

$$\log \sigma = 2.72 + 0.40 (\log V - \log d) \text{에 의해 구할수 있다.}$$

이때 V: 面積比,

d: 平均粒子 크기 (Rowe and Rutter, 1990)이다. 이 公式은 自然界에서 適用할때 複雜한 變形作用 단계와 相關없이 包括적인 값을 가지며 鑛物들이 選擇 配向 (preferred orientation)을 가질때도 有效하다. 그러나 面積比에 의한 方法은 測定時 많은 誤差를 隨伴함으로써 本域에 適用結果 다른 두 方法에 比하여 過大評價되는 경향이 있고 差應力の 값도 一律적인 樣相을 보이지 않는다 (Fig. 6).

考 察

本域에서 試料로 使用된 方解石脈은 S_1 葉理를 切斷 하나, S_2 葉理에 平行하게 발달하기도 하고 衝上斷層에 隨伴된 F_2 褶曲作用에 의해 褶曲되기도 하며, 또한 衝上斷層面과 F_2 褶曲軸面이 一致하는점 등으로 미루어 보아서 方解石脈의 雙晶 生成時期는 D_1 變形作用以後이며 D_2 變形作用과 同時期로 생각할 수 있다.

이러한 觀點에서 差應力을 구하는 세가지 方法에서 각각의 絶對的인 差應力값은 一致하지 않으나 K_1 試料에서는 높은 값을 보이다가 K_2 試料에서 특히 낮은 값을 나타내면서 K_7 試料로 갈수록 값이 높아지는 一律的인 分布樣相을 보인다 (Fig. 6). 그러나 雙晶密度 (D_t)와 面積比 ($V\%$)에 의한 差應力의 標準偏差는 41 - 43 Mpa로 比較的 높게 나타나는데 비하여 雙晶頻度 (I_t)는 31 Mpa로 比較的 작은 標準偏差를 가진다. 面積比에 의한 方法은 測定에 많은 誤差가 있음을 否認할수 없고 Fig. 6에서도 알수 있듯이 粒子크기에 따른 差應力의 分布樣相 또한 다르다. 雙晶密度에 의한 方法은 重複變形을 받은 試料에서도 利用可能하나 큰 誤差를 隨伴하며 (Rowe and Rutter, 1990) 다른 두 方法에 비하여 다소 過小評價되는 傾向이 있다. 또한 本域에 作用한 局部的인 D_3 變形作用을 無視한다면 方解石 變形雙晶은 한차례의 變形作用 (D_3)과 關聯되므로 雙晶頻度方法이 가장 妥當하다고 생각할수 있다.

Tullis (1980)에 의하면 差應力은 125 - 280 Mpa에서 衝上斷層을 同伴할수 있다고 報告하였다. 또한 Rowe and Rutter (1990)에 의하면 스페인 北西部 造山帶에서 差應力의 최고값은 150 - 250 Mpa로 報告하였다. 이 結果로 볼때 本域의 K_1 은 沃川累層群과 朝鮮累層群 사이의 衝上斷層의 影響으로 190 Mpa의 높은 값을 나타내고 K_3 에서 K_7 까지의 差應力이 平均 150 Mpa 이상의 값을 가지므로 또다른 衝上斷層의 存在可能性을 間接的으로 示唆한다.

K_1 값이 K_2 보다 높은 것은 撓曲抵抗 (Fluxural resistance)이 크다는 것을 暗示하며 Ramp에 의한 高角의 斷層地域이라 볼수 있으며 K_2 지역은 衝上斷層의 上盤이 overriding된 部分임을 示唆한다. 또한 K_2 부터 K_7 까지 推定差應力이 增加하는 것은 K_7 以東에 또다른 衝上斷層의 存在可能性을 間接的으로 示唆한다.

結 言

衝上斷層을 隨伴한 D_2 變形作用에 의해 變形된 古雲里層 內의 石灰岩中の 方解石 變形作用雙晶을 利用하여 推定差應力 (inferred differential stress)을 分析한 結果, 沃川累層群과 朝鮮累層群 境界部의 衝上斷層面에 가장 가까운 K_1 試料에서 推定差應力이 190 Mpa로 나타났고, K_2 試料에서는 130 Mpa에서 K_7 試料에서는 214 Mpa로 漸次 增加하는 樣相을 나타냈다. 즉 K_1 試料는 沃川累層群과 朝鮮累層群의 接觸部에 發達하는 衝上斷層의 影響으로 推定 差應力이 높게 나타났고, K_7 試料로 갈수록 값이 增加하는 것은 K_7 試料 以東의 朝鮮累層群 內에 또다른 衝上斷層의 存在 可能性을 間接的으로 示唆한다.

Rowe and Rutter (1990)가 提案한 雙晶頻度, 雙晶密度 및 面積比에 의한 方法들은 아직 실험 적용단계에 있긴 하지만 本域과 같이 衝上斷層을 隨伴한 地域에서는 雙晶頻度 方法이 推定 差應力 分析의 適切한 方法이라고 생각된다.

謝 辭

野外調査와 試料採取에 도움을 준 金度貝 學兄 및 蔡丙坤 學兄에 感謝하고 특히 顯微鏡下 觀察 및 測定에 많은 時間을 할애해준 李美敬 學兄에 깊은 感謝의 뜻을 나타낸다.

參考文獻

金英嚴(1991) 水安堡-大香山 地域의 地質構造와 變形量. 慶北 大學校 碩士學位論文.
 李政成, 朴奉淳(1965) 黃江里 圖幅 報告書(1:50000). 國立地質 調查所.
 任明赫, 金英嚴, 張泰雨(1991) 忠州地域 大香山 硅岩의 變形 量 分析 및 變形作用史. 地質學會誌, 27권 (인쇄중).
 Baker, A. J. (1990) Introduction to metamorphic textures and microstructures. Chapman and Hall, N. Y.
 Borradaile, G. J. and McArthur, J. (1990) Experimental calcite fabrics in a synthetic weaker aggregate by coaxial and non-coaxial deformation. J. Structural Geol., v. 12, p. 351-363.
 Carter, J. L. and Raleigh, C. B. (1969) Principal stress direction from plastic flow in crystals. Geol. Soc. Am. Bull., v. 80 p. 1231-1264.
 Fossen, H. and Rykkelid, E. (1990) Shear zone structures in

- the Oygraden area, West Norway. *Tectonophysics*, v. 174, p. 385-397.
- Friedman, M. and Stearns, D.W. (1971) Relations between stresses inferred from calcite twin lamellae and microfractures, Teton Anticline, Montana. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 82, p. 3151-3162.
- Groshong, R.H. Jr. (1972) Strain calculated from twinning in calcite. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 83, p. 2025-2038.
- Jamison, W.P. and Spang, J. H (1976) Use of calcite twin lamellae to infer differential stress. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 87, p. 868-872.
- Marshak, S. and Engelder, T. (1985) Development of cleavage in limestones of a fold-thrust belt in eastern New York. *J. Structural Geol.*, v. 7, p. 345-369.
- Rowe, K.J. and Rutter, E.H. (1990) Paleostress estimation using calcite twinning: experimental calibration and application to nature. *J. Structural Geol.*, v. 12, p. 1-17.
- Spang, J.H. (1972) Numerical method for dynamic analysis of calcite twin lamellae. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 83, p. 467-472.
- Spang, J.H. (1974) Numerical dynamic analysis of calcite twin lamellae in the greenport center syncline. *Am. J. Sci.*, v. 274, p. 1044-1058.
- Tullis, T.E. (1980) The use of mechanical twinning in minerals as a measure of shear stress magnitudes. *J. Geophys. Res.*, v. 85, p. 6263-6268.
- Turner, F.J. (1953) Nature and dynamic interpretation of deformation lamellae in calcite of three marbles. *Am. J. Sci.*, v. 251, p. 276-298.
- Turner, F.J. and Weiss, L.E. (1963) *Structural analysis of metamorphic tectonites*. McGraw-Hill, N.Y., 541 p.

1991년 2월 20일 원고접수



