

미국 메사추세츠 북중부의 데본기 리틀튼층에서 산출되는 석류석의 누대구조

Garnet Zoning from the Devonian Littleton Formation, North-Central Massachusetts, USA

김형수 (Hyeong Soo Kim)¹⁾

School of Earth Sciences, James Cook University, Townsville, Queensland, 4811, Australia
(제임스 쿡 대학교, 지구과학과, 4811, 타운스빌, 퀸즈랜드, 호주, E-mail: hyeongsoo@yahoo.com)

요약 : 미국 메사추세츠 북중부에 산출되는 데본기 리틀튼층(Littleton Formation)의 남정석-십자석-석류석 대에서 채취한 석류석 반상변정의 화학적 누대구조는 여러 번의 성장 단계를 경험했음을 보여준다. 석류석 반상변정들은 비대칭적이고 불규칙적인 Mn, Mg, Ca의 누대구조를 보인다. 조직대 경계부에서 석류석 성분들은 단면선에 따라 그 형태가 다르게 나타나고, X_{Mn} 과 Fe/(Fe+Mg)비의 역전 누대구조는 석류석 내의 내부엽리의 발달과 밀접한 관계를 보여준다. 이런 관찰 사항들은 석류석 누대구조가 석류석을 형성/소모시키는 반응뿐만 아니라, 용해작용과 침전작용과 관련된 기존의 미세구조에 의해 변화되었음을 의미한다. 화학적 그리고 조직적 잘림구조의 관계 그리고 저자가 제안한 석류석 성장모델은 석류석 누대구조가 엽리의 발달 동안 전단 응력대에서 일어나는 선택적 용해작용과 압축 운동대에서 발생하는 침전작용에 의해 조절되었음을 지시한다.

주요어 : 석류석 반상변정, 역전 누대구조, 용해작용, 침전작용.

ABSTRACT : Compositional zoning patterns of garnet porphyroblast in kyanite-staurolite-garnet bearing sample from the Devonian Littleton Formation, north-central Massachusetts, reveal complex growth patterns. Garnet porphyroblast exhibits asymmetric and irregular zoning patterns in Mn, Mg and Ca. The composition of the garnet at the textural boundaries is different for different traverses, and zoning reversals in X_{Mn} and Fe/(Fe+Mg) are coincident with development of inclusion trails within the porphyroblast. These observations suggest that the garnet zoning was not only modified from garnet-consuming reactions, but also influenced by pre-existing microfabrics through the effects of dissolution and precipitation. Relationships between chemical and textural truncations and garnet growth model proposed in this paper indicate that the zoning patterns of garnet were controlled by preferential dissolution and precipitation during the development of successive foliations that occurred in zones of shearing (high strain/stress) and zones of shortening (low strain/stress).

Keywords : Garnet Porphyroblast, Zoning Reversal, Dissolution, Precipitation.

1) 현주소: 강원대학교 자연과학대학 지질학과.

서 론

석류석 반상변정의 성장은 변성반응과 변형 작용에 의해 조절된다고 알려져 있다(Karabinos, 1984; Bell *et al.*, 1986; Bell and Hayward, 1991; Gibson, 1992; Spear, 1993; Williams, 1994). Bell *et al.* (1986)과 Bell and Hayward (1991)는 변형/변성작용 동안 용해작용(dissolution)과 용액 이동(solution transfer)은 점진적인 전단운동(shearing)과 압축작용(shortening)으로 구성된 변형분배(deformation partitioning)에 의해 조절된다고 제안했다. 점진적인 전단대(progressive shearing zone)는 비관상 규산염광물들의 용해와 관상 규산염광물과 흑연의 축적이 특징이고, 점진적인 압축대(progressive shortening zone)는 반상변정의 형성과 성장이 특징이다. 이것은 압축대 내에 발생하는 미세균열(microfracture)을 따라 반상변정이 형성되고 성장하는데 필요한 성분을 함유한 유체(fluids)가 유입하기 때문이다(Bell *et al.*, 1986). Williams(1994)는 반상변정의 성장률은 미세구조의 발달에 의해 영향을 받는다고 제안했고, 그는 변성작용과 변형작용에 의해 조절되는 반상변정 성장 모델을 제시했다.

석류석의 화학적 누대구조는 석류석의 성장 그리고 확산(diffusion) 역사를 의미하고, 온도, 압력 및 화학적 전위차(chemical potential, μ_i)에 의해 조절된다. 이런 누대구조는 다변성 작용을 받은 지역의 온도-압력 역사를 밝히는데 사용되어 왔다(Tracy *et al.*, 1976; Spear and Selverstone, 1983; Schulz, 1990; Hickmott and Spear, 1992; Florence and Spear, 1993). 석류석의 누대구조는 크게 대칭과 비대칭 누대구조로 구분할 수 있다(Tracy *et al.*, 1976; Hickmott and Spear, 1992). Duebendorfer and Frost (1988)는 원래의 석류석의 화학적 누대구조가 전단운동 동안 편리의 발달과 선택적인 용해작용으로 인해 변화될 수 있다고 제안했다. 따라서 비대칭 또는 절단된 형태의 누대구조가 이러한 후기의 변화산물이라면 석류석의 성장역사와 성장과정을 해석하는 데 결정적인 정보를 제공해 줄 수 있을 것이다. 이 논문의 목적은 엽리의 발달과 석류석의 화학적 누대구조간의 상호 연관성을 밝히는 것이다. 엽리의 발달은 반상변정 연변부에서 작용하는 점진적인 전단운동에 의해 선택적인 용해작용과 침전작용을 일으킬 수 있고,

이런 작용들은 반상변정의 복잡한 화학적 누대구조를 형성시킬 것이다. 이와 같은 누대구조의 형성 원인은 연속적인 엽리의 발달에 따른 석류석 내의 불연속적인 내부엽리를 형성케 하는 반상변정 성장 모델(Bell and Johnson, 1989)을 사용하여 토의하였다.

지질개요 및 암석기재

이 연구에서 사용된 석류석 반상변정은 미국 메사추세츠 북중부에 위치하는 데본기 리틀톤층(Littleton Formation)의 남정석-십자석-석류석대에서 채취하였다. 이 연구에 사용된 시료(K77)는 Tracy *et al.* (1976)의 남정석대 시료 908과 같은 위치에서 채취하였다. 이 석류석을 포함하는 암석의 형성 온도와 압력은 약 470~600°C와 5.5~6.0 kbar이다(Tracy *et al.*, 1976; Schumacher *et al.*, 1989).

남정석대에서 대부분의 석류석 반상변정들은 복잡한 내부엽리 형태(예, 계단상 또는 나선형)와 잘림 조직(textural truncation)을 보인다. 석류석 내, 포획광물들은 석영, 녹니석, 티탄철석 그리고 흑연으로 구성되어 있다. 남정석은 조직적으로 크게 2가지 형태를 보인다. 흑운모, 십자석과 교호하면서 기질을 구성하는 것과, 석영과 흑운모를 포획하는 반상변정으로 산출하는 것으로 구분된다. 십자석 반상변정은 석영, 흑운모, 석류석, 흑연, 티탄철석을 포획광물로 가지고 있다. 기질은 흑운모, 백운모, 석영, 사장석, 남정석, 티탄철석으로 구성되어 있다.

시료 K77에서 석류석 반상변정들은 석영, 흑연, 티탄철석으로 구성된 내부엽리를 갖는다(Fig. 1). 이 반상변정은 포획광물들의 밀도와 내부엽리 구조의 변화에 따라 다음과 같은 3개의 조직대를 갖는다(Fig. 1d): Z1(중앙부), Z2(중간부), Z3(외각부). Z1은 포획광물이 빈약하며(특히 흑연이 적다), 경사가 급한 내부엽리 구조를 가지고 있다. 이 내부엽리는 Z1의 가장자리에서 약하게 곡선화되어 있고, Z2의 내부엽리에 의해 잘려 나타난다(Fig. 1b, c). Z2는 포획광물이 풍부하며, 시계방향으로 휘어지는 경사가 완만한 내부엽리를 보인다(Fig. 1a, b). Z3는 포획광물이 적고, 완만한 내부엽리를 가지고 있다.

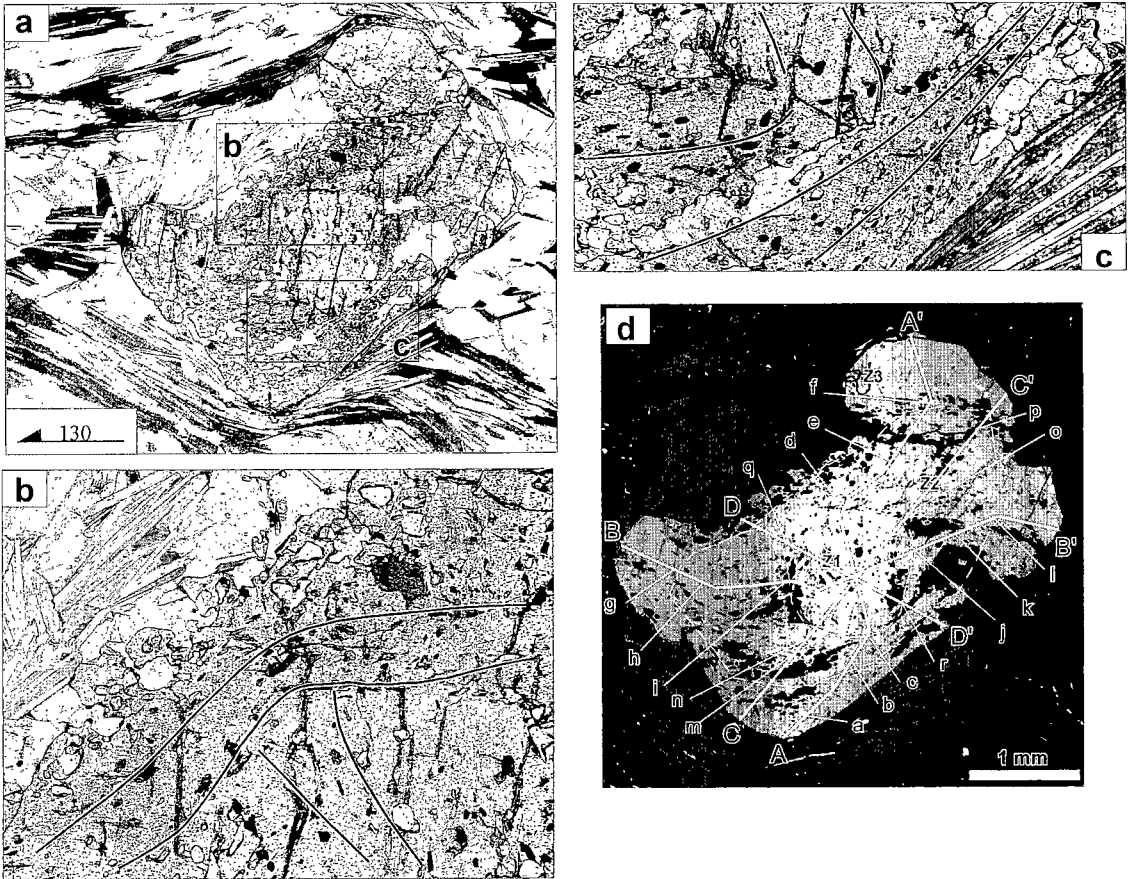
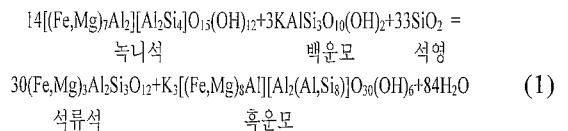


Fig. 1. (a) Photomicrograph of garnet porphyroblast in the vertical thin section striking 130° of sample K77. (b) Photomicrograph showing the upper boundary between the core and median (box b in Fig. 1a) with lines indicating inclusion trails. (c) Photomicrograph showing the lower boundary between the core and median (box c in Fig. 1a) with lines indicating inclusion trails. (d) Back-scattered electron image of garnet showing three textural zones. Dashed and solid lines indicate textural boundaries and analysed traverses respectively. Uppercase and lowercase letters indicate profile lines and spots analysed for Fig. 3. All photos were taken under plane-polarized light. Width of base of photos a, b and c is 5.71, 2.29, and 2.29 mm respectively.

일반적인 석류석 형성 반응들

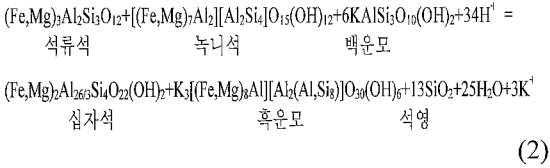
KFMASH계에서 석류석 반상변정의 형성과 성장은 일변수, 이변수 및 다변수 반응의 조합에 의해 조절된다고 알려져 있다(Thompson *et al.*, 1977; Williams, 1994). 저변성도 조건에서 석류석 형성 반응은 전암 성분에 따라 달라진다. 일반적으로 녹니석을 함유한 암석에서 석류석은 전형적으로 이변수 반응 (1)에 의해 형성된다(Thompson, 1976; Loomis, 1986).



시료 K77의 Z1에 해당되는 석류석 반상변정은 녹니석을 포획광물로 가지며 중앙부에서 높은 Mn 함량(약 25 mol.%)을 보이는데(Fig. 2a) 이것은 Tracy *et al.*(1976)에 의해 연구된 석류석의 Mn 함량보다 2~3배 높은 값이다. 이 지역

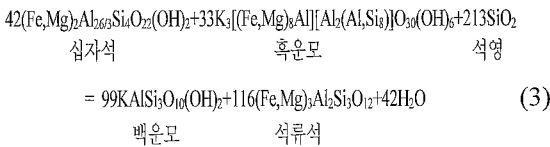
에서 경록니석(chloritoid)은 산출되지 않는다. 따라서 석류석 반상변정의 중앙부(Z1)는 반응 (1)에 의해 형성되었을 것이다.

위 반응 (1)에 의해 생성된 석류석은 온도가 증가함에 따라 부분적으로 일변수 반응 (2)에 의해 재흡수(resorption) 된다(Loomis, 1986; Frost and Tracy, 1991; Spear *et al.*, 1991).

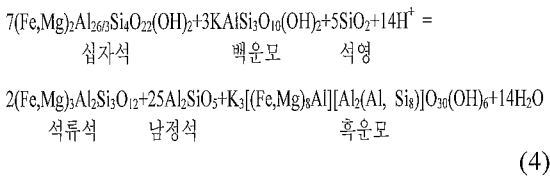


이 반응은 십자석과 흑운모를 생산하면서 녹니석을 제거시킨다. 시료 K77에서 석영, 흑운모 그리고 석류석을 포획광물로 가지며 산출되는 십자석 반상변정들 반응 (2)에 의해 형성되었을 것이다.

석류석은 온도가 증가함에 따라 이변수 반응 (3)에 의해 재성장될 수 있다(Thompson *et al.*, 1976; Spear, 1993).



이 반응은 온도가 증가함에 따라 석류석의 Fe/(Fe+Mg)비를 감소시킨다(Spear, 1993). 마지막으로, 십자석을 소멸시키는 일변수 반응 (4)에 의해 남정석이 형성하게 된다(Thompson *et al.*, 1976; Tracy *et al.*, 1976; Florence and Spear, 1993).



기질부에서 관찰된 흑운모와 십자석과 밀접하게 교호하면서 산출되는 남정석은 반응 (4)에 의해 생성된 것으로 보여진다.

연구방법

석류석 반상변정의 화학분석은 James Cook University의 Advanced Analytical Centre(AAC)와 기초과학지원연구소에서 전자현미분석기(JEOL-840A, CAMECA SX-51)를 이용하여 실시했다. 반상변정의 점 분석은 한점당 3개의 분석값의 평균을 사용했고 EDS(Energy Dispersive Spectrometers)를 이용하였다. 분석시간은 50초/한점, 가속 전압은 15 kV, 빔(beam)전류는 20 nA, 빔 직경은 3~5 μm이다. 분석치 보정은 ZAF 방법을 사용하였다. 시료 K77의 석류석 반상변정의 Mn, Mg, Ca 성분의 화학조성지도(X-ray map)는 WDS(wavelength dispersive spectrometer) 방법을 사용하여 만들었다.

결과

석류석 반상변정의 화학조성

Fig. 2는 시료 K77의 석류석 반상변정의 Mn, Mg, Ca의 성분화학조성을 보여준다. 이들 세 성분의 누대구조는 비대칭적이고, Z1과 Z2의 양측면에서 그 함량이 최대/최저가 된다(Fig. 2). 석류석은 중심부와 Z2의 중앙에서 Mn 함량이 높으며(최대 약 25 mol%), 외각부(rim)에서는 약 4 mol%로 감소한다(Fig. 2a). Mg 함량은 일반적으로 중심부에서 외각부쪽으로 증가하지만, Z1-Z2 경계부에서는 감소하여 최저값이 된다(Fig. 2b). 이 화학조성 분포의 중요한 특징은 Mn과 Mg의 누대구조 변화가 일치한다는 것이다. Ca X-ray 그림 또한 Z2의 양측 중앙부에서 그 함량이 최대가 된다(Fig. 2c). 작은 Ca 함량의 변화는 Z2-Z3 경계부에서 관찰된다. Z1-Z2 경계부에서 급격한 Ca 함량의 증가는 Mn 성분의 증가와 Mg 성분의 감소와도 일치한다. 비록 석류석 반상변정들은 사장석 포획광물을 갖고 있지 않고, 또한 기질부에 있는 사장석은 누대구조(An₂₈; Table 1)를 보이지 않지만, 이 X_{Ca}의 급증은 압력의 변화 또는 레일리(Rayleigh) 분별작용에 의한 것으로 사료된다(Hollister, 1966). 전반적으로 이들 성분의 X-ray 화학조성은 Z1, Z2, Z3 조직대의 경계와 정확히 일치하지는 않지만 화학조성의 변화는 조직대의 형성과 밀접한 관계를 보임을 알 수 있다.

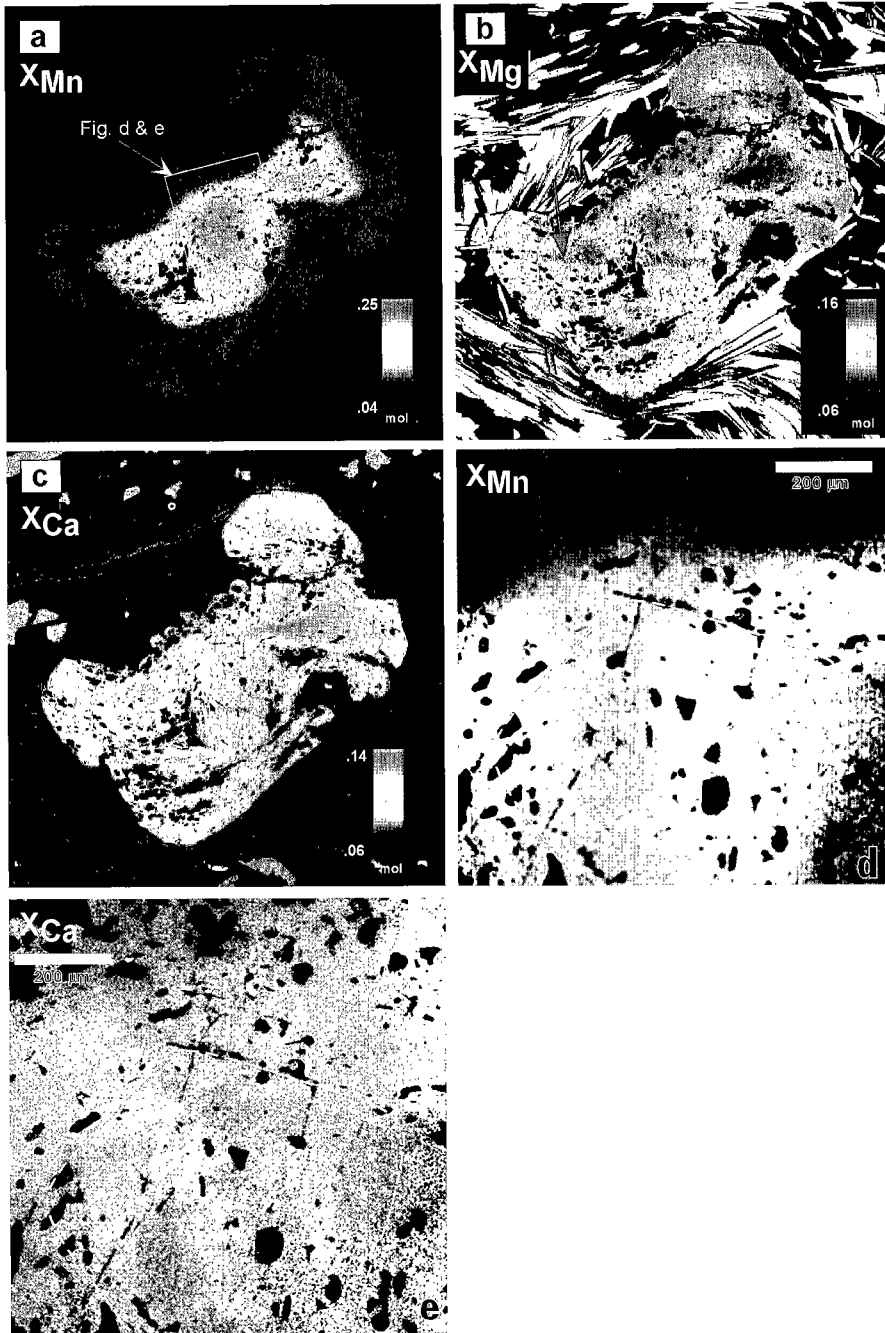


Fig. 2. X-ray maps for the garnet porphyroblast in sample K77 (Fig. 1). (a) Mn X-ray map. (b) Mg X-ray map. Gray colored arrow indicates scratched mark. (c) Ca X-ray map. High resolution Mn (d) and Ca (e) X-ray maps of compositional zoning of the garnet porphyroblast in the Z1-Z2 boundary (box in Fig. 2a). Dashed lines indicate textural boundary between Z1 and Z2. Microprobe operating conditions for (a), (b) and (c): 15 keV, 100 nA, 100 millisecond, 9 micron step size, resolution 512×512 . Microprobe operating conditions for (d) and (e): 15 keV, 50 nA, 50 millisecond, 1 micron step size, resolution 512×512 .

Table 1. Representative electron microprobe analyses of garnet porphyroblasts and plagioclase from sample K77.

	Garnet						Plagioclase		
	Z1 (101)	SD	Z2 (171)	SD	Z3 (72)	SD	Matrix (14)	SD	
SiO ₂	36.87	0.38	37.06	0.67	37.55	0.48	SiO ₂	61.66	0.49
TiO ₂	0.05	0.04	0.36	1.47	0.08	0.10	TiO ₂	0.03	0.04
Al ₂ O ₃	20.96	0.34	20.91	0.47	21.25	0.36	Al ₂ O ₃	24.03	0.41
FeO*	26.91	1.17	28.92	2.48	31.03	1.43	FeO*	0.05	0.06
CaO	2.62	0.25	3.20	0.89	3.43	0.53	CaO	5.92	0.15
MgO	2.51	0.43	2.68	0.58	3.11	0.74	MgO	0.00	0.00
MnO	9.65	1.37	6.84	2.71	4.39	1.83	MnO	0.04	0.07
Total	99.57		99.99		100.84		Na ₂ O	8.31	0.70
	Cations per 12 oxygens						K ₂ O	0.13	0.08
Si	2.988	0.015	2.984	0.045	2.989	0.020	Total	100.17	
Al ^{IV}	0.014	0.012	0.018	0.044	0.015	0.015	Cations per 8 oxygens		
Ti	0.003	0.003	0.022	0.089	0.005	0.006	Si	2.727	0.024
Al ^{VI}	1.987	0.009	1.966	0.076	1.978	0.012	Al	1.252	0.009
Fe	1.823	0.072	1.948	0.174	2.065	0.095	Ca	0.280	0.005
Ca	0.227	0.022	0.276	0.075	0.293	0.045	Na	0.711	0.056
Mg	0.302	0.050	0.321	0.070	0.368	0.087	K	0.007	0.005
Mn	0.663	0.096	0.466	0.182	0.296	0.124			
F/(F+M)	0.859	0.017	0.860	0.019	0.851	0.028			
X _{Fe}	0.605	0.023	0.647	0.061	0.683	0.031	An (%)	28.17	1.68
X _{Mg}	0.100	0.016	0.107	0.023	0.122	0.028	Ab (%)	71.10	1.92
X _{Ca}	0.075	0.007	0.092	0.024	0.097	0.015	Or (%)	0.73	0.50
X _{Mn}	0.220	0.032	0.154	0.060	0.098	0.041			

Number in parentheses represents total number of analyses. All formulas represent average compositions and standard deviations (SD). Note: *, Total Fe as FeO; X_i (mole fraction of component i) = i/(Fe+Mg+Mn+Ca); F/(F+M) = Fe/(Fe+Mg); An % = Ca/(Ca+K+Na) × 100; Ab % = Na/(Ca+K+Na) × 100; Or % = K/(Ca+K+Na) × 100.

석류석 누대구조와 내부염리 구조의 관계

석류석의 성장 누대구조는 석류석 성장 당시의 자신의 화학조성을 반영한다. 이번 연구에서 분석된 석류석의 누대구조는 단순하지 않고, 조직대에 따라 다른 화학조성을 보인다. 이와 같은 누대구조의 유형은 동심원이나 대칭적 누대구조와는 다른 해석이 필요하다.

시료 K77 석류석의 누대구조는 불규칙적이고, 단면선(profile lines)에 따라 그 모양이 다르다. X_{Mn}의 화학적 누대구조는 복잡하고, 적어도 2개의 역전 누대구조가 존재한다:(1) Z2 내부(단면선 B-B'와 C-C'; Fig. 3b, c); 그리고(2) Z3의 가장자리(최외각 부분; Fig. 3a, b, c). 전체적으로 Fe/(Fe+Mg)비는 석류석의 중앙부에서 외각부 쪽으로 감소한다. 이것은 일반적으로 온도

증가에 따른 Fe-Mg 교환반응에 의한 것으로 해석되었다(Thompson, 1976; Spear, 1993). 그러나 석류석의 Fe/(Fe+Mg)비는 부분적으로 증감의 반복을 보여준다("zigzag" path): Z1 [Δ Fe/(Fe+Mg) = -0.04~-0.07; Fig. 3b, c]; Z2 [Δ Fe/(Fe+Mg) = +0.09; Fig. 3b, c]; Z3 [Δ Fe/(Fe+Mg) = -0.02~-0.07; Fig. 3b]; 그리고 Z2-Z3 사이에서 불연속적인 변화(Fig. 3b)를 보인다. X_{Ca} 누대구조는 Z1과 Z2 사이에서 7 mol%에서 14 mol%로 급증한다(Fig. 3c).

급한 경사를 갖는 Z1의 내부염리는 Z1-Z2 경계부에서(위와 아래 부분; Fig. 1b and c) Z2의 완만한 경사의 내부염리에 의해 잘려진다. 이 경계부에서 관찰되는 X_{Mn}의 급한 성분 경사(단면선 A-A'와 D-D')는 반응식 (2)로 인한 재흡수 작용 및 용해작용의 결과일 것이다. 용해작용은

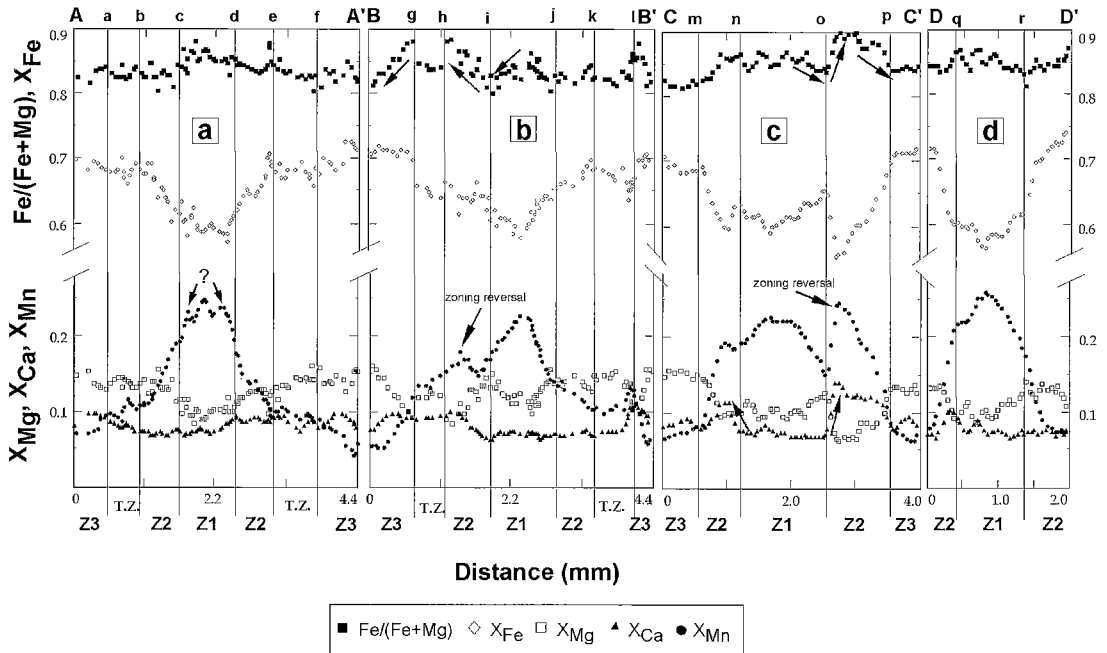


Fig. 3. Profile diagrams for Fe/(Fe+Mg), X_{Fe} , X_{Mg} , X_{Mn} , and X_{Ca} of garnet along five traverses in the vertical thin section. (a) Line A-A' (b) Line B-B'. (c) Line C-C'. (d) Line D-D'. Lowercase and uppercase alphabets at the top of the diagrams indicate the analysed spots marked in Fig. 1d. $X_i = i/(Fe + Mg + Mn + Ca)$. T.Z. = transition zone.

내부엽리가 잘리는 부분에서 X_{Mn} 의 단면선 모양을 변화시킬 수 있다(Duebendorfer and Frost, 1988). X_{Mn} 의 약한 역전 누대구조(단면선 A-A'; Fig. 3a)는 Z1-Z2 경계부에서 관찰되지만, 고해상도 Mn X-ray 그림에서는 확인할 수 없었다(Fig. 2d). 비록 Z1에서 Fe/(Fe+Mg)비는 일정하지는 않지만 감소하는 경향을 보인다(Fig. 3b, c). Z1에서 X_{Ca} 는 평탄한 형태를 보인다(Fig. 2e, 3).

Z2 내에서 관찰되는 강한 X_{Mn} 의 역전 누대구조는 Fe/(Fe+Mg)비의 증가 그리고 X_{Ca} 의 급증하는 누대구조와 일치한다(Fig. 3b, c). 이들 Mn, Mg, Ca 성분들의 분포는 Z2의 완만한 경사의 내부엽리를 따라 평행하게 분포하는 양상을 보인다(Fig. 2a, b, c). 그러므로 이런 역전 누대구조는 반상변정 주위에서 일어나는 변형분배(deformation partitioning; Bell *et al.*, 1986)의 효과로 해석하였다. 즉, 석류석은 국부적인 물리화학적 비평형으로 인해 높은 변형대 부분에서 용해되고 낮은 변형대 부분에서는 침전된

다. 따라서 Z2의 강한 역전 누대구조는 높은 변형대에서(Z1-Z2 경계 위와 아래 부분) 용해된 성분이 변형 그림자대(strain-shadow zone; Z2의 양쪽 측면)로의 이동에 의해 형성되었을 것이다. 이것은 다음 토의부분에서 좀 더 자세히 다루었다. X_{Mn} 과 Fe/(Fe+Mg)비의 역전 누대구조는 또한 단결정 내에서 여러 개의 핵의 성장으로도 설명될 수 있다(Daniel and Spear, 1998). 그러나 시료 K77에서 나타나는 X_{Mn} 과 Fe/(Fe+Mg)비의 역전 누대구조는 내부 엽리구조의 발달과 연관되어 있으며, 그들은 내부엽리 잘림관계로 상대적인 형성 시간을 알 수 있다. 그러므로 이들 역전 누대구조를 여러 개의 핵의 성장으로 설명하기는 어렵다. Z3에서 X_{Mn} 과 Fe/(Fe+Mg)비는 점진적으로 감소하는 경향을 보이고, 최외각부에서 약간 증가하는 경향을 보인다. 이것은 후기 후퇴변성작용의 효과로 생각된다.

이상 위에서 언급한 바와같이, 석류석의 X_{Mn} 과 Fe/(Fe+Mg)비의 누대구조는 석류석 반상변정이 점진적으로 온도가 증가함에 따라 성장하

였음을 의미한다. 또한 석류석의 누대구조와 내부엽리의 발달간의 관계는 Z1, Z2, Z3의 상대적인 성장 시간을 결정할 수 있게 해준다. Z1-Z2 경계부 사이에 조직적/화학적 잘림관계는(Fig. 2) Z1의 성장이 Z2와 Z3의 성장보다 전에 일어났음을 의미하며, 또한 Z1과 Z2의 석류석 성장 사이의 시간적 차이(hiatus)를 의미할 수 있다(Karabinos, 1984). 마지막으로 석류석의 Z2와 Z3는 지역적인 응력작용 지배하에서 성장했을 것이다.

토 의

석류석 반상변정의 용해작용

석류석의 입자모양과 누대구조는 용해작용, 용액이동 그리고 화학적 확산작용에 의해 변화될 수 있다(Bell *et al.*, 1986; Bell and Hayward, 1991; Spear, 1993). Fig. 4에서는 석류석 성장 유형에 대한 몇가지 가능한 해석들을 정리하였다. 이들 모델에 의하면, 석류석 반상변정은 파랑벽개(crenulation cleavage) 발달과정의 1, 2단계 동안 형성되고 성장한다(Fig. 4a, b; Bell and Rubenach, 1983). 점진적인 압축대에서 미세 파쇄구조는 반상변정이 성장할 수 있도록 물질이동의 통로 역할을 한다(Bell and Hayward, 1991). 경로 1에서 반상변정은 비동축 변형운동(non-coaxial deformation)과 점진적인 압축대에서 미세 파쇄구조의 소멸로 인해 성장을 멈춘다(Figs. 4c, 4d). 용해작용은 분화된 파랑벽개(즉, 점진적인 전단운동대; Bell and Hayward, 1991) 근처에서 일어날 수 있다. 따라서 원래 석류석 반상변정의 성장 형태와 누대구조는 파랑벽개의 발달에 의해 변화될 수 있다.

경로 2에서 보여주는 반상변정의 성장형태는 경로 1과 유사하다. 그러나 반상변정은 점진적인 전단대에서의 용해작용과 석영이 풍부한 압영대(즉, 점진적인 압축대; Figs. 4e, 4f)로 용해된 물질의 이동으로 인해 전단운동 방향과 평행하게 3, 4 단계 동안에도 계속해서 성장할 수 있을 것이다. X_{Mn} 과 Fe/(Fe+Mg)비의 역전 누대구조는 변형분배(deformation partitioning; Bell *et al.*, 1986)의 결과로 설명할 수 있다. 즉, 석류석은 국부적인 물리화학적 비평형으로 인해 높은 변형대 부분에서 용해되고 낮은 변형대

부분에서는 침전된다. 따라서 Z2의 강한 역전 누대구조는 높은 변형대에서(Z1-Z2 경계의 위와 아래 부분) 용해된 성분이 변형 그림자대(strain-shadow zone; Z2의 양쪽 측면)로 이동하여 형성되었을 것이다.

시료 K77의 석류석 반상변정 Z2 내에서 나타나는 누대구조의 이상(anomaly)은 “디비아토릭(deviatoric) 응력”로도 설명할 수 있다. 디비아토릭 응력은 $\sigma_{dev} = \sigma_n(\text{normal stress}) - \sigma_{mean}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3/3)$ 을 의미한다. 선택적인 압력 용해작용이(pressure solution) 디비아토릭 응력에 의해 반상변정 주변에서 발생할 수 있다. 이 선택적인 압력 용해작용은 반상변정이 기질과 순간적인(instantaneous) 압축방향과 고각으로 접촉하는 곳, 즉 응력이 높은 곳에서 일어난다(Rubin, 1978; Fig. 4g). 선택적인 입자경계 용해작용은 응력이 높은 곳에서 용해도(solubility)의 증가로 인해 일어날 수 있다(Knipe, 1989). 따라서 용해된 물질은 응력에 의해 야기된 화학적 전위차로 인해 용해도가 높은 지역에서 용해도가 낮은 지역으로 이동될 수 있다. 용해된 물질의 침전작용은 반상변정의 압영대 부분에서 일어날 것이다(Fig. 4g; e.g., 점진적인 압축대). 용해작용은 높은 변형/응력대(e.g., M-domain; Fig. 4g)에서 일어날 것이고, X_{Mn} 의 단면선을 급한 경사 형태로 변화시킬 것이다(Duebendorfer and Frost, 1988). 또한 X_{Mn} 의 역전 누대구조는 침전작용이 일어난 부분(e.g., Q-domain; Fig. 4g)을 지시할 것이다. 결론적으로 역전 누대구조의 위치는 엽리 방향의 변화로 인해 달라질 것이다.

경로 3은 반상변정의 모양이 결정-가소성 변형작용(crystal-plastic deformation)에 의해 변할 수 있음을 보여준다(Figs. 4h, 4i; Passchier and Trouw, 1996). Ji and Martignole (1994)는 이런 가소성 변형작용에 의한 석류석의 변형이 일어나기 위해서는 매우 높은 온도(900°C 이상)가 필요하다고 제안했다. 따라서 경로 3은 이번 연구에서 사용한 석류석 반상변정에 적용되기 어렵다. 결론적으로 원래의 석류석 반상변정의 누대구조는 경로 1과 2의 효과로 인해 비균질한 누대구조로 변화된 것으로 보인다(Figs. 4c, 4d, 4e, 4f).

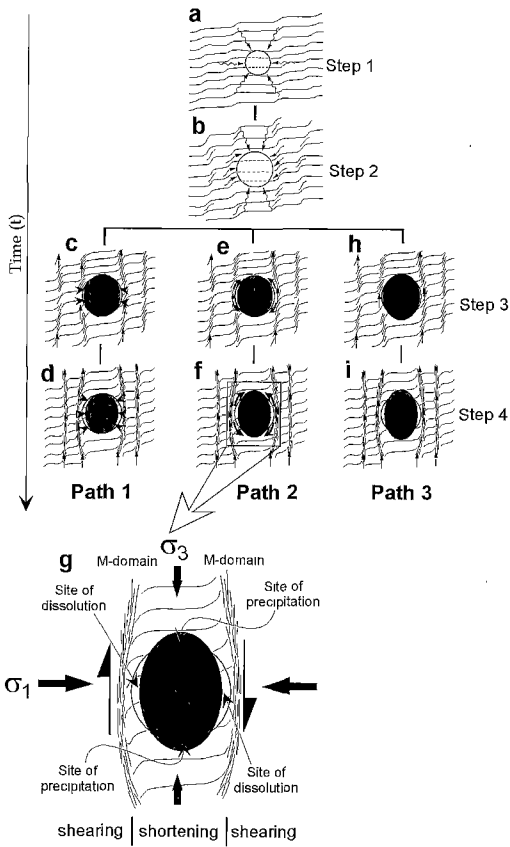


Fig. 4. Series of schematic diagrams showing three possible paths for porphyroblast growth relative to crenulation cleavage development (modified from Bell and Hayward, 1991). (a) and (b): The nucleation and growth of a porphyroblast at steps 1 and 2 of crenulation cleavage development (Bell and Rubenach, 1983). Path 1 (c and d): The porphyroblast stops growing at step 3 of cleavage development due to establishment of non-coaxial pattern of deformation partitioning associated with progressive shearing. Dissolution and diffusion occur within and adjacent to the newly developed differentiated crenulation cleavage. Path 2 (e and f): Continuous growth of a porphyroblast in the strain shadow zone during steps 3 (e) and 4 (f) due to strain-induced solution transfer of material from the porphyroblast rim against the differentiated cleavage to the boundaries in the strain shadows. (g) Schematic showing sites of preferential dissolution and precipitation due to selective stress solution resulted from deviatoric stress. Note: $\sigma_1 > \sigma_3$. Path 3 (h and i): The grain

shape of the porphyroblasts changed by crystal-plastic deformation. Open circles in a and b represent initial garnet porphyroblast. The shaded ellipse in each of three paths indicates the real porphyroblast grain shape. Black arrows show paths of material transfer and triangles in c and d indicate moving of grain boundary of garnet porphyroblast due to dissolution in progressive bulk-shearing zone.

누대구조와 선택적인 용해작용

Fig. 5에 석류석 반상변정의 비대칭적 누대구조의 발달을 위한 가능한 2차원적인 모델을 정리하였다. 이 모델은 시료 K77의 석류석이 여러 번의 성장 단계과 각 단계에서 Fig. 4에서 제시된 용해작용과 침전작용을 통해 형성되었다는 해석을 기초로 만들었다. 반상변정은 파랑벽개 발달과정의 1단계에서 2단계까지 파랑벽개를 포획하면서 성장한다(Fig. 5a; Bell and Rubenach, 1983). 외부엽리가 발달함에 따라서 반상변정은 미세 파쇄대의 소멸로 인해 성장을 멈춘다. 석류석 반상변정의 입자 모양은 반상변정 외각부에서 일어나는 전단응력과 수반된 용해작용과 용해된 물질들의 이동으로 인해 타원형으로 될 것이다(Fig. 5b). 단면선 A-A'와 B-B'에서 보여주는 다른 X_{Mn} 누대구조(Fig. 5c)는 선택적인 입자 경계 용해작용과 침전작용으로 설명할 수 있다.

석류석 성장의 다음 단계(stage 2) 동안에 성장 유형은 외부엽리의 방향이 90° 이동(y축과 평행; Fig. 5d, e)된 것을 제외하면 1 단계에서 묘사한 것과 유사하다. 이 단계에서 예상되는 X_{Mn} 의 역전 누대구조는 단면선 A-A'에서는 중앙부와 외곽부 경계에, 단면선 B-B'에서는 결정 외곽부에서 나타난다(Fig. 5f). 마지막 석류석 성장 단계 동안에(stage 3) 단면선 B-B'에서는 X_{Mn} 의 역전 누대구조는 중간부-외곽부 경계에서 나타나지만, 단면선 A-A'에서는 두 번의 역전 누대구조가 나타날 수 있다(Fig. 5i): (1) 중앙부와 중간부 사이 그리고 (2) 결정 최외각부.

결 론

이 논문에서 언급한 모델에서 예상된 X_{Mn} 의 누대구조는 단면선에 따라 다르다. 이것은 시료

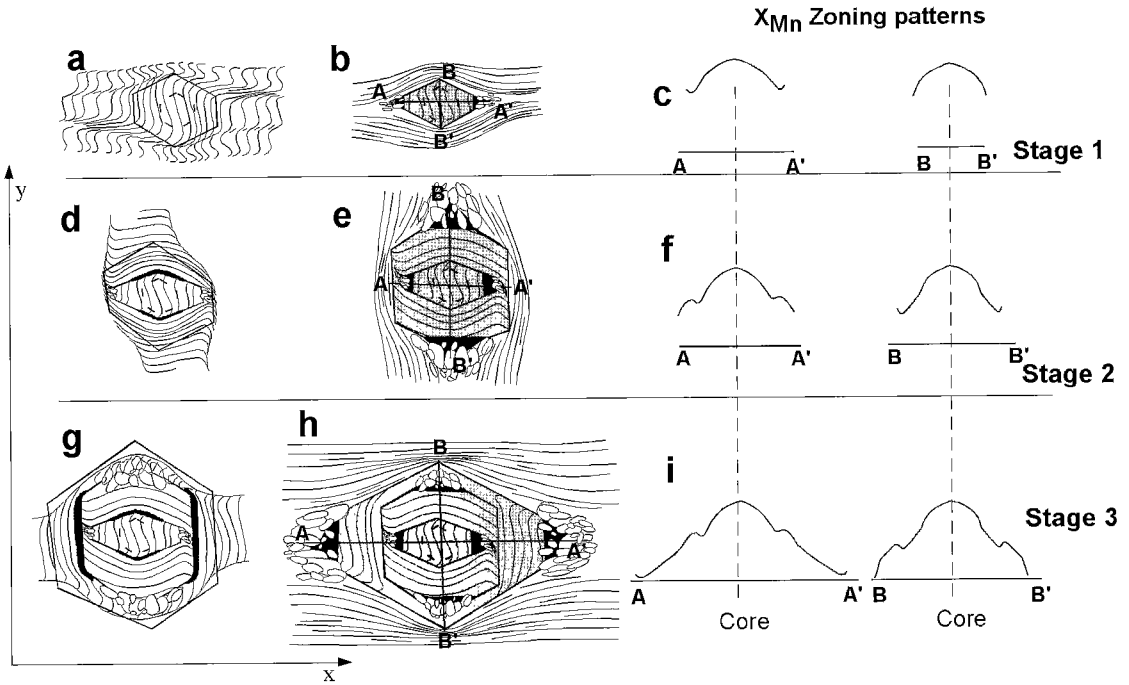


Fig. 5. 2-D model showing growth and development of asymmetrical zoning in garnet porphyroblast (a, b, d, e, g, and h were modified from Bell and Johnson 1989). Light and dark shaded regions indicate final garnet porphyroblast grains and zones of preferential dissolution and grain boundary diffusion, respectively. The profile diagrams(c, f, and i) are X_{Mn} zoning patterns expected.

K77에서 관찰된 석류석의 비대칭/비균질 누대 구조가 압축운동 방향의 변화와 수반되는 선택적 용해작용과 침전작용의 결과로 해석할 수 있다. 선택적인 용해작용과 침전작용은 변형분배(deformation partitioning)와 디비아토릭(deviatoric) 응력으로부터 야기된 용해도와 화학적 진위차의 변화로 일어날 수 있다. 석류석 누대 구조의 형성은 주로 변성요인들(예, 온도, 압력, 유체 등)의 변화에 의해 결정된다고 알려져 있다. 그러나, 위에서 언급한 바와 같이, 석류석의 누대구조는 다음과 같은 작용들에 의해서도 변화할 수 있다.

(1) 엽리의 발달과 연관된 용해작용과 침전 작용

(2) 압축운동 방향의 변화

석류석은 암석의 변형과 변성을 지시하는 중요한 광물이다. 따라서 앞으로 다양한 지역에서 산출되는 석류석의 비균질한 누대구조의 형성 과정에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

사 사

이 연구는 ARC(to Tim Bell)와 DMRS(Doctoral Merit Research Scheme to H.S. Kim)에 의해 수행되었다. 논문 초고에 건설적인 비평을 제공해 준 T.H. Bell, K.A. Hickey, M. Rubenach, E. Essene, F. Spear, R.F. Dymek, B. Ronald Frost(with English version)에게 감사드린다. 그리고 석류석 광물 산출에 대한 다양한 자료를 제공해 준 산업광물은행(Industrial Mineral Bank)에 감사드린다. 마지막으로 이 논문을 제출할 수 있도록 여러 컴퓨터 기기들을 제공해 준 강원대학교 지질학과에 진심으로 감사 드린다.

참 고 문 헌

- Bell, T. H. and Hayward, N. (1991) Episodic metamorphic reactions during orogenesis: The control of deformation partitioning on reaction sites and duration. *Jour. Meta. Geol.*, 9, 619-640.
- Bell, T. H. and Johnson, S. E. (1989) Porphyroblast inclusion trails: the key to orogenesis. *Jour. Meta. Geol.*, 7, 279-310.

- Bell, T. H. and Rubenach M. J. (1983) Sequential porphyroblast growth and crenulation cleavage development during progressive deformation. *Tectonophysics*, 92, 171-194.
- Bell, T. H., Rubenach M. J., and Fleming, P. D. (1986) Porphyroblast nucleation, growth and dissolution in regional metamorphic rocks as a function of deformation partitioning during foliation development. *Jour. Meta. Geol.*, 4, 37-67.
- Daniel, C. G. and Spear, F. S. (1998) Three-dimensional patterns of garnet nucleation and growth. *Geology*, 26, 503-506.
- Duebendorfer, E. M. and Frost, B. R. (1988) Retrogressive dissolution of garnet: Effect of garnet-biotite geothermometry. *Geology*, 16, 875-877.
- Florence, F. P. and Spear, F. S. (1993) Influences of reaction history and chemical diffusion on P-T calculations for staurolite schists from the Littleton Formation, northwestern New Hampshire. *Amer. Mineral.*, 78, 345-359.
- Frost, B. R. and Tracy, R. J. (1991) P-T paths from zoned garnets: some minimum criteria. *Amer. Jour. Sci.*, 291, 917-939.
- Gibson, R. L. (1992) Sequential, syndeformational porphyroblast growth during Hercynian low-pressure/high-temperature metamorphism in the Canigou massif, Pyrenees. *Jour. Meta. Geol.*, 10, 637-650.
- Hickmott, D. and Spear, F. S. (1992) Major- and trace-element zoning in garnet from calcareous pelites in the NW Shelburne Falls quadrangle, Massachusetts: Garnet growth histories in retrograde rocks. *Jour. Petro.*, 33, 965-1005.
- Hollister, L. S. (1966) Garnet zoning: an interpretation based on the Reyleigh fractionation model. *Science*, 154, 8437 -8448.
- Ji, S. and Martignole, J. (1994) Ductility of garnet as an indicator of extremely high temperature deformation. *Jour. Struc. Geol.*, 16, 985-996.
- Karabinos, P. (1984) Polymetamorphic garnet zoning from southeastern Vermont. *Amer. Jour. Sci.*, 284, 1008-1025.
- Kinpe, R. J. (1989) Deformation mechanism - recognition from natural tectonics. *Jour. Struc. Geol.*, 78, 249-272.
- Loomis, T. P. (1986) Metamorphism of pelites: calculation of equilibrium assemblages and numerical simulation of the crystallization of garnet. *Jour. Meta. Geol.*, 4, 201-229.
- Passchier, C. W. and Trouw, R. A. J. (1996) *Microtectonics*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 254 p.
- Robin, P. Y. F. (1978) Pressure solution at grain-to-grain contacts. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 42, 1383-1389.
- Schumacher, J. C., Schumacher, R., and Robinson, P. (1989) Acadian metamorphism in central Massachusetts and southwestern New Hampshire: evidence for contrasting P-T trajectories. In Daly, J. C., Cliff, R. A., and Yardley, B. W. D. (Eds.) *Evolution of Metamorphic Belts*. Geological Society of London, Special Publication, 43, 453-460.
- Schulz, B. (1990) Prograde-retrograde P-T-t-deformation path of Austroalpine micaschists during Variscan continental collision (Eastern Alps). *Jour. Meta. Geol.*, 8, 629-643.
- Spear, F. S. (1993) *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Path*. Mineralogical Society of America, Monograph Series, Washington DC, 799 p.
- Spear, F. S., Kohn, F. P., Florence, F. P., and Menard, T. (1991) A model for garnet and plagioclase growth in pelitic schist: implications for thermobarometry and P-T path determinations. *Jour. Meta. Geol.*, 8, 683-696.
- Spear, F. S. and Selverstone, J. (1983) Quantitative P-T paths from zoned minerals: theory and tectonic applications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 83, 348-357.
- Thompson, A. B. (1976) Mineral reactions in pelitic rocks: II. calculation of some P-T-X(Fe-Mg) phase relations. *Amer. Jour. Sci.*, 276, 425-454.
- Thompson, A. B., Tracy, R. J., Lyttle, P. T., and Thompson, J. B. Jr. (1977) Prograde reaction histories deduced from compositional zonation and mineral inclusions in garnet from the Gassetts schist, Vermont, USA. *Amer. Jour. Sci.*, 266, 1152-1167.
- Tracy, R. J., Robinson, P., and Thompson, A. B. (1976) Garnet composition and zoning in the determination of temperature and pressure of metamorphism. *Amer. Mineral.*, 61, 762-775.
- Williams, M. L. (1994) Sigmoidal inclusion trails, punctuated fabric development and interactions between metamorphism and deformation. *Jour. Meta. Geol.*, 12, 1-21.

2000년 11월 13일 원고접수, 2001년 3월 5일 게재승인.