

뉴잉글랜드 펠암 돌 주변부 데본기 변성 이질암의 변성 온도-압력 경로

김형수

제임스 쿡 대학교, 지구과학 학교

요약: 북중부 Massachusetts 주에 위치하는 펠암 돌의 북동부 연변부에서 산출되는 십자석대와 남정 석대에서 채취한 시료내의 주구성 광물과 석류석 반상변정에 대해 주성분 분석과 화학적 누대구조를 분석하였다. 석류석 반상변정들은 결정 내의 내부 엽리 형태의 변화와 누대구조를 통해 이들은 다변 형/변성 작용을 거쳐서 성장했음을 지시한다. X_{Mn} 의 역전 누대구조와 경사의 변화, $Fe/(Fe+Mg)$ 비의 증감 그리고 계단상의 X_{Ca} 을 보이는 석류석의 비정상적인 누대구조들은 석류석 반상변정 내의 내부 엽리 구조의 변화와 일치하는 경향성을 보인다. 이 내부 엽리의 형태와 광물의 산출상태, 그리고 사장 석, 흑운모, 십자석 그리고 백운모의 화학성분은 석류석의 누대구조가 다음들의 조합에 의해 변화되었 음을 지시한다. (i) 석류석의 소모 (석류석+녹니석+백운모 = 십자석+흑운모+석영+ H_2O)와 생성 (십 자석+백운모+석영=석류석+흑운모+ $Al_2SiO_5+H_2O$)을 포함하는 일변수와 이변수 반응들. (ii) 엽리 발 달 동안 이온성 용해작용, 선택적인 확산작용과 원소의 재분포를 유도하는 변형작용. (iii) 석류석 성장 동안에 온도-압력의 변화. 암석학적 관찰과 석류석의 내부엽리 구조의 변화와 결합된 연구지역의 온도-압력 경로는 두가지로 구분된다: (1) NW-SE 압축운동 동안의 온도-압력 증가; (2) NNW-SSE 압축운 동 동안의 온도-압력 감소. 기존의 펠암 돌과 Bronson Hill 지역에서 모나자이트, 티타나이트, 각섬석, 흑운모, 백운모 그리고 K-장석들의 온도-시간적(thermochronological) 자료와 후기 고생대 구조 모델에 근거해서, 아발론 압축과 표층암 경계를 따라 집중된 비균질 전단운동의 결과로 형성된 알레게니안 변 성작용은 펠암 돌 중부 Shutesbury 지역에서 펜실베이니아기 동안(290-300Ma) 남정석-십자석-백운모 광 물조합을 형성시켰다. 그러나, Northfield 향사 지역에서는 알레게니안 변성작용의 온도는 석류석과 십 자석을 형성시킬 만큼 높지 않았으며, 비균질한 전단운동에 의해 기질(matrix)에만 영향을 미쳤다. 따 라서 Northfield 향사 지역의 온도-압력 경로 (1)과 (2)는 데본기(약 367 Ma)~미시시피안(약 326 Ma) 동안에 형성되었고, 기질은 페름기(약 260-270 Ma)에 재변성되었다.

핵심어: 내부 엽리, 석류석 누대구조, 용해작용, 온도-압력 경로, 온도-시간 경로

서 론

지금까지 변형작용과 변성작용은 실험적 관찰을 통해 서로 밀접하게 관계가 있다고 보고되어 있다 (e.g., Etheridge *et al.*, 1983; Karabinos, 1984; Bell *et al.*, 1986, 1998; Barker, 1994; Williams, 1994; Aerden, 1995). 비록 반상변정 내의 내부엽리 구조(inclusion trails)의 발달에 대한 해석은 아직까 지 의견이 분분하지만(Passchier *et al.*, 1992; Bell *et al.*, 1992; Williams and Jiang, 1999), 상대적인 반상변정의 성장 시기는 내부와 외부 엽리의 접촉 관계, 내부 엽리 구조 형태 및 포유광물의 변화로 부터 유추되어져 왔다(Vernon, 1978; Bell *et al.*, 1998; Bell and Hickey, 1997).

점진적인 석류석 누대구조에서 갑작스런 변화는

(1) 부피 확산(volume diffusion) 없는 석류석 성장 의 연속적인 에피소드(epochs); (2) 석류석 소모를 유발하는 일변수 반응(univariant reaction); (3) 부피 확산을 갖는 재흡수(resorption); 그리고 (4) 변성 교 대 작용에 의한 용해작용(dissolution)과 이미 존재 하는 석류석의 재침전 작용에 의해 형성되어질 수 있다(Thompson *et al.*, 1977; Tracy, 1982; Karabi nos, 1984; Hames and Menard, 1993). 석류석 반 상변정 내에 남아있는 내부 엽리의 잘림 관계(textural truncations)는 일변수와 이변수(divariant) 반응 들에 의한 반상변정의 소모와 성장의 결과일 수 있 다. 또한 용해작용과 용액이동(solution transfer)를 유발하는 변형작용은 반상변정 성장 동안에 내부 엽리의 잘림 관계를 설명할 수 있다(e.g., Bell and Hayward, 1991; Williams, 1994; Spiess and Bell, 1996).

반상변정(e.g., 석류석, 십자석 그리고 사장석) 내

연락저자: 강원도 춘천시 강원대학교 지질학과

의 미세구조 발달과 화학적 변화 양상 사이의 관계에 대한 이해는 조산운동의 자세한 지구조적(tectonometamorphic) 역사를 밝히는 데 도움을 줄 것이다. 실제 온도-압력-시간(P-T-t path)는 단순히 시계/반시계 방향 경로가 보다 복잡한 유형을 보일 것이고, 이것은 자세한 미세구조와 변성암석학적인 연구를 통해서 알아낼 수 있다(Schulz, 1990; Kriegsman, 1993; Zhang *et al.*, 1994; Rubenach and Barker, 1998). 이 논문의 목적은 다음과 같다.

(1) 미국 매사추세츠(Massachusetts) 주 북중부에 위치하는 펠암 돔(Pelham Dome)의 북동부 연변부에서 산출되는 변성 광물조합(mineral assemblage) 변화에 따른 누대구조의 변화 양상을 이용하여 온도-압력 경로 규명

(2) 석류석 반상변정 내에 휘어진 내부 엽리의 변곡축을 이용하여 얻은 과거 압축운동 방향의 변화와 변성 온도-압력 경로를 기초로 연구지역의 보다 정확한 온도-압력-변형(P-T-d) 변천 역사를 밝히는 데 있다. 이로부터 얻어진 자료들은 연구 지역 부근에서 기 발표된 온도-압력-시간 경로와 구조적(tectonic) 모델들과 비교 분석하여, 연구 지역의 석류석 성장이 아카디안(Acadian) 변성작용에 의한 것인지 아니면 펜실베이니아기(Pennsylvanian) 동안의 알레게니안(Alleghanian) 변성작용에 의해 지배되었는지를 밝히고자 한다.

지질개요

연구 지역은 4개의 주요 지질대로 구분된다: Connecticut Valley, Bronson Hill, Kearasge-Central Maine 그리고 Merrimack Zones(Fig. 1; Zen *et al.*, 1983; Zartman, 1988). 이 논문에서 언급하는 Bronson Hill 지역은 선캠브리아기의 편마암과 변성된 오르도비스기, 실루리아기 그리고 데본기의 퇴적암과 화산암으로 구성되어 있다(Robinson, 1967; Zen *et al.*, 1983). 대부분의 시료는 Northfield 향사 지역의 데본기 리틀톤(Littleton)과 어빙(Erving)층에서 채취했다(Fig. 1). 리틀톤층은 주로 석류석과 십자석 반상변정과 흑연을 함유하는 운모 편암과 국부적으로 규암이 산출된다. 어빙층은 주로 각섬석-녹염석 각섬암으로 구성되어 있고 석영-사장석-흑운모 편암, 운모 편암 그리고 탄산 규산연암이 협재되어 나타난다.

중부 매사추세츠 지역의 변성대는 광물조합과 온도-압력 조건에 따라 Zone I에서 Zone VI까지 6개로 나누어져 있다(참고 fig. 1 in Tracy *et al.*,

1976). 연구 지역은 Zone I (남정석대)에 해당된다. Tracy *et al.*(1976)은 석류석-흑운모 지은계와 석류석-남정석-사장석-석영(GASP) 지압계를 사용하여 Zone I의 변성 온도-압력 조건이 470~600°C와 5.5~6.0 kbars이라 발표하였고, 이것은 아카디안 조산운동에 의한 것으로 설명했다. 아카디안 조산운동은 냅(nappe), 재습곡(back-fold) 그리고 돔(dome) 단계로 구성되어 있고, 이것은 연구 지역에서 나타나는 복잡한 습곡대(e.g., anticlinorium 또는 synclinorium)를 형성 시켰다(Robinson, 1967; schumacher *et al.*, 1990; Peterson and Robinson, 1993). 그러나 Tucker and Robinson(1990)과 Robinson *et al.*(1992)은 펠암돔 주변 shutesbury 지역에서 290-300 Ma의 모나자이트(monazite)의 U-Pb 절대연령을 근거로 연구지역의 Zone I의 암석은 알레게니안 조산운동 동안 펜실베이니아 변성작용에 의해 재변성되었다고 해석하였다.

연구방법

미세구조와 변성암석학적인 관찰을 위해 200여 개의 시료를 채취하였고, 약 1,500개의 박편을 제작 관찰하였다. 조암광물의 화학분석은 James Cook University의 Advanced Analytical Centre(AAC)에서 전자 현미 분석기기(JEOL-840A)를 이용하여 실시했다. 반상변정의 화학 성분은 점분석을 통해 분석하였고, 각 분석치는 한점에 대해 3회 분석한 값의 평균치를 사용했다. 분석시 count 시간은 50초/한점, 가속 전압은 15kV, 빔(beam) 전류는 20 nA 그리고 빔 직경은 3-5 μm 이다. 분석치 보정은 ZAF 방법을 사용하였다. 십자석대와 남정석대에서 산출되는 광물들의 화학조성은 부록의 Table A1~A4에서 보여준다.

석류석 반상변정 내 엽리의 변곡축은 이전의 엽리로 정의되는 내부엽리(inclusion trails)의 형태를 이용하여 측정되었다(Bell *et al.*, 1995). 변곡축의 선주향(trend)은 정향된 시료를 진북을 기준으로 0°에서 170°까지 10° 간격으로 외부엽리에 대해 수직으로 박편을 제작한 다음, 석류석 반상변정에서 관찰된 휘어진 내부엽리의 형태가 변하는 위치를 찾음으로 결정할 수 있다. 즉, 같은 방향으로(예, 시계 또는 반시계방향) 내부엽리 형태를 관찰하면, 휘어진 내부엽리의 모양이 2개의 수직박편사이에서 "S"자에서 "Z"자로 바뀌게 된다. 이 두 박편의 중간값이 변곡축의 선주향을 의미한다. 예를들면, 주향이 30°와 40°인 두 수직박편에서 모양이 변화하면, 변곡축의 선주향

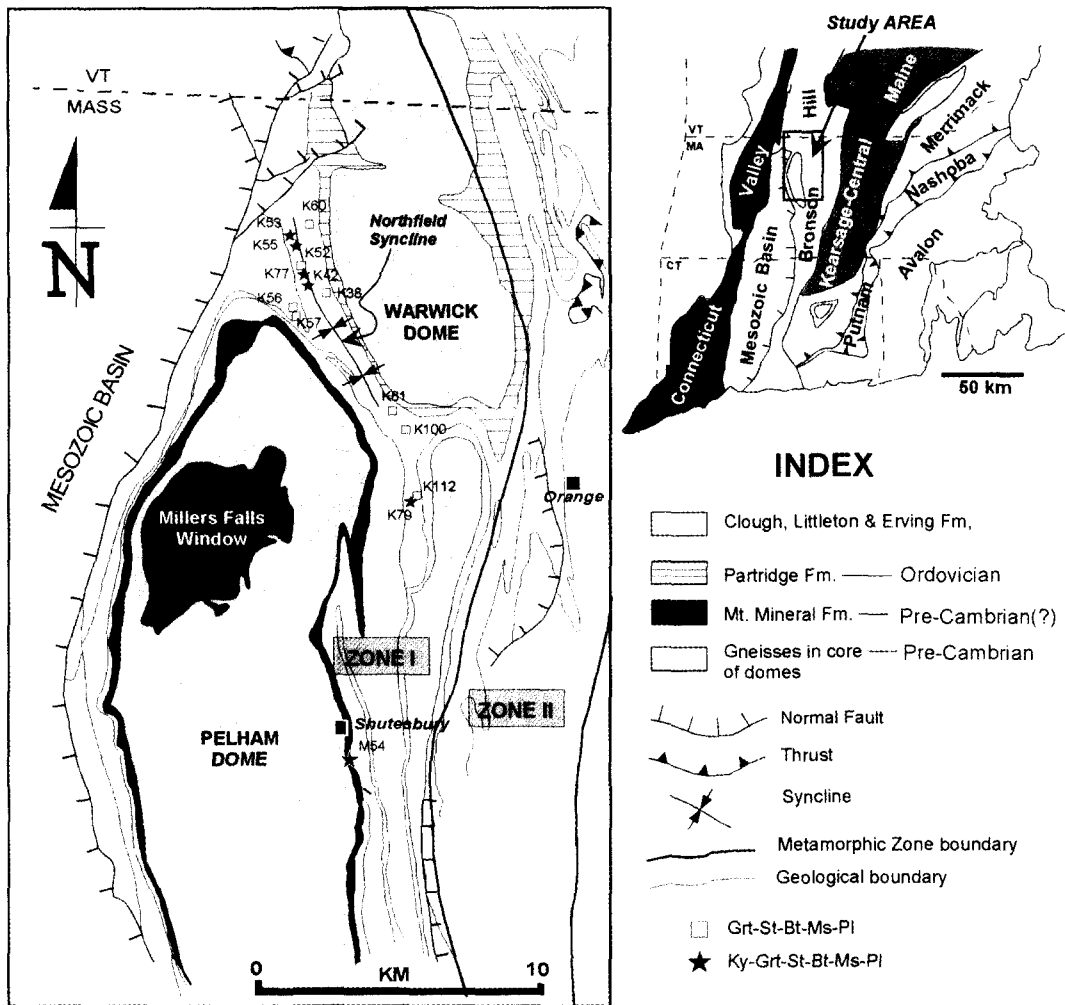


Fig. 1. Geological map of the study region showing sample location and distribution of mineral assemblages. There are four major tectonic subdivisions; the Connecticut Valley, the Bronson Hill, the Kearsarge-Central Maine and the Merrimack Zones around the Pelham and the Warwick Domes in north-central Massachusetts(after, Zen, *et al.*, 1983; Zartman, 1988). Zones I and II indicate metamorphic zones of Tracy *et al.* (1976). Unpatterned unit consists of Silurian Clough Formation, and Devonian Littleton and Erving Formations.

은 35°이다. 이 내부엽리의 변곡축은 반상변정이 회전에 의해 형성되었다면 변곡축의 선주향은 편리의 이동방향과 수직관계를 나타내고(Rosenfeld, 1968; Schoneveld, 1979), 기질이 회전에 의해 형성되었다면 변곡축의 선주향과 수직인 방향은 수평 압축방향(bulk horizontal shortening)을 지시할 것이다(Bell *et al.*, 1992; Bell and Hickey, 1997). 변곡축 선주향의 상대적인 시간은 한 개의 반상변정에서 두개 이상의 변곡축을 얻을 수 있다면, 즉 중심부에서 외각부로 감에 따라 변곡축의 선주향 변화를 관찰할 수 있으면, 결정할 수 있다. 왜냐하면 반상변정 중앙부의 변

곡축은 외각부의 변곡축 보다 먼저 형성된 것이기 때문이다. 따라서 이와같은 변곡축 선주향의 변화는 압축 운동방향의 변화 역사를 유추하는데 사용할 수 있다(Bell *et al.*, 1998).

광물조합

Northfield 향사 지역에서 채취한 시료들의 광물 조합은 석류석-십자석-흑운모-백운모-사장석±녹니석±티탄철석±흑연(십자석대)와 남정석-석류석-십자석-흑운모-백운모-사장석±녹니석±티탄철석±흑

Table 1. Modal compositions of samples from two metamorphic grade assemblages

	Sp. no.	Qtz	Bt	Ms	Grt	St	Pl	Chl	Ky	Ilm	Grap	Rut
Grt-St	K38	41.2	25.4	11.4	8.6	4.0	4.2	Tr	-	1.0	4.2	-
	K60	38.7	22.9	23.0	6.1	Tr	5.9	1.0	-	1.9	0.5	-
Zone I Ky-Grt-St	K41	33.0	34.9	2.0	10.6	1.4	18.0	Tr	Tr	0.1	Tr	Tr
	K53	33.9	15.3	24.2	6.3	7.9	2.7	4.0	4.1	1.4	Tr	Tr
	K77	35.0	38.3	10.6	4.6	4.7	4.7	0.7	1.1	0.3	Tr	Tr
	K79	42.4	33.7	7.0	5.6	1.7	4.4	4.9	Tr	0.3	Tr	Tr
	M54	36.3	18.3	26.4	10.4	1.3	1.4	Tr	4.0	1.9	Tr	Tr

N.B. Total counting number is 700 points for each sample. Mineral abbreviations from Kretz (1983).

연(남정석대)으로 구성된다(Table 1). 석류석 반상변정들의 입자 크기는 세립에서 극조립(>5 mm)까지 다양하게 산출되고, 석영, 티탄철석과 흑연을 흔하게 포획광물로 가지고 있다. 일부 석류석 반상변정들은 녹니석과 흑운모 포획물을 가지며, 석영과 흑연의 함량 변화에 따른 조직적 누대구조를 보인다. 십자석 반상변정들은 석영, 흑운모, 백운모, 사장석, 석류석, 티탄철석 그리고 흑연을 포획광물로 가지고 있다(Fig. 2a). 또한 일부 십자석 반상변정들은 방향성을 보이지 않는 조립질의 백운모에 의해 부분적 또는 완전히 가상(pseudomorph)화 되어있다(Fig. 2b). 남정석은 산출상태에 따라 2개의 형태: (i) 십자석과 교호하면서 엽리의 방향과 평행하게 기질부에서 산출되는 것; (ii) 석영과 흑운모를 포획물로 가지며 반상변정으로 산출되는 것(Fig. 2c)으로 구분된다. 이 두 변성대에서 엽리를 이루는 일부 흑운모는 녹니석과 교호하면서 산출되고, 일부는 백운모와 마그네타이트(magnetite)로 치환되어 있다.

펜실베이안 변성작용에 영향을 받은 것으로 알려진 Mt. Mineral층에서 채취한 시료 M54(Robinson *et al.*, 1992)는 Northfield 향사 지역의 남정석대와 유사한 광물조합을 보인다. 그러나 이 시료에서는 십자석 반상변정은 산출되지 않는다. 이 시료에서 남정석은 석류석과 사장석 반상변정들의 포획물로 나타나고(Fig. 2d), 남정석은 조립질 백운모에 의해 치환되어져 있다(Fig. 2e). 이런 암상은 Northfield 향사 지역의 남정석대에서는 발견되지 않았다.

광물화학

두 변성암대에서 흑운모의 Mg/(Mg+Fe) 비는 0.34~0.60의 범위를 보인다. Mg의 함량은 남정석대에서 산출되는 흑운모에서 풍부하고, 십자석대로 감에 따라 감소하는 경향을 보인다(Fig. 3a). 그러나, 시료 M54(Mt. Mineral층)의 흑운모는 Northfield 향사 지역의 흑운모에 비해 낮은 Mg/(Mg+Fe) 비

를 갖는다.

백운모의 성분은 총 Al 함량의 넓은 분포범위를 보인다(Fig. 3b). 남정석대에서 백운모의 Na/(Na+K) 비는 0.14~0.28의 범위를 보이지만, 십자석대에서 Na/(Na+K)비는 0.01~0.45로 넓은 범위를 보인다. 두 변성암대에서 백운모의 Al과 Si 함량은 반비례 관계를 보이고 대부분 백운모의 성분은 세라도라이트-백운모 연결선 상에 위치한다(Fig. 3c). 이와같은 성분변화 양상은 백운모 성분은 처마카이트 치환, $(Fe^{2+}, Mg)Si \rightleftharpoons Al+Al$, 의해 조절되었음을 의미한다.

십자석대에서 산출되는 사장석의 An%(Anorthite)는 1~15의 범위를 보인다. 남정석대에서 산출되는 사장석의 An%는 2~43의 넓은 범위를 보이며, 두 구름으로 구분된다(Fig. 4a: An_{1-20} 과 An_{20-43}). Northfield 향사 지역에서 산출되는 사장석 반상변정은 누대구조를 보이지 않지만, 시료 M54내의 사장석 반상변정은 중앙부(An_9)에서 외각부(An_{13})로 감에 따라 약간 증가하는 경향을 보인다(Fig. 4b).

두 변성암석대의 녹니석의 Si은 5.0~5.6을 보이며 0.2~0.8의 Fe/(Fe+Mg) 비로 대부분이 Hey (1954) 분류방법에 의하면 레피도라이트(repidualite)에 해당된다(Fig. 4c). 석류석 반상변정 내의 녹니석 포획물의 Fe/(Fe+Mg) 비는 0.91~0.47이고 기질 내의 녹니석의 Fe/(Fe+Mg) 비는 0.40~0.54를 보인다. 시료 K41에서 석류석 반상변정 내의 녹니석 포획물의 Fe/(Fe+Mg) 비는 중앙부(0.74)에서 외각부(0.46)으로 감에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 보인다(Fig. 4c). 두 변성암대에서 석류석과 십자석 반상변정 내에 포획광물로 그리고 기질부에서 산출되는 대부분 티탄철석의 Fe/(Fe+Mn) 비는 0.97~0.99 범위 안에 놓인다.

석류석 누대구조와 내부엽리의 발달: 온도 입력 경로 해석

연구지역의 변성경로는 석류석 반상변정 내의 내

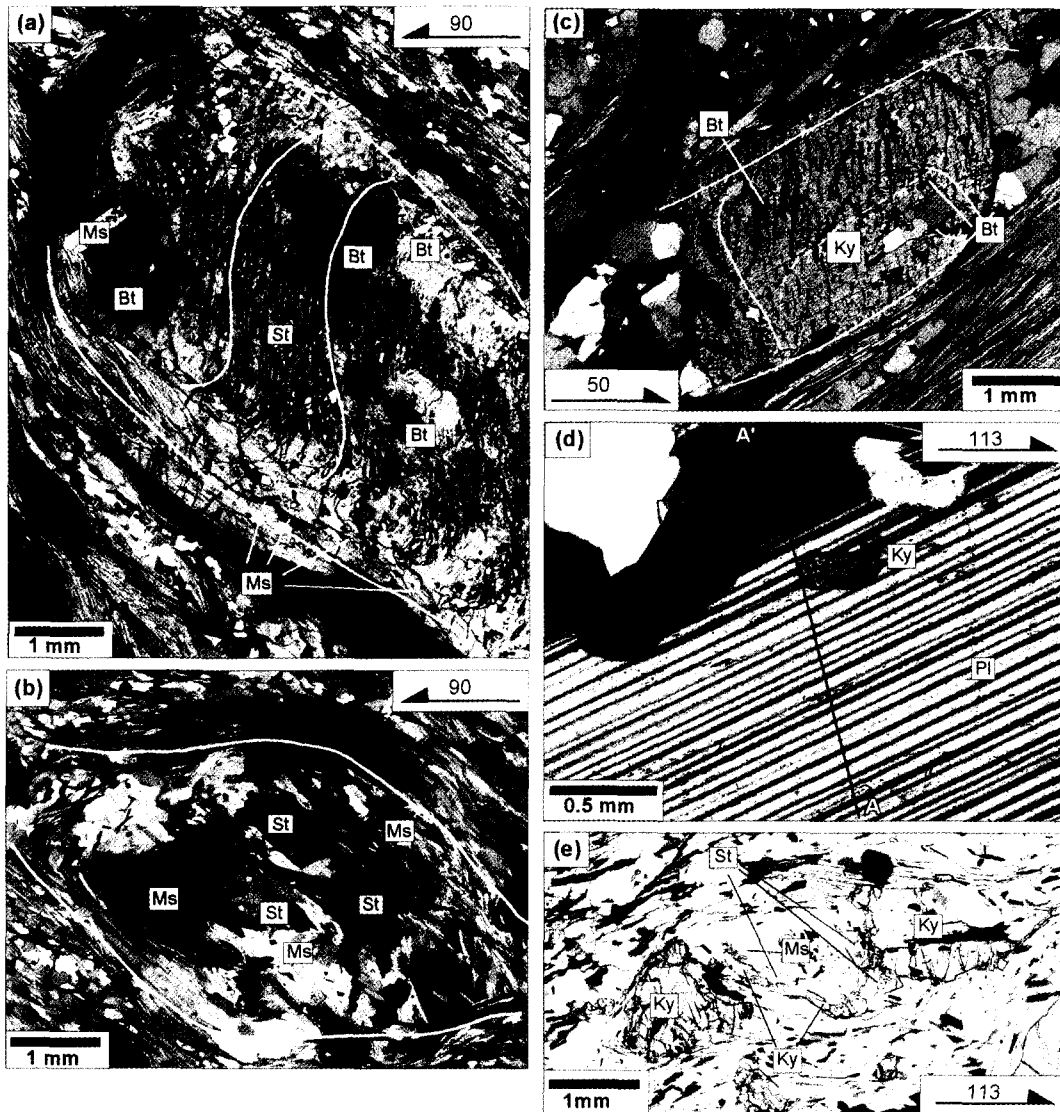


Fig. 2. Photos of mineral occurrences in Grt-St and Ky-Grt-St grade assemblages. (a) Staurolite porphyroblast showing changes in inclusion trail density and mineralogy, where quartz, biotite, graphite, ilmenite inclusions occur at the core and muscovite and quartz at the rim. Vertical thin section (striking 90°) of sample K57. Mineral abbreviations from Kretz (1983). (b) Staurolite partially replaced by coarse-grained, randomly oriented muscovite forming a pseudomorph. The pseudomorph is outlined by white lines. Vertical thin section (striking 90°) of sample K58. (c) Kyanite porphyroblast containing quartz and biotite inclusions (sample K77). Kyanite shows slightly curved inclusion trails in the core. The trails in the rim are continuous with the matrix foliation. Vertical thin section (striking 50°). (d) Plagioclase containing kyanite inclusion. A-A line indicates the position of a microprobe traverse. Vertical thin section (striking 113°) of sample M54 from the Mt. Mineral Formation, central Massachusetts. (e) Corroded kyanite and staurolite porphyroblasts mantled by coarse-grained muscovite in sample M54. Vertical thin section (striking 113°). Photos a, b, c and d taken under partially crossed polars, and e taken under PPL.

부 열리의 발달과 석류석의 성분 누대구조에 대한 해석을 기초로 측정하였고, 변성 경로상의 온도-압력 조건은 변성 이질암에 적용되는 지온지압계를

이용하여 계산하였다. 시료에 적용된 지온지압계들은 석류석-흑운모 Fe-Mg (Hodges and Spear, 1982; Berman, 1990)와 석류석-티탄철석 Fe-Mn 지온계

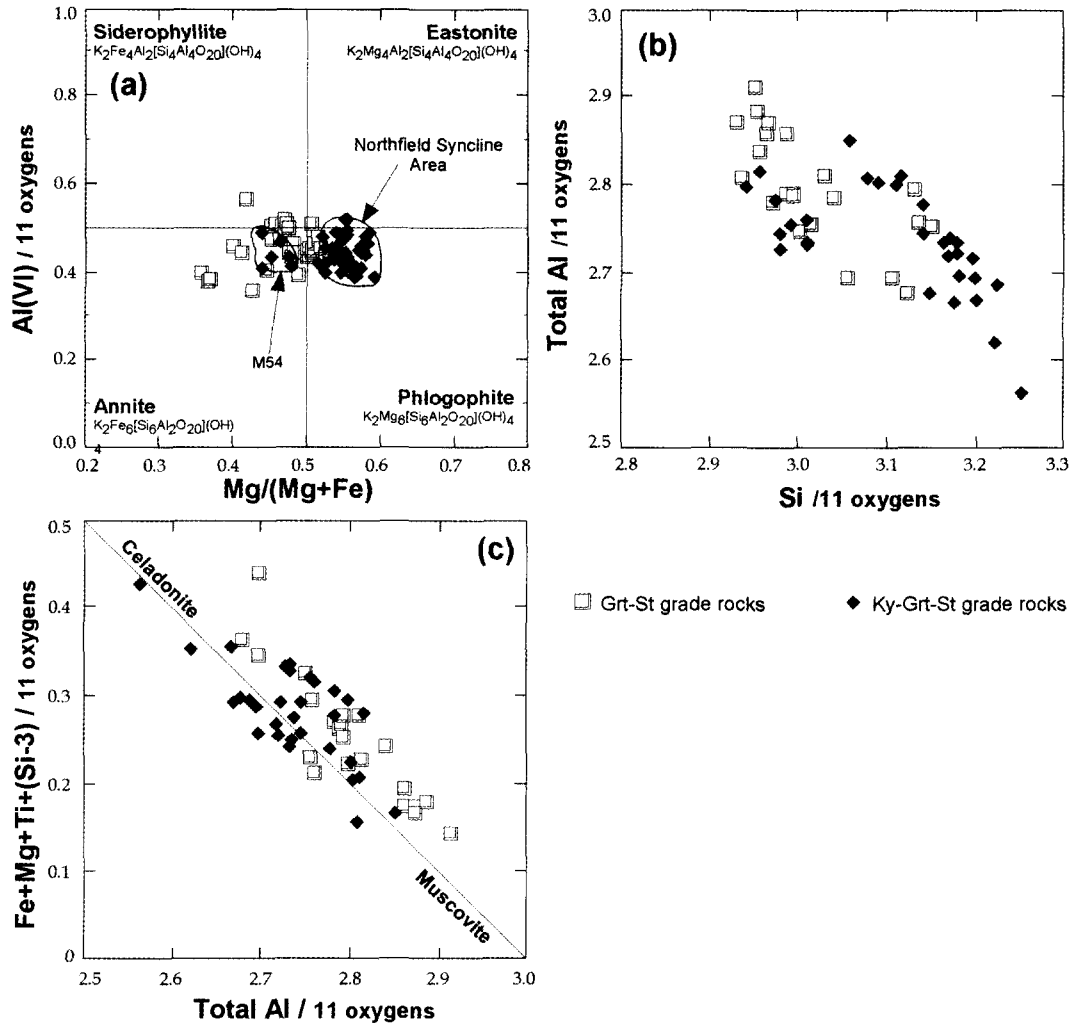


Fig. 3. The compositional variations of biotite and muscovite grains from two metamorphic grade assemblages. (a) Mg/Mg+Fe vs. Al(VI) in biotite. (b) Si vs. total Al in muscovite. (c) total Al vs. Fe+Mg+Ti+(Si-3) to illustrate the ideal tricahedral and tschermakitic substitutions in muscovite. All cations are based on 11 oxygens.

(Pownceby *et al.*, 1987) 그리고 석류석-사장석-백운모-흑운모(GPMB; Ghent and Stout, 1981), 석류석-사장석-석영-Al₂SiO₅(GASP; Hodges and Spear, 1982; Hodges and Crowley, 1985), 석류석-금홍석-Al₂SiO₅-티탄철석-석영(GRAIL; Bohlen *et al.*, 1983) 그리고 석류석-금홍석-사장석-티탄철석-석영(GRIPS; Bohlen and Liotta, 1986) 지압계이다.

십자석대

시료 K38

석류석 반상변정은 석영, 녹니석과 흑연을 포함

하고 있으며(Fig. 5a), 석류석 결정 중앙부에는 경사가 급한 내부 엽리 구조를 가지고 있다(Fig. 5b). 이 중앙부의 내부 엽리는 흑연이 풍부한 중앙-외각(core-rim) 경계부에서 잘려진다. 또한 이들 석류석 결정 내의 내부 엽리는 기질 엽리와 연속되지 않는다. 내부엽리 변곡축의 선주향은 중앙부와 외각부에서 각각 140°와 60°이다(Table 2).

X_{Mn}(spessartine)은 중앙부에서 "종모양"(bell-shaped) 형태를 보이고, 중앙-외각 경계부에서는, 즉 중앙 내부 엽리가 잘리는 부분(textural truncation zone), 약간 증가하거나 평탄한 형태를 보이며, 결

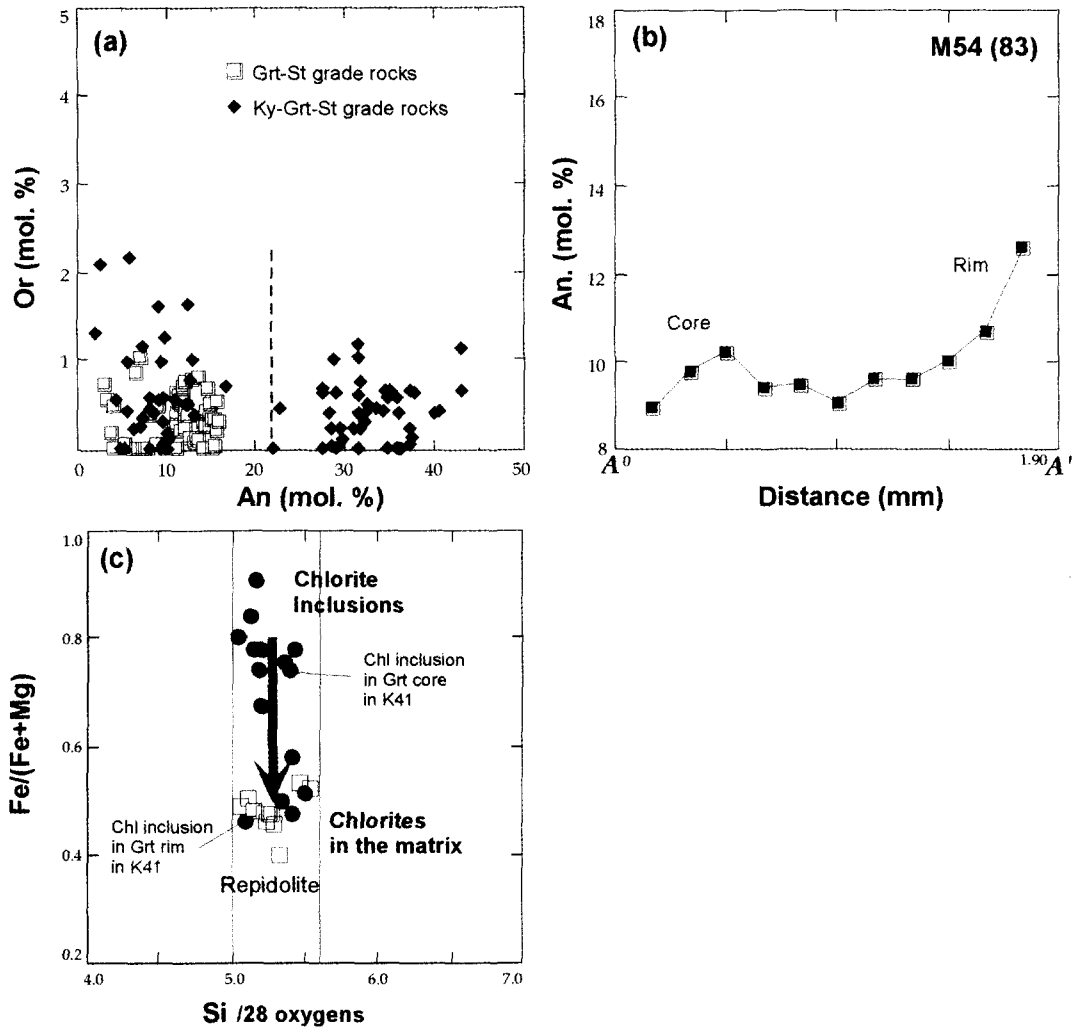


Fig. 4. (a) Compositions of plagioclase from two metamorphic grade assemblages, plotted on An-Or diagram. Symbols are the same as in Fig. 3. (b) An.% variation of plagioclase from the core to the rim, sample M54 in Fig. 2d. (c) Classification of chlorite based on Fe/Fe+Mg and Si compositions(after, Hey, 1954). Closed circles and open boxes represent chlorite inclusion and matrix chlorite respectively.

정 외각부에서는 다시 감소하는 경향을 보인다(Fig. 5c). Fe/(Fe+Mg)는 결정 가장자리로 감에 따라 약간 감소하는 경향을 보이지만, 중앙 내부 엽리가 잘린 부분에서는 반대로 증가한다($\Delta Fe/(Fe+Mg) = +2$ 에서 5 mol.%; 절단선 A-A'와 B-B'; Fig. 5c). X_{Ca} (grossular) 또한 중앙-외각 경계부에서 증가한다($\Delta X_{Ca} = +3.3$ mol.%; Fig. 5c). 이런 X_{Mn} 과 Fe/(Fe+Mg)의 역전 누대구조와 X_{Ca} 의 급증은 중앙-외각 경계부의 석류석 내부 엽리 형태 변화와 비교적 잘 일치하고 있다. X_{Mn} 과 Fe/(Fe+Mg)의 역전 누대구조는 단순히 온도 감소를 지시할 수 있으며, 또

는 석류석 중심부가 성장 후, 외각부가 성장하기 전까지의 시간적인 차이(gap)에 의한 것으로 생각할 수 있다. 따라서 이런 역전 누대구조는 석류석 결정 중앙부가 성장한 후, KFMASH($K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$) 계하에서 십자석을 형성하기 위해 반응 (1)에 의해 석류석은 부분적으로 재흡수 작용(resorption)에 의해 생성되어질 수 있다(e.g., Tracy *et al.*, 1976; Loomis, 1986; Spear *et al.*, 1991).

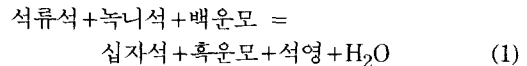


Table 2. Trend of inflexion axes and inclusion morphology of garnet porphyroblasts which analysed in this study.

Sample No.	Metamorphic grade	Trend of inflexion axes (relative to true north)			Inclusion Trail morphology	Grt grain size(mm)
		Core	Med.	Rim		
K38	Grt-St	140		60	slightly sigmoidal trail	3.1
K60	Grt-St	140		50	sigmoidal and staircase trails	4.1
K53	Ky-Grt-St	140	70		weak spiral trail	9.0
K77	Ky-Grt-St	125	45		sigmoidal and d.c.c.	5.0
M54	Ky-Grt-St				straight trail	3.1

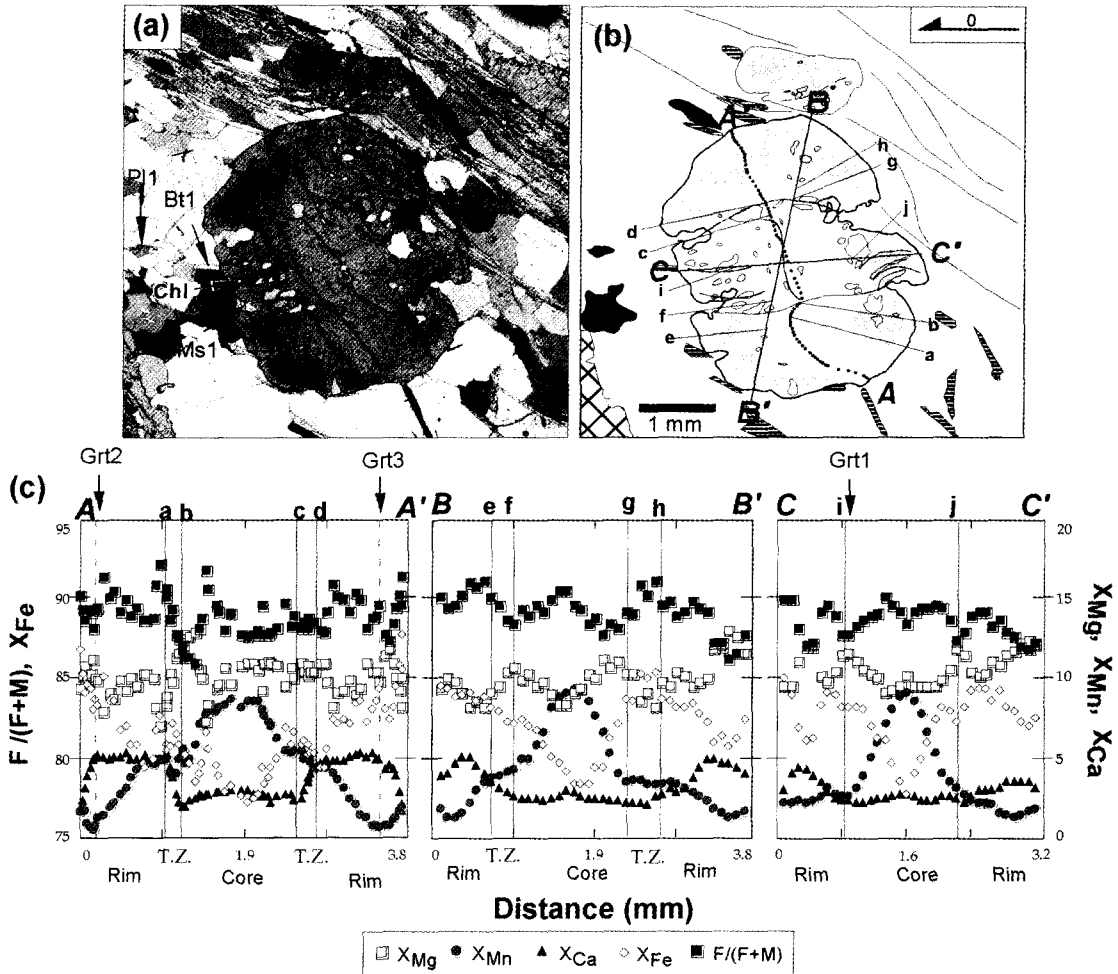


Fig. 5. (a) Photo of garnet porphyroblast in sample K38 showing textural truncations of the core inclusions trails by the trails in the rim. Vertical thin section (striking 0°). Partially crossed polars. (b) Line diagram of Fig. 5a. Light gray area within garnet indicates graphite-rich zone. Dark gray, horizontal hatch and cross hatch represent Pl, mica and St respectively. Lower-case and uppercase alphabets indicate locations analyzed (see Fig. 5c). (d) Profile diagrams for the garnet porphyroblast. N.B. $F/(F+M) = Fe/(Fe+Mg)$; X_i (mole fraction for component i) = $i/(Fe+Mg+Mn+Ca)$; T.Z., truncation zone.

즉, 반상변정과 외부 엽리와 접하는 부분에서 석류석 결정과 기질 사이의 용해작용과 화학적 전위 (chemical potential) 차이에 의해 Mn과 Mg는 재분

포(re-distribution) 설명할 수 있다. 이 석류석을 소모하는 일변수 반응 (1)은 석류석 성장 누대구조의 일부분을 없애 버릴 수 있고, 내부 엽리의 절단도

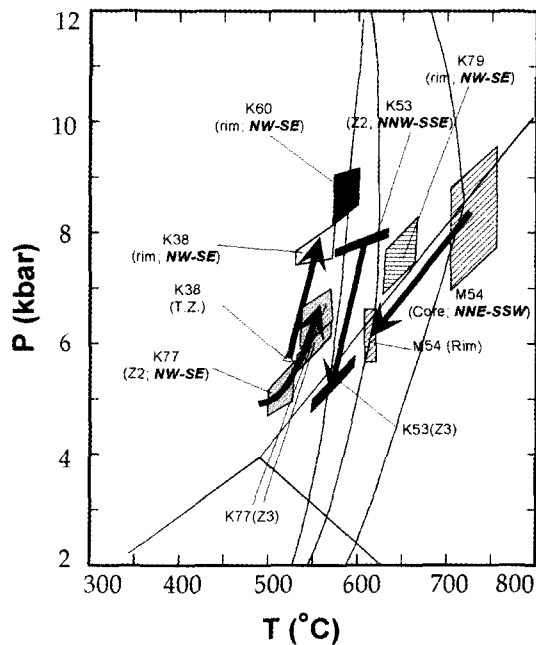
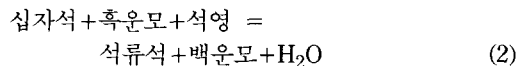


Fig. 6. Results of thermobarometric calculations for two metamorphic grade assemblages. P-T conditions of samples from Grt-St and Ky-Grt-St grade rocks based on the intersections GB, GI and GPMB, GASP and GRAIL.

이 반응으로 설명된다. 석류석 결정 외각부는 십자석 가상을 형성하기 위해 반응 (2)에 의해 Fe/(Fe+Mg)가 증가하면서 성장했을 것이다(e.g., Loomis, 1986; Spear *et al.*, 1991).



중앙 내부 엽리가 잘리는 부분(석류석 결정의 중앙-외각 경계부)의 온도-압력은 석류석 성분(Fig. 5c의 Grt1)과 석류석 외각부 성장 전에 형성된 중앙부 압영대에 있는 사장석, 흑운모와 백운모 성분(Fig. 5c의 Pl1, Bt2 그리고 Ms1)을 이용했다. 석류석 외각부의 온도-압력은 석류석 성분(Fig. 5c의 Grt2)과 기질에 존재하는 사장석, 흑운모와 백운모 성분을 사용했다. 석류석-흑운모와 석류석-사장석-백운모-흑운모 지은지압계로 결정한 석류석 결정의 중앙-외각 경계부 온도-압력은 520°C, 5.7 kbar이다(Table 3). 그리고 변곡축의 선주향이 60°인 석류석 외각부의 온도-압력은 561~571°C, 7.2~8.1 kbar이다(Table 3; Fig. 6). 이것은 석류석 결정 중앙부가 성장한 후 NW-SE 압축운동에 의한 온도와 압력의 증가 함을 의미한다(Fig. 6).

시료 K60

석류석 반상변정은 석영, 티탄철석과 흑연 포획 광물들을 가지고 있고, 석영 포획물에 의해 만들어진 내부 엽리는 중심부에서 외각으로 감에 따라 약한 나선형 모양을 보이며(Fig. 7a and b), 내부 엽리의 잘림구조는 보이지 않는다. 이 내부 엽리는 외부 엽리에 의해 고각(high angle)으로 잘려져 있다(Fig. 7b). Jones(1994)는 하나의 엽리가 다른 엽리로 완곡한 곡선으로 이어지는 것은 이들이 용해작용(dissolution)에 영향을 받지 않았음을 지시한다고 제안했다. 내부엽리 변곡축의 선주향은 중앙부와 외각부에서 각각 140°와 50°이다(Table 2).

X_{Mn} 은 변곡대 부근에서 환경사에서 급경사의 변화를 보이며 대체로 "종 모양"의 누대구조를 보인다(Fig. 7c). Fe/(Fe+Mg)비 또한 변곡대 근처에서 증가한다(Fig. 7c). 비록 누대구조가 일정하지 않은 변화로 인해 해석에 어려움이 있지만, 변곡대에서 X_{Mn} 과 Fe/(Fe+Mg)의 변화는 석류석 반상변정이 반응 (1)에 의해 석류석 결정 중앙부 성장한 후, 부분적인 재흡수 작용에 의한 것으로 생각된다. 그러나, 이 재흡수 작용은 아마 내부 엽리의 잘림을 형성할 만큼 강하지 않았을 것이다. 석류석 외각부(Grt1 and Grt2; Fig. 7c)와 기질부의 사장석, 흑운모와 백운모 성분을 이용하여 얻은 온도-압력 조건은 568~599°C, 8.2~8.6 kbar이다(Table 3; Fig. 6). 이것은 석류석 외각부의 변곡축의 선주향(50°)에 대해 수직인 NW-SE 압축운동 동안의 온도-압력을 지시한다.

남정석대

시료 K77

석류석 반상변정은 석영, 녹니석, 티탄철석과 흑연 포획광물을 가지고 있다. 이 석류석 결정은 포획광물의 밀도와 내부 엽리의 형태로 3개의 조직대로 구분된다(Fig. 8a and b): Z1(중앙부), Z2(중간부) 그리고 Z3(외각부). 내부엽리 변곡축의 선주향은 중앙부와 중간부에서 각각 125°와 45°이고 외각부의 선주향은 엽리 발달의 결어로 구하지 못했다(Table 2).

시료 K77 석류석의 X_{Mn} 의 화학적 누대구조는 복잡하고, 적어도 다음과 같은 4개의 역전 누대구조가 존재한다: i) Z1의 가장자리, ii) Z2 내, iii) Z2와 Z3 경계부, iv) 결정의 최외각부. 전체적으로 Fe/(Fe+Mg)비는 석류석의 중앙부에서 외각부로 감에 따라 감소한다. 이것은 일반적으로 온도 증가에 따른 Fe-Mg 교환반응에 의한 것으로 해석되었다

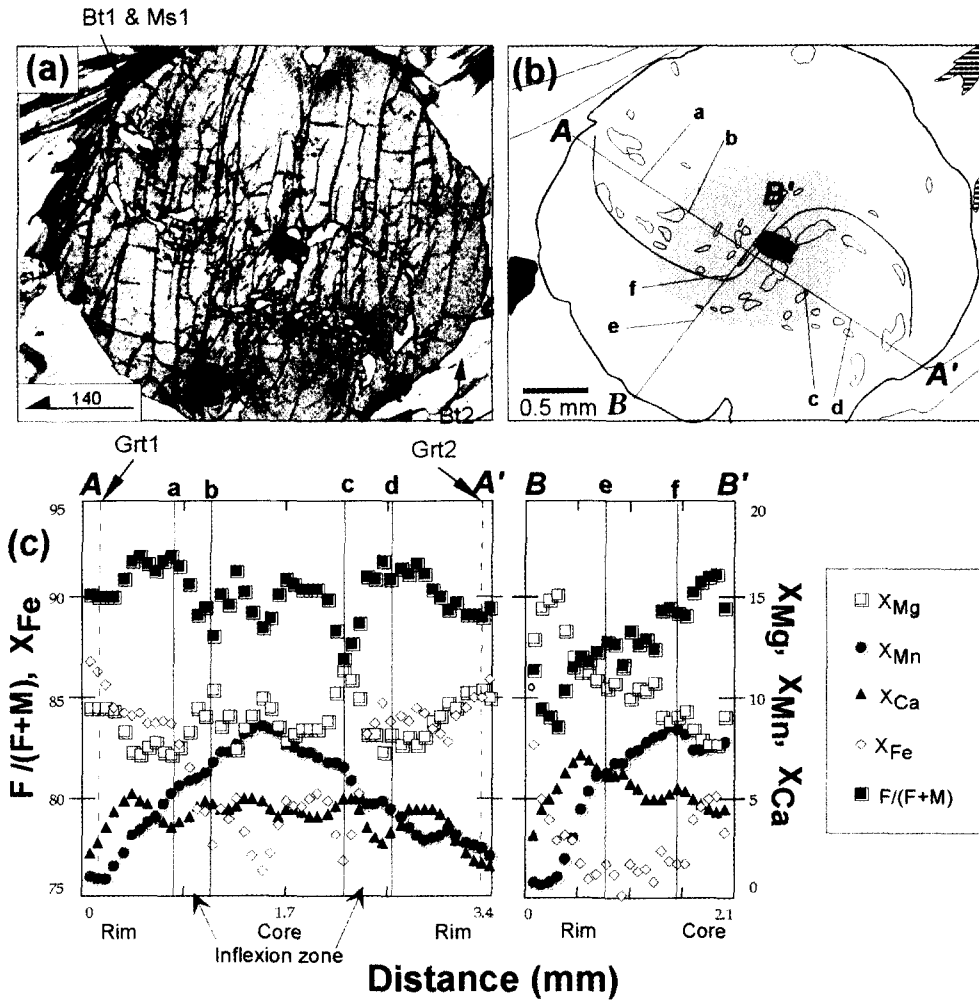
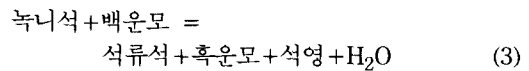


Fig. 7. (a) Photo of garnet porphyroblast in sample K60 showing a weak spiral-shaped inclusion trail. Vertical thin section (striking 140°). Plane-polarized light (PPL). (b) Line diagram of Fig. 7a. Light gray area within garnet indicates the garnet core. Dark gray and horizontal hatch represent Pl and mica respectively. Lowercase and uppercase alphabets indicate locations analyzed (see Fig. 7c). (c) Profile diagrams of compositional zoning of the garnet porphyroblast. All symbols are the same as in Fig. 5.

(Thompson, 1976; Spear, 1993). 그러나 석류석의 Fe/(Fe+Mg)비는 Z1[$\Delta\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg}) = -4 \sim -6 \text{ mol.}\%$]과 Z3에서는 [$\Delta\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg}) = -2 \sim -7 \text{ mol.}\%$] 감소하는 경향을 보이나, Z2[$\Delta\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg}) = +6 \sim +9 \text{ mol.}\%$]에서는 증가한다(Fig. 8c). X_{Ca} 는 Z1-Z2 경계부에서 급증하는 경향을 보인다(Fig. 8c).

이들 누대구조의 변화는 석류석 결정 내의 내부엽리의 변화와 비교적 일치하는 경향을 보인다. 석류석 반상변정의 중앙부(Z1)는 녹니석 포획광물과 높은 Mn 함량(25 mol.%)으로 이루어진 KFMASH계 하에서 반응 (3)에 의해 성장했을 것이다(Yardly,

1989; Frost and Tracy, 1991).



급한 경사를 갖는 Z1의 내부엽리는 Z1-Z2 경계부에서(위와 아래 부분; Fig. 8b) Z2의 완만한 경사의 내부엽리에 의해 잘려진다. 이 경계부에서 관찰되는 X_{Mn} 의 역전 누대구조(단면선 A-A')와 급한 성분 경사는 반응 (2)와 수반된 재흡수작용 및 용해작용 후, 석류석과 기질 사이의 응력(stress)과 Mn 성분의 화학적 전위 차의 결과로 생각된다. 용해되는 석

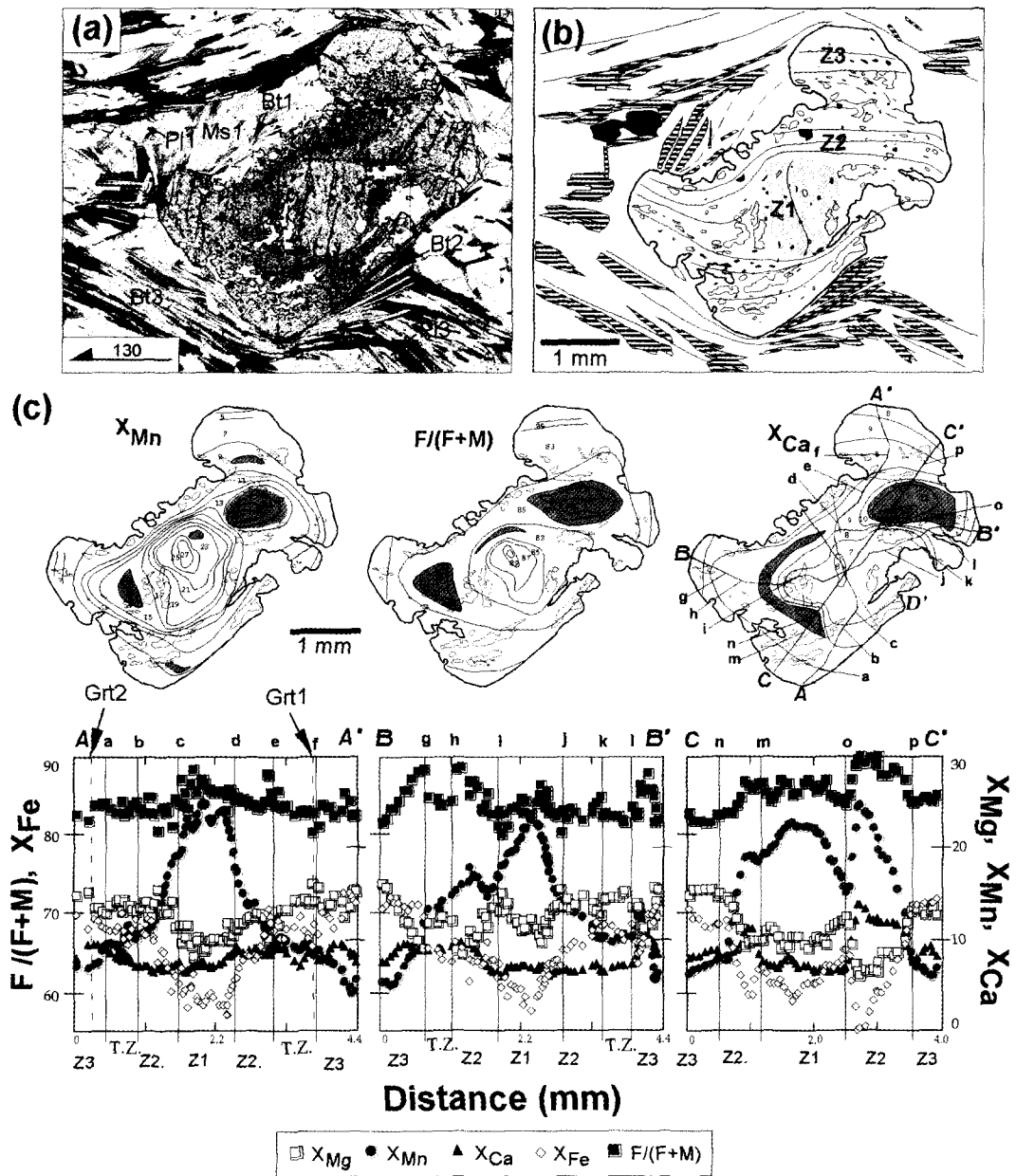


Fig. 8. (a) Photo of garnet porphyroblast in sample K77 showing textural zoning patterns. Vertical thin section (striking 130). Plane-polarized light (PPL). (b) Line diagram of Fig. 8a. Dark gray and horizontal hatch represent Pl and mica respectively. (c) Contour maps and profile diagrams of compositional zoning of the garnet porphyroblast. Zoning reversals are shaded in contour maps. Number in the contour maps in each component represents mol. %. Lowercase and uppercase alphabets indicate locations analyzed. All symbols are the same as in Fig. 5.

류석이 Mn의 느린 확산작용 때문에 기질과 평형을 이루지 못하는 것이다. 이것은 기질과 이온 교환 평형을 유지하지 못하며, 주위의 유체로 성분들을 잃게 된다. 이와 같은 경우, Mn 성분은 석류석 가장자

리에서 증가할 것이다 (Duebendorfer and Frost, 1988). 왜냐하면 석류석이 암석에서 Mn 성분이 가장 풍부한 광물이기 때문이다. 따라서 Z1-Z2의 경계부에서 Mn 성분의 증가 (Fig. 7c)는 석류석과 기

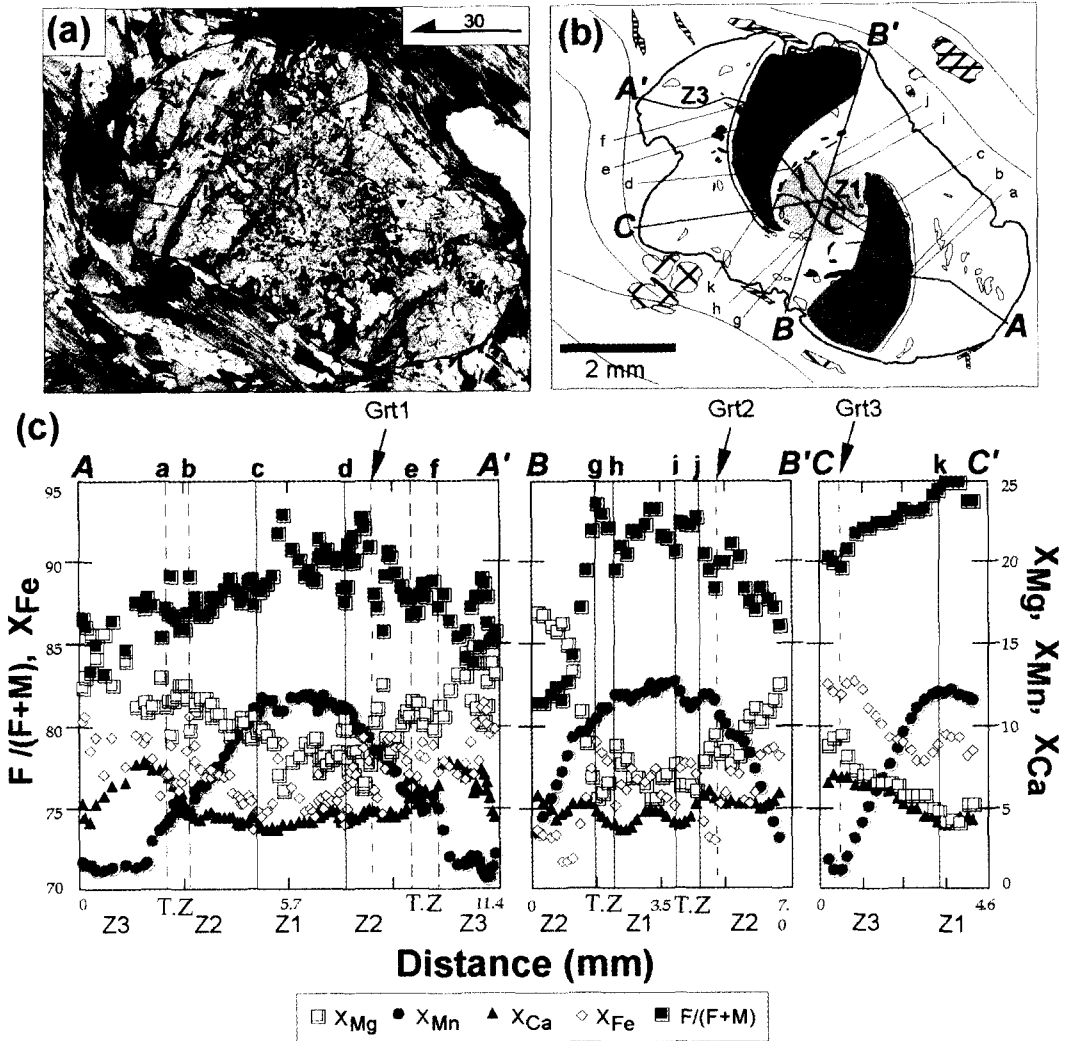


Fig. 9. (a) Photo of garnet porphyroblast in sample K53 showing weak spiral-shaped inclusion trails. Number in the garnet porphyroblast represents ilmenite inclusion(see Fig. 10). Vertical thin section(striking 30°). Partially crossed polars. (b) Line diagram of Fig. 9a. Lowercase and uppercase alphabets indicate locations analyzed(see Fig. 9c). (c) Profile diagrams of compositional zoning of the garnet porphyroblast. All symbols are the same as in Fig. 5.

질사이의 화학적 전위차와 용해작용에 의한 Mn의 재배치로 인한 결과일 것이다.

그러나, Z2 내에서 관찰되는 강한 X_{Mn} 의 역전 누대구조는 내부에서 나타나기 때문에(Fig. 8c) 위에서 제안한 입자 경계부에서의 역전 누대구조와 같이 해석하기 어렵다. 이런 역전 누대구조는 변형분배(deformation partitioning; Bell *et al.*, 1986)의 효과로 설명할 수 있다. 즉, 석류석은 국부적인 비평형으로 인해 높은 응력대 부분에서 용해되고 낮은 응력대 부분에서는 침전된다. 따라서 Z2의 강한

역전 누대구조는 높은 응력대에서(Z1-Z2 경계 위와 아래 부분) 용해된 성분이 변형 그림자대(strain-shadow zone; Z2의 양쪽 측면)로의 이동의 의해 형성되었을 것이다.

X_{Mn} 과 $Fe/(Fe+Mg)$ 비의 역전 누대구조는 또한 단결정 내에서 여러 개의 핵의 성장으로도 설명할 수 있다(Daniel and Spear, 1998). 그러나 시료 K77에서 나타나는 X_{Mn} 과 $Fe/(Fe+Mg)$ 비의 역전 누대구조는 내부 열리구조의 발달과 연관되어 있으며, 그들은 내부열리 잘림관계와 변곡축의 변화로 상대적

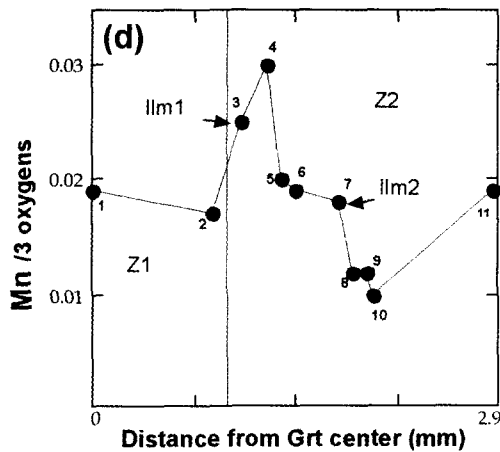
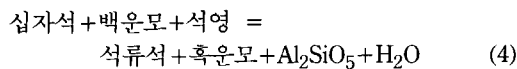


Fig. 10. Diagram of the Mn component of ilmenite inclusions vs. distance from the center of the garnet porphyroblast in Fig. 9a.

인 형성 시간을 알 수 있다. 그러므로 이들 역전 누대구조를 여러 개의 핵의 성장으로 설명하기는 어렵다. Z2의 석류석 성장에 대한 다른 가능한 해석은 석류석과 십자석의 동시 성장이다(e.g., Grambling, 1986). Spear *et al.*(1991)은 암석 내로 석류석 성분을 함유한 유체의 흐름(flux)을 포함하는 변성교대작용에 의해 경녹니석 없이 석류석과 십자석이 같이 성장할 수 있다고 제시했다.

Z1-Z2 경계부에서 X_{Ca} 의 급증은 X_{Mn} 과 $Fe/(Fe+Mg)$ 의 역전 누대구조와 잘 일치하고 있다(Fig. 8c). 비록 시료 K77에 있는 석류석 반상변정들은 Ca를 함유한 광물들을 포획물로 가지고 있지 않고, 기질부에 있는 사장석은 누대구조를 보이지 않지만, X_{Ca} 의 급증은 압력의 변화 또는 Ca를 함유한 광물의 소모를 의미할 것이다. 석류석 결정 외각부(Z3)에서의 $Fe/(Fe+Mg)$ 의 감소는 석류석이 반응 (4)에 의해 형성되었음을 지시한다.



석류석 결정 중앙부(Z1)의 온도-압력은 포획광물 결여로 인해 측정할 수 없었다. Z2의 온도-압력들은 석류석의 중간부 성분과 석류석 중앙부에 대한 압영대에 있는 사장석, 흑운모 그리고 백운모 성분(Fig. 8c의 Grt1, Pl1, Bt1 and Ms1)을 이용하여 측정하였다. 변곡축의 선주향이 45°인 Z2의 온도-압력 조건은 501~528°C, 4.6~5.5 kbar로(Table 3; Fig. 6). Z3의 온도-압력은 외각부 석류석 성분(Grt2)

과 기질에 있는 사장석과 흑운모 성분(Pl3와 Bt3; Fig. 8c)을 사용해서 측정했다; 온도-압력은 540~553°C, 6.3~6.8 kbar이다(Table 3; Fig. 6).

시료 K53

석류석 반상변정은 석영, 녹니석, 티탄철석과 흑연을 포획광물로 가지고 있으며, 티탄철석은 석류석 결정의 중앙부에서 외각부에 걸쳐 산출된다(Fig. 9a). 시료 K53의 석류석 반상변정은 또한 포획광물의 밀도와 내부엽리의 형태의 변화로 3개의 조직대로 구분된다(Fig. 9b): Z1(중앙부), Z2(중간부) 그리고 Z3(외각부). Z1은 포획물이 풍부하고 완만한 경사를 갖는 내부엽리를 함유하며, 이 석류석 결정 중앙부에 있는 엽리는 Z1의 가장자리에서 약한 곡선을 이루고 있고, Z1-Z2 경계부에서 Z2의 경사가 급한 내부 엽리에 의해 잘려져 나타난다(Fig. 9b). Z2는 석영에 의해 내부 엽리를 가지고 있으며, 이 엽리는 급한 경사로 시계방향의 곡선을 보인다. Z3은 포획광물이 거의 존재하지 않는다. 전체적으로 석류석 결정 내의 내부 엽리는 남정석, 십자석, 흑운모와 백운모로 구성된 기질에 의해 잘려져 있다. 내부엽리 변곡축의 선주향은 중앙부와 중간부에서 각각 140°와 70°이다.

X_{Mn} 은 중앙부에서 외각부까지 전형적인 "중모양"의 누대구조를 보인다. $Fe/(Fe+Mg)$ 의 증가는 Z1-Z2 그리고 Z2-Z3 경계부에서 관찰되었다(Fig. 9c). X_{Ca} 는 복잡하고 불규칙적인 누대구조를 보이나, Z2-Z3 경계에서는 다소 증가하는 경향을 보인다(Fig. 9c). 비록 화학적 누대구조는 일정하지 않은 변화로 인해 해석하기 어렵지만, Z1-Z2 경계부에서 $Fe/(Fe+Mg)$ 의 증가는, 시료 K77의 석류석과 유사하게, 반응 (1)에 의한 부분적인 재흡수 작용과 점진적인 전단대에서 화학적 확산작용에 의해 Mn과 Fe의 재분포를 유발하는 변형운동에 의한 결과로 생각된다. 석류석 결정 내의 티탄철석 포획물의 Mn 함량은 Z1-Z2 경계부를 지나면서 증가하는 경향은 이 해석을 뒷받침 해준다(Fig. 10). 이것은 Mn의 부화(enrichment)는 석류석 중앙부 성장 후, 반응 (1)을 통한 석류석 재흡수 작용의 결과라 생각된다. 그러나, 시료 K53(90)의 석류석 결정 외각부(Z3)에서 $Fe/(Fe+Mg)$ 의 증가(Fig. 11)는 이 재흡수와 확산작용으로 설명할 수 없다. 왜냐하면, X_{Mn} 는 계속해서 감소하기 때문이다(Fig. 11). 가능한 해석은 Z3에서 $Fe/(Fe+Mg)$ 의 증가는 온도의 증가에 따른 반응 (5)의 결과로 생각된다(Thompson *et al.*, 1977; Spear, 1993).

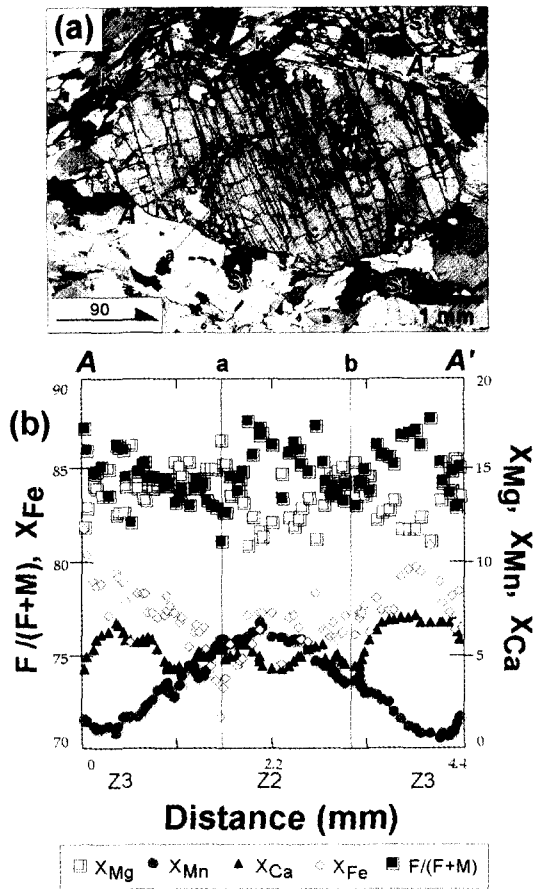
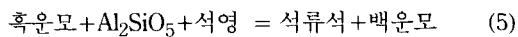


Fig. 11. (a) Photo of garnet porphyroblast in sample K53 showing weak spiral-shaped inclusion trails. Vertical thin section (striking 90°). Lowercase and uppercase alphabets indicate locations analyzed (see Fig. 11b). Partially crossed polars. (b) Profile diagrams of compositional zoning of the garnet porphyroblast. Fe/(Fe+Mg) shows a zigzag path from the core to the rim. All symbols are the same as in Fig. 5.



또한 석류석의 최외각부는 십자석의 소멸과 남정석 형성과 연관된 일변수 반응 (4)에 의해서 형성되었을 것이다.

석류석 Z2와 Z3의 온도-압력 조건은 각각 576~614°C, 7.6~8.0 kbar 그리고 515~595°C, 4.3~5.2 kbar이다 (Table 3; Fig. 6). 석류석 Z2의 온도-압력은 Grt2, Ilm1 and 2 성분 (Fig. 11c and d)을 이용한 석류석-티탄철석 지온계와 석류석-금홍석-Al₂SiO₅-티탄철석-석영 지온계로 측정되었고, Z3은 Grt3과 기질의 흑운모 성분 (Fig. 9c)을 이용한 석류석-흑운

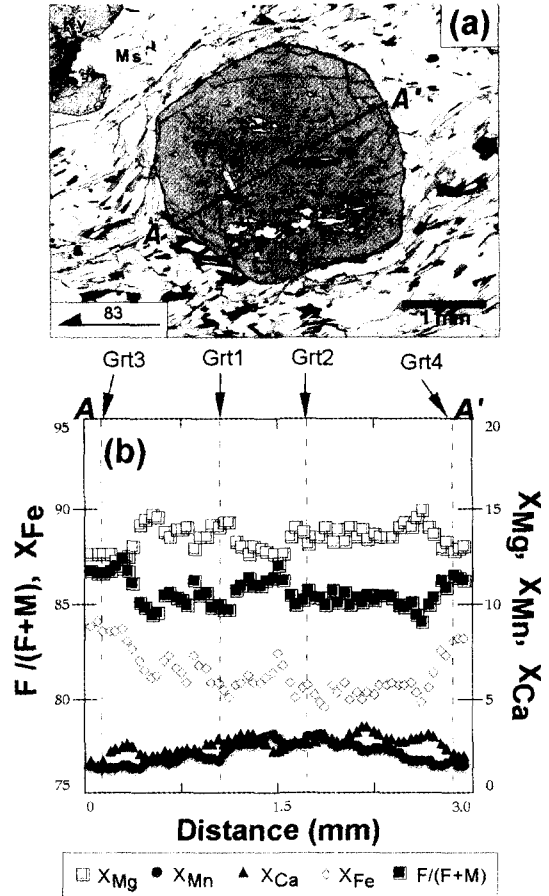


Fig. 12. (a) Photo of garnet porphyroblast from sample M54 (striking 83°), the Mt. Mineral Formation. The garnet contains quartz, plagioclase, biotite, ilmenite and graphite inclusion in the core. The matrix consists of Ky, St, Bt and Ms. (b) Profile diagram of compositional zoning of the garnet porphyroblasts in Fig. 12a. All symbols are the same as in Fig. 5.

모, 석류석-Al₂SiO₅-사장석-석영 지온계로 결정했다. 석류석 결정 중앙부 성장 후, 내부 엽리가 완만한 경사에서 급경사로 변화하는 Z2에서 Z3으로 온도-압력 경로는 온도와 압력 감소 (ΔT = -60~80°C 그리고 ΔP = -2.4~3.7 kbar; Fig. 9)로 특징 지워진다.

시료 M54

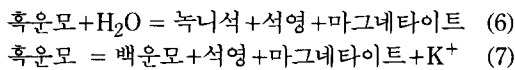
시료 M54의 석류석 반상변정은 결정 중앙부에 석영, 사장석, 흑운모, 티탄철석 그리고 흑연 포획 광물을 가지며, 내부 엽리는 비교적 직선의 형태를 보인다 (Fig. 12a). 두 시료의 석류석들의 누대구조는

결정 외각부를 제외하고 균등하게 나타난다(Fig. 12b). 이것은 석류석이 화학성분의 확산이 활발한 높은 온도에서 재결정되었다는 것을 지시한다. 석류석 외각부에서 X_{Fe} (almandine)의 약간 증가와 X_{Mg} (pyrope)의 감소는 후퇴변성의 Fe-Mg 교환반응으로 인한 결과일 것이다(Tracy, 1982).

시료 M54는 석류석 결정 내의 포획광물의 변화에 따라 2개의 다른 온도-압력 조건을 보인다. 석영, 사장석, 흑운모, 티탄철석 그리고 흑연을 배태하고 있는 석류석 결정 중앙부(Fig. 12b의 Grt1과 Grt2)의 온도-압력은 704~756°C, 7.0~9.4 kbar를 보인다(Table 3; Fig. 6). 석류석 외각부(Fig. 12b의 Grt3 and 4)와 기질의 흑운모와 사장석을 이용해 얻은 온도-압력은 615~622°C, 5.5~6.5 kbar이다(Table 3; Fig. 6). 이와 같은 석류석 중앙부의 높은 온도는 초기의 석류석 누대구조는 확산적 균등화작용(diffusive homogenization)에 의해 소멸되어졌을 것이다. 그러므로 온도-압력 감소 경로($\Delta T = -82 \sim -141^\circ\text{C}$ 그리고 $\Delta P = -1.5 \sim -3.9$ kbar; Fig. 6)는 석류석이 균등화된 후, 후퇴변성 온도-압력 경로를 지시한다. 시료 M54에서 이런 균등화된 누대구조는 다른 남정석대에서 산출되는 석류석 보다 오랜 시간 동안 높은 온도 하에 있었음을 지시한다 (Moecher, 1999).

후퇴 변성작용

연구지역의 십자석대와 남정석대에서의 후퇴 변성작용은 기질부의 흑운모에서 관찰된다. 흑운모는 부분적으로 녹니석으로 변질되어 있으며, 일부 흑운모는 백운모와 마그네타이트로 변질되어 산출된다. 이것은 반응 (6)과 (7)에 의한 것으로 생각된다.



온도-압력 계산과정에서 가능한 오류들

Fig. 6에서 보여주는 온도-압력의 범위 상자들은 지온계와 지압계의 교차점을 이용하여 결정했고, Table 3에 요약해 놓았다. 이들 상자들은 화학성분의 이질성, 광물성분과 분석시 부정확성과 연관된 오류를 나타낸다. 총 지질학적 불확실성은 50°C와 1 kbar 내외일 것이다(Hodge and Mckenna, 1987; Spear *et al.*, 1991). 그럼에도 불구하고, 지온지압계들의 하나의 보정(calibration)을 사용해서 얻은 시료

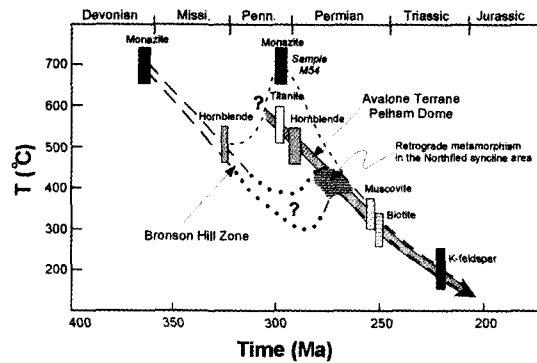


Fig. 13. Late Paleozoic temperature-time (T-t) paths (after Wintsch *et al.*, 1992) for the area of the Pelham Dome and Bronson Hill Zone. Geochronology data from Tucker *et al.*(1988), Harrison *et al.*(1989), Spear and Harrison(1989), Tucker and Robinson(1990). See text for further explanation.

들 사이의 상대적인 온도-압력 오류는 총 지질학적 불확실성보다 작을 것이다. 지온지압계를 이용한 계산 방법중 가장 큰 불확실성은 암석학적인 해석에서 나타날 것이다. 이 논문에서, 이 문제는 석류석의 상대적인 성장시간과 내부(S_i)와 외부(S_e) 엽리의 관계를 고려해 최소화하였다. 시료 M54와 같은 노두에서 채취한 Moecher(1999)의 시료 7alb와 변성 온도-압력 조건을 비교해 보면, 연구지역의 시료들 사이의 상대적인 지질학적 오류들은 대략 $\pm 25 \sim 40^\circ\text{C}$, 그리고 $\pm 0.2 \sim 0.7$ kbar일 것이다(Table 3).

지구조적인 의의

Fig. 13에서는 모나자이트와 티타나이트의 U-Pb 그리고 각섬석, 백운모, 흑운모, K-장석의 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 냉각연령(Tucker *et al.*, 1988; Harrison *et al.*, 1989; Spear and Harrison, 1989; Tucker and Robinson, 1990) 기초로 연구지역의 펠암돔(아발론 암층군)과 표층암(Bronson Hill 암석)의 온도-시간 역사를 보여준다. Moecher and Wintsch(1994)와 Wintsch *et al.*(1992)은 펠암돔 주변의 앰피블라이트 상(amphibolite facies; 남정석대에 해당되는 암석들은 데콜망(decollement)로 인해 생성된 펠암돔과 표층암(Bronson Hill 암석) 경계를 따라 집중된 변형 작용의 결과로 해석했다. 표층암(Bronson Hill 암석)은 초기 테본기에 NW-SE 압축운동(compression)에 의해 아발론 암층군 위로 overthrusting 된다(Wintsch *et al.*, 1992). Bronson Hill 암석에서, 각각 367 Ma와 326 Ma를 보이는 모나자이트와 각섬

석의 냉각 연령(Tucker *et al.*, 1988; Spear and Harrison, 1989)은 이들 암석들이 overthrusting에 의해 데본기에서 미시시피안(Mississippian)에 걸쳐 지표 노출(exhumation)과 완전한 냉각을 의미한다. 반면에, 펠암돔 내의 편마암의 냉각은 티타나이트와 각섬석의 냉각 연령을 근거로 펜실베이니아기(약 300-290 Ma; Spear and Harrison, 1989; Tucker and Robinson, 1990)에 시작된다. 따라서 Wintsch *et al.* (1992)는 연구지역의 온도와 하중의 증가는 초기 펜실베이니아기(약 330 Ma과 290-300 Ma 사이)에 일어났음을 주장했다.

연구지역의 Northfield 향사 지역에서 십자석대와 남정석대의 온도-압력 범위는 각각 550-600°C와 5.7-8.1 Kbar 그리고 500-640°C 4.3-8.1 Kbar이다(Table 3). 온도-압력 경로는 크게 온도 증가/압력 증가(시료 K38와 K77)와 온도 감소/압력 감소(시료 K53와 M54)로 구분된다(Fig.6). Bronson Hill 암석의 시간에 따른 온도 변화(Fig. 13)에 의하면 이와같은 변성 온도 영역은 약 320 Ma 이전에만 가능하다. 또한 온도-압력 증가 동안 성장한 석류석 내부염리의 변곡축의 수직방향은 데본기 동안 데꼴망을 형성케 한 NW-SE 압축운동과 일치한다(Wintsch *et al.*, 1992). 따라서 연구지역의 온도/압력 증가 경로는 데본기 동안 아카디안 변성작용에 의한 것으로 생각되고(Fig.14), NNW-SSE 압축운동 동안의 온도-압력 감소 경로(시료 K53)는 데본기에서 미시시피안(Mississippian)에 걸쳐 지표 노출과 완전한 냉각에 의한 것으로 생각된다(Fig. 14). 기질부에서 관찰되는 흑운모의 후퇴변성 작용은 Bronson Hill 암석의 시간에 따른 온도 곡선에 의하면 후기 고생대(약 260-270 Ma)에 일어났음을 지시한다(Fig. 13). 따라서 연구지역의 석류석 반상변정은 데본기의 아카디안 변성작용 동안 성장했으며, 기질은 후기 고생대 동안 알레게니안 변성작용에 의해 영향 받은 것으로 판단된다.

Moecher(1999)는 알레게니안 변성작용은 아발론 압축과 과거 아카디안 광역 변성작용에 영향을 받은 표층암(Bronson Hill 암석) 경계를 따라 집중된 국부적인 비균질 전단운동 (heterogeneous shear)의 결과라 정의했다. 그리고 윌리만틱(Willimantic dome) 지역에서 알레게니안 변성작용(약 290 Ma)의 최고 온도-압력 조건(M2 in Fig. 14)은 550-640°C와 7.5-9.5 kbar로 남정석-십자석-흑운모 광물조합을 형성시켰다(Moecher and Wintsch, 1994). 그러나 연구지역의 Bronson Hill 암석의 온도-시간 곡선은 펜실베이니아기 동안 윌리만틱 지역처럼 높은 온도를

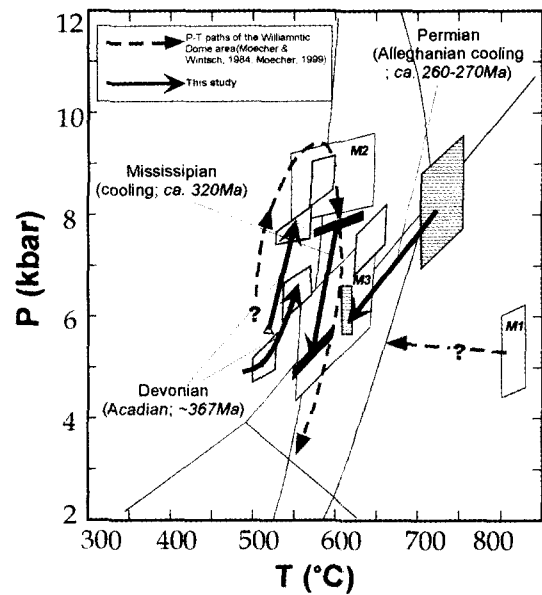


Fig. 14. Summary of quantified P-T-t paths in the Northfield area. Light and dark gray-colored boxes represent heating/compression and slow cooling with decompression during Devonian (~ ca. 367Ma) ~ Mississippian(ca. 326Ma). Hatched boxes(sample M54) may be generated by tectonic denudation resulting from extensional collapse of thickened crust during Permian(ca. 260-270Ma). See text for discussion. N.B. M1, M2 and M3 with opened boxes indicate P-T condition of Acadian(370 Ma) for M1, and of Alleghanian(290 and 280 Ma) for M2 and M3 (after, Moecher and Wintsch, 1994; Moecher, 1999) for the Willimantic Dome area.

보여주지 않는다. 따라서 연구지역에서 알레게니안 변성작용은 지역에 따른 비균질한 전단운동의 세기(intensity) 차이로 인해 남정석대에 해당하는 온도-압력까지 미치지 못했을 것이고, 단지 기질부에 영향을 미쳤을 것이다. 연구지역의 모든 석류석과 십자석 반상변정 내의 내부 염리가 외부염리에 의해 절단되어 있는 것은 기질부에 작용한 전단운동에 기인한 것으로 생각된다. 그러나 펠암돔 중앙 좌측 경계부에서(shutesbury 지역) 채취한 시료 M54는 펜실베이니아기 연령(Fig. 13; 모나자이트 U-Pb 290-300 Ma; Robinson *et al.*, 1992)과 온도-압력 감소 경로(Fig. 14)를 보인다. 따라서 시료 M54는 펜실베이니아기 동안 알레게니안 변성작용에 의해 남정석대를 형성하는 온도-압력까지 증가했음을 의미하고, 온도-압력 감소 경로는 후기 알레게니안 동안 확장성 붕괴에 따른 구조적 삭박작용(tectonic denudation)으로 설명된다.

Table A1. Representative analyses of garnet porphyroblasts from Garnet-Stauroilite and Kyanite-Garnet-Stauroilite grade rocks.

Sample No.	Garnet-Stauroilite grade											
	K38(0)								K60			
	A-A'				B-B'				A-A'			
	Core (30)	SD	Rim (47)	SD	Core (15)	SD	Rim (27)	SD	Core(21)	SD	Rim (30)	SD
SiO ₂	37.01	0.47	37.25	0.31	37.94	0.26	38.07	0.56	37.90	0.37	37.75	0.36
TiO ₂	0.03	0.02	0.05	0.03	0.03	0.02	0.07	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05
Al ₂ O ₃	20.65	0.37	20.78	0.26	20.84	0.27	20.83	0.49	21.00	0.40	20.33	0.39
FeO	34.35	0.67	36.02	1.17	34.49	0.83	35.88	0.48	34.24	1.13	37.04	0.48
CaO	0.94	0.11	1.57	0.33	0.89	0.06	1.29	0.35	1.56	0.08	1.32	0.29
MgO	2.60	0.32	2.40	0.27	2.37	0.22	2.43	0.36	2.24	0.23	2.09	0.25
MnO	2.89	0.60	1.25	0.67	2.93	0.82	1.22	0.40	3.11	0.39	1.54	0.57
Total	98.46	0.96	99.31	0.78	99.48	0.61	99.79	1.67	100.09	0.92	100.12	1.00
Cations per 11 oxygens												
Si	3.029	0.017	3.024	0.019	3.065	0.010	3.064	0.019	3.047	0.015	3.054	0.012
Al(IV)	0.000	0.001	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.002	0.001	0.003	0.002	0.002	0.001	0.004	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003
Al(VI)	1.989	0.020	1.985	0.018	1.983	0.017	1.975	0.020	1.990	0.040	1.938	0.027
Fe	2.350	0.053	2.446	0.080	2.330	0.059	2.415	0.027	2.302	0.074	2.506	0.031
Ca	0.081	0.010	0.135	0.028	0.077	0.005	0.111	0.029	0.135	0.007	0.114	0.026
Mg	0.315	0.037	0.284	0.040	0.285	0.026	0.291	0.039	0.268	0.028	0.252	0.029
Mn	0.200	0.042	0.085	0.046	0.200	0.056	0.083	0.028	0.212	0.026	0.106	0.039
F/F+M	0.882	0.012	0.896	0.013	0.891	0.008	0.893	0.013	0.896	0.011	0.909	0.009
XFe	0.798	0.014	0.829	0.018	0.806	0.017	0.833	0.012	0.789	0.012	0.841	0.011
XMg	0.107	0.012	0.096	0.013	0.098	0.009	0.100	0.013	0.092	0.010	0.085	0.010
XCa	0.028	0.003	0.046	0.010	0.027	0.002	0.038	0.010	0.046	0.003	0.038	0.009
XMn	0.068	0.014	0.029	0.016	0.069	0.020	0.029	0.010	0.073	0.009	0.035	0.013

Table A1. Continued.

Sample No.	Kyanite-Garnet-Stauroilite grade											
	K77											
	A-A'				B-B'							
	Core (23)	SD	Md (40)	SD	Rim (21)	SD	Core (22)	SD	Md (47)	SD	Rim (22)	SD
SiO ₂	38.21	0.14	38.38	0.39	38.39	0.46	37.75	0.32	38.24	0.45	38.48	0.29
TiO ₂	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.07	0.04
Al ₂ O ₃	21.68	0.17	21.45	0.34	21.35	0.35	21.19	0.27	21.25	0.27	21.53	0.22
FeO	27.51	0.57	29.38	0.98	31.18	1.06	26.31	0.60	29.66	1.23	31.21	0.76
CaO	2.41	0.13	2.76	0.40	3.29	0.29	2.59	0.22	2.84	0.33	3.07	0.21
MgO	3.06	0.36	3.27	0.45	3.17	0.55	2.51	0.22	3.30	0.32	3.57	0.23
MnO	8.63	0.79	5.97	0.99	3.77	1.28	9.85	0.59	5.45	1.26	3.33	0.75
Total	101.55	0.56	101.26	0.99	101.22	1.12	100.27	0.73	100.81	1.00	101.28	0.92
Cations per 11 oxygens												
Si	3.009	0.012	3.025	0.017	3.027	0.015	3.020	0.013	3.027	0.015	3.022	0.012
Al(IV)	0.002	0.005	0.000	0.001	0.000	0.000	0.004	0.004	0.002	0.005	0.003	0.003
Ti	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.003	0.004	0.003	0.003	0.003	0.004	0.002
Al(VI)	2.008	0.013	1.990	0.016	1.982	0.012	1.995	0.014	1.981	0.018	1.993	0.012
Fe	1.811	0.036	1.935	0.061	2.055	0.066	1.760	0.035	1.963	0.073	2.050	0.049
Ca	0.203	0.011	0.233	0.034	0.277	0.024	0.221	0.019	0.240	0.027	0.258	0.019
Mg	0.357	0.042	0.383	0.052	0.371	0.063	0.297	0.026	0.388	0.037	0.417	0.027
Mn	0.575	0.053	0.397	0.066	0.252	0.086	0.668	0.043	0.365	0.086	0.221	0.049
F/F+M	0.836	0.016	0.836	0.018	0.848	0.021	0.856	0.012	0.835	0.014	0.831	0.010
XFe	0.615	0.015	0.657	0.019	0.696	0.021	0.597	0.014	0.664	0.025	0.696	0.016
XMg	0.121	0.014	0.129	0.017	0.125	0.021	0.101	0.009	0.131	0.012	0.142	0.009
XCa	0.069	0.004	0.079	0.012	0.094	0.008	0.075	0.006	0.081	0.009	0.088	0.006
XMn	0.195	0.018	0.135	0.023	0.085	0.029	0.227	0.014	0.123	0.029	0.075	0.017

Table A1. Continued.

Sample No.	Kyanite-Garnet-Staurolite grade											
	K53						K53(90)			M54		
	A-A'						A-A'			A-A'		
	Core (28)	SD	Md (43)	SD	Rim (39)	SD	Core (27)	SD	Rim (55)	SD	Total (63)	SD
SiO ₂	37.37	0.37	37.55	0.40	37.76	0.31	37.50	0.41	37.65	0.48	38.06	0.25
TiO ₂	0.14	0.18	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05
Al ₂ O ₃	20.90	0.30	20.91	0.27	21.07	0.29	21.16	0.44	21.10	0.30	21.19	0.20
FeO	33.26	0.36	34.07	0.46	35.14	0.59	33.64	0.50	34.62	0.77	35.60	0.52
CaO	1.52	0.10	1.62	0.13	2.27	0.34	1.76	0.15	2.01	0.33	0.93	0.15
MgO	2.12	0.29	2.52	0.40	3.09	0.43	3.36	0.42	3.50	0.31	3.33	0.18
MnO	4.93	0.19	3.50	0.80	1.20	0.69	2.43	0.37	1.13	0.56	0.96	0.24
Total	100.23	0.72	100.23	1.09	100.58	0.93	99.89	1.11	100.05	1.26	100.12	0.72
Cations per 11 oxygens												
Si	3.016	0.018	3.022	0.011	3.014	0.013	3.007	0.018	3.011	0.014	3.041	0.012
Al(iv)	0.002	0.005	0.000	0.000	0.001	0.003	0.004	0.009	0.002	0.005	0.000	0.000
Ti	0.008	0.011	0.003	0.002	0.003	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	1.994	0.010
Al(vi)	1.985	0.019	1.981	0.017	1.924	0.173	1.985	0.020	1.979	0.021	0.003	0.003
Fe	2.245	0.033	2.293	0.040	2.345	0.045	2.256	0.032	2.315	0.048	2.378	0.035
Ca	0.130	0.008	0.139	0.011	0.194	0.030	0.150	0.013	0.171	0.028	0.397	0.021
Mg	0.253	0.034	0.300	0.047	0.365	0.049	0.400	0.047	0.416	0.035	0.080	0.013
Mn	0.336	0.013	0.238	0.054	0.081	0.046	0.165	0.026	0.076	0.038	0.065	0.016
F/F+M	0.899	0.013	0.884	0.017	0.865	0.016	0.850	0.016	0.848	0.012	0.857	0.007
XFe	0.757	0.012	0.772	0.015	0.786	0.015	0.760	0.014	0.777	0.015	0.815	0.012
XMg	0.085	0.011	0.101	0.015	0.122	0.016	0.134	0.015	0.140	0.011	0.136	0.007
XCa	0.044	0.003	0.047	0.004	0.065	0.010	0.051	0.004	0.057	0.009	0.027	0.004
XMn	0.113	0.004	0.080	0.018	0.027	0.016	0.055	0.009	0.026	0.013	0.022	0.005

Number of parentheses represents total number of analyses. All formulas represents average compositions and standard deviations (SD).

Note: Total Fe as FeO; Xi = i/(Fe+Mg+Mn+Ca); F/(F+M) = Fe/(Fe+Mg);

변성암석학적인 의의

남정석대의 광물조합에서 녹니석은 5개의 AFM 상(phase)중 하나로, 즉 석류석-남정석-십자석-흑운모-녹니석, 산출된다. 이와 같은 녹니석의 존재는 광물조합이 재 평형 되었거나, 부가적인 성분의 유입으로 인한 다변성 작용이 있었음을 지시한다 (Guidotti, *et al.*, 1991). 또한 Giaramita and Day (1991)는 5개의 AFM상 존재는 다음 중 1개 또는 이상에 의한 것으로 제시했다; (i) 비 평형 상태, (ii) 비-KFMASH 성분의 유입, 그리고 (iii) 이들 상들 간의 반응. 비-KFMASH 성분(예, Mn, Ca and Zn)은 석류석과 십자석의 안정도(stability)에 영향을 미칠 것이다. 남정석대에서 석류석 반상변정의 Mn 함량 4~25 mol.% 까지 넓은 범위와 급증하는 형태를 보여준다(시료 K77; Fig. 10). Symmes and Ferry(1992)는 누대구조를 갖는 석류석들을 생성하는 변성반응들은 효과적인 Mn 전암 성분을 감소시킬 것이고, 반면에 석류석을 소비시키는 반응들은 효과적인 Mn 전암 성분을 증가시킬 것이라 제안했다. 따라서, 연구지역의 석류석 Mn 함량의 다양성

은 석류석 반상변정의 성장이 보다 더 복잡한 반응에 의해 영향을 받았을 것이다.

연구지역의 십자석대와 남정석대는 야외 노두 규모에서 불규칙한 분포를 보인다. 이것은 온도와 압력의 변화만으로 이들 두 광물조합의 형성을 설명할 수 없다(Lang, 1991). 따라서, 이 두 변성암대는 다른 α_{H_2O} (water activity) 환경 하에서 형성했을 가능성이 높다. 변성작용 중, 물을 생성하는 탈수화 반응(dehydration reactions)들은 용액-이동 작용(solution-transfer processes)으로 인해 변형작용의 비의 증가를 일으킬 것이다(Bell and Cuff, 1989; Bell and Hayward, 1991; Williams, 1994). 석류석 역전 누대구조를 일으키게 한 선택적인 전단작용(shearing)은 수화반응(hydration reaction)에 의한 것으로 여겨진다. 이 수화반응이 일어나게 할 수 있는 원자 배열 전위(dislocation)의 이동과 OH⁻와 H₂O의 입자 경계에서의 용해-확산작용은 높은 전단대(shear zone)에서 증가할 것이다(e.g., Moecher and Wintsch, 1994). 석류석 반상변정 내의 내부 엇리가 잘리는 부분(textural truncation zone)에서 Fe/(Fe+Mg)비와 X_{Mn}의 증가는(Figs. 5, 8 and 9) Fe

Table A2. Representative analyses of biotite from Garnet-Stauroilite and Kyanite-Garnet-Stauroilite grade rocks.

Sample No.	Garnet-Stauroilite grade										Kyanite-Garnet-Stauroilite grade																									
	K38	K56	K57	K60	K81	K100	K112	K41	K42(0)	K53	K55	K77	K79	M54	incl.	mt(5)	mt(3)	mt(5)	mt(10)	mt(4)	mt(7)	mt(3)	mt(6)	mt	mt(10)	mt(6)	mt(10)	mt(3)	mt(6)							
SiO ₂	36.80	35.02	34.50	34.92	34.78	35.23	35.63	36.81	37.59	35.97	37.21	36.63	35.80	35.90																						
TiO ₂	1.51	1.42	1.74	1.53	1.43	1.33	1.41	1.51	1.77	1.54	1.52	1.43	1.62	1.75																						
Al ₂ O ₃	18.90	19.12	17.93	18.86	18.70	19.27	19.47	18.09	18.44	19.38	17.67	19.71	19.37	18.37																						
FeO	19.00	18.74	23.17	18.78	18.62	20.17	19.53	16.89	16.54	16.56	17.09	16.47	15.47	19.40																						
CaO	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.11	0.08	0.01	0.08	0.04	0.00	0.02																						
MgO	9.78	9.31	7.43	10.36	9.63	9.17	10.04	11.07	12.10	11.86	10.86	11.62	11.53	9.17																						
MnO	0.04	0.13	0.00	0.10	0.06	0.01	0.18	0.09	0.02	0.04	0.06	0.01	0.15	0.07																						
Na ₂ O	0.00	0.20	0.00	0.39	0.37	0.52	0.20	0.01	0.00	0.50	0.06	0.29	0.29	0.00																						
K ₂ O	8.14	8.06	9.03	8.55	8.50	8.20	8.37	8.68	8.74	8.98	8.65	8.62	8.31	8.98																						
Total	94.24	92.00	93.80	93.50	92.26	93.95	94.85	93.25	95.28	94.85	93.22	94.81	92.54	93.72																						
Cations per 11 oxygens																																				
Si	3.045	2.784	2.721	2.841	2.726	2.712	2.707	2.808	2.795	2.704	2.841	2.738	2.733	2.770																						
Al(IV)	0.955	1.216	1.279	1.159	1.274	1.288	1.293	1.192	1.205	1.296	1.159	1.262	1.267	1.230																						
Al(VI)	0.891	0.574	0.388	0.651	0.447	0.463	0.453	0.434	0.410	0.422	0.429	0.474	0.474	0.440																						
Ti	0.093	0.085	0.103	0.094	0.084	0.077	0.080	0.087	0.099	0.087	0.087	0.080	0.092	0.101																						
Fe	1.314	1.247	1.527	1.277	1.218	1.301	1.240	1.077	1.028	1.042	1.091	1.030	0.988	1.250																						
Mg	1.204	1.100	0.871	1.259	1.121	1.050	1.136	1.257	1.340	1.331	1.234	1.294	1.316	1.055																						
Mn	0.003	0.008	0.000	0.007	0.005	0.000	0.011	0.005	0.002	0.002	0.004	0.001	0.009	0.004																						
Ca	0.005	0.001	0.000	0.000	0.004	0.004	0.001	0.009	0.007	0.001	0.007	0.003	0.000	0.002																						
Na	0.000	0.030	0.000	0.060	0.056	0.077	0.028	0.001	0.000	0.072	0.008	0.041	0.042	0.000																						
K	0.857	0.815	0.907	0.885	0.846	0.803	0.809	0.844	0.828	0.860	0.842	0.821	0.807	0.883																						
Mg/(Mg+Fe)	0.478	0.469	0.363	0.496	0.479	0.447	0.478	0.539	0.566	0.561	0.531	0.557	0.571	0.457																						
Mg/Fe	0.916	0.882	0.571	0.987	0.936	0.808	0.916	1.169	1.303	1.279	1.133	1.260	1.334	0.845																						

Number of parentheses represents total number of analyses. All formulas represents average compositions; Total Fe as FeO

Table A3. Representative analyses of muscovite from Garnet-Stauroilite and Kyanite-Garnet-Stauroilite grade rocks.

Sample No.	Garnet-Stauroilite grade										Kyanite-Garnet-Stauroilite grade																	
	K38	K56	K57	K60	K81	K100	K112	K41	K42	K53	K55	K77	K79	M54	K38	K56	K57	K60	K81	K100	K112	K41	K42	K53	K55	K77	K79	M54
	mt(2)	mt(2)	mt(3)	mt(5)	mt(3)	mt(5)	mt(3)	mt(6)	mt(2)	mt(5)	mt(4)	mt(7)	mt(2)	mt(6)	mt(2)	mt(5)	mt(4)	mt(5)	mt(3)	mt(5)	mt(3)	mt(6)	mt(2)	mt(5)	mt(4)	mt(7)	mt(2)	mt(6)
SiO ₂	45.96	44.80	44.33	44.20	43.27	44.30	45.00	45.61	47.15	45.16	45.94	46.28	44.65	45.62	45.96	44.80	44.33	44.20	43.27	44.30	45.00	45.61	47.15	45.16	45.94	46.28	44.65	45.62
TiO ₂	0.48	0.40	0.59	0.44	0.36	0.36	0.63	0.56	0.91	0.66	0.59	0.68	0.88	0.77	0.48	0.40	0.59	0.44	0.36	0.36	0.63	0.56	0.91	0.66	0.59	0.68	0.88	0.77
Al ₂ O ₃	35.09	33.10	35.20	35.25	35.80	35.74	35.17	32.94	33.61	35.54	33.01	35.41	34.90	33.80	35.09	33.10	35.20	35.25	35.80	35.74	35.17	32.94	33.61	35.54	33.01	35.41	34.90	33.80
FeO	0.91	1.68	1.07	1.80	0.90	1.02	1.05	1.16	0.98	1.10	0.89	1.37	1.02	1.01	0.91	1.68	1.07	1.80	0.90	1.02	1.05	1.16	0.98	1.10	0.89	1.37	1.02	1.01
CaO	0.04	0.06	0.00	0.11	0.01	0.00	0.07	0.05	0.27	0.03	0.08	0.05	0.10	0.06	0.04	0.06	0.00	0.11	0.01	0.00	0.07	0.05	0.27	0.03	0.08	0.05	0.10	0.06
MgO	0.65	1.48	2.13	1.03	1.54	1.45	1.25	0.00	0.80	2.43	0.13	1.02	2.12	0.00	0.65	1.48	2.13	1.03	1.54	1.45	1.25	0.00	0.80	2.43	0.13	1.02	2.12	0.00
MnO	0.02	0.12	0.05	0.08	0.00	0.05	0.01	0.15	0.00	0.10	0.06	0.02	0.00	0.05	0.02	0.12	0.05	0.08	0.00	0.05	0.01	0.15	0.00	0.10	0.06	0.02	0.00	0.05
Na ₂ O	2.26	0.96	2.34	3.27	3.27	2.73	1.89	0.27	0.00	1.89	0.69	1.42	2.03	0.60	2.26	0.96	2.34	3.27	3.27	2.73	1.89	0.27	0.00	1.89	0.69	1.42	2.03	0.60
K ₂ O	7.81	9.86	8.44	7.38	7.63	8.11	9.01	9.33	9.24	9.84	8.98	9.32	9.13	8.97	7.81	9.86	8.44	7.38	7.63	8.11	9.01	9.33	9.24	9.84	8.98	9.32	9.13	8.97
Total	93.21	92.45	94.16	93.57	92.78	93.76	94.09	90.07	93.03	96.75	90.38	95.56	94.82	90.89	93.21	92.45	94.16	93.57	92.78	93.76	94.09	90.07	93.03	96.75	90.38	95.56	94.82	90.89

	Cations per 11 oxygens													
	Si	Al(vi)	Al(vi)	Ti	Fe	Mg	Mn	Ca	Na	K	Na/(Na+K)			
Si	3.088	3.087	2.981	3.054	2.949	2.986	2.916	3.183	3.175	2.977	3.187	3.062	2.991	3.148
Al(vi)	0.912	0.913	1.019	0.946	1.051	1.014	1.084	0.817	0.825	1.023	0.813	0.938	1.009	0.852
Al(vi)	1.870	1.775	1.774	1.823	1.824	1.827	1.617	1.891	1.842	1.739	1.885	1.823	1.748	1.897
Ti	0.024	0.020	0.030	0.023	0.018	0.018	0.033	0.030	0.046	0.032	0.031	0.034	0.044	0.040
Fe	0.051	0.097	0.060	0.107	0.051	0.057	0.054	0.067	0.055	0.060	0.051	0.075	0.056	0.058
Mg	0.066	0.150	0.213	0.100	0.156	0.145	0.179	0.000	0.080	0.238	0.013	0.099	0.211	0.000
Mn	0.001	0.007	0.003	0.005	0.000	0.003	0.002	0.009	0.000	0.005	0.003	0.001	0.000	0.003
Ca	0.003	0.004	0.000	0.008	0.000	0.000	0.005	0.004	0.019	0.002	0.006	0.003	0.007	0.005
Na	0.294	0.127	0.304	0.298	0.431	0.356	0.296	0.035	0.000	0.240	0.091	0.180	0.263	0.080
K	0.668	0.864	0.723	0.650	0.663	0.696	0.715	0.829	0.794	0.827	0.795	0.786	0.779	0.790
Na/(Na+K)	0.304	0.127	0.296	0.299	0.392	0.337	0.294	0.038	0.000	0.223	0.099	0.182	0.252	0.088

Number of parentheses represents total number of analyses. All formulas represents average compositions; Total Fe as FeO

Table A4. Representative analyses of chlorite from Garnet-Staurolite and Kyanite-Garnet-Staurolite grade rocks.

Grade Sample No.	Grt-St grade						Ky-Grt-St grade					
	K38(0)		k60(140)		K100		K41(20)				K42(0)	
	ps	inc.	inc.	inc.	mt	mt	inc.	inc.	mt	mt	mt	
SiO ₂	23.15	23.34	22.17	22.07	23.40	23.50	24.09	23.87	25.04	24.77	23.88	25.41
TiO ₂	0.13	0.06	0.00	0.11	0.12	0.01	0.00	0.00	0.00	0.32	0.25	0.22
Al ₂ O ₃	19.92	19.23	20.87	20.57	23.50	23.90	20.20	19.32	20.54	19.33	22.95	22.19
FeO	35.40	36.80	42.58	39.77	24.00	24.10	34.30	27.82	26.14	25.02	23.74	20.96
CaO	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.10	0.12	0.00	0.00
MgO	6.41	5.92	2.44	4.31	13.20	14.00	6.70	11.25	12.70	12.83	15.26	17.41
MnO	0.09	0.38	0.15	0.22	0.20	0.02	2.99	2.01	1.31	1.61	0.22	0.15
Total	85.21	85.73	88.21	87.05	84.42	85.53	88.29	84.27	85.83	84.00	86.30	86.34
Cations per 28 oxygens												
Si	5.355	5.414	5.149	5.128	5.099	5.048	5.392	5.402	5.462	5.517	5.086	5.311
Ti	0.022	0.010	0.000	0.020	0.019	0.001	0.000	0.000	0.000	0.054	0.040	0.035
Al	5.428	5.255	5.710	5.631	6.046	6.041	5.328	5.153	5.279	5.073	5.760	5.465
Fe	6.845	7.135	8.265	7.722	4.369	4.334	6.419	5.264	4.766	4.659	4.226	3.663
Ca	0.028	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.024	0.030	0.000	0.000
Mg	2.208	2.046	0.843	1.491	4.285	4.486	2.235	3.792	4.126	4.257	4.840	5.420
Mn	0.017	0.075	0.029	0.043	0.036	0.003	0.567	0.385	0.241	0.303	0.040	0.027
Total	19.905	19.935	19.996	20.036	19.853	19.913	19.942	19.996	19.898	19.893	19.993	19.921
F/(F+M)	0.756	0.777	0.907	0.838	0.505	0.491	0.742	0.581	0.536	0.523	0.466	0.403

Table A4. Representative analyses of chlorite from Garnet-Staurolite and Kyanite-Garnet-Staurolite grade rocks.

Grade Sample No.	Ky-Grt-St grade												
	k53(30)				K53(90)				M54(123)			M54(83)	
	mt	mt	mt	mt	mt	mt	inc.	inc.	inc.	inc.	inc.	inc.	
SiO ₂	23.96	24.26	23.58	24.31	23.85	24.17	21.59	21.85	24.73	22.31	24.40	22.41	22.61
TiO ₂	0.05	0.05	0.09	0.19	0.23	0.20	0.01	0.04	0.17	0.03	0.04	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	21.74	21.25	21.69	21.49	21.22	21.43	21.53	21.15	21.54	20.33	20.07	21.01	22.32
FeO	23.29	23.28	24.74	24.63	24.28	24.12	37.20	34.86	25.11	36.88	23.92	31.55	33.38
CaO	0.00	0.03	0.07	0.00	0.00	0.07	0.00	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.12
MgO	15.05	15.35	14.90	15.04	14.93	14.71	5.07	5.61	13.99	5.83	14.75	8.54	6.52
MnO	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.02	0.13	0.29	0.00	0.04
Total	84.09	84.22	85.17	85.66	84.51	84.70	85.40	83.81	85.57	85.51	83.47	83.51	84.99
Cations per 28 oxygens													
Si	5.226	5.283	5.130	5.241	5.214	5.259	5.037	5.145	5.340	5.195	5.397	5.183	5.167
Ti	0.009	0.008	0.015	0.031	0.038	0.033	0.001	0.007	0.028	0.004	0.007	0.000	0.000
Al	5.589	5.453	5.560	5.459	5.466	5.495	5.920	5.868	5.480	5.580	5.231	5.728	6.012
Fe	4.248	4.238	4.498	4.438	4.436	4.387	7.255	6.860	4.532	7.181	4.422	6.100	6.378
Ca	0.000	0.007	0.015	0.000	0.000	0.016	0.000	0.025	0.003	0.000	0.000	0.000	0.030
Mg	4.891	4.979	4.829	4.829	4.861	4.767	1.763	1.966	4.501	2.024	4.860	2.942	2.219
Mn	0.000	0.000	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.040	0.004	0.026	0.054	0.000	0.007
Total	19.963	19.969	20.066	19.999	20.015	19.958	19.977	19.912	19.887	20.010	19.971	19.953	19.813
F/(F+M)	0.465	0.460	0.482	0.479	0.477	0.479	0.804	0.777	0.502	0.780	0.476	0.675	0.742

와 Mn 성분이 온도변화 없이 전단율(shearing rate)의 증가로 야기된 수화반응에 의해 재분포 되었을 가능성도 배제할 수 없다.

결 론

1. 연구지역의 십자석대와 남정석대에서 산출되는 석류석은 X_{Mn} 과 Fe/(Fe+Mg)의 역전 누대구조와 계단상의 X_{Ca} 성분변화를 보이며, 이런 누대구

조 이상(anomalies)은 석류석의 내부엽리의 형태가 변하는 부분에서 관찰된다. 따라서 이것은 석류석의 누대구조가 과거 엽리의 발달에 따른 재흡수작용과 부분적인 용해작용에 의해 영향을 받았음을 지시한다.

2. 두 변성암대에서 측정된 온도-압력 경로는 크게 온도/압력 증가와 온도/압력 감소로 구분된다. 석류석 내부엽리의 변곡축을 근거로 온도/압력 증가는 NW-SE 압축운동 동안 형성 되었으며, 온도/압

Table A5. Representative analyses of plagioclase from Garnet-Staurolite and Kyanite-Garnet-Staurolite grade rocks.

Sample No.	Grt-St grade										Ky-Grt-St grade															
	K38	K57	K60	K81	K100	K41	K53(30)	K57	K55	K77	K79	M54	K38	K57	K60	K81	K100	K41	K53(30)	K57	K55	K77	K79	M54		
	mt(2)	mt(5)	mt(11)	mt(6)	mt(2)	in core(3)	in med(14)	in rim(7)	mt(10)	mt	in ky (6)	mt(7)	in gt(12)	mt(3)	mt(12)	mt(2)	mt(14)	in (3)	mt(2)	mt(3)	in gt(12)	mt(3)	mt(12)	mt(2)	mt(14)	in (3)
SiO ₂	68.02	63.26	66.33	63.17	63.05	64.63	66.50	60.83	62.07	59.79	59.93	61.42	61.33	62.62	61.72	61.15	65.19	63.94	61.72	62.62	61.33	62.62	61.72	61.15	65.19	63.94
TiO ₂	0.06	0.00	0.05	0.03	0.00	0.07	0.04	0.03	0.08	0.10	0.07	0.02	0.00	0.05	0.03	0.00	0.03	0.09	0.03	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03	0.09
Al ₂ O ₃	19.82	21.20	18.33	20.78	20.95	19.96	18.84	22.80	22.80	21.36	21.77	22.31	22.77	22.51	24.08	23.85	20.53	20.35	24.08	22.51	22.77	22.51	24.08	23.85	20.53	20.35
FeO	0.03	0.00	0.12	0.07	0.05	0.19	0.15	0.31	0.23	0.00	0.05	0.06	0.13	0.04	0.05	0.00	0.09	0.32	0.05	0.06	0.13	0.04	0.05	0.00	0.09	0.32
CaO	1.44	3.11	0.96	2.27	3.15	2.75	1.40	6.09	5.47	5.33	6.06	5.70	6.28	5.74	5.90	5.47	2.11	2.62	5.90	6.28	6.28	5.74	5.90	5.47	2.11	2.62
MgO	0.00	0.01	0.00	0.08	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.05	0.04	0.04	0.04	0.14	0.06	0.12	0.20	0.04	0.04	0.01	0.05	0.08	0.05	0.04	0.01	0.03	0.00	0.04	0.08	0.08	0.05	0.04	0.01	0.03	0.00
Na ₂ O	10.41	11.12	9.63	12.15	11.50	9.30	10.21	7.41	8.12	7.18	6.30	7.03	6.50	7.12	8.39	9.60	10.18	9.76	7.03	7.03	6.50	7.12	8.39	9.60	10.18	9.76
K ₂ O	0.00	0.09	0.06	0.02	0.15	0.06	0.11	0.20	0.05	0.16	0.07	0.06	0.24	0.09	0.12	0.12	0.10	0.18	0.06	0.24	0.06	0.09	0.12	0.12	0.10	0.18
Total	99.82	98.83	95.51	98.60	99.12	97.02	97.38	97.87	98.87	94.00	94.26	96.65	97.33	98.22	100.32	100.19	98.25	97.25	96.65	97.33	98.22	100.32	100.19	98.25	97.25	
Cations per 8 oxygens																										
Si	2.976	2.828	3.021	2.841	2.825	2.923	2.988	2.759	2.781	2.809	2.802	2.802	2.784	2.810	2.726	2.703	2.914	2.896	2.802	2.781	2.802	2.810	2.726	2.703	2.914	2.896
Al	1.022	1.118	0.983	1.103	1.109	1.064	0.997	1.221	1.204	1.182	1.199	1.200	1.218	1.190	1.253	1.245	1.086	1.086	1.200	1.218	1.199	1.200	1.253	1.245	1.086	1.086
Ca	0.067	0.148	0.047	0.109	0.151	0.133	0.068	0.299	0.263	0.268	0.303	0.279	0.305	0.276	0.279	0.259	0.101	0.127	0.279	0.299	0.305	0.276	0.279	0.259	0.101	0.127
Na	0.882	0.966	0.850	1.062	1.002	0.814	0.889	0.649	0.705	0.654	0.570	0.621	0.571	0.619	0.716	0.821	0.856	0.856	0.621	0.571	0.570	0.621	0.716	0.821	0.856	0.856
K	0.000	0.005	0.003	0.001	0.008	0.004	0.006	0.012	0.003	0.009	0.004	0.003	0.014	0.005	0.006	0.006	0.010	0.010	0.003	0.014	0.004	0.005	0.006	0.006	0.006	0.010
An (%)	7.08	13.26	5.18	9.32	13.00	14.11	7.03	31.37	27.13	28.80	34.55	30.88	34.27	30.67	27.96	23.81	10.24	12.81	30.88	34.27	30.88	34.27	27.96	23.81	10.24	12.81
Ab (%)	92.92	86.32	94.42	90.59	86.32	85.50	92.30	67.42	72.57	70.19	64.95	68.75	64.14	68.74	71.38	75.61	89.19	86.18	68.75	64.14	68.75	68.74	71.38	75.61	89.19	86.18
Or (%)	0.00	0.42	0.40	0.10	0.68	0.39	0.67	1.21	0.30	1.01	0.50	0.37	1.59	0.59	0.66	0.59	0.57	1.01	0.37	1.59	0.59	0.59	0.66	0.59	0.57	1.01

Note: An (%) = Ca/(Ca+Na+K)*100; Ab (%) = Na/(Ca+Na+K)*100; Or (%) = K/(Ca+Na+K)*100
 Number of parentheses represents total number of analyses. All formulas represents average compositions

Table A5. Representative analyses of ilmenite.

	K38	K60	K53			M54		
	mt	inclu.	mt	in core	in rim	mt	mt	mt
	2	4	4	4	7	4	4	4
SiO ₂	0.87	0.65	0.60	0.57	0.60	0.70	0.74	0.68
TiO ₂	51.02	50.53	50.98	49.75	51.16	51.85	51.57	52.06
Al ₂ O ₃	0.27	0.16	0.22	0.19	0.24	0.17	0.10	0.28
FeO	45.29	47.62	47.44	48.17	46.00	48.16	46.44	46.85
CaO	0.10	0.04	0.03	0.08	0.07	0.12	0.03	0.07
MgO	0.37	0.08	0.19	0.34	0.43	0.15	0.45	0.06
MnO	0.36	0.66	0.32	1.05	0.74	0.36	0.21	0.16
Total	98.27	99.74	99.77	100.15	99.24	101.50	99.54	100.16
Cations per 6 oxygens								
Si	0.022	0.017	0.015	0.014	0.015	0.017	0.019	0.017
Ti	0.976	0.964	0.970	0.950	0.974	0.969	0.977	0.982
Al	0.008	0.005	0.006	0.006	0.007	0.005	0.003	0.008
Fe	0.964	1.011	1.004	1.023	0.974	1.001	0.978	0.982
Ca	0.003	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.001	0.002
Mg	0.014	0.003	0.007	0.013	0.016	0.005	0.017	0.002
Mn	0.008	0.014	0.007	0.023	0.016	0.008	0.004	0.003
Total	1.995	2.015	2.010	2.031	2.004	2.009	1.999	1.997
F/(F+M)	0.992	0.986	0.993	0.978	0.984	0.992	0.995	0.996

Note: F/(F+M) = Fe/(Fe+Mn)

Number in the 3rd row represents total number of analyses. All formulas represents average compositions

력 감소 경로는 NNW-SSE 압축운동 동안 형성되었다.

3. 기존의 연구에 의하면(Moecher, 1999), 과거 아카디안 변성작용을 경험한 펠암돔 주변의 남정석대(Zone D)로 특징 지워지는 암석은 펜실베이니아기의 알레게니안 변성작용에 의해 남정석-십자석-백운모로 재변성된 것으로 해석했다. 그러나, 펠암돔 북쪽(Northfield 향사지역)의 온도-시간(Temperature-Time) 경로는 이 지역이 남정석대를 형성할 수 있는 온도 범위까지 도달하지 못했음을 지시한다. 따라서 Northfield 향사지역의 석류석 반상변정은 주로 아카디안 변성작용에 의해 형성되었으며, 기질(matrix)은 알레게니안 변성작용에 의해 증첩된 것으로 생각된다.

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, D. Moecher, F. Spear, C. Daniel(with English version) 그리고 이진한 교수님에게 감사드린다. 논문은 저자의 박사학위 논문을 바탕으로 쓰여졌다. 마지막으로 이 논문을 제출할 수 있도록 여러 컴퓨터 기기들을 제공해 준 강원대학교 지질학과에 진심으로 감사 드린다.

참고문헌

- Aerden, D.G.A., 1995. Porphyroblast non-rotation during crustal extension in the Variscan Lys-Caillaouas Massif, Pyrenees. *Jour. Struct. Geol.*, 17, 709-725.
- Barker, A.J., 1994. Interpretation of porphyroblast inclusion trails: limitation imposed by growth kinetics and strain rates. *Jour. Metamorphic Geol.*, 12, 681-694.
- Bell, T.H. and Cuff, C., 1989. Dissolution, solution transfer, diffusion versus fluid flow and volume loss during deformation/metamorphism. *Jour. Metamorphic Geol.*, 7, 425-447.
- Bell, T.H., Forde, A. and Wang, J., 1995. A new indicator of movement direction during orogenesis: measurement technique and application to the Alps. *Terra Nova*, 7, 500-508.
- Bell T.H., Johnson, S.E., Davis, B., Forde, A., Hayward, N and Wilkins, C., 1992. Porphyroblast inclusion-trail orientation data: eppure non son girate! *Jour. Metamorphic Geol.*, 10, 295-307.
- Bell, T.H., Hickey, K.A. and Upton, G.J.G., 1998. Distinguishing and correlating multiple phases of metamorphism across a multiply deformed region using the axes of spiral, staircase and sigmoidally curved inclusion trails in garnet. *Jour. Metamorphic Geol.*, 16, 767-794.
- Bell, T.H. and Hickey, K.A., 1997. Distribution of pre-folding linear indicators of movement direction around the Spring Hill Synform, Vermont: Signifi-

- cance for mechanism of folding in this portion of the Appalachians. *Tectonics*, 274, 275-294.
- Bell, T.H. and Hayward, N., 1991. Episodic metamorphic reactions during orogenesis: The control of deformation partitioning on reaction sites and duration. *Jour. Metamorphic Geol.*, 9, 619-640.
- 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. Metamorphic Geol.*, 4, 37-67.
- Berman, R.G., 1990. Mixing properties of Ca-Mg-Fe-Mn garnets. *Am. Mineral.*, 75, 328-344
- Bohlen, S.R., and Liotta, A., 1986. A barometer for garnet amphibolites and garnet granulites. *Jour. Petrol.*, 27, 1025-1034.
- Bohlen, S.R., Wall, V.J., and Boettcher, A.L., 1983. Experimental investigation and application of garnet granulite equilibria in the system FeO-TiO₂-Al₂SiO₅-SiO₂-H₂O. *Am. Mineral.*, 68, 1049-1058.
- 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.
- Etheridge, M. A., Wall, V. J. and Vernon, R. H., 1983. The role of the fluid phase during regional metamorphism and deformation. *Jour. Metamorphic Geol.*, 1, 205-226.
- Ghent, E.D., and Stout, M.Z., 1981. Geobarometry and geothermometry of plagioclase-biotite-garnet-muscovite assemblage. *Contr. Mineral. Petrol.*, 76, 92-97.
- Giarmita, M.S. and Duy, H.W., 1991. Buffering in the assemblage staurolite-Alumino-silicate-Biotite-Garnet-Chlorite. *Jour. Metamorphic Geol.*, v. 9, p. 363-378.
- Guidotti, C.V., Teichmann, F. and Henry, D.J., 1991. Chlorite-bearing polymetamorphic metapelites in the Rangeley area, Maine: Evidence for equilibrium assemblages. *Am. Mineral.*, 76, 867-879.
- Hames, W.E., and Menard, T., 1993. Fluid-assisted modification of garnet composition along the rims, cracks, and mineral inclusion boundaries in samples of amphibolite facies schist. *Am. Mineral.*, 78, 338-344.
- Harrison, T.M., Spear, F.S., and Heizler, M.T., 1989. Geochronologic studies in central New England II: Post-Acadian hinged and differentiated uplift. *Geology*, 17, 185-189.
- Hey, M.H., 1954. A new review of the cholites. *Mineral. Mag.*, 30, 277-292.
- Hodges, K.V., and Spear, F.S., 1982. Geothermometry, geobarometry and Al₂SiO₅ triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. *Am. Mineral.*, 67, 1118-1134.
- Hodges, K.V., and McKenna, L.W., 1987. Realistic propagation of uncertainties in geological thermobarometry. *Am. Mineral.*, 72, 671-680.
- Hodges, K.V., and Crowley, P.D., 1985. Error estimation and empirical geothermobarometry for pelitic system. *Am. Mineral.*, 71, 702-709.
- Jones, K.A., 1994. Progressive metamorphism in a crustal-scale shear zone: an example from the Leon region, north-west Brittany, France. *Jour. Metamorphic Geol.*, 12, 69-88.
- Karabinos, P., 1984. Polymetamorphic garnet zoning from southeastern Vermont. *Am. Jour. Sci.*, 284, 1008-1025.
- Kretz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. *Am. Mineral.*, 68, 277-279.
- Kriegsman, L. M., 1993. Geodynamic evolution of the Pan-African lower crust in Sri Lanka. *Geology Ultrajet*, 114-208.
- Lang, H.M., 1991. Quantitative interpretation of within-outcrop variation in metamorphic assemblage in staurolite-kyanite-grade metapelites, Baltimore, Maryland. *Canad. Mineral.*, 29, 655-671.
- Loomis T.P., 1986, *Metamorphism of pelites: calculation of equilibrium assemblages and numerical simulation of the crystallization of garnet.* *Jour. Metamorphic Geol.*, 4, 201-229
- Moecher, D.P., and Wintsch, R.P., 1994. Deformation-induced reconstitution and local resetting of mineral equilibria in polymetamorphic gneisses: tectonic and metamorphic implications. *Jour. Metamorphic Geol.*, 12, 523-538.
- Moecher, D.P., 1999, The distribution, style and intensity of Alleghanian metamorphism in south-central New England: Petrologic evidence from the Pelham and Willimantic Domes: *Jour. of Geol.*, in press.
- Passchier, C.W., Throuw, R.A.J., Zwart, H.J. and Vissers, R.L.M., 1992. Porphyroblast rotation: eppur si muove? *Jour. Metamorphic Geol.*, 10, 283-294.
- Peterson, V.L. and Robinson, P., 1993. Progressive evolution from uplift to orogenic-parallel transport in a late-Acadian, upper amphibolite- to granulite-facies shear zone, south-central Massachusetts. *Tectonics*, 12, 550-567.
- Pownceby, M.I., Wall, V.J., and O'Neill, H.S.C., 1987. Fe-Mn partitioning between garnet and ilmenite: experimental calibration and applications. *Contr. Mineral. Petrol.*, 97, 116-126.
- Robinson P, 1967. Gneiss domes and recumbent folds of the Orange area, west central Massachusetts. *Guidebook New England Intercollegiate Geological Conference*, Amherst, Massachusetts, 17-47.
- Robinson, P., Tucker, R.D., Gromet, L.P., Ashenden,

- D.D., Williams, M.L., Reed, R.M. and Peterson, V.L., 1992. The Pelham Dome, Central Massachusetts: stratigraphy, geochronology, structure and metamorphism. In: P. Robinson and J.B. Brady (Editors), Guidebook for Field Trips in the Connecticut Valley Region of Massachusetts and Adjacent States, New England Intercollegiate Geological Conference, Amherst, Massachusetts, 1, 132-169.
- Rosenfeld, J.L., 1968, Garnet rotations due to the major Palaeozoic deformations in southeast Vermont. In studies of Appalachian Geology (eds. Zen, E-an et. Al.): Wiley Interscience, New York, p. 185-202.
- Rubenach, M.J. and Barker, A.J., 1998. Metamorphic and metasomatic evolution of the Snake Creek Anticline, eastern succession, Mt Isa Inlier. Australia Jour. Earth Sci., 45, 363-372.
- Schoneveld, C., 1979. The geometry and significance of inclusion patterns in syntectonic porphyroblasts. PhD thesis, University of Leiden, Leiden, 125p.
- Schulz, B., 1990. Prograde-retrograde P-T-t-deformation path of Austroalpine micaschists during Variscan continental collision (Eastern Alps), Jour. Metamorphic Geol., 8, 629-643.
- Schumacher, J.C., Hollocher, K.T., Robinson, P. and Tracy, R.J., 1990. Progressive reactions and melting in the Acadian metamorphic high of central Massachusetts and southwestern New Hampshire, USA. In High-Temperature Metamorphism and Crustal Anatexis, J.R. Ashworth and M. Brown (edi.). Unwin Hyman, 407p.
- Spear, F.S. and Harrison, T.M., 1989, Geochronologic studies in central New England I: Evidence for pre-Acadian metamorphism in eastern Vermont. Geology, 17, 181-184.
- 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. Metamorphic Geol., 8, 683-696.
- Spiess, R. and Bell, T.H., 1996, Microstructural controls on sites of metamorphic reaction: a case study of the inter-relationship between deformation and metamorphism. European Jour. Mineral., 8, 165-186.
- Symmes, G.H. and Ferry, J.M., 1992. The effect of whole-rock MnO content on the stability of garnet in pelitic schists during metamorphism. Jour. Metamorphic Geol., 10, 221-237.
- 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. Am. Jour. Sci., 277, 1152-1167.
- Tracy, R.J., 1982. Compositional zoning and inclusions in metamorphic minerals. In: Characterization of Metamorphism through Mineral Equilibria (ed. Ferry, J.M.), Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy, 10, 355-397.
- Tracy, R.J., Robinson, P. and Thompson, A.B., 1976. Garnet composition and zoning in the determination of temperature and pressure of metamorphism. Am. Mineral., 61, 762-775.
- Tucker, R.D., and Robinson, P., 1990. Age and setting of the Bronson Hill magmatic arc: A re-evaluation based on U-Pb zircon ages in southern New England. Geol. Soc. Am. Bull., 102, 1404-1419.
- Tucker, R.D., Robinson, P. and Hollocher, K.T., 1988, U-Pb zircon, titanite, and monazite dating in basement rocks of the Bronson Hill anticlinorium, central Massachusetts. Geological Society American Abstract with Program, 20, A216.
- Vernon, R.H., 1978. Porphyroblast-matrix microstructural relationships in deformed metamorphic rocks. Geol. Rundsch. 67, 288-305.
- Williams, M.L., 1994. Sigmoidal inclusion trails, punctuated fabric development and interactions between metamorphism and deformation. Jour. Metamorphic Geol., 12, 1-21.
- Williams, P.F. and Jiang, D., 1999. Rotating garnet. Journal of Metamorphic Geology, 17 367-378.
- Wintsch, R.P., Sutter, J.F., Kunk, M.J., Aleinikoff, J.N. and Dorais, M.J., 1992. Contrasting P-T-t paths: thermochronologic evidence for a late Paleozoic final assembly of the Avalonian composite terrane in the New England Appalachians, Tectonics, 11, 672-689.
- Zartman, R.E., 1988. Three decades of geological studies in the New England Appalachians. Geol. Soc. Am. Bull., 100, 1168-1180.
- Zen, E-an, R. Goldsmith, N.L. Ratcliffe, P. Robinson and R.S. Stanley, 1983. Bedrock geological map of Massachusetts. U.S. Geological Survey, Washington D.C., scale 1:250,000.
- Zhang, J., Dirks, P.H.G.M. and Passchier, C.W., 1994. Extensional collapse and uplift in a polymetamorphic granulite terrain in the Archaean and Palaeoproterozoic of north China. PreC. Res., 67, 37-57.

(책임편집: 송용선)

(2000년 10월 30일 접수, 2000년 11월 20일 접수)

Metamorphic P-T Paths from Devonian Pelitic Schists from the Pelham Dome, Massachusetts, USA

Hyeong Soo Kim

School of Earth Sciences, James Cook University, Townsville, QLD., 4811, Australia

Abstract : Major element zoning has been analyzed in garnet porphyroblasts obtained from the Grt-St and Ky-Grt-St grade assemblages in Zones I on the northern flank of the Pelham Dome, north central Massachusetts. These porphyroblasts grew during multiple phases of deformation and metamorphism revealed by the inclusion trail geometry plus the chemical zoning patterns within garnet porphyroblasts. Unusual zoning patterns, including zoning reversals and gradient changes in XMn, zigzag patterns in Fe/(Fe+Mg) and staircase-shaped patterns in XCa, are coincident with textural truncations and other changes in microstructure within the garnet porphyroblasts. Chemical variations in plagioclase, biotite, muscovite and staurolite combined with inclusion trail geometry and petrography reveal that the garnet zoning patterns are modified by combinations of the following. (1) Uni- and divariant reactions involving garnet consumption ($\text{Grt} + \text{Chl} + \text{Ms} = \text{St} + \text{Bt} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$) and production ($\text{St} + \text{Ms} + \text{Qtz} = \text{Bt} + \text{Grt} + \text{Al}_2\text{SiO}_5 + \text{H}_2\text{O}$). (2) Deformation induced episodic ionic dissolution, preferential diffusion and re-distribution during foliation development. (3) P-T changes during growth of the porphyroblasts. The P-T paths combined with petrographic and inclusion trail morphology observations consist of two patterns; (1) heating/compression during NW-SE shortening; and (2) decompression with cooling during NNW-SSE shortening. Based on temperature-time (T-t) geochronological data and late-Paleozoic tectonic model, Alleghanian metamorphism, which is the result of heterogeneous shearing concentrated along the boundary between the Avalone Terrane (Pelham dome) and cover rocks (Bronson Hill Terrane), has produced Ky-St-Ms mineral assemblage during Pennsylvanian (290-300 Ma) in Shutesbury area. However, temperature of alleghanian metamorphism was not high enough to form garnet and staurolite in the Northfield syncline area. Alleghanian metamorphism has affected only the matrix due to heterogeneous shearing in the study area. Consequently, P-T paths (1) and (2) in the Northfield syncline area may have formed during Devonian (ca. 367Ma) ~ Mississippian (ca. 326Ma), and the matrix may have remetamorphosed during Permian (ca. 260-270Ma).

Key words : inclusion trails, garnet zoning, dissolution, P-T path, T-t path