

변성암석학과 구조지질학에서 석류석 반상변정의 종합적인 의의: 조산운동의 온도-압력-변형-시간 경로 해석

김형수*

경북대학교 사범대학 과학교육학부 지구과학전공

초록

석류석은 변성 온도와 압력을 계산하는 지온지압계에 널리 사용되며, 또한 이들 내부 엽리와 외부엽리와의 접촉 관계를 이용하여 상대적인 변형작용의 시기를 밝히는 데 이용되어져 왔다. 석류석 반상변정 내의 내부 엽리 조직에 대한 정량적인 해석과 내부 미세 구조와 화학적 누대구조와의 관계에 대한 접근 방법은 석류석이 형성되는 동안에 온도-압력-변형작용의 진화 과정을 보다 정량적으로 해석할 수 있을 뿐만 아니라, 절대 연령 자료와 결합은 조산 운동 동안 발생하는 다변성/다변형 작용의 특징 보여주는 온도-압력-변형-시간 경로를 규명할 수 있다. 미국 메사추세츠 주 북중부 지역에서 십자석, 남정석과 함께 산출되는 석류석 반상변정은 온도-압력이 증가(540-570 °C, 4.0-5.0 kbar에서 620-637 °C, 7.9-8.8 kbar 까지) 하면서 성장하였다. 또한 이와 같은 변성작용 동안 압축 변형 방향은 다음과 같은 순서로, NE-SW, NW-SE, N-S 그 다음 E-W 방향으로 변화하였다. 결론적으로 이와 같은 변성작용과 변형작용은 주로 고생대 중기 데본기 동안에 일어났던 아카디안 조산운동으로 특징 지워지며, 후기 알레게니안 조산운동에 부분적으로 영향을 받은 것으로 판단한다.

주요어 : 석류석 반상변정, 내부 엽리 조직, 온도-압력-변형-시간 경로

1. 서론

석류석은 넓은 온도-압력 범주에서 안정한 광물이며, 따라서 변성 온도-압력 경로 (Pressure-Temperature Path)를 결정하기 위해 사용되는 대부분의 지온지압계의 중요 광물 중 하나이다(e.g., Spear, 1993). 그러나 석류석 누대구조 형성에 대한 정확한 해석 없이 온도와 압력을 측정하기 위한 석류석 성분의 사용은 실제 변성 온도-압력 보다 높거나 낮을 수 있고, 따라서 전체 온도-압력 경로를 잘못 또는 부정확한 해석을 할 수 있다. 석류석 반상변정은 변형작용의 상대적인 형성 시기(pre-, syn- 및 post-tectonic)를 밝히는 데 이용되어져 왔다(Vernon & Ryde, 1978). 비록 반상변정 내의 내부엽리 구조의 발달에 대한 해석은 아직까지 의견이 분분하지만 (Passchier et. al., 1992; Bell et. al., 1992; Williams & Jiang, 1999), 여러번에 걸쳐서 성장한 반상변정의 시간관계는 내부와 외부 엽리의 접촉관계, 내부엽리 조직과 포유광물의 변화로부터 유추되어질 수 있다(Bell et. al.,

1998; Bell & Kim, 2004).

이 연구에서는 미국 메사추세츠 주 북중부 지역에서 산출되는 석류석-십자석-남정석 편암에서 산출되는 석류석을 대상으로 수행되었다. 이 석류석은 고생대 중기 아카디아안 조산운동 동안 바로비안(Barrovian) 형태의 변성작용에 의해 형성된 것으로 알려져 있고, 후기 알레게니안 변성, 변형작용에 영향을 받았다 (Tucker & Robinson, 1990; Kim, 2000). 이 연구는 석류석 반상변정 내의 미세구조 발달과 화학적 변화 양상 사이의 관계를 내부엽리 절단축(Foliation Intersection Axes; FIA)의 측정과 프로그램 THERMOCALC를 이용하여 보다 정량적으로 조산운동의 진화 과정을 밝히는 데 그 목적이 있다.

2. 연구방법

2-1 정향 박편 제작과 내부엽리 절단축 측정

내부엽리 절단축의 선주향은 내부엽리 곡선의 비대칭이 변하는 위치를 찾음으로 결정할 수 있다. 즉, 우리가 반시계방향으로 내부엽리의 형태를 관찰하면, 휘어진 내부엽리

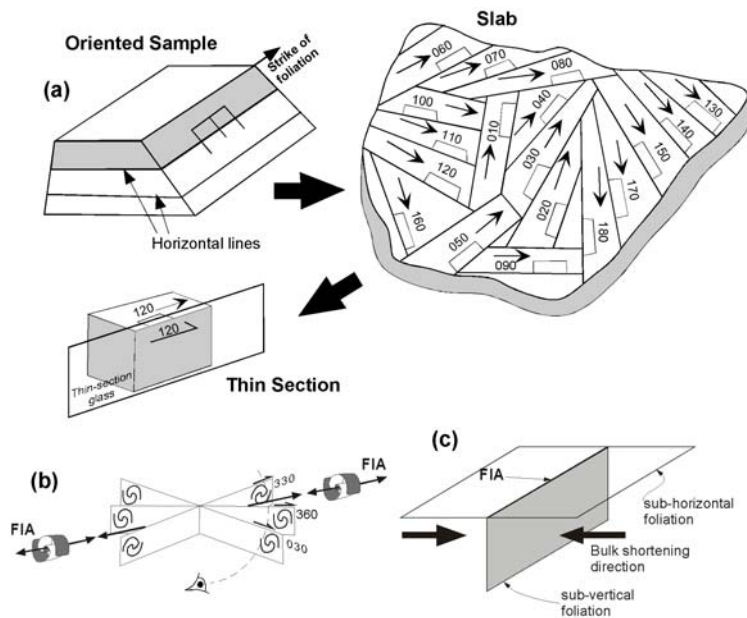


Fig 1. Measurement and significance of Foliation Intersection Axes(FIA) within porphyroblast.

는 두 수직박편에서 S자에서 Z자 모양으로 변하게 된다(그림 1b). 따라서 이 두 박편의 중간의 값이 내부엽리 절단축의 선주향을 의미한다. 예를 들면, 주향이 30° 와 40° 인 두 수직박편에서 모양이 변화하면, 내부엽리 절단축의 선주향은 35°이다. 만약 한 반상변정

내에서 두개의 내부엽리 절단축 선주향을 측정했다면, 이 두 FIA 선주향의 상대적인 시간을 결정할 수 있다. 왜냐하면 반상변정 중앙부의 내부엽리 절단축은 외곽부의 것보다 먼저 형성된 것이기 때문이다. 또한 내부엽리 절단축의 선주향과 수직인 방향은 수평 압축 변형 방향(그림 1c)을 지시한다(Bell et. al., 1998; Kim, 2001; Bell & Kim, 2004).

2-2 전자현미 분석

내부엽리 절단축의 선주향을 결정한 후, 뚜렷한 내부엽리 구조의 변화를 보이는 석류석 반상변정을 선정하여 주구성 원소(Fe, Mg, Mn 그리고 Ca)에 대해 X-ray 성분지도를 얻기 위해 전자 현미 분석을 실시하였다. 이와 같은 접근방법은 석류석 누대구조와 내부엽리 구조의 변화를 직접 비교할 수 있으며, 구조의 변화가 화학변화에 어떤 영향을 미쳤는지 알아낼 수 있다. 더 나아가 석류석 반상변정이 성장하는 동안 변형작용과 변성작용의 역사를 보다 정량적으로 해석할 수 있다.

2-3 프로그램 THERMOCALC

온도-압력 가상평형도(pseudosections)는 석류석을 함유하는 변성 광물의 조합의 안정도를 알아보기 위해서 프로그램 THERMOCALC(version 3.1; Powell & Holland 1988; Powell et al., 1998)을 이용하여 $MnO-Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ (MnNCKFMASH) 시스템 하에서 계산하였다.

3. 결과 및 해석

3-1 내부엽리 절단축의 상대적인 형성시기

총 64개의 내부엽리 절단축이 석류석 반상변정으로부터 측정하였다. 이들은 크게 5개의 그룹, NW-SE(set 0), NE-SW(set 1), W-E(set 2), NNW-SSE(set 3) 그리고 NNE-SSW(set 4), 으로 구분 할 수 있었다. 이들의 상대적인 형성 시기는 set 1이 가장 오래 전에 형성되었고, 다음 set2, set3, set4, 마지막으로 형성된 것이 set 5이다.

3-2 석류석의 내부 엽리 구조와 화학적 누대구조의 관계

시료 K77에서 산출되는 석류석 반상변정은 석영, 티탄철석과 흑연 포획광물을 가지고 있다. 이 석류석 결정은 포획광물의 밀도와 내부 엽리의 형태로 세개의 성장 구역으로 나누어질 수 있다. G1은 포획물이 적고 급한 경사를 갖는 내부엽리를 포함하고 있다. 이 중앙 내부엽리는 G1의 가장자리에서 G2의 완만한 경사를 갖는 내부엽리에 의해 잘려져 나타난다. G1의 FIA 선주향은 125°이고 G2는 45°이다. 그러나 G3의 FIA 선주향은 내부엽리의 결여로 인해 결정할 수 없었다.

Mn 성분지도는 G1과 G2에서 최고점(약 25 mol.%)을 보이고, Mg 성분지도는 Mn과 반

대로 G1과 G2 에서 최저점을 보인다. Ca 성분지도는 G2에서 급증하는 경향을 보인다. G2에서 이들 세 성분은 G2의 내부엽리를 따라 분포하는 경향을 보이다(그림 2). G2에서 X_{Mn} 과 $Fe/(Fe+Mg)$ 비는 역전 누대구조를 보인다. $Fe/(Fe+Mg)$ 비는 G1 [$\Delta Fe/(Fe+Mg) = -4 \sim -6 \text{ mol.}\%$] 과 G3에서는 [$\Delta Fe/(Fe+Mg) = -2 \sim -7 \text{ mol.}\%$] 감소하는 경향을 보이나, G2 [$\Delta Fe/(Fe+Mg) = +6 \sim +9 \text{ mol.}\%$] 에서는 증가한다. X_{Ca} 는 G1-G2 경계부에서 급증하는 경향을 보인다. 이와 같은 비정상적인 누대구조의 변화는 석류석 결정 내의 내부엽리의 변화와 비교적 일치하는 경향을 보이고, 이것은 석류석의 화학적 변화가 변형작용에 영향을 받았음을 지시한다.

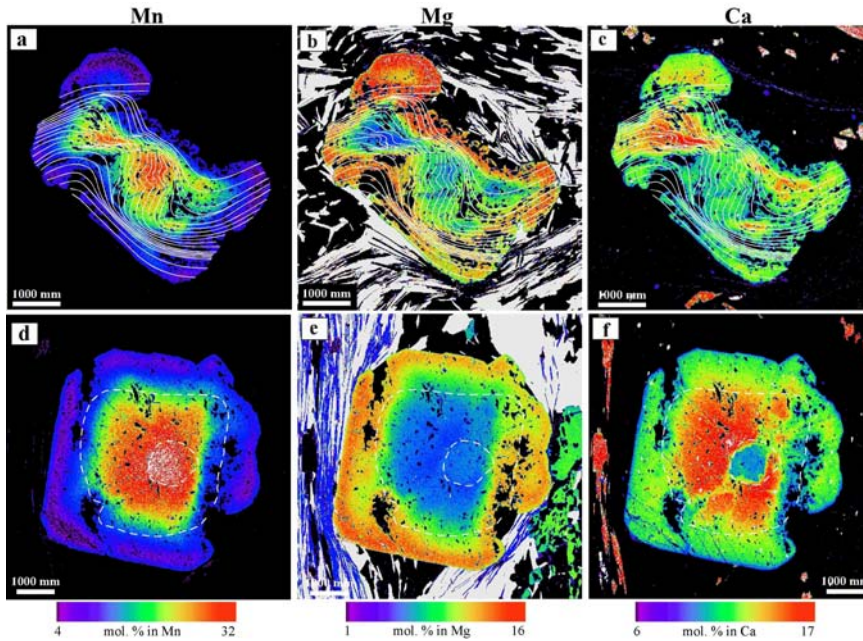


Fig. 2. Mn, Mg, and Ca compositional map of garnet porphyroblasts in sample K77

3-3 온도-압력 가상평형도 - 온도와 압력 경로

온도-압력 가상평형도는 사장석의 Na와 Ca 그리고 석류석의 Mn 성분을 포함하는 MnNCKFMASH 시스템에서 계산하였고, 석류석을 함유하는 변성 광물의 조합과 안정도를 알아보기 위해서 프로그램 THERMOCALC를 사용하였다(그림 3a). 그림 2a에서, 석류석은 약 470 °C에서부터 형성되며, 녹니석, 흑운모 그리고 사장석과 넓은 온도, 압력 범주에서 안정하게 산출된다. 십자석은 약 600 °C와 7.0 kbar에서 석류석과 같이 나타나며, 남정석은 약 620-630 °C, 7-8 kbar에서 석류석과 공생한다.

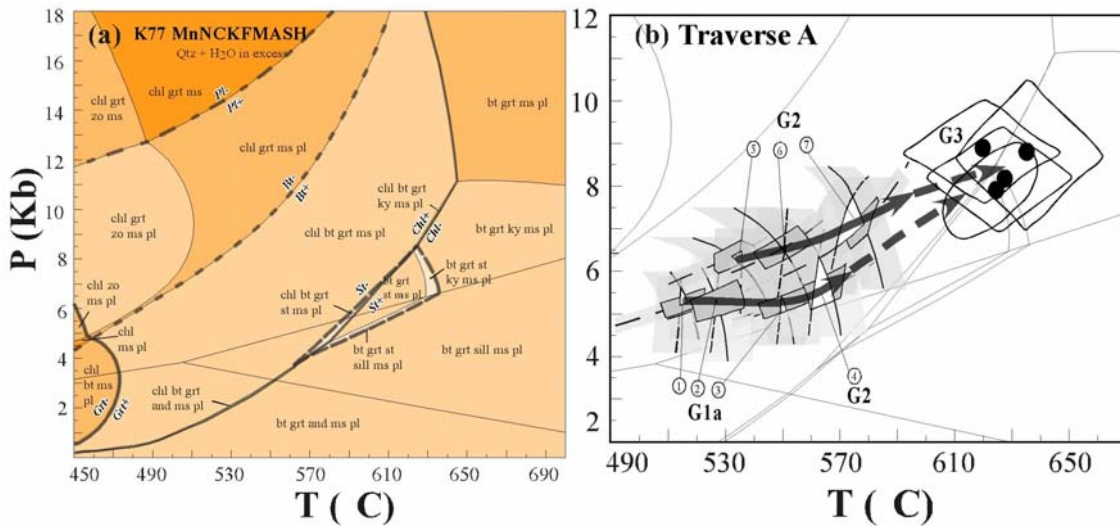


Fig. 3. (a) P-T pseudosection in MnNCKFMASH system (b) Pressure-Temperature path for garnet growth calculated from intersection of isopleths in X_{Mn} , X_{Ca} and X_{Fe} . Mineral abbreviations: chl chlorite; ms, muscovite; zo, zoisite; grt, garnet; bt, biotite; pl, plagioclase; st, staurolite; ky, kyanite; sill, sillimanite; and, andalusite.

석류석 성분을 이용하여 얻은 온도-압력 경로는 석류석의 세가지 성분의 등성분선 (isopleth)의 교차 관계를 이용하여 구하였다(그림 3b). 석류석 G1와 G2에 대한 온도-압력 조건은 각각 535-560 °C, 5.0-6.0 kbar, 그리고 550-585 °C, 6.0-7.0 kbar이다. 기질부의 온도-압력은 620-637 °C, 7.9-8.8 kbar로 십자석과 남정석을 함유한 변성광물조합과 일치한다. 전반적으로 온도-압력 조건은 압축-가열 경로(compressional heating path)를 보여 준다. 이것은 기존 연구 결과와도 일치 한다 (Tracy et al., 1976).

4. 토의 및 결론

석류석 결정의 내부엽리 절단축의 형성 시 온도-압력 조건은 석류석 성분과 프로그램 THERMOCALC를 사용하여 측정할 수 있었다(그림 4). NW-SE 방향의 압축작용(set 0)은 약 540-570 °C, 4.0-5.0 kbar에서 형성되었으며, NE-SW 방향의 압축작용(set 1)은 약 550-590 °C, 5.0-6.5 kbar에서 형성되었다. 그리고 N-S 방향의 압축작용(set 2)은 약 570-610 °C, 6.0-6.5 kbar에서 형성되었다.

온도-압력-변형 경로에서 시간은 석류석 결정 내에 흔히 존재하는 모나자이트 광물을 이용하여 석류석 각 부분의 형성 시기를 결정 할 수 있다(예, Bell & Welch, 2003). 선행 연구 결과에서, 이번 연구에 사용된 석류석 반상변정들의 형성은 약 425 Ma에서부터 385-360 Ma까지(그림 4), 고생대 데본기 동안에 일어난 아카디안 조산운동에 영향을 받

았음을 알 수 있었다. 결론적으로, 이번 연구에서 제시한 석류석 반상변정의 응용 방법은 조산운대의 변성지구조적(tectonometamorphic) 역사를 보다 정량적으로 규명하는데 도움을 줄 것이다.

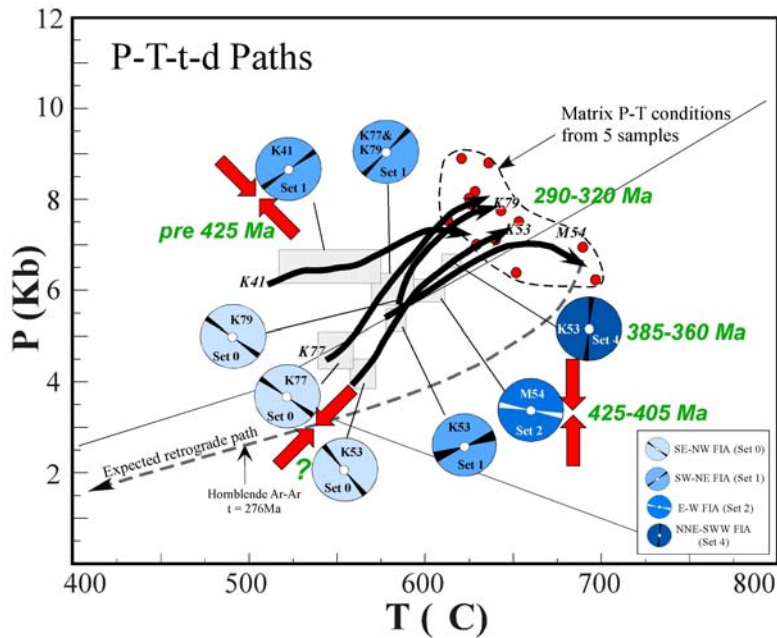


Fig. 3. Pressure–Temperature–deformation–time paths.

참 고 문 헌

- Bell T.H and Kim, H.S., 2004, Preservation of deformation and metamorphism through extensive younger orogenic overprinting: Alleghanian versus Acadian orogenesis in central New England. *Journal of Structural Geology*, 26, 1591–1613.
- Bell T.H. and Welch P.W., 2002, Prolonged Acadian Orogenesis: Revelations from FIA controlled monazite dating of foliations in porphyroblasts and matrix. *Am Journal Sci*, 302, 549–581
- 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! *Journal of Metamorphic Geology*, 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: *Journal of Metamorphic Geology*, 16, 767–794
- Kim, H.S., 2000, Structural and Metamorphic Evolution of the Northern Appalachian Orogenic belt in

- north-central Massachusetts, USA. James Cook University, Ph.D. Thesis, 269p.
- Kim, H.S., 2001, A new approach to distinguishing multiple phases of metamorphism and deformation: Application to the Northeastern Appalachian. *Geosciences Journal*, 5, 65–84,
- Passchier, C. W., Trouw, R. A. J., Zwart, H. J. and Vissers, R. L. M., 1992, Porphyroblast rotation: eppur si mouve? *Journal of Metamorphic Geology*, 10, 283–294
- Powell R and Holland T.J.B., 1988, An internally consistent dataset with uncertainties and correlation; 3, Applications to geobarometry, worked examples and a computer program. *J Metamorphic Geol*, 6, 173–20
- Powell R, Holland T.J.B., and Worley B., 1998 Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC. *J Metamorphic Geol*, 16, 577–58
- Spear, F.S., 1993, *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure–Temperature–Time Path*. Mineralogical Society of America, Monograph Series, Washington DC, 799p
- Tracy RJ, Robinson, P, Thompson, A.B., 1976 Garnet composition and zoning in the determination of temperature and pressure of metamorphism. *Am Mineral*, 61, 762–77
- Tucker R.D, 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, 1404–141
- Vernon, R.H. and Ryde, N., 1978, Porphyroblast–matrix microstructural relationships in deformed metamorphic rocks. *Geological Rundsch.*, 67, 288–30
- Williams, P. F. and Jiang, D., 1999. Rotating garnet. *Journal of Metamorphic Geology*, 17, 367–378.