

다변성작용 동안 십자석 반상변정과 가상의 성장

김형수

경북대학교 사범대학 과학교육학부 지구과학전공(hskim@knu.ac.kr)

1. 서론

미국 북중부 메사추세츠 주에 분포하는 리틀튼층(Littleton Formation)의 변성 이질암(pelitic schist)에서 십자석과 석류석 결정이 반상변정으로 나타난다. 이들 십자석 반상변정은 흔히 내부 엽리조직을 가지고 있으며, 부분적으로 또는 완전하게 가상화(pseudomorphism) 되어 나타난다. 이번 연구에서 십자석 반상변정은 리틀튼층의 석류석+십자석+흑운모+백운모+사장석대(십자석대; Zone I), 남정석+석류석+십자석+흑운모+백운모+사장석대(남정석대; Zone I), 그리고 규선석+석류석+십자석+흑운모+백운모+사장석대(규선석대; Zone II)에서 산출된다.

가상은 두 가지 이상의 변성광물의 안정성을 파악하고, 온도-압력-시간 경로를 해석하는데 사용되어질 수 있다(e.g., Vernon, 1982; Johnson & Vernon, 1995; Guidotti & Johnson, 2002). 이 가상들은 다양한 작용에 의해 형성될 수 있지만, 다변성 작용 동안에 다음과 같은 과정의 결과로 형성될 수 있다. (a) 만약 암석 내에 유체가 풍부하다면, 서서히 냉각되는 동안의 후퇴 재결정작용(e.g., Fyfe *et al.*, 1978). (b) 시간적으로 분리된 재결정 작용(e.g., Guidotti & Johnson, 2002). (c) 광물조합, 광물화학 그리고 조직적 특징의 변화를 보이는 연속적인 변성작용 동안 재결정 작용(e.g., Brodie & Rutter, 1985). 따라서 가능한 가상 형성 과정에 대한 이해는 보다 정확한 지구조 역사를 이해하는 데 중요하다.

이 논문의 목적은 이들 십자석 성장과 소멸 그리고 십자석 가상의 형성 시기와 그들의 온도-압력 조건을 규명하고, 고생대 중기에서 말기에 걸쳐 연구지역에 영향을 준 아카디안(Acadian)과 알레게니안(Alleghanian) 조산운동의 특성을 밝히고자 한다.

2. 연구방법

십자석의 안정 영역을 알아보기 위한 온도-압력 가상평형도(pseudosection)는 THERMOCALC(version 3.1; Powell and Holland, 1988; Powell *et al.*, 1998) 프로그램을 이용하여 MnO-Na₂O-CaO-K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O(MnNCKFMASH) 계하에서 작성하였다. 석영과 H₂O는 과포화(in excess) 상태로 가정하였고, MnO는 석류석의 안정 영역 변화에 민감하므로 계에 포함시켰다(e.g., Mahar *et al.*, 1997; Tinkham *et al.*, 2001). 사장석은 모든 시료에서 관찰되므로 CaO와 Na₂O를 계에 포함시켰다. 일반적으로 십자석은 소량의 아연(ZnO)을 함유하지만, 분석된 십자석에서 ZnO의 함량은 극소량이므로(평균 >0.05) MnNCKFMASH 계의 가상평형도에 큰 영향을 주지 않을 것으로 사료된다.

3. 십자석의 산출상태

Zone I의 십자석대에서 산출되는 십자석의 입자 크기는 대부분 조립질에서 극조립까지 다양하게 반상변정으로 산출된다. 십자석 반상변정들은 석영, 티탄철석, 흑운모, 백운모, 흑연 그리고 석류석을 포획광물로 가지고 있고 결정 외각은 부분적으로 석영과 백운모에 의해 resorbed 되어 나타난다. 또한 일부 십자석 결정은 방향성을 보이지 않는 조립질 백운모에 의해 부분적 또는 완전한 가상화 되어 나타난다. 남정석대에서 산출되는 십자석 또한 다양

한 종류의 포획광물을 함유하는 반상변정으로 나타나며, 휘어진 내부엽리가 보존되어 있다. 기질에서 나타나는 십자석은 주 엽리 방향과 평행하게 남정석과 교호하면서 산출된다.

Zone II의 규선석대에서 산출되는 십자석은 보다 복잡한 공생관계를 보인다. 십자석 가상은 두 가지 형태로 산출된다. 이것은 (a) 조립질 백운모로 채워진 십자석 가상과, (b) 세립질 백운모와 자색을 띠는 녹니석으로 치환되어진 십자석 가상이다. 전자의 경우는 점진변성작용에 의한 것으로 판단되고, 후자는 물(H₂O)와 관련된 후퇴변성작용 동안에 형성된 것으로 사료된다(Hollocher, 1987). 또한 전자의 경우, 조립질 백운모 결정 경계에서 새로운 세립의 십자석이 관찰되며, 이는 잔류 십자석과는 생성시기가 다른 것으로 판단된다. 즉, 세립의 십자석 결정은 십자석 가상 형성 후에 새로 생성되었음을 지시한다. 또한 석류석 반상 변정 주변부는 십자석으로 치환되어 나타나고 후에 섬유상의 규선석으로 전이되어 나타난다. 이런 십자석과 섬유상의 규선석 그리고 티탄철석의 관계는 기질부에서 쉽게 관찰된다. 따라서 조립질 백운모 결정 경계부에서와 석류석 결정 주변에서 산출되는 십자석은 최고 변성작용 이후 후퇴 변성작용 동안에 형성된 것으로 판단된다.

4. 십자석의 안정영역

십자석대에 해당되는 시료 K60의 P-T 가상평형도에서 십자석은 넓은 영역에서 석류석, 흑운모, 백운모 그리고 사장석과 안정하게 나타나며, 녹니석의 소멸에 의해 최초로 생성되며, Al-silicates(남정석 또는 규선석)이 생성되면서 소멸된다. 십자석의 안정영역의 온도-압력은 약 540~650°C 그리고 2.5~10.0 kbar이다.

남정석대에 해당되는 시료 K53의 P-T 가상평형도에서 십자석은 시료 K60에서 보다 넓은 온도-압력 조건에서 십자석이 안정하게 산출된다. 온도는 약 510~650°C를 보이고, 압력은 약 2.5~11.0 kbar의 범위를 보인다. 십자석은 경녹니석(chloritoid)의 소멸에 의해 생성되며, 석류석, 사장석, 백운모 그리고 녹니석과 비교적 넓은 온도-압력 범위에서 공존한다. 또한 녹니석이 소멸된 후, 십자석은 Al-silicate가 생성될 때 까지 석류석, 흑운모, 사장석 그리고 백운모와 공존한다.

규선석대에 해당되는 시료 K135의 P-T 가상평형도에서 십자석은 시료 K53과 유사하게 석류석, 사장석, 백운모 그리고 녹니석과 비교적 넓은 온도-압력 범위에서 공존한다. 십자석은 다른 광물의 소멸없이 생성되며, 온도-압력이 증가하면 녹니석이 소멸되고 흑운모, 석류석, 사장석, 백운모와 공존하며, Al-silicates이 생성되면서 소멸된다.

5. 해석 및 토의

Zone I의 남정석대에 해당되는 시료 K53에서 십자석 반상변정은 석류석과 함께 온도-압력의 증가에 의해 형성될 수 있다. 석류석의 X_{Mn}, X_{Fe} 그리고 X_{Ca} 등성분선(isopleth)를 이용하여 구한 온도-압력 경로에 의하면(Fig. 1a; Kim and Bell, 2005), 십자석은 약 560°C, 4.0 kbar에서 녹니석, 석류석, 백운모, 사장석과 함께 공존하며, 흑운모의 산출과 동시에 급격히 modal proportion 비가 증가한다(Fig. 1a). 그 후 흑운모-석류석-십자석-사장석 안정영역인 약 600°C, 6.0 kbar를 지나면서 십자석은 남정석이 산출될 때까지(즉, 최고 온도-압력 조건인 약 649±25°C, 7.0±1.0 kbar) 점진적으로 감소하는 경향을 보인다(Fig. 1a). 따라서 십자석의 형성은 아래 변성반응 (1)와 (2)에 의한 것으로 해석될 수 있다.

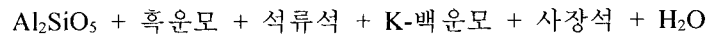
(1) 녹니석 + 백운모 =



(2) Mg-녹니석 + 석류석 + 백운모 = 십자석 + 흑운모 + Na-백운모 + 석영 + H₂O

그리고 십자석의 modal proportion의 감소는 조립질 백운모 치환에 의해 형성된 십자석 가상과 연관되며, 이것은 반응 (3)에 의해 온도-압력이 증가하면서 형성된다(Fig. 1a; Guidotti and Johnson, 2002).

(3) 십자석 + Na-백운모 + 석영 =



규선석대에서 점진 변성작용의 온도-압력 경로는 석류석의 누대구조의 균질화작용에 의해 결정할 수 없었고, 기질부의 광물과 석류석의 외곽 성분을 이용하여 구한 온도-압력은 시료 K135에서는 평균 650±34°C, 6.3±1.3 kbar이고 시료 K147에서는 평균 664±35°C, 6.6±1.5 kbar를 보인다 (Fig. 1b & c). 그림 2b와 c에서 보여주는 십자석의 modal proportion 등고선의 변화는 규선석대에서 십자석이 최고 변성온도-압력 후 온도-압력의 감소 동안 형성할 수 있음을 보여준다. 따라서 십자석 가상 내에 존재하는 조립질 백운모의 결정 경계 사이에 재결정된 세립의 십자석과 석류석 결정 외각부에서 섬유상 규선석과 함께 산출되는 십자석은 후퇴변성작용 동안에 의해 Fe/(Fe+Mg) 비가 증가하는 반응 (4)가 형성된 것으로 해석할 수 있다.

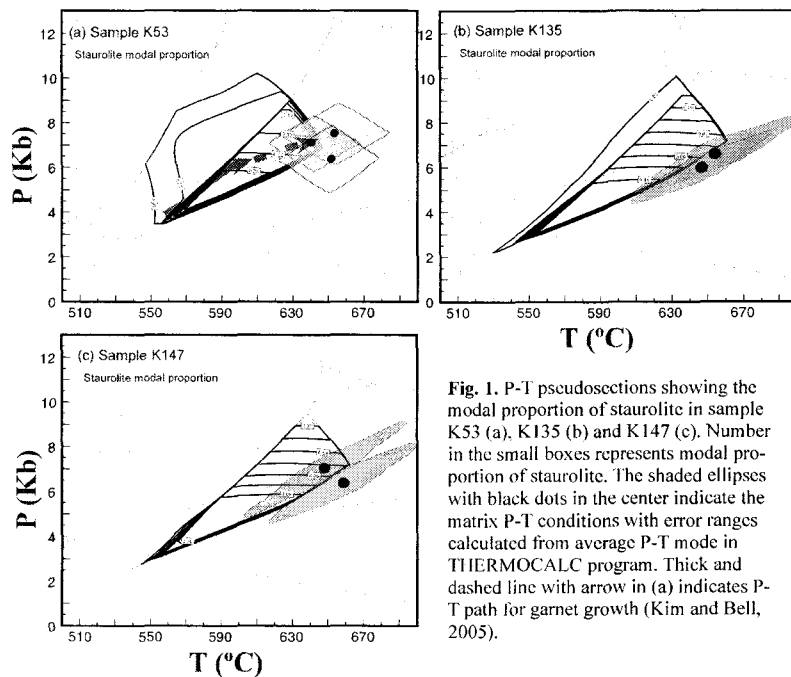
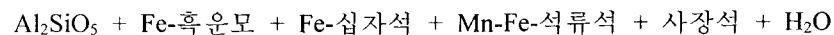


Fig. 1. P-T pseudosections showing the modal proportion of staurolite in sample K53 (a), K135 (b) and K147 (c). Number in the small boxes represents modal proportion of staurolite. The shaded ellipses with black dots in the center indicate the matrix P-T conditions with error ranges calculated from average P-T mode in THERMOCALC program. Thick and dashed line with arrow in (a) indicates P-T path for garnet growth (Kim and Bell, 2005).

(4) Mg-흑운모 + 백운모 + 석류석 + 십자석 + 석영 =



그리고 녹니석과 백운모로 치환된 형태로 나타나는 십자석 가상은 약 530°C, 3.0 kbar 보다

낮은 온도-압력 하에서 반응 (5)에 의해 생성된 것으로 판단된다(Fig. 1b).

(5) 흑운모 + 십자석 + 석영 + H₂O = 백운모 + 녹니석 + 티탄철석

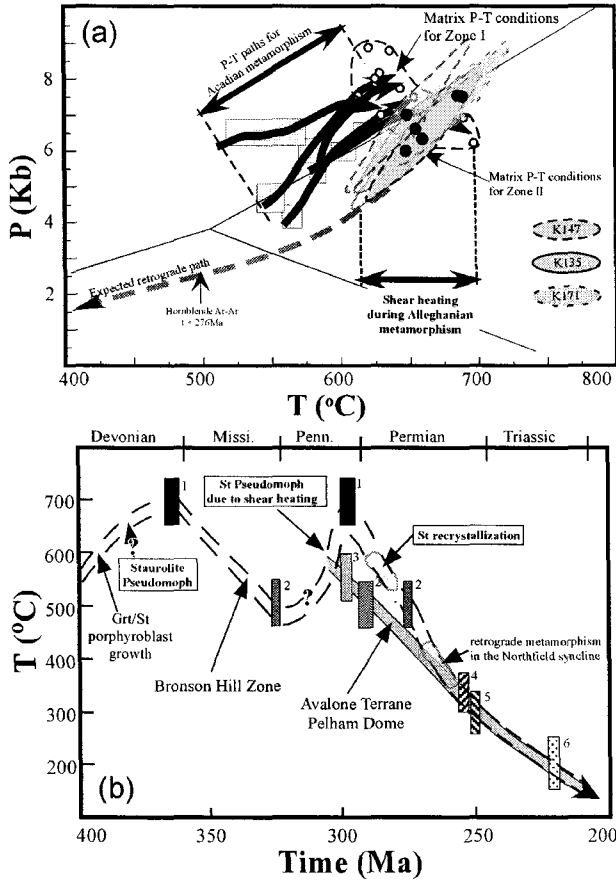


Fig. 2. (a) P-T path for Acadian metamorphism and shear heating during Alleghanian (modified from Kim and Bell, 2005). See text for more detailed explanation. (b) Late Paleozoic Temperature-time (T-t) paths (after Wintsch et al., 1992) for the area of the Pelham Dome and the Bronson Hill Zone. Geochronology data are: 1, monazite; 2, hornblende; 3, titanite; 4, muscovite; 5, biotite; 6, k-feldspar from Tucker et al. (1988), Harrison et al. (1989), Spear and Harrison (1989), Tucker and Robinson (1992). See text for further explanation.

성될 수 있고, 이는 연구지역을 포함한 뉴잉글랜드 지역의 고변성도의 변성작용에서 흔히 관찰된다고 보고하였다. 또한 온도의 증가(heating)는 아카디안 조산운동 말기 또는 후에 일어난 규장질 심성암체의 정치에 기인한다고 설명하였다. 따라서 미시시피안 후기에서 펜실베이안 중기 동안 일어난 알레게니안 전단운동(Fig. 2b)은 국부적으로 온도를 증가(약 700°C 까지; Kim and Bell, 2005)시켰고, 이로 인해 십자석 결정이 조립질 백운모로 치환되면서 가상을 형성되었음을 시사한다. 그러나 주상 또는 rhombic의 규선석을 생성하는 아카디안 변성작용 동안에 형성되었을 가능성도 배제할 수 없다.

Zone II에서 관찰된 십자석 가상 내에 존재하는 조립질 백운모의 결정 경계면사이에서 나타나는 세립의 십자석과 석류석 결정 주변에서 규선석과 산출되는 십자석은 따라서 가상이 형성된 후 재결정된 것으로 판단된다. 즉, 알레게니안 전단운동에 의해 형성된 최고 온도(peak temperature) 이후(즉, 펜실베이안 후기에서 페름기 초기; Fig. 2), 온도-압력의 감소에

연구지역의 다양한 형태의 내부 엽리 조직을 함유하며 석류석과 함께 상변정으로 산출되는 십자석은 그들의 내부와 외부 엽리 조직의 관계(Kim, 2001)와 내부 포획광물로 산출되는 모나자이트의 U-Pb 절대연령(360-415 Ma; unpublished data)에 의하면 아카디안 변성작용 동안 형성된 것으로 사료된다(Fig. 2). Zone I에서 산출되는 조립질 백운모로 채워진 십자석 가상의 결정 형태는 대부분 원래 십자석 결정 경계를 유지하며 비교적 자형으로 산출된다. 이것은 그들의 형성 동안 또는 이후 광역적인 응력의 세기가 낮았음을 의미한다. 즉, 만약 점진 또는 후퇴변성작용 동안 일정한 응력 조건 하에서 H₂O의 감소 또는 증가하였다면, 반응 (3)에 의해 십자석은 점진적으로 백운모로 치환될 수 있다(e.g., Guidotti and Johnson, 2002). 그러나 펠람돔에서 비교적 근거리에서 채취한 시료 K135와 K147(Zone II)에서 산출되는 십자석 가상 결정은 다소 신장되어 나타난다. 이는 알레게니안 변형작용에 의한 것으로 생각된다. Guidotti(1993)는 비교적 낮은 압력과 높은 온도 환경 하에서 십자석 가상이 형

의해 새로운 십자석이 재결정된 것으로 판단된다(Fig. 2).

6. 결론

연구지역의 십자석, 남정석, 규선석 대에서 산출되는 십자석은 반상변정, 가상 그리고 세립질로 기질부 또는 가상 내에서 산출된다. MnNCKFMASH 계에서 계산된 온도-압력 가상 평형도에서 세 변성대에서 산출되는 십자석은 녹니석 소멸에 의해 형성되며, 흑운모, 석류석, 백운모, 사장석과 공존하며 남정석 또는 규선석의 형성에 의해 소멸된다. 십자석대와 남정석대에서 십자석은 반상변정과 부분적으로 조립질 백운모로 치환된 가상으로 산출되며 기질에서는 남정석으로 전이되어 나타난다. 반면에 규선석대의 십자석은 반상변정보다는 방향성을 보이지 않는 조립질 백운모로 치환된 가상과 기질에서 섬유상 규선석과 같이 산출된다. 뿐만 아니라, 세립의 십자석이 가상 내의 조립질 백운모 결정 사이에 나타나거나, 석류석 반상변정의 외각부에서 석류석을 치환한 형태로 산출된다. 따라서 연구지역의 십자석 반상변정과 재결정된 세립의 십자석은 가상화작용(pseudomorphism)을 전후로 형성된 것을 지시한다.

기존의 아카디안 변성작용의 온도-압력 경로와 아카디안에서 알레게니안 조산운동 동안의 온도-시간 경로를 근거로, 연구지역의 십자석 반상변정은 A1이 풍부한 암석에서는 석류석과 공존하며 이 시기에 성장한 것으로 판단된다. 규선석대에서 산출되는 재결정된 세립의 십자석은 알레게니안 최고 온도 조건 이후 즉, 페름기 초기(300-280 Ma) 온도-압력의 감소에 의해 형성된 것으로 판단된다. 그리고 세 변성대에서 산출되는 조립질 백운모에 의해 치환된 십자석 가상은 알레게니안 전단운동에 의해 발생한 온도 상승으로 인해 형성되었을 가능성이 높다.

7. 참고문헌

- Brodie, K.H. and Rutter, E.H., 1985, On the relationship between deformation and metamorphism with special reference to the behaviour of basic rocks. In: *Metamorphic Reactions, Kinetics, Textures and Deformations* (eds Thompson, A.B., and Rubie, D.C.). *Advanced in Physical Geochemistry*, 4, 138-179.
- Forster, C.T. Jr., 1983, Thermodynamic models of biotite pseudomorphs after staurolite. *Am. Minerol.*, 68, 389-397.
- Fyfe, W.S., Price, N.J. and Thompson, A.B., 1978, *Fluids in the Earth's crust*. Elsevier, Amsterdam.
- Guidotti, C.V., 1970, The mineralogy and petrology of the transition from the lower to upper sillimanite zone in the Oquossoc area, Maine. *Jour. Petrol.*, 11, 277-336.
- Guidotti, C.V., 1993, Textural aspects of high T-low P polymetamorphism in the Rangeley area, western Maine: general implications for studies of Acadian metamorphic rocks in New England (abstract). *Geol. Soc. Am. Abstract with Program*, 25, A21.
- Guidotti, C.V. and Johnson, S.E., 2002, Pseudomorphs and associated microtextures of western Maine, USA. *Jour. Struct. Geol.*, 24, 1139-1156.
- Hollocher, K.T., 1987, Systematic retrograde metamorphism of sillimanite-staurolite schist, New Salem area, Massachusetts. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 98, 621-634.

- Johnson, S.E. and Vernon, R.H., 1995, Stepping stones and pitfalls in deformation of anticlockwise P-T-t path: the low-P, high-T Cooma Complex, Australia. *Jour. Metam. Geol.*, 13, 165-183.
- 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.
- Kim H.S. and Bell T.H., 2005, Combining compositional zoning and foliation intersection axes (FIAs) in garnet to quantitatively determine early P-T-t paths in multiply deformed and metamorphosed schist: north central Massachusetts, USA. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 149, 141-163.
- Kretz, R., 1983, Symbols for rock-forming minerals. *Am. Mineral.*, 68, 277-279.
- Mahar E.M., Baker J.M., Powell R., Holland, T.J.B. and Howell, N., 1997, The effect of Mn on mineral stability in metapelites. *Jour. Metam. Geol.*, 15, 223-238
- 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. Geol.*, 107, 449-471
- 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. *Jour. Metam. Geol.*, 6, 173-204
- Powell, R., Holland, T.J.B. and Worley, B., 1998, Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC. *Jour. Metam. Geol.*, 16, 577-58
- 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 (Eds), *Guidebook for Field Trips in the Connecticut Valley Region of Massachusetts and Adjacent States*, New England Intercollegiate Geological Conference, Amherst, Massachusetts 1, 132-169.
- Spaer, F.S., 1993, *Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time path*. Mineralogical Society of America, Monograph Series, Wasgington D.C., 799p.
- Tinkham, D.K., Zuluaga, C.A. and Stowell, H.H., 2001, Metapelite phase equilibria modeling in MnNCKFMASH: The effect of variable Al₂O₃ and MgO/(MgO+FeO) on mineral stability. *Geol. Material. Res.*, 3, 1-42
- Vernon, R.H., 1982, Isobaric cooling of two regional metamorphic complexes related to igneous intrusions in southeastern Australia. *Geology*, 10, 76-81.