

## 호주 퀸즈랜드 주 캔닝턴 지역의 석류석-규선석-흑운모 편마암과 편암의 온도-압력-변형 경로

김형수<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> School of Earth Sciences, James Cook University, Townsville, QLD., 4811, Australia

<sup>2</sup> 경북대학교 사범대학 과학교육학부 지구과학교육전공 (hskim@knu.ac.kr)

### 1. 서론

캔닝턴(Cannington) 지역은(동경 140 55', 남위 21 52') 호주 퀸즈랜드 주 마운트 아이자(Mount Ias) 지역 남동 가장자리에 위치한다. 이 지역은 3가지 주요 층서학적과 지질구조학적 암군으로(terrane) 나뉜다. 가장 오래된 중부 칼카둔-리치하트(Kalkadoon-Leichharte) 습곡대는 서부와 동부 습곡대 중간에 위치하며, 이 지역들은 다변형/다변성된 초기-중기 원생대 암석으로 특징 지워진다.

캔닝턴 광상의 모암은 마로난(Maronan) 누층군에(1.67 Ga) 속하는 미그마타이트, 흑운모-규선석-석류석 편마암, 흑운모-규선석 편암, 그리고 각섬암으로 구성되어 있다(Beardsmore et al., 1988). 미그마타이트와 호상 편마암은 우흑대와 우백대로 구성된 분화된 성분층리(compositional layers)를 보인다. 각섬암은 석류석 반상변정과 흑운모를 함유하고 있으며, 부분적으로 엽리가 발달해 있다. 캔닝턴 지역의 최고 변성작용은 규선석, K-장석, 각섬석, 사장석 광물조합과 부분용융을 근거로 상부-엠피블라이트 변성상을 나타내며, 변성 온도-압력은 650-690 °C and 4.0±1 kbar이다. 캔닝턴 광산은 중간을 자르는 트라펠(Trepell) 단층에 의해 남부대와 북부대로 구분되며 남부 광산의 전체적인 지질구조는 서남서 방향으로 기울어진 향사성 등사 습곡이다. 습곡의 핵에는 각섬암이 분포한다.

연구 목적은 캔닝턴 광상의 모암에서 산출되는 변성광물 규선석과 석류석의 산출 상태와 미세구조를 관찰하여, 연구 지역의 변성작용의 특징을 알아보고자 한다. 그리고 궁극적으로 이들 변성작용, 부분용융과 변형작용과의 관계성에 대해 논의 하고자 한다.

### 2. 지질개요 및 연구방법

야외 노두가 없는 지역이므로 시료는 대부분이 정향된 시추 코아로부터 채취하였고, 이들로부터 얻은 지질 구조 및 암석학적 정보를 이용하여 지질 평면도와 단면도를 작성하였다. 최고 변성 온도-압력 조건은 각섬석-석류석-사장석 화학 성분을 프로그램 THERMOCALC의 평균 온도-압력 모드를 이용하여 계산하였다.

온도-압력 가상평형도(pseudosections)는 규선석을 함유하는 변성 광물의 조합과 용융의 안정도를 알아보기 위해서 프로그램 THERMOCALC (version 3.1; Powell et al., 1998)을 이용하여 4개의 화학 시스템 즉, K<sub>2</sub>O-FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O(KFMASH), Na<sub>2</sub>O-CaO-KFMASH(NCKFMASH), MnO-NCKFMASH (MnNCKFMASH) 그리고 KFMASH-TiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(KFMASHTO) 하에서 계산하였다(예, White et al., 2002).

### 3. 규선석과 석류석의 산출상태와 엽리의 발달

규선석은 광상 주변에 있는 대부분의 모암에서 산출되며, 그들의 결정 형태에 따라 세가지로 구분된다. 첫번째는 능면상 또는 주상의 형태로 기질부에서 그리고 다형가상(paramorph)으로 산출된다. 이 다형가상 내에 규선석은 단결정이 아니라 여러 능면상 규선석 집합체로 나타나며, 이는 홍주석 반상 변정이 나중에 규선석으로 변이된 것으로 알려져 있다. 두번째 산출 형태는 주상과 섬유상 규선석의 공생이다. 이들은 광상 모암에서 주엽리를 구성하고 있으며, 성분 엽리와 거의 평행하게 산출되기도 한다. 마지막 산출 유형은 섬유상의 규선석이다. 이 형태의 규선석은 흑운모와 함께 수평 엽리를 구성하며, 성분엽리를 절단하며 나타난다. 석류석은 모암인 편마암과 편암 내에서 반상 변정으로 산출되고, 반상 변정의 크기는 수 mm에서 수 cm로 다양하게 나타난다. 두개의 성장 분대, 즉 내부 포획 광물이 풍부한 중앙부와 반대의 외곽부로 구분된다. 각섬암에 산출되는 석류석은 S 또는 Z자 형태의 내부 엽리를 가지고 있으며, 이들은 석영, 흑운모, 각섬석, 티탄철석, 자철석 그리고 인회석으로 구성되어 있다.

연구 지역의 엽리의 발달은 규선석의 정향 배열을 이용하여 5개의 엽리를 구분하였다. S1에서 S4는 주상 또는 능면형 규선석에 의해, 그리고 S5는 섬유상 규선석에 의해 구별하였다. S1, S3, S5는 거의 수평엽리의 특징을 보이고, S1a, S2, S4는 거의 수직 엽리 형태로 나타난다. 석류석과 아연-침정석 반상변정 내의 내부 엽리축의 변화는 최대 압축작용 방향이 남-북에서 동-서로 변화하였음을 지시한다.

석류석 반상변정은 내부에 S자 또는 Z자 형태의 내부 엽리가 발달해 있고, 이들의 형태 변화를 관찰하여 내부엽리 변곡축(FIA)를 측정하였다. 총 14개의 시료로부터 18개의 FIA를 측정하였고, 두개의 sets(동서와 남북 FIAs)으로 구분하였다. 석류석의 FIA 자료는 동서 방향의 FIA가 남북 방향 보다 먼저 형성되었음을 지시한다. 따라서, 석류석은 남북과 동서 방향의 압축작용으로 변형 작용동안 형성되었음을 알 수 있다.

### 4. 온도-압력 가상평형도(Pseudosection)과 변성작용

MnNCKFMASH와 KFMASH계하에서 시료 CAD420(267)의 규선석의 모드 조성비 변화 양상은 Figure 1에서 보여준다. 두 계에서 최대 규선석 모드 조성비는 용융이 일어나는 전후에 위치하며, 규선석은 용융이 일어나기 전까지는 온도와 압력이 증가하면서 성장하였음을 지시한다. 따라서 시료 CAD420(267)에서 관찰된 규선석 다형가상은 약 2.5 kbar, 600 C에서 홍주석-규선석 전이선 까지 전진 변성작용에 의해 형성된 것으로 생각된다(Fig. 2). 주상 내지는 능면상의 규선석은 연속적인 온도와 압력의 증가와 부분 용융에 의해 성장된 것으로 생각된다. 섬유상 규선석의 상대적인 형성 시기는 온도-압력 가상평형도를 이용하여 구분할 수는 없지만, 이들은 최고 변성 작용 후 후퇴 변성작용으로부터 형성된 것으로 사료된다(예, Roache, 2004)

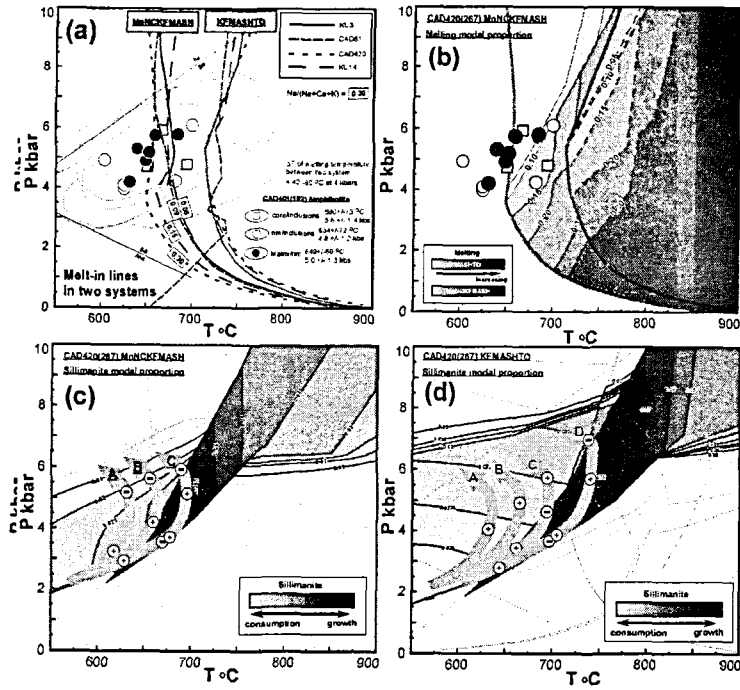


Fig. 1. (a) P-T diagram showing melting curves for 4 samples in MnNCKFMASH and KFMASHTO systems. Circles and squares with ellipses indicate P-T conditions with standard deviation calculated from garnet-hornblend-plagioclase geothermobarometer using program THERMOCALC (v. 3.2) Powell et al., 1998). Na/(Na+Ca+K) ratio in small boxes is from the bulk rock compositions of each sample. (b) Modal proportion of melt in sample CAD420A in MnNCKFMASH system. (c) and (d) Sillimanite modal proportion of sample CAD420A in MnNCKFMASH and KFMASHTO systems.

### 5. 온도-압력-변형 역사

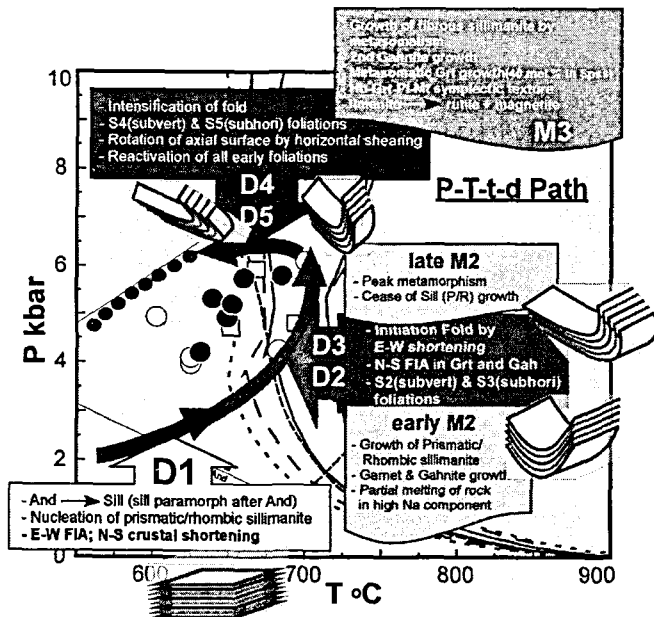


Fig. 2 Generalized P-T-d Path for the host rocks of the Cannington Deposit. Block diagrams on each deformation stage indicate development of fold around the deposit involving E-W and N-S crustal shortening with sub-horizontal shearing.

석류석 반상변정 내의 내부 엽리축의 변화는 최대 압축작용 방향이 남-북에서 동-서로 변화하였음을 지시한다. 따라서 남-북 압축운동은 D1과 D1a동안에 일어났고, 동-서 압축 방향은 D2에서 D5 동안에 작용한 것으로 판단된다. 지역적인 부분용융은 암석의 화학성분에 따라 변화지만, D1 이후에 일어났을 것으로 보이고, 향사형태의 D2 습곡은 D4 동안 동-

서 압축 작용에 영향을 받았다. 결론적으로 규선석-석류석의 산상과 엽리의 발달 과정을 근거로 석류석 반상변정과 주상과 능면상의 규선석은 부분 용융과 온도-압력이 증가하는 동안 형성하였으며(반시계 방향), 섬유상 규선석은 최고 온도-압력 조건 이후 변성 교대작용과 재활성작용에 의해 기존의 규선석과 공생하게 되어진 것으로 생각된다.

## 6. 참고문헌

- 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. Meta. Geol.*, 16, 577-588.
- Roache, T.J. (2004) Shear zone versus fold geometries at the Cannington Ag-Pb-Zn deposit: implications for the genesis of BHT deposit. *J. Struct. Geol.*, v. 26, pp. 1215-1230.
- White, R.W., Powell, R., and Clarke, G.L. (2002) The interpretation of reaction textures in Fe-rich metapelitic granulite of the Musgrave Block, central Australia: constraints from mineral equilibria calculations in the system  $K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-TiO_2-Fe_2O_3$ . *Jour. Meta. Geol.*, 20, 41-55.