

전북 장수군 대유 페그마타이트광산의 전기석에 포획된 유체포유물

Fluid Inclusions Trapped in Tourmaline from the Daeyou Pegmatite Deposit, Jangsu-Gun, Jeollabukdo

이 주 연 (Ju-Youn Lee) · 양 경 희 (Kyounghee Yang)* · 엄 영 보 (Youngbo Eom) ·
남 북 현 (Bokhyun Nam) · 황 병 훈 (Byoung-Hoon Hwang)

부산대학교 자연과학대학 지질환경과학전공

(Geological Environmental Science Major, College of Natural Sciences, Pusan National University, Pusan, 609-735,
Korea)

요약: 전북 장수군 대유광산에 부존하는 페그마타이트내 전기석에는 네 종류의 유체포유물이 풍부하게 포획되어 있다. 유체포유물의 크기는 5~100 μm 이고, 상온에서 관찰되는 상(phase)의 거동에 따라 I, II, III, IV형으로 분류된다. I형은 액체가 풍부하고 기포의 크기가 50 vol% 이하인 것으로 공융온도(eutectic point)는 $-54\sim-29^{\circ}\text{C}$, NaCl상당 염농도(이하 염도)는 0~12 wt%, 균질화온도는 $181\sim230^{\circ}\text{C}$ 이다. II형은 기포의 크기가 80~90 vol% 이상을 차지하는 포유물로서 역시 낮은 공융온도($-54\sim-22^{\circ}\text{C}$)를 보이며, 염도는 3~8 wt%, 균질화온도는 $177\sim304^{\circ}\text{C}$ 범위이다. III형은 액체가 풍부하고 압염(halite)을 딸결정으로 포함하는 포유물로서 균질화온도는 $230\sim328^{\circ}\text{C}$, 염도는 31~40 wt%이다. III형은 규산염용융포유물과 연관되어 산출되며 가열실험 중에 90% 이상의 포유물이 기포가 사라진 후에 압염이 용해되는 거동을 보인다. IV형은 CO_2 를 함유하면서 칼리암염(sylvite)이나 암염을 딸결정으로 포함하는 포유물로서 전기석에 가장 풍부하게 포획되어 있다. CO_2 시스템의 밀도는 $0.80\sim0.75\text{ g/cm}^3$, 균질화 온도는 $190\sim317^{\circ}\text{C}$, 염도는 2~35 wt%이다. 멜트(melt)에서 가장 먼저 용리된 유체로부터 형성된 유체포유물은 규산염용융포유물과 공간적으로 연관되어 산출되는 III형이며, I형에 비해 전기석의 중앙부에서 산출되는 II형이 I형보다 먼저 포획된 것으로 추측된다. 용융체에서 용리된 유체의 염도는 용리압력과 밀접한 관련성이 있으며, 염도의 요동(fluctuation)은 페그마타이트가 형성되는 동안 압력의 요동이 있었음을 의미한다. IV형은 가장 후기에 포획된 유체포유물이며, 광산 주변에 분포하는 석회암체 등의 변성퇴적암류로부터 CO_2 성분과 다양한 성분의 유체가 공급되어 생성된 것으로 여겨진다. 정동이 발달하고 있지 않으며, 백운모를 함유하고 있는 대유페그마타이트는 변성작용에 의한 부분용융에 의해 형성된 멜트에서 결정화되었으며, 상당히 높은 압력의 환경에서 대유페그마타이트의 결정화작용 과정에서 용리한 유체의 성분이 전기석에 포획되어 있다. 이때 용리된 유체는 다양한 성분을 지니고 있었으며, 매우 낮은 공융온도와 다양한 딸결정은 포유물 내에 NaCl, KCl 이외에 적어도 CaCl_2 , MgCl_2 와 같은 성분을 포함하고 있음을 지시한다. 유체의 용리는 적어도 2.7~5.3 kbar 이상의 압력과 $230\sim328^{\circ}\text{C}$ 이상의 온도에서 시작되었다.

주요어: 전북 대유페그마타이트, 부분용융, 전기석, 용리, 유체포유물

*교신저자: yangkyhe@pusan.ac.kr

ABSTRACT: Four types of fluid inclusions are trapped within tourmaline from Daeyou pegmatite, Jangsu-Gun, Jeonllabukdo. They range 5~100 μm in size and are grouped into I, II, III, and IV based on the phase behavior at the room temperature: (1) Type I inclusions are liquid-rich and NaCl equivalent salinity ranged 0~12 wt%, and the homogenization temperatures (T_h) ranged 181~230°C with eutectic temperatures (T_e) -54~-22°C. (2) Type II inclusions are vapor-rich and salinity ranged 3~8 wt% NaCl, and T_h ranged 177~304°C also showing T_e -54~-29°C. (3) Type III inclusions contain a halite daughter mineral with 31~40 wt% NaCl, T_h 230~328°C. More than 90% of Type III homogenize by halite dissolution and are spatially associated with silicate melt inclusions. (4) Type IV inclusions are CO_2 -bearing containing various daughter minerals such as sylvite and/or halite. The density of CO_2 system within the Type IV is 0.80~0.75 g/cm^3 , T_h 190~317°C, and salinity 2~35 wt% NaCl. Type III fluid inclusions, considered as the earliest fluid, formed from the fluid exsolved from the crystallizing pegmatite. It is suggested that Type II fluid in the central part of tourmaline were exsolved earlier than Type I fluids in the margin indicating salinity fluctuation during the growth of tourmaline. It implies the fluctuation of the pressure since the salinity of fluid exsolved from the crystallizing melt is governed by the pressure. The last fluid was Type IV, which may be derived from the nearby limestone and metasedimentary rocks. It is suggested that Daeyou pegmatite containing muscovite without miarolitic cavities was formed by the partial melting resulted from the regional metamorphism. Subsequently, the exsolving fluids from the crystallizing melt were trapped in tourmaline at high pressure condition. The exsolved fluids contain various components such as CaCl_2 and MgCl_2 as well as NaCl and KCl. The exsolution began at least at 2.7~5.3 kbar and 230~328°C with the pressure fluctuation.

Key words: Jeonllabukdo Daeyou pegmatite, partial melting, tourmaline, exsolution, fluid inclusion

서 론

전기석은 거의 모든 암석 종류에서 산출되는, 복잡한 화학식을 갖는 붕산규산염 광물이다. 화성암(Wolf and London, 1997; Trumbell and Chaussidon, 1999)에서 산출되거나 퇴적암의 속성작용 후기 단계에서 형성되고(Henry and Durtrow, 1992), 페그마타이트(Jolliff *et al.*, 1986; Slack *et al.*, 1993; 김수영과 문희수, 1994), 변성암(Henry and Guidotti, 1985)에서 산출되기도 하며, 열수광상(London and Manning, 1995; Williamson *et al.*, 2000)에서도 나타나는 다양한 성분을 가진 광물이다. 전기석의 다양한 화학성분은 마그마의 지화학적 특성, 열수의 기원과 성분, 열수의 물리화학적 환경 [압력-온도-산소분압($f\text{O}_2$)]과 체계적인 관련성을 가지고 변화하기 때문에 암석의 성인과 열수광상의 기원과 진화에 대한 정보를 제공하고, 광물자원의 탐사 및 채광에 대한 중요한 지시자로 사용되고 있다(Taylor and Slack, 1984; Slack *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1996; Jiang *et al.*, 1998). 더욱이 전기석 결정은 대부분의 지질학적 환경에서 물리·화학적으로 안정하기 때문에 전기석이 산출된 암석에 대한 암석학적 정보, 즉 물

리·지화학적 특성을 제공해 줄 수 있는 중요한 매개체가 될 수 있다(Henry and Guidotti, 1985).

유체포유물이란 마그마나 열수가 결정내부에 포획되어 있는 것을 말한다. 광물 내에 포획된 유체포유물은 마그마 혹은 암석이 지질학적 진화과정(압력-온도-성분의 진화)을 겪는 동안 어느 특정한 시점에서 암석과 상호작용을 했던 실질적인 유체(휘발성 성분)로서 현재 획득되어 질 수 있는 유일한 시료이다. 유체포유물의 가열과 냉각실험을 통해 얻어지는 균질화 온도와 성분조성 자료를 통해 유체의 밀도 혹은 체적(molar volume)을 알 수 있으며, 온도-압력 다이어그램에서 이 유체가 포획된 온도-압력조건을 나타내는 독특한 아이스코어(isochore)를 결정하는데 사용되어진다(Hollister, 1981). 본 연구는 전북 장수군에 분포하고 있는 변성암내에 관입암상으로 배태되어 있는 대유 페그마타이트를 대상으로 하고 있다. 대유 페그마타이트에서 산출되는 전기석에 대하여 현미경 관찰과 전기석에 포획된 유체포유물에 대한 물리화학적 특성 연구를 통해 전기석의 기원과 광화유체의 특성과 진화를 규명하려고 한다.

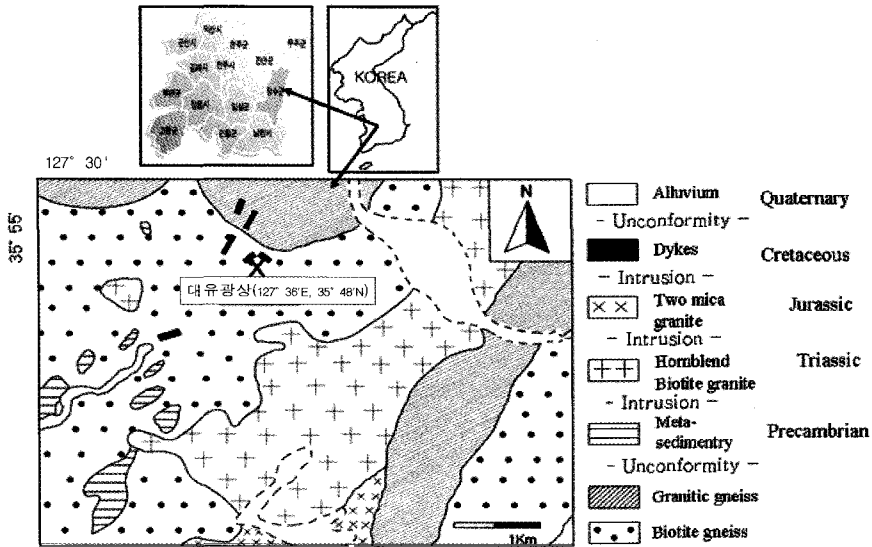


Fig. 1. Location and geological map of the study area showing the Daeyou pegmatite mine (after Hong and Yun, 1993).

일반지질 및 광상개요

대유페그마타이트 광산이 위치하고 있는 전북 장수군 계북면 임평리(127° 36'E, 35° 48'N) 지역은 1:50,000축척의 장계도폭(홍승호와 윤욱, 1993) 북서부에 해당되는 지역으로 이 일대의 지질은 소백산편마암복합체에 속하는 흑운모 편마암, 화강암질 편마암, 변성퇴적암류, 중생대 화강암류, 그리고 페그마타이트와 염기성 암맥으로 이루어져 있다(그림 1). 페그마타이트가 관입하고 있는 흑운모 편마암과 이 일대에 넓게 분포하고 있는 화강암질 편마암과 우백질 화강편마암은 선캄브리아기 소백산 변성암복합체의 남서 연장부로서 이 일대의 최고기의 기반암체이다(홍승호와 윤욱, 1993).

대유 페그마타이트 광산은 석영과 장석을 주 채광대상으로 하였으며, 지금은 폐광된 상태이다. 대유 페그마타이트 광산은 8개의 페그마타이트 암맥으로 구성되고, 폭은 20~50 m, 최대 700 m 이상의 연장을 이루고 있다(김대업, 1989; 대한광업진흥공사 등, 1989). 암맥을 구성하고 있는 전기석과 백운모, 그리고 열수변질 광물인 견운모에 대한 화학성분 조성, K-Ar 연대측정에 대한 연구가 수행되었으며(신홍자, 1999), 그 결과 페그마타이트의 형성연대는 원

생대 후기(1010 ± 15~1074 ± 16 Ma)이며, 전기석 내의 세맥이나 파쇄대를 따라 산출되는 변질 광물인 견운모의 연령은 대략 161 Ma로 측정되어 전기석 관련 열수 변질시기는 쥐라기 중기로서 페그마타이트의 형성시기와 큰 차이가 있음을 나타내고 있다.

대유 페그마타이트광산을 배대하고 있는 흑운모 편마암에는 K-장석과 석영이 반상변정으로 산출되며, 중립 내지 세립질의 석영, 사장석, K-장석, 흑운모, 백운모로 이루어져 있다(그림 2). 구성광물들의 입자크기는 조립에서 세립까지 다양하며 운모류와 신장된 석영입자에 의해 미약한 방향성을 보이는 grano-lepidoblastic 조직을 나타낸다. 석영 반상변정은 신장되어 있거나 subgrain으로 나누어져 flattening되어 있으며, 파동소광을 나타낸다(그림 2a, b). 세립의 석영은 대부분 다각형의 annealing조직을 나타낸다. K-장석 반상변정은 퍼사이트(perthite)가 발달한 미사장석과 정장석에 속하는 것이 대부분이며 입자경계는 견운모 혹은 석영으로 치환되어 있거나 변질되어 있다(그림 2c, d). 장석의 결정 경계면을 따라 관찰되는 석영은 아주 세립으로 나타나고, 세맥과 입자 경계부분은 불투명광물(황철석?)으로 산화되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 장석입자 내부에 형성된 세맥을 따라 세

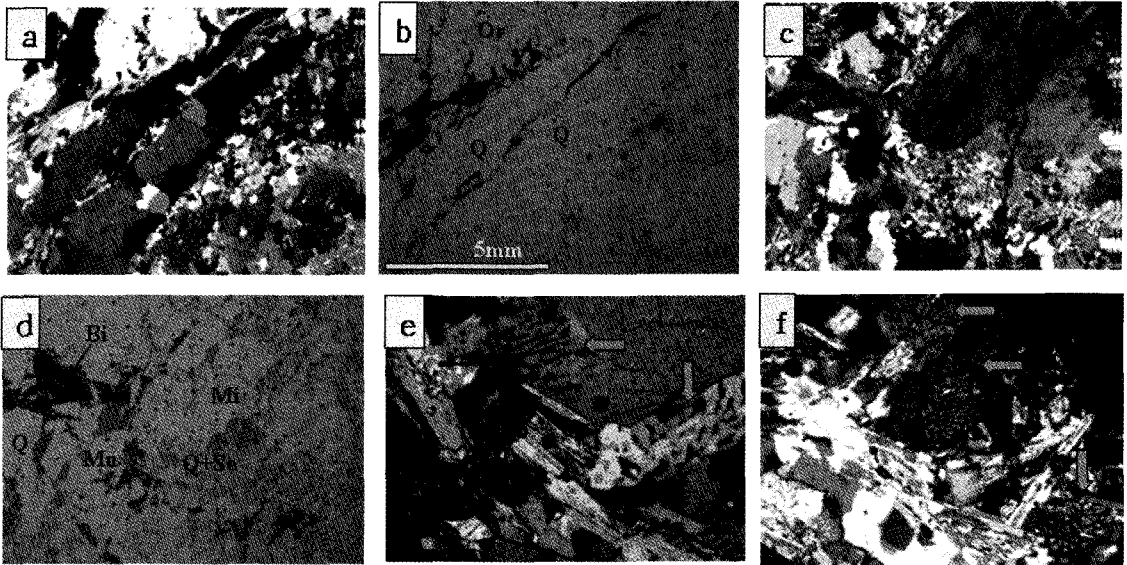


Fig. 2. Photographs showing various textures of the biotite gneiss. The scale bar applies for all pictures. **a and b:** Grano-lepidoblastic texture showing various grain sizes and stretched porphyroblastic quartz crystal with elongate subgrains. **c and d:** K-feldspar porphyroblastic grain showing substitution by sericite and fine-grained quartz. **e and f:** symplectite texture (arrows) of quartz and feldspar within K-feldspar. (a, c, e, f) = crossed nicols, (b, d) = open nicols. Q = quartz, Mi = microcline, Mu = muscovite, Bi = biotite, Or = orthoclase, Se = sericite.

립의 견운모와 석영입자가 치환하고 있으며, 대체적으로 세립의 호운펠스 조직도 관찰되어 주변의 화강암관입에 의한 견운모화작용과 규화작용을 받은 것으로 보여진다. 정장석 입자주변에는 symplectic melting에 의해 형성된 것으로 여겨지는 미문상조직이 형성되어 있는 것이 일반적이다(그림 2e, f). 운모류는 미약하게 엽리의 방향성을 보이며 정렬되어 있거나 입자들의 경계부를 충전(interstitial)하면서 산출되고 있다.

대유 광산의 페그마타이트에는 정동(mirolitic cavity)이 발달되어 있지 않으며, 주 구성광물은 거정의 석영, 장석, 백운모, 전기석이고, 그 이외의 견운모, 흑운모, 불투명광물(황철석?), 방해석, 녹니석 등이 산출된다. 이외에도 석류석, 레피돌라이트, 능철석, 인회석, 형석, 저콘 등이 보고되어 있다(신홍자, 1999). 석영과 장석, 백운모, 전기석은 각자의 결정형을 가지고 단독으로 산출되기도 하지만 대부분이 서로 교호(intergrowth)되어 있는 모습을 보인다. 육안으로는 하나의 단결정으로 보이는 거정의 석영은 유백색 내지 백색의 색깔을 띠고 있으며,

현미경하에서는 중립의 타형 석영입자들이 서로 교호하면서 파동소광과 다각형(triple junction) 접촉을 보이고 있지만 강력한 변성작용(deformation)의 모습은 아니다(그림 3a). 세립의 석영은 큰 결정들 사이에서 세립의 입자로 산출되거나, 거정질의 장식이나 전기석의 세맥을 따라 치환하고 있다(그림 3b, c, d). 장식은 백색에 가까운 옅은 분홍빛을 띠고 있으며 단독으로 산출되기 보다는 석영과 함께 나타나며, 주로 미사장석이나 정장석이 대부분이며 사장석은 드물게 발견된다. 운모는 주로 조립질의 백운모로 구성되며 흑운모는 백운모와 공생하며 견운모로 변질되거나 장석, 석영, 전기석 등과 교호하며 나타난다.

대유 페그마타이트 광산에서 산출되는 전기석은 다양한 크기와 모양으로 산출된다. 육안으로 볼 때 흑색 또는 흑회색의 단주 또는 장주상 결정으로 나타나며, 대부분이 석영, 장석 및 백운모와 함께 공존되어 산출된다. 전기석은 산출되는 유형에 따라 순수하게 단결정으로 산출되는 것, 석영, 장석과 연속적으로 교호하면서 산

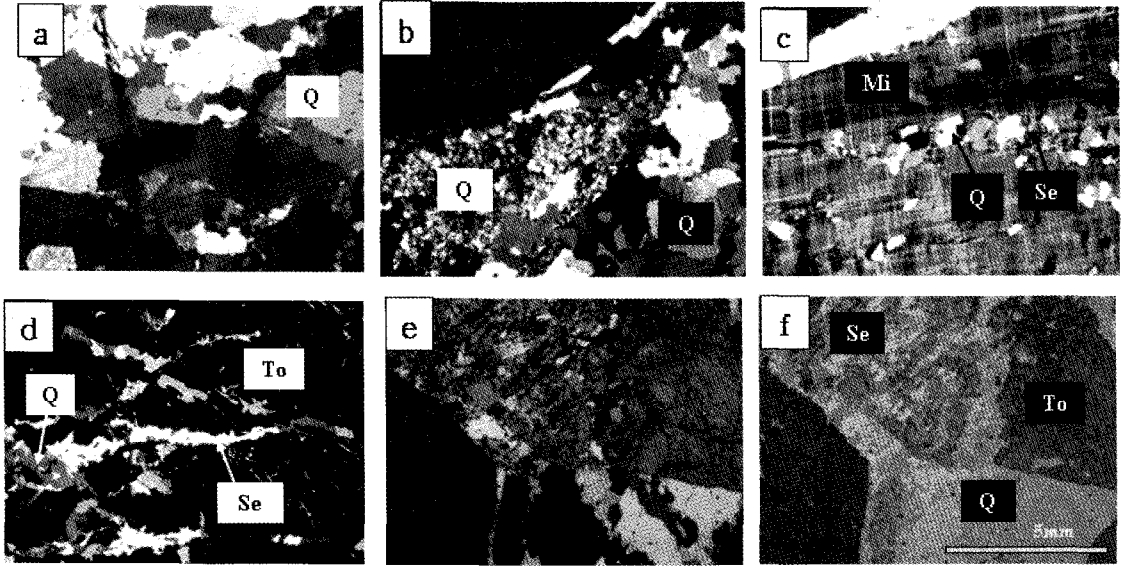


Fig. 3. Photographs showing various textures of the minerals from the Daeyou pegmatite. The scale bar applies for all pictures. **a.** Coarse-grained quartz with kink banding and undulatory extinction. **b.** Quartz grains showing two different grain sizes. **c.** Microvein filled with quartz and sericite within microcline. **d.** Microvein filled with quartz and sericite within tourmaline. **e and f.** Tourmaline substituted by fine-grained quartz and sericite following the host crystal form. **e =** crossed-nicols, **f =** open nicols. **Q =** quartz, **Se =** sericite, **To =** tourmaline, **Mi =** microcline.

출되는 것, 그리고 전기석의 파쇄 방향을 따라 견운모 혹은 석영의 세맥이 발달하거나 부분적으로 전기석의 흔적만 남아있는 전기석의 4가지 유형으로 나누어지지만 산출유형에 따라 화학성분 변화는 거의 없으며, Fe와 Mn성분이 풍부한 흑전기석(schorl)에 가까운 조성을 보인다(신홍자, 1999).

전기석에는 누대구조가 발달되어 있지 않으며, 개방니콜하에서 전기석은 주로 흑색, 황색, 녹색, 붉은색 등을 띠는 다색성이 잘 발달되어 있다. 누대구조가 미약하게 관찰되는 경우는 세립의 석영이나 견운모가 전기석의 세맥을 채우면서 산출되어질 때이다. 전기석과 중립질의 석영과의 사이에는 거의 항상 세립질의 석영입자들이 산출되며(그림 3b), 석영과 견운모가 장식내의 파쇄대를 따라 치환되고 있는 것도 흔하게 나타난다(그림 3c). 전기석의 c축에 수직으로 잘린 면은 청색의 다색성을 나타내고 있으며, 직교니콜에서는 완전소광을 이루고 있다(그림 3d). 전기석의 결정면을 따라 견운모, 석영, 장식들이 치환되고 있는 것이 종종 관찰된다(그

림 3e, 3f).

실험방법

대유페그마타이트 광산의 전기석을 형성시킨 유체의 물리화학적 진화환경을 추적하기 위하여 페그마타이트를 구성하고 있는 전기석 중에서 단결정으로 산출되는 단주 상의 전기석에 포획된 유체포유물이 조사되었다. 유체포유물의 현미경관찰과 기체, 가열/냉각실험을 위해 두께가 대략 0.5~1 mm인 양면 연마편이 제작되었다. 유체포유물의 분포를 시·공간적 변화에 따라 관찰하는데 편리하도록 C축에 수직과 수평으로 잘라 시편을 제작하였다. 또한 전기석의 형성 기원에 대한 정보를 얻기 위해 전기석과 공존하고 있는 석영과 전기석내의 규산염용융포유물(silicate melt inclusion) 존재여부를 조사하였다. 본 연구에서는 규산염용융포유물에 대한 가열/냉각은 수행되지 않았으며, 현미경관찰에 의한 기체만이 이루어졌다.

전기석에 포획된 유체포유물은 전기석이 형

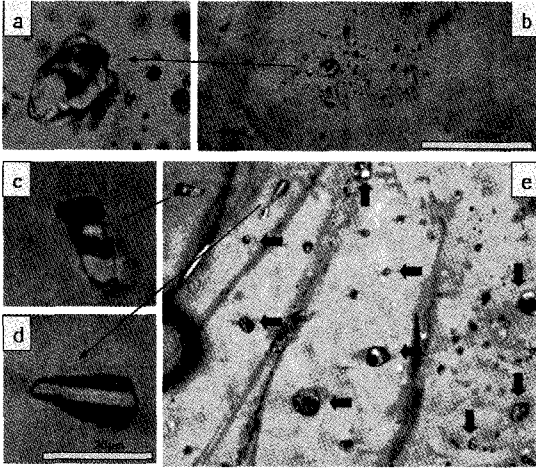


Fig. 4. Silicate melt inclusions trapped in quartz and tourmaline from the Daeyou pegmatite. (a, b) A decrepitation halos of aqueous inclusions around the silicate melt inclusions trapped in quartz. (c, d, e) Silicate melt inclusions associated with aqueous Type III inclusions in tourmaline.

성될 때 포획된 초생포유물(primary inclusion)과 전기석이 형성된 이후에 포획된 이차포유물

(secondary inclusion)로 나누어진다. 본 연구에서는 초생포유물과 초생포유물의 상비율(phase ratio)과 동일하게 나타나는 유체포유물만을 주 연구 대상으로 하였다. 현미경 관찰에 의해 초생포유물이라고 여겨지는 것은 전기석의 모결정 형태를 나타내면서 고립되어 독립적으로 분포하는 유체포유물, 혹은 삼각형 내지 육각형의 규칙적인 형태로 삼차원적인 공간적 형태로 분포한다.

유체포유물의 균질화온도와 성분 파악을 위한 냉각/가열 실험은 부산대학교의 Linkam Th 600 heating/cooling stage를 사용하였으며, 표준 합성 유체포유물(synthetic fluid inclusions), 순수 CO₂ (-56.6°C)와 H₂O (0°C와/및 374.1°C)를 이용하여 온도보정을 하였다(Bodnar and Sterner, 1987). 가스(gas phase)를 포함하고 있지 않는 유체포유물에서 측정된 온도는 얼음이 녹는 온도(Te), 얼음이 마지막으로 사라지는 온도(Tm ice), 암염이 녹는 온도(Tm halite), 모든 상의 균질화온도(Th total)이며, CO₂를 포함하고 있는 유체포유물인 경우에는 CO₂ ice가 녹는 온도(Tm CO₂), CO₂ 수화물이 녹는 온도(Tm

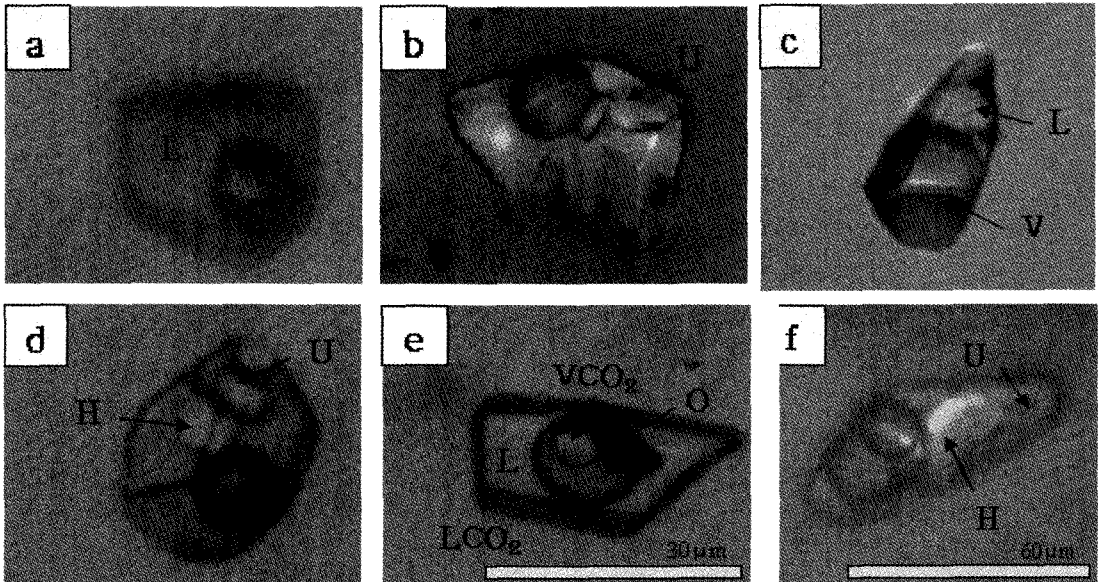


Fig. 5. Fluid inclusions trapped within the tourmaline from the Daeyou pegmatite. The scale bar applies for each fluid inclusion and all photographs were taken at room temperature. (a, b) Type I liquid-rich inclusion, (c) Type II vapor-rich inclusion, (d) Type III halite-bearing inclusion, (e, f) Type IV CO₂-bearing inclusion. L = liquid, V = vapor, H = halite. O = opaque mineral, U = unidentified daughter crystals.

Table 1. Summary of microthermometry of fluid inclusions trapped in tourmaline from the Daeyou pegmatite

Inclusion Type	Te (°C)	Tm ice (°C)	Tm clathr.. (°C)	Th CO ₂ (°C)	Tm Vapor (°C)	Th Halite (°C)	Th total (°C)	Salinity (wt.% NaCl equivalent)
I	-54~-29	-8~0			181~230		181~230	0~12
II	-54~-22	-5~-2			177~304		177~304	3~8
III					200~271	181~328	230~328	31~40
IVa			-10~9	22~28	190~317		190~317	2~24
IVb			-12~7	20~26	200~309	100~271	200~309	28~35

Te: T of eutectic, **Tm ice:** final ice melting T, **Tm clathrate:** melting T of clathrate, **Th CO₂:** T of CO₂ homogenization, **Tm Vapor:** T of vapor disappearance, **Th halite:** T of halite dissolution, **Th total:** T of total homogenization.

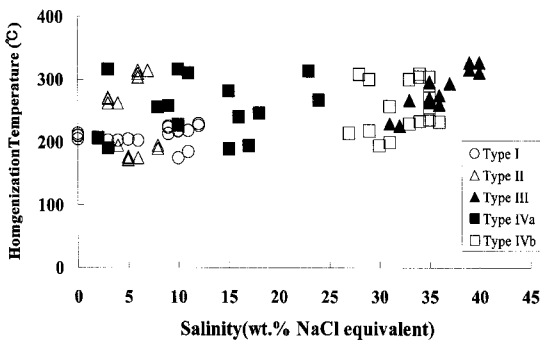


Fig. 6. Relationship between salinity (in wt.% NaCl equivalent) and homogenization temperatures for type I, II, III, and IV fluid inclusions.

clathrate)와 CO₂ 액체와 가스가 균질화되는 온도(Th CO₂), 모든 상의 균질화온도(Th total)가 측정되었다(표 1, 그림 6, 7). 정확한 온도측정을 위해 반복적인 측정을 시도하였지만 전기석 결정은 투명도가 떨어지고 유체포유물의 크기도 작아 약 ±2°C 정도의 오차가 있는 것으로 여겨진다. 가스가 없는 유체포유물의 염도는 Bodnar *et al.* (1989)의 프로그램을 이용하여 구하였고, CO₂를 함유하는 유체포유물의 염도는 Darling (1991)의 식을 이용하여 계산되었다. 현미경 관찰시 하나의 초생포유물 집단이라고 여겨진 포유물 중에 균질화온도가 일관성 있게 나타나지 않는 포유물의 경우 가열/냉각 데이터는 제외하였다.

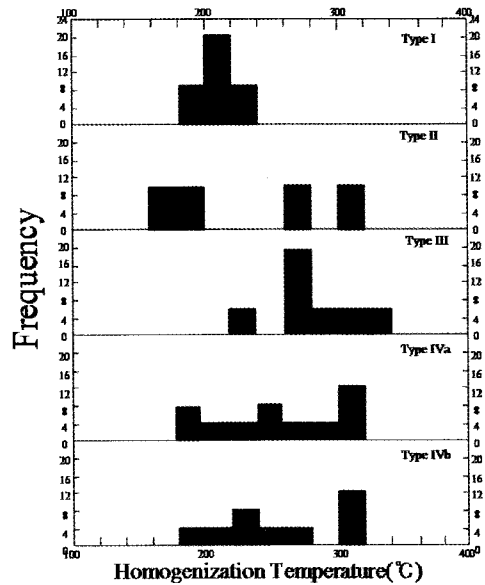


Fig. 7. Homogenization temperatures for type I, II, III, and IV fluid inclusions.

결 과

규산염용융포유물(Silicate Melt Inclusion)

대유페그마타이트를 구성하고 있는 석영과 전기석 내에는 20~100 μm 크기의 규산염용융포유물이 포획되어 있다. 상온에서 관찰되는 규산염용융포유물은 결정화되어 있으며, 복굴절을 보이는 침상 혹은 판상의 결정, 복굴절을 나타내지 않는 다소 직사각형의 결정, 그리고 기포로 이루어져 있다(그림 4a, c, d). 기포는 원형

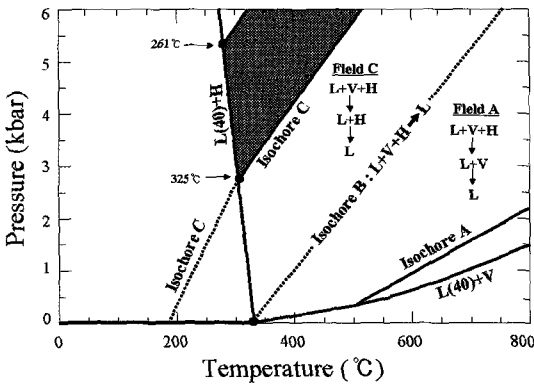


Fig. 8. Partial schematic diagram showing the relationship between the P-T trapping conditions and the mode of homogenization of H₂O-NaCl fluid inclusions with 31 and 40 wt% (after Bodnar and Vityk, 1994). The inclusions trapped in the field C of the left side of the dashed line (=isochore B) homogenize by following the path “L + V + H → L + H → L”. The inclusions trapped in the field A of the right side of the dashed line (=isochore B) homogenize by following the path “L + V + H → L + V → L”. The inclusions trapped along the dashed line (=isochore B) homogenize by simultaneous disappearance of halite and vapor following the path “L + V + H → L”. Any point of the shaded area can be possible trapping P-T conditions of Type III inclusions of this study. L = liquid, V = vapor, H = halite.

이 아닌 다소 찌그러진 변형된 형태이거나 광물들 사이에 필름 형태로 산출되고 있다. 또한 기포는 광물들에 의해 분리되어 있거나 섞여 있어서 현미경 관찰시 규산염용융포유물내에 결정화된 광물의 수를 정확하게 확인하는 것은 어렵다. 석영 내에 포획된 규산염용융포유물은 약간 등근형으로 고립되어 홀로 포획되어 있거나 두~세개의 용융포유물들이 삼차원적인 공간 배열을 보이면서 포획되어 분포한다. 석영 내에 포획된 대부분의 규산염용융포유물은 용융포유물을 중심으로 매우 크기가 작은 수용성 유체포유물이 둥글게 후광을 이루면서 산출되는 “decrepitation halo” 조직을 나타내고 있다 (그림 4b).

유체 포유물(Aqueous Fluid Inclusion)

대유 페그마타이트를 구성하고 있는 전기석에는 유체포유물이 풍부하게 포획되어 있다. 상온의 현미경하에서 관찰되는 상(phase)의 거동에 의해 4종류의 유체포유물(I, II, III, IV)로 분류된다(그림 5). 초생포유물이라고 여겨지는 것은 모결정인 전기석의 결정형을 따라 주상 혹은 삼각형의 형태가 대부분이다.

I형: I형은 액상이 풍부하고 기포의 크기가 50 vol% 이하인 포유물(액체 + 기포 ± 암염이 아닌 복굴절을 가진 결정)로서 크기는 5~100 μm으로 다양하며 가열실험 시 액상(liquid phase)으로 균질화 된다(그림 5a, b). I형은 독립적으로 분포하거나 상비율이 비슷한 것끼리 2~3개씩 함께 분포하기도 하며, 아주 작은 포유물(<5 μm)은 균집으로 분포한다. 판상 혹은 주상의 강한 복굴절(birefringent)을 나타내는 결정들이 포획되어 있는 경우가 흔하지만 고체 결정들의 상비율이 유사하게 나타나지 않아 딸결정이라기 보다는 그 당시 유체와 함께 평형을 이루고 있던 결정으로 고체포유물(solid inclusion)로 여겨진다(그림 5b). 냉각 실험시 유체포유물 시스템이 최초로 완전히 어는 온도 혹은 시스템이 최초로 용융이 시작되는 온도인 공융(eutectic) 온도(T_e)는 -54~-29°C이다. 얼음이 마지막으로 사라지는 온도(T_{m ice})는 -8~0°C, 이에 따른 염도는 0~12 wt%을 나타내고, 균질화 온도(Th total)는 181~230°C이다(표 1, 그림 6, 7). 고체 결정들은 기포가 사라지고 균질화된 이후에도 여전히 남아 있으며, I형 유체포유물은 400°C 전후에서 파열(decrepitation)되는 경향을 보인다.

II형: II형은 기체상(gas phase)이 풍부하고 기포의 크기가 80~90 vol% 이상을 차지하는 포유물(액체 + 기포 ± 암염이 아닌 복굴절을 가진 결정)로서 가열실험 시 기상(vapor phase)으로 균질화 된다(그림 5c). 크기는 5~70 μm으로 다양하며, 주로 고립되어 단독으로 산출되지만 모양, 크기, 상비율이 비슷한 2~3개의 유체포유물이 함께 3차원적으로 산출되기도 한다. II형에도 복굴절을 나타내는 작은 결정들이 포함되기도 한다. II형의 유체포유물은 I형에 비해 전기석 결정의 중앙부에서 산출된다. 공융온도(T_{e ice})는 대체로 -54~-22°C이며, 얼음이 마지막으로

로 사라지는 온도(T_m ice)는 $-5 \sim -2^\circ\text{C}$, 염도는 $3 \sim 8 \text{ wt}\%$, 균질화온도는 $177 \sim 304^\circ\text{C}$ 범위를 나타냈다(표 1, 그림 6, 7).

III형: III형은 액체가 풍부하고 암염을 딸결정으로 포함하는 포유물(액체 + 기포 + 암염 ± 암염이 아닌 딸결정)로서 $5 \sim 70 \mu\text{m}$ 정도의 다양한 크기로 나타난다(그림 5d). III형은 단독으로 분포하거나 규산염용융포유물과 함께 분포하고 있다(그림 4). 암염이 아닌 딸결정은 직사각형, 정사각형, 사다리꼴 등 다양한 형태로 복굴절 현상을 나타낸다. 드물게 불투명 광물이 관찰되기도 하며, 4~5개의 딸결정이 하나의 포유물에서 관찰되기도 한다. 가열 실험시 기포는 $200 \sim 271^\circ\text{C}$ 에서 사라지고, 암염은 $181 \sim 328^\circ\text{C}$ 에서 용해되어 없어지며 균질화온도는 $230 \sim 328^\circ\text{C}$, 염도는 $31 \sim 40 \text{ wt}\%$ 이다(표 1, 그림 6, 7). III형의 90% 정도가 기포가 사라진 후에 암염이 용해되는 거동을 보인다. 암염이 아닌 딸결정들은 가열 실험시 균질화 된 이후에도 남아 있으며 II형 유체포유물은 $350 \sim 500^\circ\text{C}$ 정도에서 파열되는 것이 대부분이다.

IV형: 전기석에 포획된 유체포유물의 특성 중에 가장 뚜렷하게 관찰되는 것은 다양한 IV형의 포유물이 풍부하게 포획되어 있는 것이다. $5 \mu\text{m}$ 이하의 작은 것에서부터 $80 \mu\text{m}$ 이상의 큰 포유물로 다양한 크기로 산출된다. IV형은 칼리암염(sylvite)의 유무에 의해 두 그룹으로 다시 분류된다: IVa형은 액체 + 액체 CO_2 + 기체 CO_2 ± 복굴절을 가진 딸결정 혹은 불투명 광물로 구성되어 있는 것(그림 5e), IVb형은 액체 + 액체 CO_2 + 기체 CO_2 + 칼리암염 ± 복굴절 딸결정으로 이루어진 포유물(그림 5f)로 나누어진다. IVa형에서는 복굴절 현상을 보이는 딸결정과 불투명 광물이 함께 산출될 경우도 있으며, 불투명 광물은 대부분 둥근 형태의 다각형으로 나타나고, 길쭉하고 불규칙한 모양인 것도 있으며, 유체포유물 내의 다른 상들을 가릴 만큼 크기가 큰 것도 관찰된다. IVb형에서 산출되는 딸결정 중에 칼리암염으로 추정되는 딸결정은 암염에 비해 굴절율이 높아 전기석의 굴절율과 유사하며 결정형태는 대체로 둥근 모서리를 가지고 있어 암염이라기 보다는 칼리암염으로 여겨진다.

IVa형과 IVb형 모두 $-56 \sim -57^\circ\text{C}$ 에서 CO_2 ice가 녹아 CO_2 이외의 다른 가스가 포함되지 않

은 것으로 여겨진다. 비록 딸결정의 포함유무에 의해 두가지 형태로 구분되었지만 균질화온도는 거의 유사한 범위를 나타내고 있다. 하지만 CO_2 를 함유하는 포유물은 완전히 균질화 되기 전에 파열되어져 김계 변하거나 가스가 빠져나가 버리는 거동을 보여 모든 결정과 기포가 완전히 사라지는 균질화온도는 측정할 수가 없었다. 또한 IVa와 IVb형에 있어서 CO_2 시스템 내에서의 액체 CO_2 와 기체 CO_2 가 균질화 되는 온도($T_h \text{CO}_2$)는 각각 $22 \sim 28^\circ\text{C}$, $20 \sim 26^\circ\text{C}$ 이며 이들의 밀도도 $0.8 \sim 0.75 \text{ g/cm}^3$ 의 범위로 서로 유사한 값을 나타내고 있다. 이러한 유체포유물인 경우 15°C 이상 되는 실험실의 현미경하에서는 I형 혹은 II형으로 잘못 인식되어질 수 있다. 실온에서 액체 CO_2 상과 기체 CO_2 상이 공존하고 있다는 것은 전기석내의 유체의 압력이 $50 \sim 60 \text{ bars}$ 를 이루고 있다는 것을 의미한다(Bodnar and Vityk, 1994). IVa형의 균질화 온도는 $190 \sim 317^\circ\text{C}$, CO_2 수화물이 녹는 온도(T_m clathrate)는 $-10 \sim 9^\circ\text{C}$ 로 측정되었고, 이로부터 염도는 $2 \sim 24 \text{ wt}\%$ 이다. IVb형의 균질화 온도는 $200 \sim 309^\circ\text{C}$, 염도는 $28 \sim 35 \text{ wt}\%$ 이다(표 1, 그림 6, 7).

토의 및 결론

영남육괴에 분포하는 소백산편마암복합체는 광범위한 광역변성작용과 화강암화작용을 수차례 경험하였으며 또한 부분용융도 일어나 변성 퇴적암의 초생구조들이 많이 파괴되어 있음이 보고되어있다(대한지질학회, 1999). 소백산편마암체가 분포하는 이 지역에는 3회의 광역변성작용이 인지되고 있으며, 영남육괴에 분포하는 화강편마암에 대한 Rb-Sr, Pb-Pb 전암 연대가 일반적으로 $2.1 \sim 1.8 \text{ Ga}$ 를 나타내고, U-Pb 저콘 연령은 $2.1 \sim 1.9 \text{ Ga}$ 으로 측정되어 고원생대에서 중원생대 시기에 격렬한 산성질 화성활동이 있었음을 지시하고 있다(Chough *et al.*, 2000). 그러나 변성시기에 대해서는 석류석-흑운모 편암에 대한 Pb-Pb 연대가 $1840 \pm 26 \text{ Ma}$ 로 알려진 것 외에는 거의 없으며, 영남육괴에서의 변성작용은 산성질 화성활동 직후에 일어났음을 나타내고 있다(Chough *et al.*, 2000).

한편, 대유 페그마타이트 광산을 구성하고 있는 거정의 백운모에 대한 K-Ar연대는 약 1,010

~1,074 Ma이고, 전기석을 치환하고 있는 세립의 견운모에 대한 K-Ar연대는 약 161 Ma로 보고되어 있다(신홍자, 1999). 이 중 견운모의 K-Ar연대는 쥐라기 중기로서 광산 주변에 분포하고 있는 쥐라기 화강암의 관입과 관련성을 지니고 있으나 페그마타이트의 형성은 이 지역 일대에 분포하는 중생대 화강암류와는 관련성이 없는 것을 의미한다. 그러나 페그마타이트내의 백운모에 대한 K/Ar 연대(1,010~1,074 Ma)가 페그마타이트 형성연대로 생각되지는 않는다. 첫째, 백운모는 다른 광물에 비해 폐쇄온도가 낮기 때문에 페그마타이트의 형성연대라기 보다는 백운모의 결정화작용이 끝난 시기를 의미한다. 특히 광산으로부터 1 km 이내에 관입된 쥐라기 심성암체는 백운모에 대한 상당한 아르곤(Ar) 손실을 초래하였을 것이다. 실제로 암주(stock) 정도의 크기를 가진 심성암체는 거의 2 km까지 막대한 영향을 미치며, 관입암체와의 접촉부에서 적어도 5 km 이상 벗어나 있어야 관입암체에 의한 Ar 손실을 어느 정도 피할 수 있다고 한다(Faure and Mensing, 2005). 그러므로 페그마타이트의 형성연대는 1,010~1,074 Ma 보다는 훨씬 오래 된 시기이며, 더욱이 영남육괴의 남서부 지역에는 이와 유사한 연대(1,010~1,074 Ma)를 보이는 화성암작용에 대한 기록도 찾을 수가 없다.

대유페그마타이트는 광물조성, 야외노두관찰, 현미경관찰, 유체포유물의 증거에 의해 상당히 높은 압력의 환경에서 생성된 것으로 보여진다. 대유페그마타이트 광상에는 백운모가 산출되며, 정동이 발달하고 있지 않고 있다. 이는 페그마타이트가 상당히 깊은 곳(7~11 km 이상의 깊이), 즉, 각섬암상의 압력환경에 해당하는 조건에서 형성되었음을 의미한다(Evans, 1993; Cerny, 2005). 또한 대유광산에 산출되는 전기석은 매우 좁은 범위의 균질한 성분조성을 나타내고 있으며(신홍자, 1999), 누대구조가 거의 발달되어 있지 않아 전기석이 열수에 의해 형성된 것이 아님을 의미하고 있다. 전기석의 누대구조는 전기석이 형성되는 동안 화학적 조성이 변화하였음을 의미하며 전기석의 누대조직에서 내핵은 전기석의 원래 화학적 성분을 그대로 가지고 있는 반면, 외핵은 열수의 침입이나 여러 가지 요인에 의해 변질 또는 치환되어 화학성분이 변하게 된다(Palmer and Slack, 1989). 그러

므로 누대구조가 거의 없는 대유광산의 전기석은 비교적 성분의 변화가 없는 평형상태에서 형성되었음을 의미한다. 반면 열수에 의해 형성된 일광광산의 전기석과는 뚜렷한 성분적, 조직적 차이를 보이고 있다(양경희와 장주연, 2002). 또한 전기석에 포획된 III형의 유체포유물의 균질화되어지는 거동, 즉, 기포가 먼저 사라지고 암염이 마지막으로 균질화되는 것은 이 유체가 상당히 높은 압력하에서 포획되었음을 의미한다(Bodnar and Vityk, 1994).

페그마타이트를 구성하고 있는 전기석과 석영에 포획되어 있는 규산염용융포유물은 완전히 결정화되어 있어 깊은 곳에서 형성되었음을 강하게 시사하고 있다. 또한 석영 내에 포획된 규산염용융포유물이 보이는 “decrepitation halo” 조직은 용융포유물 주변에 형성된 미세한 파쇄대에 수용성 유체포유물이 포획되어져 이루어진 것으로 변성암에서 흔히 관찰되는 조직이다(Yang and Bodnar, 1994). 지하 깊은 곳에서 포획된 용융포유물이 결정화가 진행되어지면서 포유물내에서 물에 포획되어지고 이와 더불어 지표면으로 용기하면서 야기된 압력의 감소에 의해 용융포유물내에 휘발성 성분의 체적변화의 증가를 가져오게 되었다(Burnham, 1997). 그 결과 용융포유물내에 형성된 압력을 방출하면서 용융포유물 주변에 미세파쇄대를 형성하게 되었고 점성도가 낮은 수용성 유체가 이러한 미파쇄대에 유체포유물로 포획되어 “decrepitation halo” 조직을 만들어낸 것으로 여겨진다. 위에서 열거한 여러 증거들은 대유페그마타이트가 고압 환경에서 형성된 용융체로부터 형성되었음을 지시하고 있다.

대유 페그마타이트의 구성 광물인 전기석에는 다양한 유체포유물이 포획되었으며, 유체포유물에 대한 암석기재(petrography)와 냉각/가열 실험 결과에 의해 다양한 유체가 진화 과정을 알 수 있다. 전기석에 포획된 유체포유물은 (1) 전기석이 형성되어지는 동안에 멜트(melt)와 평형을 이루었거나 장석, 석영, 전기석 등의 무수 광물이 결정화가 진행되는 동안 멜트에서 용리되어진 유체, 혹은 (2) 전기석이 완전히 형성되고 난 후 전기석에 포획된 유체를 나타내고 있다. 전기석에 포획되어진 유체의 가장 특징적인 것은 공융온도(eutectic point)가 매우 낮은 유체포유물(I, II형)과 암염이나 칼리암염을 포함하

고 있는 CO₂ 포유물(IV형)이 매우 풍부하게 산출된다는 것이다(표 1). 공용온도가 -54°C라는 것은 이 유체 안에 NaCl이나 KCl이 아닌 다른 염(salt) 성분, CaCl₂, MgCl₂ 성분 등이 들어 있음을 제시하며, 변성기원의 유체에 나타나는 전형적인 모습 중에 하나이다(Roedder, 1984).

페그마타이트가 형성되어질 때 최초로 포획된 유체는 규산염용융포유물과 공존하는 염농도 31~40 wt%의 III형포유물이다. 전기석에 포획된 III형포유물은 암염이 용해되면서 균질화되는 거동을 보이는데 이는 고압의 환경에서 포획된 유체포유물에서 나타나는 것으로 기포가 사라지면서 균질화되는 유체와는 서로 다른 온도·압력조건에서 포획되었음을 의미한다. 이 III형포유물은 적어도 2.7~5.3 kbar보다 더 고압의 조건에서 포획되었음을 시사하고 있다(그림 8). III형의 균질화온도는 230~328°C이지만 이 균질화 온도가 포획온도를 의미하기 위해서는 압력보정이 이루어져야 한다. 압력보정을 하기 위해서는 독립적인 압력 조건을 나타내는 데이터가 있어야 할 것이다. I형포유물과 II형포유물의 포획순서는 분명하지가 않지만 c축에 수직으로 잘린 시편에서 전기석의 중앙부에서 산출되는 경향을 보이는 II형이 I형보다 먼저 포획된 것으로 보여진다. 만약에 이 순서가 맞다면 전기석이 형성되는 동안 멜트에서 용리된 열수의 염도가 낮아졌다가 다시 높아졌다는 것을 의미하며 이는 페그마타이트가 형성되는 동안 압력의 요동(fluctuation)이 있었음을 의미한다. 즉, 마그마에서 용리되어지는 열수의 염도는 마그마의 성분과 용리압력 조건에 의해 가장 크게 좌우되어진다(Cline and Bodnar, 1994).

IV형포유물은 유체포유물의 모습이 전기석의 규칙적인 부정형(negative crystal shape)을 보이면서 단독으로 산출되는 것이 있지만 다음과 같은 이유로 이차포유물로 간주된다. IV형포유물은 전기석 결정의 모든 부분에서 산출되고 있으며, 균질화온도와 CO₂ 밀도(0.8~0.75 g/cm³)가 거의 일정하게 나타난다. 그리고 염도도 제한된 범위를 나타내지 않고 넓은 범위에 걸쳐 나타나고 있다. 이는 유체포유물의 넥킹다운(necking down)에 의한 것이거나 딸결정이 아닌 고체포유물의 특성에 의해 넓은 범위의 염도를 나타내고 있다. IV형은 광산 주변에 분포하는 화강암의 관입에 의해 형성된 열수계가 광산

주변에 분포하는 석회암체(신홍자, 1999) 등의 변성퇴적암류로부터 CO₂ 성분을 공급받고 다양한 성분의 고체포유물이 포획되어질 가능성을 제시한다. 하지만 이차포유물이라고 해도 암염이나 칼리암염을 딸결정으로 포함하고 있는 CO₂ 포유물이라면 이 유체가 상당히 높은 압력 환경에서 포획되었음을 의미한다(Roedder, 1984).

야외노두에서의 관계, 연대측정, 현미경하에서의 관찰되는 광물조직, 유체포유물의 산출조직, 냉각/가열 실험의 결과를 토대로 요약할 한다면, 대유페그마타이트 광산의 전기석에 포획된 유체포유물은 변성 작용시 형성된 부분용융에 의해 형성된 멜트가 페그마타이트를 형성하는 결정화작용 과정에서 용리된 유체의 성분을 나타내고 있다. 이때 용리된 유체는 다양한 성분을 지니고 있었으며, NaCl, KCl 이외에 적어도 CaCl₂, MgCl₂와 같은 성분을 포함하고 있다. 대부분의 유체포유물은 상당히 높은 압력하에서 포획되었음을 나타내고 있으며, 적어도 2.7~5.3 kbar 이상의 압력과 230~328°C 이상의 온도에서 유체의 용리는 시작되었으며, 전기석이 형성되는 동안 압력의 요동이 있었다.

감사의 글

본 논문의 부족한 많은 부분을 수정·심사하여 주신 허순도 박사님과 익명의 심사자님께 깊은 감사를 보냅니다. 본 연구는 2단계 BK21사업과 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

- 김대업, 이형재, 조한익, 임현철 (1989) 경남·북, 전남·북 지역 고품위 규석 광산 조사연구. 비금속 광산조사연구, KR-892B-1, 54-60.
- 김수영, 문희수 (1994) 상동지역 페그마타이트 및 관계 화성암의 전기석 분화 특징. 자원환경지질, 27권, 441-449.
- 대한광업진흥공사 (1989) 비금속광물특성조사보고서 (규석, 장석편), 547.
- 대한지질학회 (1999) 한국의 지질. 802.
- 신홍자 (1999) 대유 페그마타이트광산의 광물조성과 k-Ar연대. 자원환경지질, 32, 227-236.
- 양경희, 장주연 (2002) 경상남도 일광의 각력파이프형 구리(Cu)광산에서 산출되는 전기석의 지구화학. 한국암석학회지, 11, 3-4, 259-270.
- 진명식, 김성재 (1988) 순경 함추석 페그마타이트의

- K-Ar연령. 광산지질, 21, 171-174.
- 홍승호, 윤옥 (1993) 장계도폭 지질보고서. 한국자원 연구소, 4-9.
- Evans, A.M. (1993) *Ore Geology and Industrial Minerals An Introduction*(3rd Ed.). Blackwell science, 121-127.
- Bodnar, R.J. and Sterner, S.M. (1987) Synthetic fluid inclusions: in G.C. Ulmer and H.L. Barnes, eds., *Hydrothermal Experimental Techniques*, Wiley-Interscience, New York., 423-457.
- Bodnar, R.J., Sterner S.M. and Hall D.L. (1989) Salty: A Fortran program to calculate compositions of fluid inclusions in the system NaCl-KCl-H₂O. *Computers and Geosci.*, 15, 19-41.
- Bodnar, R.J. and Vityk, M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. In: De Vivo, B. and Frezzotti, M.L. (eds.), *Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Application*. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 117-130.
- Burnham, C.W. (1997) Magmas and hydrothermal fluids. In *geochemistry of hydrothermal ore deposits 2nd ed.* (H. L. Barnes, ed), John Wiley & Sons, 71-136.
- Cerny, P. and Ercit. T.S. (2005) The classification of granitic pegmatite revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43, 2005-2026.
- Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D.K. (2000) tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view, *Earth-Sci. Rev.*, 52, 175-235.
- Cline, J.S. and Bodnar, R.J. (1994) Direct evolution of brine from a crystallizing silicic melt at the Questa, New Mexico, Molybdenum deposit. *Economic Geology*, 89, 1780-1802.
- Darling, R.S. (1991) An extended equation to calculate NaCl contents from final clathrate melting temperatures in H₂O-CO₂-NaCl fluid inclusions: implications for P-T isochore location. *Geochim Cosmochim Acta.*, 55, 3869-3871.
- Faure, G. and Mensing, T.M. (2005) *Isotopes: Principles and applications* (3rd Ed). John Wiley & Sons, INC., 113-143.
- Griffin, W.L., Slack, J.F., Ramsden, A.R., Win, T.T. and Ryan, C.G. (1996) Trace element in tourmaline from massive sulfide deposits and tourmalinites: Geochemical controls and exploration applications. *Econ Geol*, 91, 657-675.
- Henry, D.J. and Dutrow, B.L. (1992) Tourmaline in low grade clastic metasedimentary rock, An example of the petrogenetic potential of tourmaline. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 112, 203-218.
- Henry, D.J. and Guidotti, C.V. (1985) Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral, An example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. *Am Mineral*, 70, 1-15.
- Hollister, L.S. (1981) Information intrinsically available from fluid inclusions. In Hollister, L.S. and Crawford, M.L., eds., *Short Course in Fluid Inclusions*, Mineralogical Association of Canada, Calgary, 1-12.
- Jiang, S.Y., Slack, J.F. and Shaw, D.R. (1998) Paragenesis and Chemistry of Multistage Tourmaline Formation in the Sullivan Pb - Zn - Ag Deposit, British Columbia. *Econ Geol*, 93, 47-67.
- Jolliff, B.L., Papike, J.J. and Shearer, C.K. (1986) Tourmaline as recorder of pegmatite evolution: Bob Ingersoll pegmatite, Black Hills, South Dakota. *Am Mineral*, 71, 472-500.
- Lee, S.G., Shimizu, H., Masuda, A. and Song, Y.S. (1992) Crustal evolution of the Precambrian basement in the Korean Peninsula. *Joun. Petrol. Soc. Korea*, 1, 2, 124-131.
- London, D. and Manning, D.A. (1995) Chemical variation and significance of tourmaline from southwest England. *Econ Geol*, 90, 495-519.
- Parry, W.T. and Bruhn, R.L. (1987) Fluid inclusion evidence for minimum 11km vertical offset on the Wasatch fault, Utah. *Geology*, 15, 67-70.
- Palmer, M.R. and Slack, J.F. (1989) Boron isotopic composition of tourmaline from massive sulfide deposit and tourmalinites: *Contr. Mineralogy Petrology*, 103, 434-451.
- Roedder, E. (1984) *Fluid Inclusions. Reviews on Mineralogys*, 12, Mineralogical Society of America, Washington, D.C., 664.
- Slack, J.F., Palmer, M.R., Stevens, B.P.J. and Barnes, R.G. (1993) Origin and significance of tourmaline - rich rocks in the Broken Hill district, Australia. *Econ Geol*, 88, 505-541.
- Taylor and Slack, J.F. (1984) Tourmalines from Appalachian Caledonian massive sulfide deposit: Textural, chemical, and isotopic relationship. *Economic Geology*, 79, 1703-1726.
- Trumbell, R.b. and Chaussidon, M. (1999) Chemical and boron isotopic composition of granite pegmatite system in Swaziland. *Chemical Geology*, 153, 125-137.
- Williamson, B.J., Spratt, J., Adams, J.T., Tindle, A.G. and Stanley, C.J. (2000) Geochemical constraints from zoned hydrothermal tourmalines on fluid evolution and Sn mineralization: an Example from fault breccias at Roche, SW England. *Jour*

- Petro, 4, 1439-1453.
- Wolf, M.B. and London, D. (1997) Boron in granitic magmas: stability of tourmaline in equilibrium with biotite and cordierite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 130, 12-30.
- Yang, K. and Bodnar, R.J. (1994) Magmatic-Hydrothermal evolution in the bottoms of porphyry copper systems: evidence from the silicate melt and aqueous fluid inclusions in the Gyeong-sang Basin, South Korea. *Int. Geol. Rev.*, 36, 608-628.
-

2007년 2월 12일 원고접수, 2007년 3월 14일 게재승인.