한국광물학회지 제 22 권 제 3 호 (2009년 9월)
J. Miner. Soc. Korea, 22(3), 207-216 (September, 2009)

경북 울진 코리아 광상의 자수정에 대한 유체포유물 연구

Fluid Inclusions in Amethyst from the Korea Amethyst Deposit, Uljin, Gyeongbuk

이 미 령(Mi-Iyoung Lee)[1,2] · 양 경 희(Kyounghee Yang)[1,*] · 이 주 연(Ju-Youn Lee)[1] · 김 교 태(Gyo-Tea Kim)[2]

[1]부산대학교 지구환경시스템학부
(Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea)
[2]부산여자대학 보석감정 딜러&디자인과
(Department Gemological Identification Dealer & Design, Busan Women's University, Busan 614-734, Korea)

요약 : 경북 울진 분천화강편마암에 배태된 코리아 자수정광상에 산출되는 자수정은 킹크밴드와 파동소광을 가지는 조립의 석영결정과 이들 사이에 변형의 흔적이 없는 세립의 석영으로 이루어진 쌍봉 입자분포를 보이며 세 유형의 유체포유물을 포획하고 있다. Type Ⅰ은 액상이 풍부한 포유물(액체+기포)로, 시스템이 완전히 어는 최초 온도(T_e)는 -52~-20℃, 얼음이 최초로 형성되는 온도($T_{m\text{-}ice}$)는 -5~0℃ (7~0 wt% NaCl), 균질화 온도($T_{h\text{-}total}$)는 91~231℃로 측정되었다. Type Ⅱ는 기체상(80~90 vol%)이 풍부한 포유물(액체+기포)로서, T_e는 -56~-23℃, $T_{m\text{-}ice}$는 -4~-2℃ (6~3 wt% NaCl), $T_{h\text{-}total}$은 230~278℃로 측정되었다. Type Ⅲ는 액체가 풍부하고 액체+기포+확인되지 않은 딸결정 ± 칼리암염(KCl)로 구성되어 있다. Type Ⅲ의 $T_{h\text{-}total}$은 210~271℃, 유체의 염도는 32~36 wt% NaCl로 측정되었다. 석영과 자수정이 보이는 조직적 특성과 유체포유물의 성분은 자수정이 모암과 함께 동력재결정작용을 받았음을 제시한다. 또한 포획된 유체포유물은 변성기원으로 변성작용은 적어도 271~278℃ 이상의 환경에서 이루어졌음을 지시한다. 울진 코리아 자수정은 합성 자수정이나 산지가 다른 자수정의 감별증거로 볼 수 있는 독특한 유체포유물들이 포획되어 있다. 울진 코리아 자수정 내의 유체포유물은 화강암과 관련된 언양과 삼천포 자수정에 비해 NaCl 암염과 CO_2 유체포유물이 산출되지 않고 있는 점이 주목할 만하다.

주요어 : 분천화강편마암, 울진 코리아 자수정광상, 유체포유물, 변성기원의 유체, 재결정작용

ABSTRACT : Three distinct types of fluid inclusions in amethyst and quartz crystals are associated with metamorphic events in the Korea Amethyst deposit from Uljin-Gun, Gyeongbuk Province. The amethyst displays bimodal grain size distribution in fine-grained, strain-free equigranular quartz with coarse-grained quartz grains with kink bands and undulose extinction. Type I inclusions are liquid-rich and salinity is 0~7 wt% NaCl and the homogenization temperatures (T_h) 91~231℃ with eutectic temperatures (T_e) -52~-20℃. Type II inclusions are vapor-rich (80~90 vol%). The salinity and T_h ranges 3~6 wt% NaCl and 230~278℃, respectively with T_e -56~-23℃. Type III inclusions contain a daughter mineral other than NaCl. The salinity ranges 32~36 wt% NaCl and T_h 210~271℃. The textural and fluid inclusion evidences suggest that the host Buncheon granite gneiss and Amethyst pegmatite experienced dynamic recrystallization and the studied fluid inclusions are metamorphic in

*교신저자: yangkyhe@pusan.ac.kr

origin. The metamorphic event possibly occurred at higher temperature than 271~278℃. The amethysts from Uljin Korea Amethyst can be distinguished from the synthetic amethyst on basis of the distinctive two and three-phases fluid inclusions. Furthermore, it is noticeable that Korea amethyst do not contain NaCl-bearing and CO_2-rich fluid inclusions unlike those compared to those from Eonyang and Samcheonpo deposits related to unmetamorphosed granitic rocks.

Key words: Buncheon granite gneiss, Uljin Korea Amethyst mining, fluid inclusion, metamorphic water, recrystallization

서 론

우리나라의 자수정 광상은 경북 울진, 대구의 북동부에 위치한 팔공산 화강암 및 경북 산내면 동곡에서 경남 언양 일대, 경남 사천시 와룡산 부근까지 화강암내에 산출되고 있다(윤시내, 2006; 배윤수, 2007; 임예원 외, 2007). 그러나 그 산출량이 미비하거나 채산성이 맞지 않아 거의 폐광되고 울진의 코리아자수정 광상만이 현재 채굴되고 있다(그림 1). 코리아자수정 광상에 대한 지질학적/보석학적 연구는 LAM-ICP-MS에 의한 자수정에 대한 미량원소의 분석이 있을 뿐이다(김국락 외, 2000). 반면에 코리아자수정광상을 배태하고 있는 모암인 분천화강암에 대한 암석학적, 연대측정 연구를 통해 한반도 선캠브리아 지각의 연대와 진화과정에 대한 연구는 활발하게 이루어지고 있다(김종환 외, 1989; 이덕원, 1988; 박계헌 외, 1993).

유체포유물에 대한 연구는 광물의 성장 당시의 물리적 · 화학적 환경에 대한 정보를 알아낼 수 있을 뿐만 아니라 특히 보석으로 사용되는 광물의 경우 특정한 보석에서만 한정되어 나타나는 내포물이 많으므로 이들에 대한 연구와 구별을 통해 산지나 합성유무도 판단할 수 있다. 보석에 있는 유체포유물 연구는 보석광상을 탐사, 보석의 식별 및 산지분별, 합성석 제조지침제공, 천연 및 합성석 구별자료 제공 등에 유용하게 활용되고 있다(Gbeline & Koivula, 2004).

자수정은 우리나라의 국석(國石)이자 2월의 탄생석으로, 1983년 세계적인 권위의 보석연구 및 교육기관인 GIA (Gemological Institute of America)에 한국산 자수정의 품질평가를 의뢰한 결과 붉은 자주색의 한국산 자수정은 자수정으로서의 매우 이상적인 색을 지니고 있으며 내포물 또한 적은 편이라는 평가를 받았으며, 한국산 자수정의 연구결과가 학술지에 발표하였다(Koivula, 1984). 우리나라의 자수정은 1981년 법정광물로 지정되었으며, 현재 우리나라에서 유통되고 있는 자수정의 경우 60%가 합성이고 30%가 외국산 천연 자수정이며 10%가 한국산 자수정으로 추정되고 있다(김종고, 2003). 이러한 시장상황 때문에 한국산 자수정의 경우 감별서가 붙은 것은 몇 배의 고가로 거래되고 있는 실정이다. 시중에 유통되는 자수정의 가격은 원산지나 보석질의 상태에 따라 가격이 다르게 책정된다. 수입물량이 많은 브라질의 자수정의 경우는 캐럿(carat)당 2만원~5만원정도의 가격형성을 이루며 울진 코리아 자수정의 경우 국내산이라는 특성과 더불어 상질의 가격은 캐럿당 18만원을 호가하고 있는 실정이다. 특히 보석에 있어 중량은 가격에 상당한 영향을 미치므로 캐럿이 클수록 캐럿 당 가격은 단순한 배율의 계산적 상승이 아닌 소위 부르는 것이 판매가격이 되기도 한다.

국내에서 유일하게 자수정을 채굴하고 있는 울진 코리아자수정 광상은 1976년 달우자수정 광업소라는 이름으로 최초 설립되어 자수정 채굴을 시작하였다. 2007년 코리아자수정 광업소로 이름이 바뀌었다. 본 연구는 코리아자수정 광상에서 채굴되고 있는 자수정에 포획된 유체포유물 연구를 통하여 자수정의 형성 기원과 물리화학적 환경, 유체포유물의 종류와 특징에 대한 정보를 천연 자수정의 감별 증거로 제시하고자 한다.

일반지질

경북 울진군 서면에 위치하고 있는 코리아자수정 광상은 삼근리 도폭(김옥준 외, 1963) 북동부에 속하며 지체구조적으로 소백산육괴의 동북부에 해당된다. 코리아자수정 광상 일대의 지질은 광범위하게 분포하고 있는 선캠브리아기 암석과 소규모로 노출되어 있는 중생대 관입암류로 구성되어 있다(그림 1). 코리아자수정 광상을 배태하고 있는 분천화강편마암은 선캠브리아 이언의 변성퇴적암류인 원남층군과 율리층군을 관입하였고 홍제사

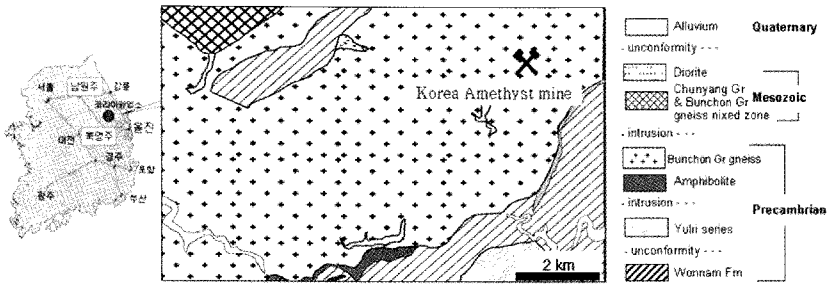

Fig. 1. Location and geological map of the study area showing the Korea Amethyst mine (after Kim *et al.*, 1963).

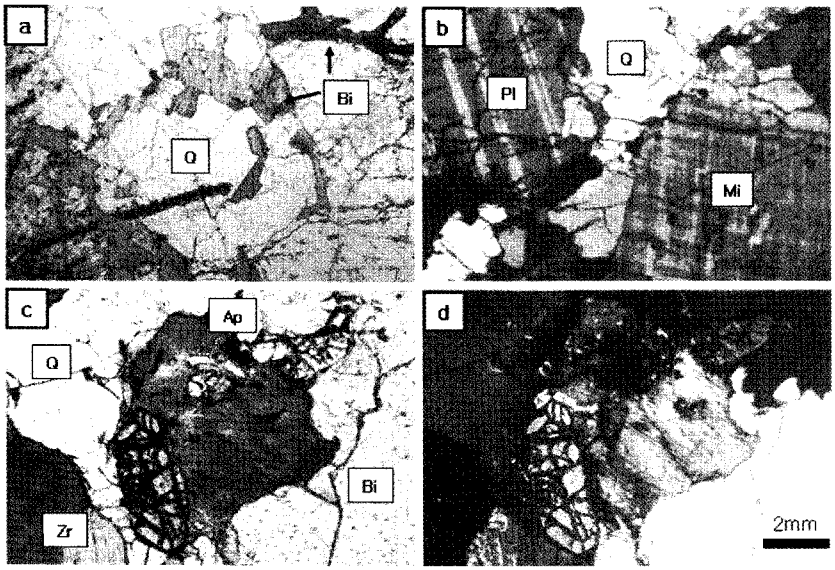

Fig. 2. Photomicrographs showing various textures of the host biotite Buncheon granite gneiss. The scale bar in (d) applies for all pictures. (a) Interstitial biotite surrounding quartz grains forming mantle-core texture. (b) Two-feldspar granite gneiss with interstitial quartz. (c) and (d) Zircon and apatite associated with biotite. Photos a and c were taken under plain-polarized light; b and d under cross-polarized light. Q = quartz, Bi = biotite, Mi = microcline, Pl = plagioclase, Zr = zircon, Ap = apatite.

화강암에 의해 관입되어 있다(김옥준 외, 1963). 분천화강암이라고도 하는 분천화강편마암은 한반도 시생대-원생대 초기 화성활동을 대표하는 고기의 화강편마암류로 약 2.1 Ga 경에 관입한 지각기원의 S-type이라는 보고가 있다(김종환 외, 1989; 이덕원, 1988; 박계헌 외, 1993).

광상 주변에 분포하는 분천화강편마암은 담색에서 담홍색의 흑운모-우백질 화강 편마암으로 단층운동 등에 의해 부분적으로 파쇄되어 있으며, 염기성 암맥에 의해 관입되어 있기도 한다. 분천화강편마암은 흑운모가 풍부한 부분과 석영과 장석이 풍부한 부분으로 나누어진 미약한 엽리를 나타내고 있으며, 주로 석영, 미사장석 또는 퍼다이트, 사장석, 흑운모, 저어콘과 인회석으로 이루어져 있다(그림 2). 석영은 타형으로 파동소광과 킹크밴드(kink band)를 보이는 조립질의 석영과 세립질의 아입자(subgrain)를 형성하고 있으며, 큰 결정을 중심으로 세립의 석영이 핵-맨틀(core-mantle) 조직을 나타내거나 삼중점이 발달된 다각형의 집합체로 관찰되기도 한다. 세립의 흑운모도 석영을 중심으로 핵-맨틀 조직을 가진다(그림 2a). 풍화가 많이 된 정장석은 견운모화 되어 있으며, 사장석과 알칼

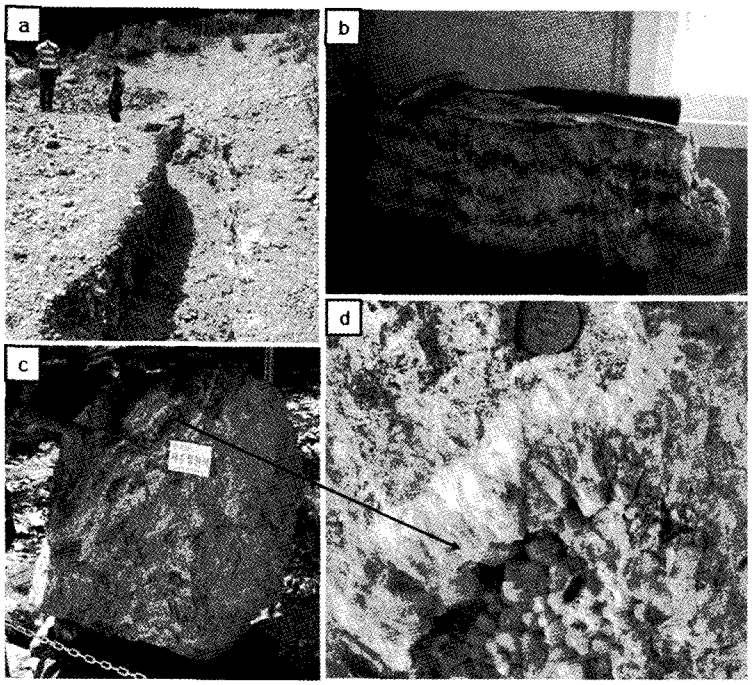

Fig. 3. Photos showing outcrop views of a pegmatite and a miarolitic cavity from the Korea Amethyst mine. (a) A pegmatite open-pit after extraction. (b) A part of the pegmatite containing amethyst in comb structure. (c) An exhibition of the Korea amethystine rough stone contained within a miarolitic cavity. (d) An euhedral quartz crystals in the cavity showing the contact with the host rock displayed in the mine. The very contact with the host is altered to clays.

리장석이 산출되는 서브솔브스(subsolvus) 화강암의 모습을 지닌다(그림 2b). 저어콘과 인회석은 주로 흑운모와 함께 산출되어지며, 저어콘은 자형으로 강한 간섭색과 높은 기복(relief)에 의해, 인회색은 독특한 낮은 간섭색 의해 뚜렷하게 구별된다(그림 2c, d).

울진 코리아 자수정은 분천화강편마암 내에 배태된 정동 혹은 맥상의 페그마타이트에 백색(milky) 혹은 투명한 석영결정과 함께 자형으로 산출된다(그림 3). 정동과 맥상의 페그마타이트는 포켓 형태부터 매우 불규칙한 지그재그의 모습까지 다양하다. 자수정을 지닌 석영은 최고 30 × 80 cm 정도까지의 다양한 크기로 배태되어 있다. 모암인 분천화강편마암과의 경계는 점이적이며, 석영결정과의 접촉부는 대체로 변질되어 점토화 되어 있다(그림 3d). 정동 내에는 양쪽 벽에서 백색 석영결정이 성장하기 시작하여 중간단계의 자수정결정, 최후기에 투명한 석영의 순으로 내부를 향해 빗(comb) 구조를 형성하며 거정질의 자수정 페그마타이트를 형성하였다(그림 3b, c, d). 자수정 페그마타이트를 형성하고 있는 거정질의 석영은 현미경하에서 뚜렷한 성장대가 관찰되며 일반적으로 6각의 주면과 추면이 잘 발달되어져 있다. 거정질의 석영결정 주변에 세립의 석영 아입자가 형성되어 거정질의 석영들 사이의 간극을 채우는 모습으로 발달되어 있다(그림 4). 석영입자는 킹크밴드와 파동소광을 가지는 조립의 결정과 이들 사이에 변형의 흔적이 없는 세립입자를 가지는 쌍봉분포(bimodal)를 이루고 있다(그림 4a, b). 이러한 산출은 모암인 화강편마암의 석영과 유사한 모습이다. 석영의 성장대에 의해 형성된 불연속면과 아입자가 형성된 곳은 변질되어 점토화된 것이 일반적이다(그림 4).

울진 코리아 자수정

코리아 자수정 광상은 정동 혹은 맥상으로 배태되어 있는 자수정을 주 채광대상으로 중앙갱구를 중심으로 빛내갱구, 논머리갱구, 먹골 현장 등 10

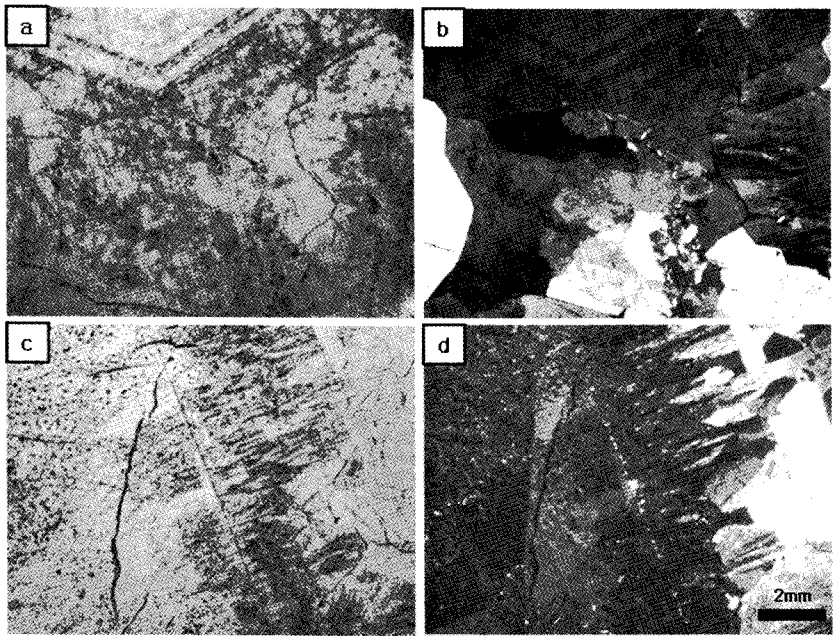

Fig. 4. Photomicrographs showing recrystallized textures of the amethystine quartz from the Korea Amethyst pegmatite. The scale bar in (d) applies for all pictures. (a) and (b) An euheral coarse-grained quartz crystal with growth zones showing fine-grained subgrains. (c) and (d) Subgrains along the growth zones which is highly altered. Photos a and c were taken under plain-polarized light; b and d under cross-polarized light.

여 곳에서 현재까지 활발하게 채굴되고 있다. 중앙 갱구 내에는 사람이 들어 갈만한 80cm 정도의 정동이 만들어져 있는데 일반인들에게는 공개가 되지 않는다(김종고, 2003). 생산량과 매장량에 대해서는 아직 공식적으로 공개된 바는 없지만 대한광업진흥공사의 2005년 기준자료에 의하면 울진 코리아 자수정 광상의 국내수급현황은 국내 총 공급량인 17,977톤 중 11,650톤으로 약 65%를 차지하고 있다. 국내 수급 분야는 LG화학(6,000톤), 노루표페인트(3,000톤), 기아자동차(100톤) 등의 신소재 부분과 울진코리아 자수정 광업소의 자회사인 (주)코리아 자수정(1,250톤) 본사에 연마된 나석을 보석으로 공급되고 있는 것으로 나타났다. 울진 코리아 자수정 광상에서 채굴된 가장 큰 보석질 원석은 505캐럿으로 보통 보석의 1캐럿이 0.20 g인 것을 감안하면 총 101 g의 무게를 지니는 것으로 계산되어진다(김종고, 2003).

현재 채굴되고 있는 울진 코리아 자수정 원석의 외관상 특징은 중간정도의 명도에 붉은색을 지닌 보라색으로 자주색의 색상이며 채굴한 원석을 연마하였을 때 고른 색 배열과 선명한 투명도를 지녀 최상급의 원석들로 평가된다. 또한 원석의 색 배열 상태와 내포물의 정도에 따라 다양한 모양들로 연마되고 있으며 연마 후에는 유리광택이 잘 나타나며 빛의 분산도 좋아 나석의 외형을 더욱 돋보이게 한다. 유색보석에 나타나는 특수효과는 나타나지 않았다. 특수효과는 주로 결정 내에 형성된 내포물 중 금홍석이나 실크(silk), 튜브(tube) 등의 침상이 빛의 반사작용에 의해 나타나거나 화학적 성분의 첨가로 변색효과 등이 나타는 것을 말한다.

유체포유물

실험방법

코리아 자수정광상의 자수정을 형성한 유체의 성분과 물리화학적 환경을 파악하기 위해 유체포유물연구가 수행되었다. 정동과 맥상의 페그마타이트를 구성하고 있는 석영과 자수정이 채취되었다. 유체포유물의 분포를 시·공간적 변화에 따라 관찰할 수 있도록 C축에 평행하게 수직으로 3등분하였으며, 3등분된 중앙부분 중 모암과 접촉하고 있는

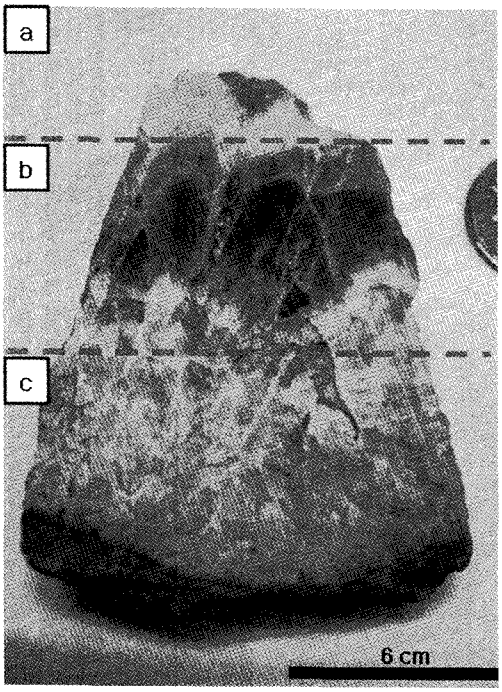

Fig. 5. A photo showing multi-grown quartz crystal with (a) clear, (b) amethystine, and (c) milky zone. The dotted lines indicate cut-off directions perpendicular to the C-axis of the crystal.

하부의 유백색대 부분, 유백색대와 경계하고 있는 자수정색대부분, 자수정대와 경계하고 있는 투명색대 부분을 각각 나누어 시편을 제작하였다(그림 5). 시편은 약 0.5~1 mm 정도의 두께로 양면 연마편으로 제작되었다.

유체포유물의 균질화온도와 성분을 파악하기 위한 냉각/가열 실험은 부산대학교의 Linkam Th 600 가열/냉각대를 사용하였으며, 표준 인조 유체포유물, 순수 CO_2 (-56.6℃)와 H_2O (0℃, 374.1℃)을 이용하여 보정되었다(Bodnar and Sterner, 1987). 유체포유물에서 측정된 데이터는 냉각 시 유체포유물 시스템이 완전히 어는 온도(T_e), 최초로 얼기 시작하는 온도($T_{m\text{-}ice}$)와 가열시 기포가 사라지는 온도($T_{m\text{-}vapor}$), 암염이 녹는 온도($T_{m\text{-}halite}$), 균질화온도($T_{h\text{-}total}$)를 측정했다(표 1). 냉각/가열대에서 시스템이 완전히 얼음이 되는 상변화(phase change)와 최초로 얼음이 형성되는 상의 인식은 유체포유물과 같은 작은 크기에서 관찰하기는 매우 어렵다. 이러한 상변화를 관찰하기 위해 상변화 과정을 역방향으로 하여 관찰하였다. 즉, 시스템이 완전히 어는 온도보다 매우 낮은 온도까지 시스템을 냉각시킨 후 최초로 얼음이 녹아서 물이 생기는 온도(T_e)와 마지막으로 얼음이 사라지는 온도($T_{m\text{-}ice}$)를 각각 측정하였다. 낮은 임계온도를 가지는 CO_2 함유 유체포유물 같은 것은 실내온도 혹은 현미경의 조명 등에 의해 이미 균질화 되어 현미경하에서는 관찰이 쉽지 않다. 이를 극복하고 CO_2 함유 포유물의 존재여부를 확인하기 위해 모든 포유물을 -180℃ 정도까지 냉각하여 온도를 올리는 순서로 상변화를 관찰하였다. 유체포유물의 염도는 Bodnar *et al.* (1989)의 프로그램을 이용하여 구하였다.

Table 1. Summary of microthermometry of fluid inclusions trapped in quartz from the Korea pegmatite

Inclusion type	I	II	III
Te (℃)	-52~-20	-56~-23	
$T_{m\text{-}ice}$ (℃)	-5~0	-4~-2	
$T_{m\text{-}vapor}$ (℃)	91~231	230~278	176~206
$T_{h\text{-}Halite}$ (℃)			210~271
$T_{h\text{-}total}$ (℃)	91~231	230~278	210~271
Salinity (wt% NaCl equivalent)	0~7	3~6	32~36

결 과

코리아 자수정페그마타이트를 구성하고 있는 자수정결정에는 비교적 크기가 작은 여러 시기의 유체포유물이 매우 복잡하게 포획되어 있다. 현미경하에서 식별되어진 유체포유물은 상온에서 다음과 같이 세 종류의 유체포유물 유형으로 분류되었다(그림 6).

Type I: 액상이 풍부하고 기포의 크기가 20~30 vol% 이하인 포유물로서 액체+기포로 구성되어 있다(그림 6a). Type I은 가열실험 시 기포가 사라지면서 액상으로 균질화되며 이는 포획 당시의 유체는 액상이었음을 나타낸다. 대체로 자수정결정의 하부 유백색대 부분에서 관찰되는데 고립되거나 군집형태로 분포한다. 기포가 없는 Type I 유체포유물이 다량으로 관찰되는데 이러한 유체포유물은 매우 저온(대략 100℃ 이하)에서 포획되었음을 의미한다(그림 6b). 기포가 형성되어 있지 않은 것은 포획된 유체가 현재의 실내온도로 낮아져도 액상과 기상이 공존하는 영역(비등곡선 혹은 불혼화영역)

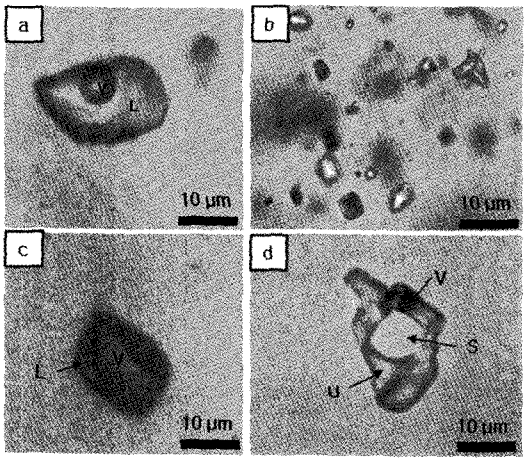

Fig. 6. Photomicrographs showing fluid inclusions trapped within the Korea amethyst. All photographs were taken at room temperature. (a) Isolated liquid-rich inclusions (Type I), (b) Low-temperature inclusions without vapor bubbles, (c) Type II vapor-rich inclusion, (d) Type III inclusion with unidentified daughter crystal plus sylvite. L = liquid, V = vapor, S = sylvite, U = unidentified daughter crystal.

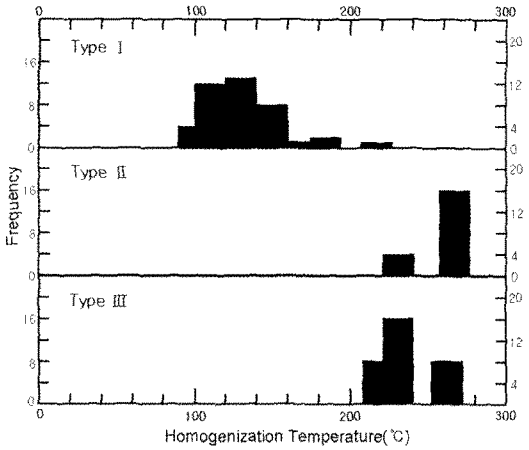

Fig. 7. Homogenization temperatures for type I, II, and III fluid inclusions.

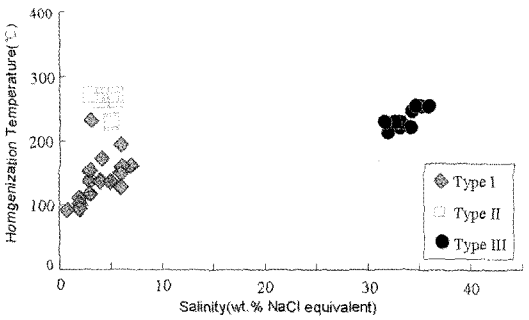

Fig. 8. Relationship between salinity (in wt% NaCl equivalent) and homogenization temperatures for type I, II, and III fluid inclusions.

에 이르지 못했기 때문이다. 유체포유물의 산출형태는 막대형, 육각주상의 모양, 부정형(negative crystal shape) 등으로 나타나며 크기는 대체로 5~20 μm이다. Type I의 유체포유물은 냉각 실험 시 T_e는 -52~-20℃ 범위에서, $T_{m\text{-}ice}$는 -5~0℃, $T_{h\text{-}total}$은 91~231℃의 온도 범위로 측정되었으며, 염도는 7~0 wt% NaCl로 계산되어졌다(표 1, 그림 7, 8). Type I포유물의 염도는 매우 낮지만 공융온도(T_e)가 높아 이 유체 안에 NaCl이나 KCl이 아닌 다른 염(salt) 성분, 예를 들어 $CaCl_2$, $MgCl_2$성분 등이 들어 있음을 제시한다.

Type II : 기체상이 풍부하고 기포의 크기가 80~90 vol.% 이상인 포유물이며 액체+기포로 구성되어 있다(그림 6c). 가열실험 시 기포가 확장되면서 기상(vapor phase)으로 균질화 되었다. 이는 포획 당시 기체상이었음을 의미한다. 유백색대에서 Type I과 함께 비교적 다량 분포하였고 자수정 색대하부 부분에서도 소량 관찰되었으나 자수정 상부와 투명색대 부분에서는 관찰되지 않았다. Type II의 크기는 10~30 μm 정도로 관찰되었으며 Type I 보다는 유체의 크기가 크고 주로 고립되어 독립적으로 산출되는 경향이다. 냉각/가열시 상변화온도 측정은 액상부분이 작고 기상이 팽창하여 균질화되는 모습을 현미경하에서 정확하게 관찰할 수 없어 ±10℃ 정도의 오차를 가진다. Type II 유체포유물의 Te는 -56~-23℃ 범위, $T_{m\text{-}ice}$는 -4~-2℃, 균질화 온도($T_{h\text{-}total}$)의 범위는 230~278℃로 측정되었다. 염도는 3~6 wt% NaCl로 계산되어졌다(표 1, 그림 7, 8).

Type III : 액체가 풍부하고 액체+기포+확인되지 않은 딸결정 ±칼리암염(KCl)으로 구성되어 있고 대체로 기포의 크기가 10~20 vol%이다(그림 6d). Type III 유체포유물의 크기는 20~30 μm로, 단독으로 분포하거나 2~5개 정도가 동일한 상비율을 보이며 산출되기도 한다. 주로 자수정색대 부분과 투명색대 부분에서 관찰되었다. 불투명결정과 침상이나 둥근형의 딸결정이 관찰되며 복굴절을 보이기도 한다. 가열실험 시 용융되는 속도와 모습이 칼

리암염로 여겨지는 딸결정도 관찰되나 매우 드물게 산출된다(그림 6d). 가열실험 시 기포가 176~206℃ 범위에서 사라지고, 딸결정은 210~271℃ ($T_{h\text{-}total}$) 범위에서 용해된다(표 1). 이러한 딸결정의 용해온도에 의해 염도는 32~36 wt% NaCl로 계산되어진다(표 1, 그림 7, 8).

토 의

울진 코리아 자수정 광상이 위치하고 있는 곳은 소백산육괴의 동북부로서 태백산편마암복합체가 분포하고 있다. 소백산육괴에 분포하는 편마암변성복합체는 광범위한 광역변성작용과 화강암화작용을 수차례 경험하였다(이상만과 김형식, 1984; 대한지질학회, 1999). 코리아 광상의 자수정과 모암인 분천화강편마암을 구성하고 있는 결정들은 킹크밴드와 파동소광을 가지는 조립의 결정사이에 변형의 흔적이 없는 세립의 결정을 가지는 쌍봉 패턴의 분포(bimodal distribution)를 보인다(그림 4). 이러한 조직은 특정한 편압에서 부분적으로 재결정화된 조직을 의미하며, 이 편압 하에서 비교적 균질한, 변형의 흔적이 없는 세립의 결정이 새로 형성되어진다(Passchier and Trouw, 1996). 자수정과 모암의 결정들이 나타내는 유사한 조직적 특성은 자수정 페그마타이트가 모암인 분천화강편마암과 함께 동력재결정작용을 받았음을 지시한다. 변성작용을 받지 않은 비교적 젊은 백악기 화강암 내에 배태되어 있는 언양자수정, 삼천포자수정에는 이러한 쌍봉 패턴의 입자 분포조직을 보이지 않는다(Yang *et al.*, 2001; 배윤수, 2007). 분천화강암은 서브솔부스 환경에서 결정화작용이 진행되었으며(그림 2b), 이는 물에 포화된 마그마였음을 지시한다. 물이 풍부한 환경에서 마그마에서 용리된 열수는 정동이라는 공간을 만들었고, 이 확보된 공간 속에서 경제성 있는 자수정을 형성한 것으로 여겨진다. 코리아 자수정은 분천화강암의 마그마 결정화작용의 최후기에 형성되었다가 분천화강편마암과 함께 변성작용을 경험한 것으로 해석된다.

코리아 자수정페그마타이트를 구성하고 있는 석영에는 비교적 크기가 작은 여러 시기의 유체포유물이 생성순서를 정확하게 측정하기에는 불가능할 정도로 복잡하게 포획되어 있다. 코리아 자수정에 산출되는 대부분의 유체포유물은 기포가 작은 크기의 저온성 포유물로 산출되고 있다(그림 6). 변성암 내에 산출되는 유체포유물은 크기가 대체로 작으며, 기포의 크기 역시 마그마 기원의 유체에 비해 작은 경향이 있다. 항상 적용되지는 않지만 기포의 크기는 유체가 포획되었던 온도/압력 공간에서 현재의 온도/압력 공간까지의 여행한 거리를 간접적으로 나타내고 있다. 기포의 크기가 클수록 고온에서 포획되어 온도/압력 공간에서 먼거리를 여행했음을 나타낸다. 코리아자수정에 염도는 매우 낮고 공융온도가 매우 낮은 Type I, II 포유물이 산출된다는 것은 유체 안에 NaCl이나 아닌 다른 염(salt) 성분($CaCl_2$, $MgCl_2$ 등)이 들어 있음을 제시하며, 이는 변성기원의 유체에 나타나는 전형적인 모습 중에 하나이다(Roedder, 1984). 화강암질 마그마 최후기에 용리되는 유체는 NaCl이 풍부한 Type III가 일반적이다(Yang, 1993; Cline and Bodnar, 1994). 울진 코리아 자수정에는 변성작용을 받지 않은 비교적 젊은 화강암에 배태되어진 자수정(즉, 언양과 삼천포 자수정)에 산출되는 유체포유물과는 뚜렷하게 다른 포유물이 포획되어 있다(Yang *et al.*, 2001; 배윤수, 2007). 화강암에서 유래된 언양과 삼천포 자수정은 매우 유사한 유체포유물을 산출하고 있으며 NaCl 암염을 지니거나 CO_2를 풍부하게 함유하고 있다. 코리아자수정에 포획된 세 유형의 유체포유물은 자수정이 정출될 당시의 유체라기보다는 변성작용 시 혹은 그 이후에 관여한 유체임을 나타내고 있다. 이러한 해석에는 유체포유물을 포획하고 있는 모결정이 재결정작용을 받았으며, 유체포유물의 전반적인 모습이 비교적 저온에서 형성된 것이라는 것, 마그마에서 유래된 성분을 보이지 않는다는 것에 근거하고 있다.

그러나 본 연구에서 설명되어져야 하는 것은 유체포유물들이 초생포유물과 같은 부정형(negative crystal shape)이면서 고립되어 산출되는 것과 자수정에 공간적으로 다르게 포획되어 있다는 것이다. 관찰된 유체포유물은 초기에는 미파쇄대에 포획된 이차포유물의 모습이었으나 오랜 기간 동안 결정이 성숙되고 넥킹(necking down) 되어지면서 자수정 결정이 부분적으로 아물어졌기 때문으로 해석된다. 자수정의 위치에 따라 다른 유형의 유체가 산출되는 것은 미파쇄대의 형성 시기가 달랐으며 그 당시의 염도와 온도가 다른 유체였을 것으로 여겨진다. 또 하나의 문제는 자수정에 포획된 유체의 염도가 대략 10~30 wt% NaCl를 가진 것이 관찰되지 않았다는 것이다(그림 8). 비록 유체의 성분은 NaCl로 나타내고 있지만 실질적으로 유체는 NaCl에 포화되어 있는 것은 아니고 여러 다른 복

합적인 딸 결정들로 인해 높은 염도를 보이고 있다. 이러한 염도의 불연속적인 특성은 현재로서는 확인되지 못하고 있으며 좀 더 발전된 연구가 이루어져야 할 것이다. 본 연구에서 제시하는 테이터는 변성작용 시 관여한 유체는 적어도 271~278℃ 이상의 온도였으며, 최고 32~36 wt%의 염도를 가졌음을 지시한다.

보석학적인 관점에서는 울진 코리아 자수정에 포획되어 있는 이상 혹은 삼상의 유체포유물은 코리아자수정에만 산출되는 매우 독특한 것으로 합성자수정과 구별되는 천연 자수정의 감별증거로 볼 수 있다. 또한 울진 코리아 자수정은 언양이나 삼천포에서 산출된 자수정에 비해 암염과 CO_2 유체포유물을 함유하지 않다는 것에 주목할 만하다. 유체포유물의 크기, 수량, 성질, 위치와 선명도 등은 보석으로 상품화 될 경우 색과 빛의 분산, 연마 시 원석의 파손에도 영향을 주기 때문에 보석으로서 사용되는 경우에는 유체포유물의 크기가 작거나 없는 것이 훨씬 유리하다. 그러므로 앞으로 울진 코리아 자수정은 채굴작업이 지속되어 더 많은 갱구들이 개발된다면 보석학적 가치측면에서는 상당한 경제성이 있을 것으로 기대된다.

결 론

1) 자수정을 배태하고 있는 자수정 페그마타이트는 모암인 분천화강편마암과 함께 동력재결정작용을 받았으며, 자수정에 포획된 세 유형의 유체포유물은 울진 코리아 자수정의 성장이 모두 끝난 후 재결정작용 동안 혹은 그 이후에 포획되어진 것으로 여겨진다.

2) 변성작용 시 관여한 유체는 적어도 271~278℃ 이상의 온도였으며, 최고 32~36 wt%의 염도를 가졌음을 지시한다.

3) 울진 코리아 자수정에 포획되어 있는 유체포유물은 독보적이고 독특한 것으로 합성자수정과 다른 산지에서 산출되는 자수정과의 구별할 수 있는 가장 특징적이고 확실한 증거가 될 수 있다.

사 사

본 논문을 심사하여 주신 익명의 심사자께 깊은 감사를 보냅니다. 본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

김국락, 김진섭, 김정숙 (2000) LAM-ICP-MS에 의한 달우, 언양에 산출하는 석영(자수정)의 미량원소의 분석. 한국암석학회・한국광물학회 공동학술발표회 논문집, 81p.

김옥준, 홍만섭, 김기태, 박희인 (1963) 한국지질도 삼근리 도폭 설명서. 국립지질조사소, 1-4, 15-16.

김종고 (2003) 한국자수정의 신비. 우석, 207p.

김종환, 조한익, 박중권, 서효준, 김상엽, 이태섭, 조진동, 서상용, 오천혁, 홍영국, 김통권, 박영수, 구성본, 최종호, 고상모, 채수천 (1989), 분천화강암원 우라늄 광상 탐사 모델 개발(I). 한국전력공사연료처, 249p.

대한지질학회 (1999) 한국의 지질. 시그마프레스, 802p.

박계헌, 정창식, 이광식, 장호완 (1993) 태백산지역의 고기 화강암 및 화강편마암류에 대한 납동위원소 연구. 지질학회지, 29, 387-395.

배윤수 (2007) 삼천포 광산의 자수정에 대한 유체포유물 연구. 부산대학교 석사 학위논문, 1-56.

이덕원 (1988) 상동-울진지역의 주석광화작용과 관련된 화강암의 암석지화학적 특징과 탐사에의 응용에 관한 연구. 서울대학교 박사 학위논문, 152p.

이상만, 김형식 (1984) 소위 율리층군 및 원남층군의 변성암석학적 연구 : 태백산일대를 중심으로. 지질학회지, 20, 195-214.

임예원, 장윤득, 김정진 (2007) 팔공산 자수정의 보석 및 광물학적 특성연구. 한국광물학회・한국암석학회 공동학술발표회 논문집, 135-137.

윤시내 (2006) 첨단분석장비를 이용한 자수정의 감별에 관한 연구. 동신대학교 박사 학위논문, 1-2, 12, 101-102.

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-H_2O, Computers & Geosci., 29-41.

Bodnar, R.J. and Vityk, M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H_2O-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, 118-130.

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.

Gubelin, E.J. and Koivula, J.I. (1992) Photo atlas of inclusion in gemstones (2nd Ed.), ABC edition, Zurich,

532p.
Koivula, J.I. (1984) "Korea amethyst". Gems and Gemology, 20, 56-60.
Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J. (1996) Microtectonics. Springer-Verlag, Berlin, 289p.
Roedder, E. (1984) Fluid Inclusions, Reviews on Mineralogys, 12, Mineralogical Society of America, Washington, D.C., 664p.
Yang, K. (1993) Fluid inclusions from the Cretaceous-early Tertiary granitoids in the southeastern Gyeongsang Basin, Korea, Unpub. Ph. D. Dissertation, Pusan National University, Pusan, Korea, 96p.
Yang, K., Yun, S.H., and Lee, J.D. (2001) A fluid inclusion study of an amethyst deposit in th Cretaceous Kyongsang Basin, South Korea, Mineralogical Magazine, 65, 477-487.

접수일(2009년 7월 28일), 수정일(1차 : 2009년 8월 25일), 수정일(2차 : 2009년 9월 11일), 게재확정일(2009년 9월 14일)