

경상남도 삼천포 광산의 자수정에 대한 유체포유물 특성

Fluid Inclusion Study of the Samcheonpo Amethyst Deposit of Kyongsangnamdo, Korea

배 윤 수(Yun-sue Bae) · 양 경 희(Kyoung-hee Yang)*

부산대학교 자연과학대학 지구환경시스템학부

(Division of Earth Environmental System, College of Natural Sciences, Pusan National University, Busan,
609-735, Korea)

요약 : 삼천포 자수정광상은 경상남도 사천시 와룡산에 위치하고 있으며, 자수정에는 4종류(I, II, III 그리고 IV형)의 다양한 유체포유물이 포획되어 있다. I형은 균질화온도 289~359°C, 염도 10~23 wt%; II형은 염도 2~10 wt%, 균질화온도 304~365°C; III형은 압염을 포함하는 포유물로서 염도 31~54 wt%, 균질화온도 259~510°C; IV형은 CO₂ 성분을 함유하는 포유물로서 균질화온도 126~277°C, 염도 9~13 wt%을 나타내고 있다. 삼천포 자수정은 뿌리부분에 I, II, III형의 유체포유물이, 상부에는 IV형만이 포획되어 있다. 고상선환경에서 최초로 용리된 IIIa형의 유체포유물은 규산염 용융포유물(melt inclusion)과 공간적으로 연관되어 산출되며, 균질화 과정에서 기포가 압염보다 먼저 사라진다. 이것은 열수가 용리될 때 비교적 고압의 상태에서 포획되었음을 의미한다. 그 후 점차 염도가 낮은 IIIb형, I형, II형이 마그마로부터 용리되고 마지막으로 CO₂ 성분을 가진 IV형의 유체가 자수정 성장에 관여했음을 알 수 있다. IV형의 열수는 화강암류를 중심으로 순환하고 있던 열수가 퇴적암과의 반응하여 형성된 CO₂ 성분을 포획한 것으로 여겨진다. 삼천포 자수정을 배태하는 화강암류는 물에 포화된 서브솔부스(sub-solvus)조건에서 결정화작용이 진행되었으며, 고상선 환경에서 휘발성성분을 다량으로 용리하였다. 그 결과 고상선 온도를 상승시켜, 잔류마그마는 비교적 급냉되어 세립질의 화강암류를 만들었다. 마그마에서 용리된 열수는 정동을 만들었으며, 확보된 공간속에서 자수정 정동을 형성하였다.

주요어 : 삼천포 자수정, 유체포유물, 고상선 환경, 용리, 균질화온도

ABSTRACT : Fluid inclusions in amethyst from the Samcheonpo amethyst deposit of the Waryongsan area, Kyongnam generally grouped into four different types: Type I (liquid-rich and 10~23 wt% NaCl, Th= 289~359°C), Type II (vapor-rich and 2~10 wt% NaCl, Th=304~365°C), Type III (halite-bearing, 31~54 wt% NaCl, Th= 259~510°C), and Type IV (CO₂-bearing, 9~13 wt% NaCl, Th= 126~277°C). Type I, II, and III inclusions are confined in the lower part of the amethyst and Type IV in the upper, which indicates significant hydrothermal activity during the earliest stage of the amethyst growth or the solidus condition of granitic rocks. The earliest fluid exsolved from the crystallizing granitic magma formed Type IIIa which is spatially associated with silicate melt

*교신저자: yangkyhe@pusan.ac.kr

inclusions. The homogenization behavior of Type IIIa inclusions by dissolution of the halite crystal after the bubble disappearance indicates that Type IIIa inclusions were trapped at some relatively elevated pressure. Exsolution of Type IIIb, I, II forming fluids with gradual decrease in their salinity was followed. The last fluid was CO₂-bearing fluid (Type IV), which is assumed to be derived by decarbonization reactions with the surrounding sedimentary rocks. It suggests that the fine-grained granitic rocks containing the Samcheonpo amethyst crystallized at the sub-solvus condition saturated with water and exsolved abundant water.

Key words : samcheonpo amethyst, fluid inclusion, solidus condition, exsolution, homogenization temperature

서 론

삼천포 자수정광상은 경상남도 사천시 남동쪽 와룡산(해발고도 799 m) 산정상부 부근에 위치하고 있으며(그림 1), 1970년대에 소량의 자수정을 산출하였으나 지금은 폐광된 상태이다. 자수정을 채굴하고 방치되어 있는 채굴갱도는 그 폭이 가장 넓은 것은 5 m, 길이는 약 5~15 m의 크기로 노출되어있다(그림 2a, b). 본 자수정광상은 세립질 화강암에 풍부하게 배태되어 있는 정동(miarolitic cavities) 내에서 산출되고 있다. 이러한 정동의 산출은 분별작용을 강하게 경험한 마그마의 결정화단계 최후기에 휘발성성분이 풍부하게 존재하였음을 지시하고 있다.

광물 내에 포획된 유체포유물은 마그마 혹은 암석이 지질학적 진화과정(압력-온도-성분의 진화)을 겪는 동안의 어느 특정한 시점에서 암석과 상호작용을 했던 실질적인 유체(휘발성 성분)로서 현재 획득되어질 수 있는 유일한 시료이다. 특히 산성질 마그마인 경우 휘발성 성분은 마그마의 분화방향, 광물의 안정도, 광상의 형성 등에 중요한 역할을 담당하고 있다(Burnham, 1997). 유체포유물 연구에 있어서 획득되어지는 균질화 온도와 성분조성에 의해 유체의 특정한 밀도(density)가 결정되고, 유체의 밀도는 온도-압력 다이어그램에서 이 유체가 포획된 온도-압력조건을 나타내는 독특한 아이스코어(isochore)를 결정하는데 사용되어진다(Hollister, 1981). 이러한 아이스코어를 사용하여 유체포유물의 포획환경을 추정할 수 있게 된다(Parry and Bruhn, 1987; Yonkee *et al.*, 1989; Yang, 1993; Hodgkins and Stewart, 1994).

천천히 관입 화강암류와 관련된 유체포유물 연구는 광물에 포획된 유체포유물의 생성순서(the paragenesis of the inclusions)를 정확하게 측정

하기에는 불가능할 정도로 복잡하게 산출되어지는 것이 일반적이다. 이러한 복잡성은 여러 세대의 유체포유물이 복잡하게 얽혀져 있기 때문이다. 이는 세밀하고 정확한 현미경관찰에 의해 생성순서를 밝혀내는 작업이 이루어져야 한다. 본 연구에서 사용되어진 삼천포자수정에는 다행스럽게도 유체포유물의 생성순서를 알 수 있는 유체포유물 조직(texture)이 관찰되어 화강암에 관련된 유체와 자수정의 생성 환경을 추정할 수 있게 한다. 본 연구는 화강암에 배태되어 있는 정동 내에서 성장한 자수정의 유체포유물연구에 관한 것으로 모암인 화강암의 고상선 환경에서의 마그마에서 열수로 전환되는 전환기(transitional zone)와 그 이후 자수정을 형성한 열수의 진화에 초점을 두고 있다.

일반지질 및 자수정의 특징

연구지역인 경상남도 사천시 와룡산 일대에 분포하는 화강암류는 저지대에서는 반상화강암, 중간 지대에서는 반상화강섬록암, 그리고 고지대에서는 세립질 화강암이 소규모로 분포하는 수직적인 조성변화를 나타내고 있다(김건기 외, 2005). 이 지역에 분포하는 화강암류는 백악기말-제3기초에 경상분지에 형성되었던 심성암화작용의 일부로서 경상누층군의 퇴적암류와 화산암류를 관입하고 있다(지정만 외, 1983; Hong, 1987). 퇴적암류는 백악기 하양층군에 속하는 것으로 자색 내지 회색의 세일, 사질세일, 역암, 이암 등으로 이루어져 있으며, 화산암류는 유천층군에 속하는 안산암류로 용암과 응회암으로 이루어져 있다. 화강암류와 기반암과의 경계부에서 기반암은 혼펠스화 되어 있으며, 반상화강암 역시 급냉에 의한 사장석과 석영 반정들을 포함하는 반암의 조직을 보인다(김건기

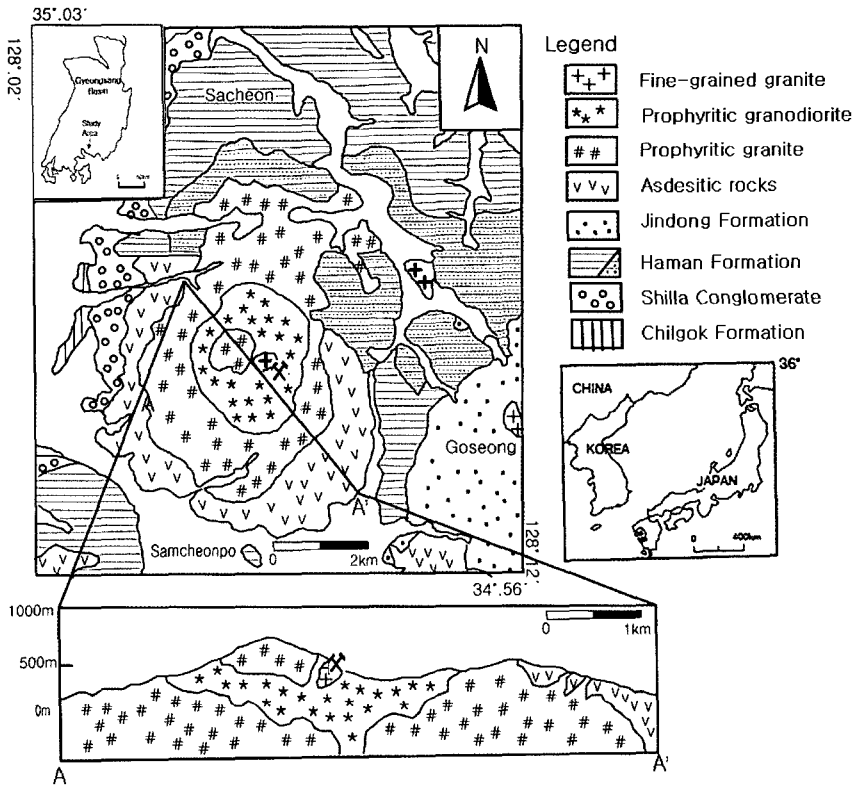


Fig. 1. Location and geological map of the study area showing the Samcheonpo amethyst mine (after Kim *et al.*, 2005).

의, 2005). 연구지역의 화강암류의 연대는 약 74 Ma (U-Pb 저어콘)를 나타내고 있다(김건기, 2006).

본 자수정 광상은 암주 상으로 분포하는 반상화강암류 내에 소규모로 분포하는 세립질 화강암에 배태되어 있는 정동 내에 성장하고 있다(그림 2). 노두에서의 반상화강암과 세립질 화강암과의 접촉관계는 매우 점이적이며, 급냉된 접촉부가 관찰되지 않는다. 세립질의 화강암은 암주의 최상부에 포켓상으로 산출되며 세립질화강암에만 유독 정동이 크게 발달하고 있다. 세립질 화강암의 주구성 광물은 정장석, 미사장석, 석영과 흑운모 등이고 견운모, 저어콘 등이 부 구성 광물이다. 석영은 타형으로 대체로 약 10~25 vol%를 차지하고 있으며, 정장석은 미문상 조적을 보여주기도 한다. 사장석은 알바이트 또는 올리고클레이스에 해당하고 선명한 알바이트 쌍정을 이룬다. 적갈색 흑운모의 함량은 5% 내외를 차지한다.

정동은 직경이 최고 1 m 정도까지의 다양한 크기로 배태되어 있으며(그림 2b), 정동 내에는 자수정 뿐만 아니라 백색의 무색수정까지 다양한 석영결정이 성장하고 있다. 정동에서 산출된 자수정들은 일반적으로 6각의 주면과 추면이 잘 발달되어져 있으며, 대부분 다결정 집합구조 형태이다. 세립질 화강암과 석영결정과의 접촉부는 점토광물화 되어 있다. 정동 내에 배태된 자형의 석영결정은 결정의 저면은 유백색에서 무색 혹은 자색으로 전환되어지는 것이 보통이다. 대부분의 자수정은 비교적 색조가 옅고 상태가 균질하지 않으며 색대(color zoning)가 뚜렷하다. 색상은 자색, 적색을 띤 자색의 이색성을 띠는 데, 채도는 약한 편이다. 자수정의 성장대가 뚜렷하게 나타나며, 성장대 부분은 대부분 점토화되어 있거나 2~3 μm 크기의 매우 작은 이차포유물이 포획되어 있다(그림 2d).

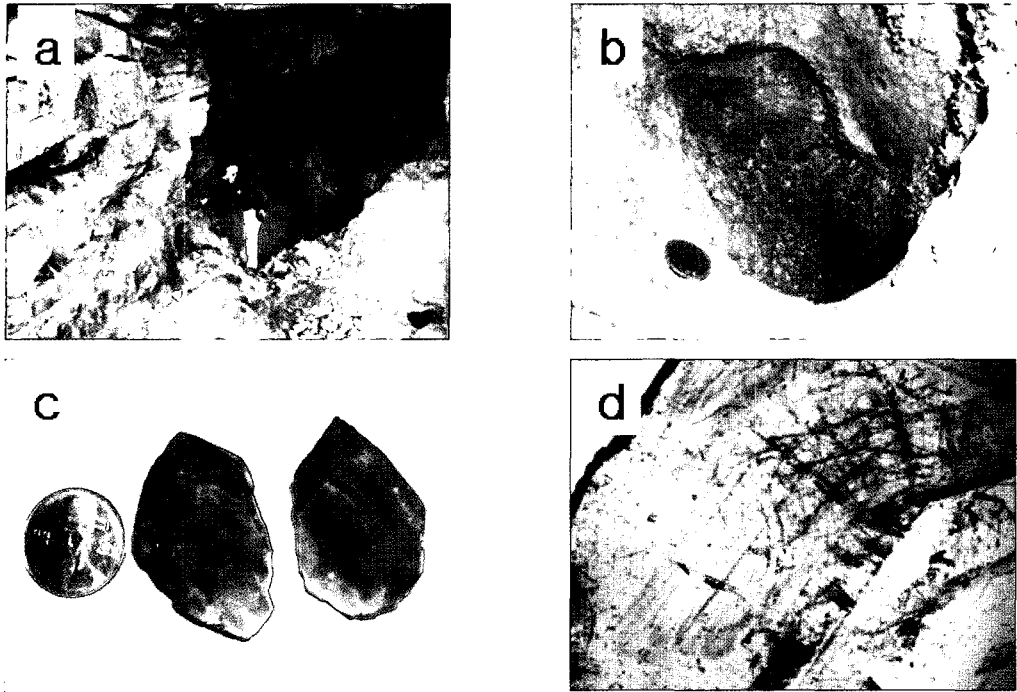


Fig. 2. Photos showing (a) a outcrop of the Samcheonpo amethyst mine, (b) a miralolitic cavity containing euhedral quartz crystals, (c) the Samcheonpo amethyst cut parallel to C-axis, and (d) the growth zones of the Samcheonpo amethyst.

실험방법

삼천포 자수정을 형성시킨 유체의 물리화학적 진화환경을 추적하기 위하여 정동 내에 산출되는 자수정에 포획된 유체포유물이 조사되었다. 유체포유물의 현미경관찰과 기재, 가열/냉각실험을 위해 두께가 대략 0.5~1 mm인 양면 연마편이 제작되었다. 보석으로서의 가치가 높은 고품위의 자수정을 시료로 얻지는 못하였지만 여러 개의 자수정에 대한 예비 관찰 결과 자수정내에 유체포유물이 다양하게 발달되어 있음이 관찰되었다. 시료로 선택된 결정은 유체포유물의 분포를 시·공간적 변화에 따라 관찰하는데 편리하도록 C축에 평행으로 잘라 시편을 제작하였다(그림 2c).

제작된 시편은 정동 벽에 붙어 있는 유백색의 하부 부분과 색대가 뚜렷한 투명한 중부 부분, 그리고 자색을 띠는 상부 부분의 세 부분으로 나누어 관찰되었다. 자수정 연마편의 현미경 관찰에 의해 초생 포유물이라고 여겨지는 (1) 독립적으로 분포하는 것, (2) 자수정의 성장선

을 의미하는 삼각형의 기하학적 형태로 분포하는 것, (3) 집합체(cluster)로 산출되는 경우 상비율(phase ratio)이 동일하게 나타나는 집단의 유체포유물만을 선택하여 냉각/가열 실험을 하였다.

유체포유물의 균질화온도와 성분을 파악하기 위한 냉각/가열 실험은 부산대학교의 Linkam Th 600 heating/cooling stage를 사용하였으며, 표준 합성 유체포유물(synthetic fluid inclusions), 순수 CO₂ (-56.6℃)와 H₂O (0℃ and 374.1℃)를 이용하여 보정되었다(Bodnar and Sterner, 1987). 가스(gas phase)를 포함하고 있지 않는 유체포유물에서 측정된 온도는 얼음이 최초 녹는 온도(Te), 얼음이 마지막으로 사라지는 온도(Tm ice), 암염이 녹는 온도(Tm halite), 균질화온도(Th total)이며, CO₂를 포함하고 있는 유체포유물인 경우 CO₂ ice가 녹는 온도(Tm CO₂), 클라스레이트가 녹는 온도(Tm clathrate)와 CO₂ 액체와 가스가 균질화되는 온도(Th CO₂), 균질화온도(Th total)가 측정되었다(표 1). 가스가 없는 유체포유물의 염도는 Bodnar *et al.* (1989)의 프

Table 1. Summary of microthermometry of fluid inclusions from the Samcheonpo amethyst

Samcheonpo amethyst	Inclusion type	Te (°C)	Tm ice (°C)	Tm clath. (°C)	Th CO ₂ (°C)	Tm Vapor (°C)	Tm Halite (°C)	Total Th (°C)	Salinity (wt% NaCl equiv.)
Upper part	IV			5	21~22	157~217		157~217	9
Middle part	IV			2~5	19~22	126~277		126~277	9~13
	I		-10~-6			122~290		122~290	9~14
	II		-7~-1			304~365		304~365	2~10
	I	-45(?)~-28(?)	-21~-7			289~359		289~359	10~23
Lower part	IIIb					259~353	181~196	259~353	31~32
						297~325	183~198	297~325	31~32
	IIIa					347~380	397~456	400(?)~510(?)	47~54

로그그램을 이용하여 추정하였고, CO₂를 함유하는 유체포유물의 염도는 Darling (1991)의 식을 이용하여 계산되었다.

결 과

상온의 현미경하에서 관찰되는 상(phase)의 거동에 의해 유체포유물은 I형, II형, III형 그리고 IV형의 네 종류로 나누어진다(그림 3). 특히 III형은 자수정의 뿌리부분에, IV형은 자수정의 중·상부 부분에서 산출되는 것이 특징적이다(그림 4).

I형: 액체가 풍부하고 기포의 크기가 50 vol%이하인 포유물(액체+기포±암염(halite)이 아닌 미세한 딸결정)로서 가열실험 시 액상으로 균질화된다(그림 3a, b). 크기는 2~60 μm으로 매우 다양하다. I형은 암염 결정이 아닌 미세한 딸결정이 포함되어 있는 것인 Ia형(그림 3a)과 딸결정이 전혀 없는 것인 Ib형으로 다시 나누어진다(그림 3b). Ia형은 모암인 화강암에 생성된 정동과 자수정과 접촉부 부분인 자수정의 뿌리부분에 포획되어 있으며, Ib형은 자수정의 중·상부 부분에서만 관찰된다(그림 4).

얼음이 최초 녹는 온도(Teice)의 측정은 포유물의 크기가 작아서 상(phase) 변화 관찰이

매우 힘들었으나, 대체로 약 -45~-28°C 근처에서 얼음이 녹기 시작되는 것으로 관찰되어졌다. 하지만 실질적인 Te ice는 이보다 더 낮은 온도에서 이미 시작했을 수도 있다. Te ice 온도가 -21.2°C보다 낮다는 것은 NaCl (halite)이 아닌 다른 종류의 염(salt) 성분이 존재하고 있음을 의미한다(Hall *et al.*, 1988). Ia형내의 얼음이 마지막으로 사라지는 온도(Tm ice)는 -21~-7°C, 균질화온도(Th total)는 289~359°C, 염도는 10~23 wt%를 나타내고 있다(표 1). Ia형의 경우 냉각실험을 하는 동안 상온에서는 존재하고 있지 않던 결정이 형성되었다가 약 7~10°C 정도에서 용융되며, 이는 냉각되는 동안 용해도가 감소되어진 성분 때문이다. Ia형에 나타나는 딸결정은 기포가 사라지고 난 후에도 균질화되지 않은 채로 남아 있는 경향이 뚜렷하다. Ib형은 Ia형에 비해 낮은 균질화온도(122~290°C)와 낮은 Tm ice 온도 (-10~-6°C)를 나타내고 있으며, 염도는 9~14 wt%이다(표 1, 그림 5, 6).

II형: 유체포유물 II형은 기포(vapor)의 크기가 50 vol% 이상을 차지하는 포유물(액체+기포±암염이 아닌 미세한 딸결정)로서 가열실험 시 기상(vapor phase)으로 균질화된다(그림 3c). 유체포유물의 크기는 30~70 μm인 것이 일반적

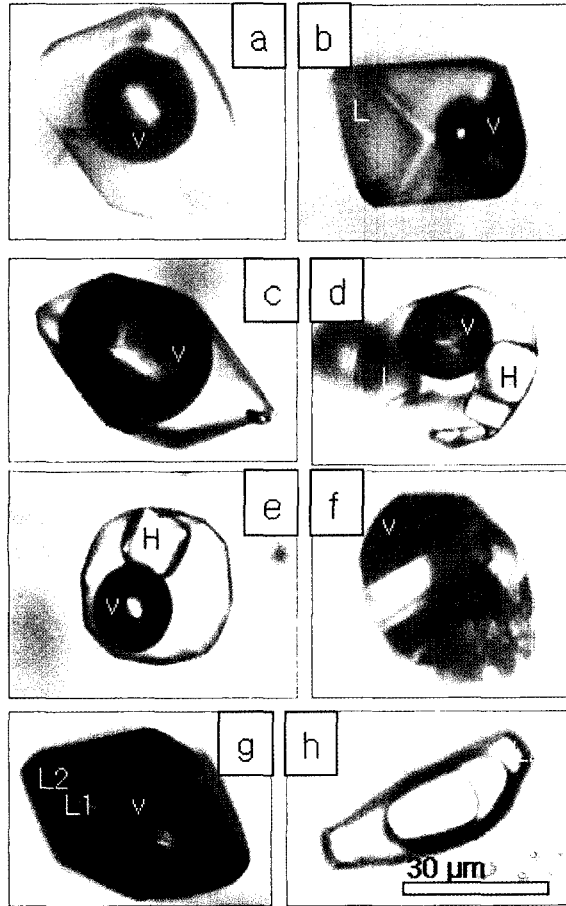


Fig. 3. Photomicrographs showing fluid inclusions trapped within the Samcheonpo amethyst. (a) Type Ia liquid-rich inclusion, (b) Type Ib liquid-rich inclusion, (c) Type II vapor-rich inclusion, (d) Type IIIa halite-bearing inclusion associated with melt inclusion, (e) Type IIIb halite-bearing inclusion, (f) Melt inclusion associated with Type IIIa halite-bearing inclusion, (g) Type IV CO₂-bearing inclusion, (h) Type IV CO₂-bearing inclusion. L= liquid, V=vapor, H=halite. The scale bar applies for each fluid inclusion and all photographs were taken at room temperature.

이다. II형의 초생포유물은 거의 자수정의 하부 부분에서 관찰된다. 얼음이 최초 녹는 온도(Te ice)는 대체로 -24~-27°C 근처에서 관찰되었으며, 얼음이 마지막으로 사라지는 온도(Tm ice)는 -7~-1°C, 염도는 2~10 wt%, 균질화온도(Th total)는 304~365°C 범위를 나타내고 있다(표 1).

III형: III형은 액체가 풍부하고 딸결정을 포함하는 포유물(액체+기포+암염±암염이 아닌 하나 이상의 미세한 딸결정)로서, 크기는 5 μm 이하에서 70 μm 까지 매우 다양하다(그림 3d, e). III형은 “halite+하나 이상의 미세한 딸결정”

을 가지는 것인 IIIa형(그림 3d)과 halite만을 딸결정으로 가지는 것인 IIIb형(그림 3e)으로 다시 분류된다. IIIa형의 대부분은 규산염 용융포유물(그림 3f)과 공간적으로 연관되어 산출되어지며(그림 4a), 가열실험시 암염보다는 기포가 먼저 사라지고 암염이 용해되면서 균질화되는 거동을 보이는 것이 특징적이다. 반면에 IIIb형은 규산염용융포유물과는 공간적으로 연관성이 없이 고립되어 산출되며 가열실험시 암염이 먼저 용해되고 그 이후에 기포가 사라지는 거동을 보인다.

IIIa형 중에 규산염 용융포유물(그림 3f)과

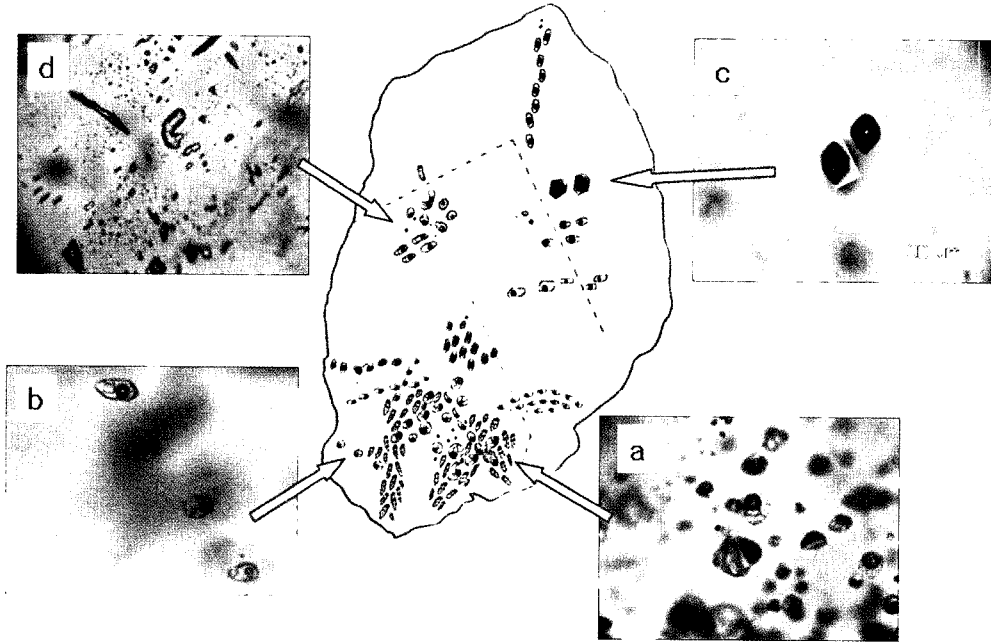


Fig. 4. Schematic representation of the distribution pattern of fluid inclusions and related melt inclusions from the Samcheonpo amethyst showing abundant inclusions at the bottom part of the amethyst and much less inclusions in the upper part. (a) Type IIIa halite-bearing inclusion associated with melt inclusion (b) Type IIIb halite-bearing inclusion without any spatial association with melt inclusion, (c) Primary Type IV CO₂-bearing inclusion, (d) Secondary Type IV CO₂-bearing inclusion.

공간적으로 연관되어 산출되는 포유물은 가열 실험시 80~90℃에서 용해되어지는 결정을 시작으로 매우 복잡한 균질화 거동을 보인다. 기포는 347~380℃에서 사라지며, 압염은 397~456℃에서 용해되어 없어지고, 그 이후에도 용해되지 않는 여러 딸결정은 400~510℃ 정도까지 가열할 때 용해되어지는 거동을 나타내지만 대부분 500℃ 근처에서 decrepitation되어 검게 변해버리는 것이 일반적이다. IIIa형이 가열되어지면서 나타내는 상변화모습과 딸결정들에 비해 기포가 더 낮은 온도에서 균질화되는 거동은 이 포유물이 상당히 높은 압력 하에서 포획되었음을 의미한다(Bodnar and Vityk, 1994). IIIb형(그림 3e)은 181~196℃에서 압염이 용해되고 기포가 사라지면서 균질화되는 온도는 259~353℃로 관찰된다. 이로부터 염도는 31~32 wt%로 계산되어진다. IIIa 포유물 중에서도 IIIb형과 유사한 균질화거동을 보이는 것은 IIIb와 유사한 균질화온도 범위와 염도를 나타내고 있다.

IV형: IV형의 유체포유물은 “액체 CO₂ + 기체 CO₂ + 수용성 액체”로 이루어져 있으며(그림 3g, h), 자수정의 상부부분에서 산출되는 것이 특징적이다(그림 4c, d). 크기는 5 μm 이하에서 80 μm 이상으로 산출된다. 초생포유물로 여겨지는 IV형은 거의 단독으로 산출되며(그림 4c), 이차 포유물은 넥킹다운(necking down)되는 모습으로 결정평면에 포획되어져 있다(그림 4d). 초생포유물인 경우 포유물 벽을 따라 소량의 수용성 액체(그림 3g의 L2)가 겨우 감지되어질 정도로 포유물은 CO₂성분으로 채워져 있는 반면, 이차포유물은 수용성 액체가 30vol %이상을 차지하고 있다(그림 3h). 초생포유물의 CO₂/H₂O의 일률적인 상비율(phase ratio)은 CO₂와 H₂O이 균질하게 하나의 상(phase)으로 용해되어 있는 온도/압력 환경에서 포획되었음을 나타내고 있다. 액체 CO₂와 기체 CO₂가 균질화 되는 온도(Th CO₂)는 19~22℃, 전체적인 균질화 온도(Th total)는 126~277℃로 측정되었다. Tm clathr 온도는 거의

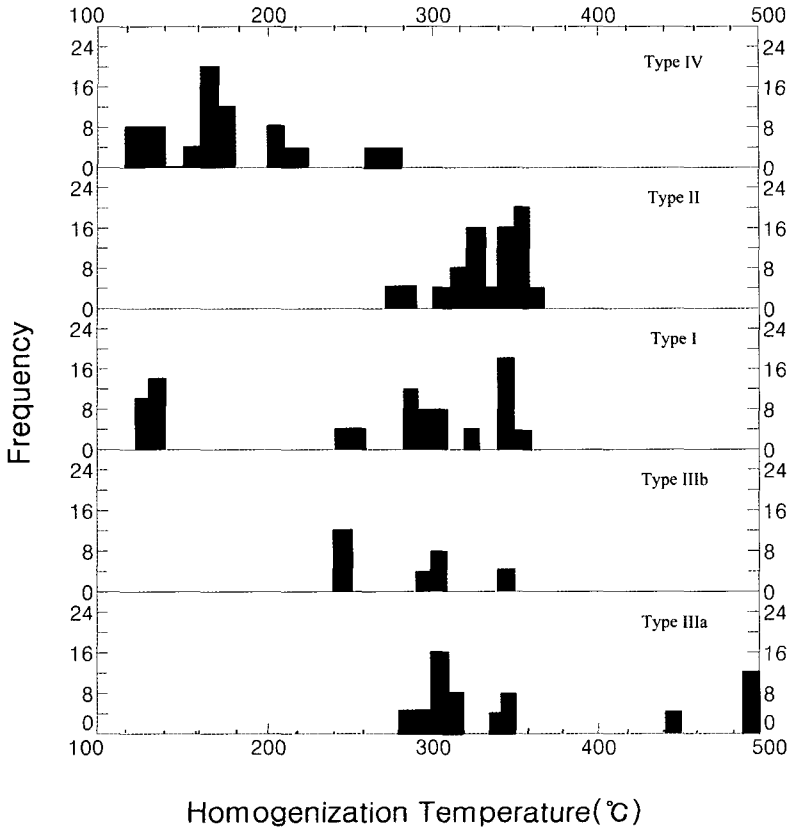


Fig. 5. Homogenization temperatures for type I, II, III, and IV fluid inclusions.

2~5°C에서 관찰되었으며, 이는 약 9~13 wt%의 염도를 나타내고 있다. 액체 CO₂와 기체 CO₂가 균질화 되는 온도(19~22°C)로부터 IV형의 포유물은 적어도 50~60 bars 보다는 높은 압력 하에서 자수정에 포획되었음을 의미한다.

토의 및 결론

삼천포 자수정광상은 반상화강암 내에 소규모로 분포하는 세립질 화강암에 배태되어 있다. 노두에서의 반상화강암과 세립질 화강암과의 접촉관계는 매우 점이적이며, 급냉된 접촉부가 관찰되지 않는다는 것, 세립질의 화강암이 암주의 최상부에 포켓상으로 산출된다는 것, 세립질 화강암에만 정동이 크게 발달하고 하는 모습은 이 암주를 형성시킨 마그마의 최후기 잔류용융체가 풍부한 휘발성성분을 포함하면서 이곳에서 완전한 결정화작용을 끝냈으므로 해석된다.

더욱이 두개의 분리된 장석결정의 산출은 와룡산의 화강암류가 물에 포획된 서브솔부스(sub-solvus)환경, 즉, 물이 풍부한 환경에서 결정화작용이 진행되었음을 의미하고 있다. 본 암주의 화강암류의 고상선 환경에서 휘발성성분이 용리되어지면서 고상선 온도를 상승시키고, 그 결과 잔류마그마는 비교적 급냉의 환경을 맞이하여 세립질의 화강암류를 만들어내고 마그마에서 용리된 열수는 정동이라는 공간을 만들었으며, 확보된 공간속에서 자수정을 형성한 것으로 여겨진다.

삼천포 자수정과 자형의 석영결정에는 4종류의 다양한 유체포유물이 포획되어 있으며, 이 네 종류의 유체포유물은 화강암의 고상선 환경에서 용리되어진 IIIa형을 시작으로 자수정 성장 최후기에는 CO₂성분을 가진 IV형의 열수가 관여한 것으로 나타나고 있다. 또한 삼천포 자수정에서 가장 뚜렷하게 관찰되는 것은 자수정

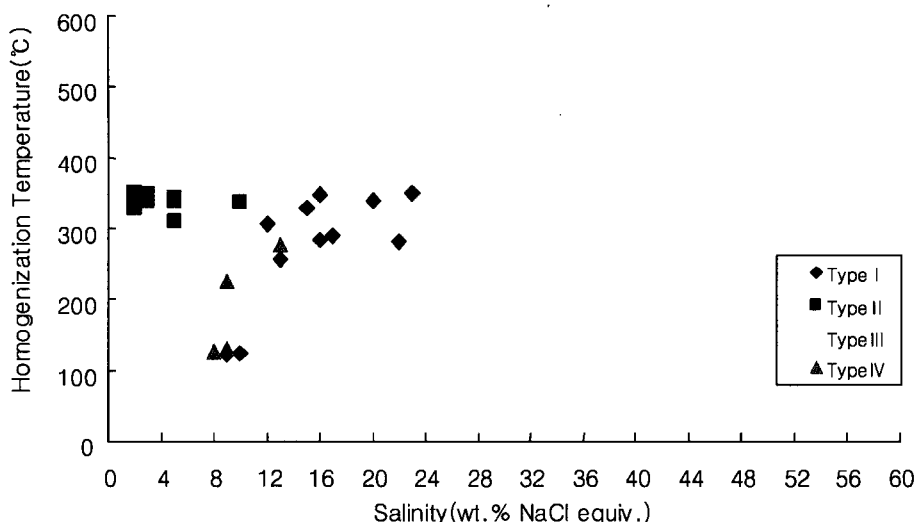


Fig. 6. Relationship between salinity (in wt.% NaCl equivalent) and homogenization temperatures for type I, II, III, and IV fluid inclusions.

의 뿌리부분에는 I, II, III형의 열수가 포획되어 있으며, 자수정의 상부에는 IV형이 포획되어 있는 것으로 마그마에서 열수기로 전환되는 시기에 열수활동이 매우 활발하였음을 보여준다. 마그마에서 용리되어지는 열수의 염도는 마그마의 성분과 용리압력 조건에 의해 가장 크게 좌우되는데(Cline & Bodnar, 1994), 열수의 염도가 점차적으로 낮아졌다는 것은 자수정이 형성되는 동안 와룡산을 구성하고 있는 화강암에 대한 압력의 요동이 없었다는 것을 의미한다.

삼천포 자수정에 포획된 유체포유물의 공간적 분포와 냉각/가열실험에 의해 얻어진 상평형 관계(phase equilibria)에 의해 자수정을 형성한 열수는 다음과 같은 진화체계를 경험한 것으로 요약되어진다. 가장 초기에 포획된 유체는 최고 54 wt% NaCl equiv. 염도와 510°C의 균질화 온도를 나타내는 IIIa형의 열수로서 규산염용융 포유물과 함께 화강암과 자수정의 접촉부에 포획되어진 것이다. 특히 자수정의 뿌리 부분에 규산염용융포유물과 IIIa형 유체포유물이 공간적인 관계를 이루고 있다는 것과 기포가 압력보다 먼저 사라지는 상변화 거동은 이 열수가 용리되어질 때는 다른 열수에 비해 비교적 고압의 상태에서 포획되었음을 의미한다(Bodnar & Vityk, 1994). 그러나 정확한 정량적인 데이터를 제시하기 위해서는 IIIa와 용융 포유물에

대한 가열실험이 동시에 이루어져야 하며 이 문제는 앞으로의 연구제목이 되어질 것이다.

그 후 염도가 다소 낮아진 그러나 여전히 높은 염도를 지닌 IIIb형, I형, II형이 마그마로부터 용리되어진 것으로 여겨지며, 이 모든 용리 사건은 자수정의 뿌리부분이 성장되는 동안 일어났다. 이 I, II, III형의 열수는 마그마에서 열수기로 전환되는 전환기의 열수로서 Na, K, Ca, Cl성분이 포획된 하이드로살린(hydrosaline) 용융체에서 용리된 것으로 여겨진다. 이런 종류의 열수는 고상선환경에서 정동내에 계속 지속되었으며, 그 이후 마그마가 완전히 끝나고 난 후 CO₂성분을 가진 IV형의 열수가 자수정 성장에 기여한 것으로 해석된다. 더욱이 자수정의 상부에 H₂O-CO₂-NaCl계를 형성하고 있던 열수가 포획되었다는 것은 그 당시에 적어도 1 kbar 정도의 압력하에 있었다는 것을 의미한다(Bowers and Helgeson, 1983; Brown and Hagemann, 1994). 적어도 3 km 깊이에서 자수정의 형성이 끝나가고 있었음을 의미하지만 이때 IV형의 열수는 마그마에서 용리되어진 것이 아니라 화강암류를 중심으로 순환하고 있던 열수가 퇴적암과의 반응에 의해 탈탄산화작용(decarbonization)에 의해 형성된 탄산가스를 함유하는 열수가 포획된 것으로 여겨진다.

감사의 글

본 논문의 부족한 많은 부분을 수정·심사하여 주신 김원사 교수님과 박맹언 교수님께 깊은 감사를 보냅니다. 또한 가열/냉각 실험, 논문의 컴퓨터 작업에 인내심을 가지고 도와준 부산대학교 지질학과 석사과정의 이주연, 남복현, 엄영보에게 깊은 감사를 보냅니다. 본 연구는 2단계 BK21사업과 2006년도 부산대학교 기초과학연구기반조성연구비지원 사업에 의해 지원되었습니다.

참고 문헌

- 김건기, 김종선, 좌용주 (2005) 경상분지 남서부 와룡산 일대에 분포하는 백악기 화강암류에 관한 암석학적 연구. *암석학회지*, 14권, 1호, p. 12-23.
- 김건기 (2006) 경상분지 백악기~제3기초 화강암류의 마그마 혼합과 불균질 혼합에 관한 연구, 경상대학교 지구환경과학과, 박사학위논문, 232p.
- 지정만, 김형식, 오인선, 김학천 (1983) 한국지질도 삼천포도폭 및 설명서, 국립지질연구소, 12p.
- 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 & Geosci.* 15, 19-41.
- Bodnar, R.J., and Vityk, M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. In *Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Applications* (B. De Vivo and M. L. Frezzotti, eds.), Virginia Tech, Blacksburg, VA, 117-30.
- Bowers, T.S. and Helgeson, H.C. (1983) Calculation of the thermodynamic and Geochemical consequences of nonideal mixing in the system H₂O-CO₂-NaCl on phase relations in geologic systems: Equation of state for H₂O-CO₂-NaCl fluids at high pressures and temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta* 47, 1247-75.
- Brown, P.E. and Hagemann, S.G. (1994) MacFlinCor: A computer program for fluid inclusion data reduction and manipulation. In *Fluid Inclusions in minerals, Methods and Applications* (B. De Vivo and M.L. Frezzotti, eds.), Virginia Tech, Blacksburg, VA, 231-50.
- Burnham, C.W. (1997) Magmas and hydrothermal fluids. In *geochemistry of hydrothermal ore deposits 2rd ed.* (H. L. Barnes, ed), John Wiley & Sons, 71-136.
- 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, 3869-71.
- Hodgkins, M.A. and Stewart, K.G. (1994) The use of fluid inclusions to constrain fault zone pressure, temperature and kinematic history: an example from the Alpi Apuane, Italy. *Jour. Structural Geol.*, 16, 85-96.
- 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, p. 1-12.
- Hong, Y. K. (1987) Geochemical characteristics of Precambrian, Jurassic and Cretaceous granites in Korea, *J. Korea Inst. Mining Geol.* 20, 35-60.
- Parry W.T. and Bruhn. R.L. (1987) Fluid inclusion evidence for minimum 11 km vertical offset on the Wasatch fault, Utah. *Geology*, 15, 67-70.
- Yang, K. (1993) Fluid inclusions from the Cretaceous-early Tertiary granitoids in the southeastern Gyeong-sang 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 the Cretaceous Kyongsang Basin, South Korea, *Mineralogical magazine*, Vol.65(4), 477-487.
- Yonkee, W.A., Parry. W.T., Bruhn, R.L. and Cashman, P.H. (1989) Thermal models of thrust faulting: Constraints from fluid-inclusion observations, Willard thrust sheet, Idaho-Utah-Wyoming thrust belt. *G. S. A. Bull.*, 101, 304-313.

2006년 8월 23일 원고접수, 2006년 9월 20일 게재승인.