

彦陽 자수정 鑛床의 成因에 관한 研究

尹錫台* · 朴喜寅**

A Study on the Genesis of Eonyang Amethyst Deposits

Seok-Tai Youn* and Hee-In Park**

ABSTRACT: The Eonyang amethyst deposits are composed of vug quartz emplaced in the Eonyang granites of Mesozoic Cretaceous age. The Eonyang granites are composed of biotite granite, porphyritic biotite granite, aplite and miarolitic granite. The petrochemical data of the Eonyang granites show the trend of subalkaline magma, calc-alkaline magma, I-type granitoid and magnetite series. The vug quartz show the characteristic growth zoning (white quartz-smoky quartz-amethyst) from wall side. Generally fluid inclusions in the vug quartz can be divided into four main types based on compositions (I-type : gas inclusion, II-type : liquid inclusion, III-type : polyphase inclusion, IV-type : liquid CO₂-bearing inclusion). Solid phase of polyphase inclusions are halite(NaCl), sylvite(KCl), hematite (Fe₂O₃) and unknown anisotropic solid. Homogenization temperatures inferred from the fluid inclusion study ranges from 440°C to 485°C in white quartz, from 227°C to 384°C in smoky quartz, from 133°C to 186°C in amethyst, respectively. Salinities of fluid inclusions in each mineralization stages ranges from 40 wt.% to 58 wt.% in white and smoky quartz, from 1.0 wt.% to 8.7 wt.% in amethyst, respectively. A consideration of the pressure regime during vug quartz deposition based on the boiling evidence suggests lithostatic pressure of less than 72 bars. This range of pressure indicate that vug quartz lay at depth of 750 m below the surface at the during mineralization.

서론

우리나라에서 자수정이 産出되는 지역은 경남 울주군 彦陽面 지역과 경북 월성군 산내면의 동골지역 그리고 속리산 근처이다. 이 중에서 경남 彦陽의 자수정광산에서 産出되는 것이 가장 양질의 자수정이다. 彦陽 자수정광산에 대한 지금까지의 연구 발표된 자료를 살펴보면 地質에 대하여는 彦陽圖幅 (이윤종, 이인기, 1972)이 발간되어 있고, 장기홍 (1970), 차문성 등 (1972), 이윤종 (1980)의 연구가 있으며, 자수정의 産出에 대하여는 박희인 (1974), 김정진 (1984), 김원사 등 (1988)의 연구가 있다. 이 연구는 우리나라에서 자수정의 가장 대표적인 산지인 경남 울주군 彦陽의 자수정 광산을 대상으로 하여 수정의 産出狀態를 조사하고, 수정이 배태된 花崗岩類에 대한 岩石學的 研究를 실시하였다. 그리고 수정을 生成時期에 따른 종류별로 채취하여 수정중에 포함된 流體包有物에 대한 실내 연구를 실시하였다. 花崗岩類에 대한 岩石學的 研究를 위하여 花崗岩類의 産出狀態, 鑛物組成, 조직등을 검토하였고, 특히 花崗岩類와 자수정과의 成因的 關係를 검토하였다. 이 광산에서 産出되는 수정에는 백

수정, 연수정, 흑수정, 그리고 자수정 등이 累帶成長하고 있는 것이 많다. 이러한 수정중에서 각 成長期를 대표하는 수정을 선택하여 각각의 수정내에 포함된 流體包有物을 연구하여 각종 수정이 생성될 때의 溫度, 壓力, 및 鹽濃度를 측정하여 수정의 生成環境 및 生成條件을 추정하였다. 특히 자수정의 生成環境을 추정하여 탐사에 이용하고자 하는데 이 연구의 목적이 있다.

일반지질

연구지역은 경상계누층이 분포하는 지역의 남동부에 해당하는 지역으로서 이 지역의 地質은 경상계 신라통의 퇴적암류를 관입 또는 분출한 주산 안산암, 이를 관입한 불국사통의 彦陽 花崗岩類, 그리고 상기 岩石을 후기에 관입한 산성 및 염기성 맥암으로 구성되어 있다 (Fig. 1). 이 지역의 지질계통을 모식적으로 도시하면 Table 1과 같다.

연구지역에 분포하고 있는 岩石들에 대하여 간략하게 기술하면 다음과 같다.

주산 안산암

연구지역의 좌측 하단부에 분포하고 있는 岩石으로서 경상계

*전남대학교 지구과학교육과 (Dept. of Earth Science Education, Chonnam National Univ., Kwangju 500-757, Korea)

**서울대학교 지질과학과 (Dept. of Geological Science, Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea)

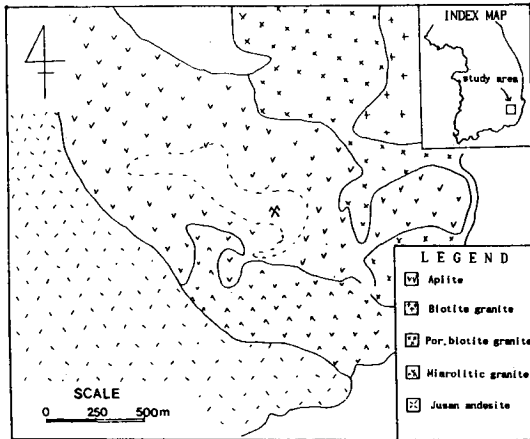


Fig. 1. Geological map of the Eonyang amethyst mine area.

Table 1. Geologic sequence of the Eonyang amethyst mine area.

Quaternary	Alluvium
	~~~~~ Unconformity ~~~~~
Cretaceous	Dyke rock
	Intrusion
	Eonyang granites
	Intrusion
	Jusan andesite

신라통의 퇴적암류를 후기에 관입한 화산암이다. 이 岩石은 彦陽 花崗岩類에 의하여 관입 당하며 彦陽 花崗岩과의 접촉부를 따라 부분적으로 열변성작용을 받아 변질대를 형성하고 있다. 편광 현미경 관찰에 의하면 이 岩石은 斜長石, 石英, 正長石의 반정이 소량 포함되어 있고, 유리질의 샤프트 (shard)와 석기로 구성되어 있으며 간혹 유동구조를 보여준다.

**彦陽 花崗岩類**

이 岩石은 彦陽圖幅에서는 彦陽 花崗岩으로 표시하였으나 본 연구에서는 세분하여 표시하기 위하여 彦陽 花崗岩類로 표시하였다. 연구지역의 대부분을 차지하는 岩石으로서 주산 안산암을 후기에 관입하고 있다. 본 지역에서는 彦陽 花崗岩類를 鑛物組成과 조직의 차이에 따라 黑雲母 花崗岩, 애플라이트, 마이아롤리틱 花崗岩, 그리고 반상 黑雲母 花崗岩 등으로 세분하였다. 黑雲母 花崗岩은 彦陽 花崗岩類의 대부분을 차지하는 岩石으로서 중립 내지 조립의 花崗岩으로 작천정 부근에 분포하며, 주성분 鑛物은 石英, 長石, 黑雲母이며 자철석 및 적철석의 不透明 鑛物을 소량 함유하고 있다. 편광 현미경 관찰에 의하면 石英은 주로 반자형을 이루며 微斜長石과 myrmekite 조직을 보여 준다. 알칼리 長石은 주로 微斜長石이며 微斜長石은 斜長石과 perthite

Table 2. Modal composition of the Eonyang granites from the Eonyang amethyst mine area.

Mineral	Biotite Granite		Por. Bio. Granite		Miaroli. Granite		Aplite	
	N-1	N-2	N-3	N-4	N-5	N-6	N-7	N-8
Quartz	29.24	28.75	30.13	28.50	33.39	32.94	31.24	31.85
K-feldspar	43.80	45.70	42.80	46.45	46.09	46.80	49.43	48.05
Plagioclase	24.96	23.50	22.75	23.15	18.50	18.98	18.90	17.96
Biotite	0.90	1.40	0.50	0.70	1.40	0.98	0.12	0.54
Sericite	0.50	0.20	0.30	0.20	0.30	0.10	0.10	0.97
Chlorite	0.10	0.10	-	0.10	0.10	-	-	0.20
Opaque minerals	0.50	0.35	0.40	0.90	0.20	0.20	0.31	0.43

를 이루기도 한다. 斜長石은 알바이트 쌍정을 보이며 소광각 측정에 의하여 組成을 구하면  $An_{5-20}$ 에 해당하여 주로 알바이트와 올리고클레스이다. 斜長石은 가끔 累帶構造를 이루기도 한다. 黑雲母 花崗岩은 작천정 서측에서 반상조직을 갖는 반상 黑雲母 花崗岩으로 접변한다. 애플라이트는 자수정 광상의 모암으로 黑雲母 花崗岩을 후기에 관입하고 있다. 이 岩石은 세립질의 石英, 長石, 黑雲母로 구성되어 있다. 대부분의 石英은 알칼리 長石과 미문상 조직을 보여 준다. 斜長石은 알바이트와 올리고클레스에 해당하며 石英과 myrmekite 조직을 보여준다. 長石은 대부분 심하게 변질을 받아 網雲母化 되어 있다. 黑雲母는 소량 함유되어 있으며 침상의 결정을 보여준다. 이 岩石에는 정동이 많이 포함되어 있는데 정동의 크기는 다양하다. 이 정동 속에는 색깔을 달리하는 여러종류의 수정들이 성장하고 있어 대단히 중요한 岩石이다. 국부적으로 石英과 長石의 반정을 갖는 반상조직을 보이기도 하며 페그마티틱 patch도 관찰된다. 마이아롤리틱 花崗岩은 黑雲母 花崗岩과 鑛物組成이 비슷하나 중립질이며 마이아롤 (miarole)을 갖는 것이 특징적이다. 마이아롤의 크기는 직경이 2cm 이하인 것이 대부분이나 간혹 수 cm 되는 것도 발견된다. 이러한 마이아롤 속에는 정동 (druse) 처럼 주위로 부터 鑛物이 성장한 것도 있다. 간혹 페그마티틱 patch나 렌즈를 갖기도 한다. 연구지역에서는 이 岩石이 黑雲母 花崗岩과 접하는 곳이 없어 선후관계가 미상이다. 반상 黑雲母 花崗岩은 鑛物組成을 보면 전술한 黑雲母 花崗岩과 비슷하나 반상조직을 갖는 것이 특징이다. 반정은 대부분이 石英과 長石이다. 작천정을 중심으로 남동-북서 방향으로 길게 분포하며 야외 조사결과 黑雲母 花崗岩과 접이적인 관계를 가지며 접변한다. 연구지역에 분포하는 彦陽 花崗岩類 중에서 일반적으로 정동 또는 마이아롤을 포함하는 岩石은 마이아롤리틱 花崗岩과 애플라이트이나 그 중에서 자수정을 포함한 정동의 產出이 가장 많은 岩石은 세립질의 애플라이트이다.

**彦陽 花崗岩類의 鑛物 및 化學組成**

Table 3. Major elements (wt.%) and normative minerals of the Eonyang granites.

Oxides	1	2	3	4	5	Average
SiO ₂	75.09	75.48	74.41	76.40	75.96	75.47
Al ₂ O ₃	13.39	13.54	13.96	13.03	13.01	13.38
FeO	0.36	0.50	0.18	0.36	0.57	0.39
Fe ₂ O ₃	0.76	0.39	0.89	0.51	0.44	0.60
MgO	0.09	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06
CaO	0.66	0.59	0.76	0.53	0.57	0.62
Na ₂ O	3.56	3.68	4.02	3.84	3.96	3.81
K ₂ O	4.66	5.15	4.85	4.89	4.53	4.82
TiO ₂	0.08	0.06	0.09	0.06	0.06	0.07
P ₂ O ₅	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
MnO	0.06	0.03	0.05	0.05	0.03	0.04
H ₂ O(+)	0.34	0.52	0.50	0.46	0.62	0.49
H ₂ O(-)	0.21	0.23	0.13	0.20	0.14	0.18
Total	99.28	100.23	99.91	100.38	99.95	
Q	35.03	32.79	30.77	34.07	34.03	33.34
Or	27.56	30.45	28.67	28.89	26.78	28.11
Ab	30.11	31.15	34.04	32.52	33.51	32.27
An	3.20	2.84	3.70	2.56	2.75	3.01
C	0.89	0.87	0.73	0.48	0.58	0.80
Fs	-	0.55	-	0.22	0.62	0.28
En	0.22	0.12	0.12	0.10	0.12	0.13
Mt	1.11	0.56	0.49	0.74	0.65	0.71
Il	0.15	0.12	0.17	0.12	0.12	0.14
Ap	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Ht	-	-	0.56	-	-	0.11
Sum	98.73	99.48	99.28	99.73	99.19	
D.I.	92.70	94.39	93.48	95.48	94.32	

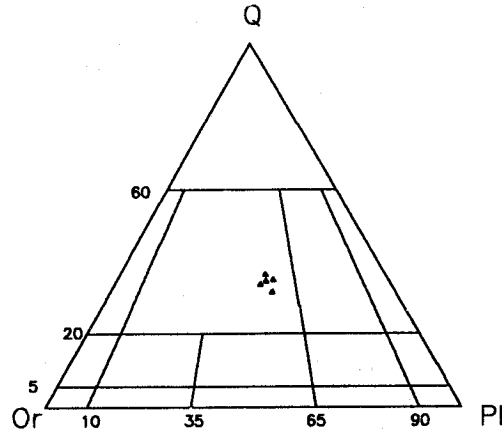


Fig. 3. Triangular diagram of normative Q-Or-Pl for the Eonyang granites based on IUGS classification.

박편을 제작하였다. 이렇게 제작된 박편을 편광 현미경하에서 관찰하여 鑛物의 모드組成을 구하였다. 각 岩石의 모드組成은 Table 2 와 같다. 각 岩石의 모드組成 결과 石英은 마이아플리틱 花崗岩에 가장 많이 함유되어 있고, 斜長石은 黑雲母 花崗岩에 가장 많이 함유되어 있다. 彦陽 花崗岩類에는 石英, 알칼리 長石, 斜長石이 主構成鑛物이고, 그의 黑雲母, 絹雲母, 綠泥石, 그리고 不透明 鑛物등이 소량 함유되어 있다. 不透明 鑛物의 종류는 주로 자철석과 적철석이다. 이러한 모드組成 결과를 가지고 Streckeisen (1976)의 Q-A-P 삼각도에 도시하면 이 岩石들은 花崗岩 영역에 해당한다 (Fig. 2).

岩石化學

모드組成을 구한 岩石시료 5개를 선정하여 각 岩石의 化學的인 특성을 검토하기 위하여 ICP를 이용하여 化學分析을 실시하였다. 主成分 元素의 분석치와 이를 바탕으로 하여 구한 CIPW 노름치는 Table 3과 같다. 彦陽 花崗岩類의 SiO₂ 함량은 74.41~76.40 wt.% 이며 분화지수 (differentiation index)는 92.70~95.48로서 암질의 변화가 심하지 않다. 전체적으로 볼 때 SiO₂의 함량과 Na₂O의 함량은 애플라이트로 가면서 함량이 증가하는 경향이 있다. 반면에 Al₂O₃, MgO, CaO의 함량은 감소하는 경향을 보인다. 이러한 사실은 產出狀態에서 처럼 수정의 產出이 많은 애플라이트가 마그마 분화 후기에 고결된 岩石임을 시사한다.

이 岩石들의 노름값 중에서 Q, Or, Pl의 양을 가지고 삼각도에 도시하면 역시 花崗岩 영역에 도시된다 (Fig. 3). 화성암류를 형성한 마그마의 유형을 알아보기 위하여 Irvine and Barager (1971)는 化學分析值 중에서 SiO₂와 Na₂O+K₂O의 함량을 가지고 알칼리암과 비알칼리암을 구분할 수 있음을 제시 하였다.

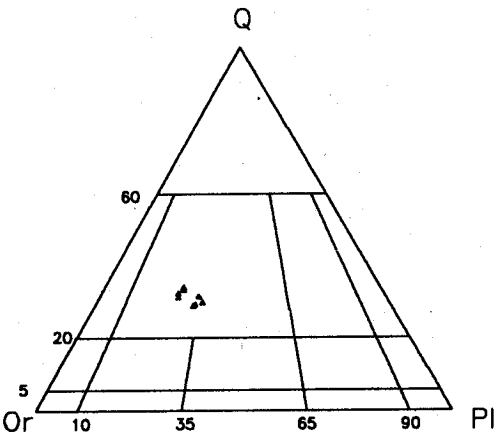


Fig. 2. Q-A-P diagram of modal composition of the Eonyang granites based on IUGS classification.

鑛物組成

야의 지질조사 및 향내 조사를 실시하여 채취한 岩石 시료 중에서 각 岩石의 특징을 가장 잘 나타내는 시료를 선택하여

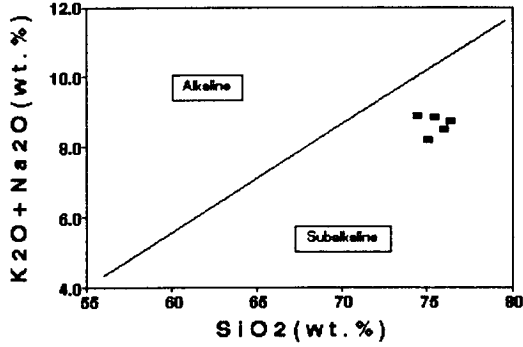


Fig. 4. Plots of  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  vs  $\text{SiO}_2$  in wt.% for the granites. The boundary line is based on Barager (1971).

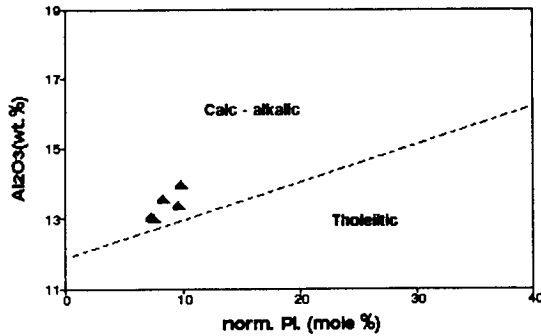


Fig. 5. Plots of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (wt.%) vs normative Pl of the Eonyang granites. The boundary line is based on Irvine and Barager (1971).

이 방법으로 도시한 결과 연구지역의 花崗岩類는 모두 비알칼리암 계열에 속한다 (Fig. 4). 또 노름 Pl에 대한  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 함량을 가지고 Irvine and Barager (1971)의 방법을 이용하여 표시하면 彦陽花崗岩類는 모두 칼크알칼리암에 해당한다 (Fig. 5).

Chappell and White (1974), White and Chappell (1977)은 花崗岩類를 형성한 기원물질의 차이에 따라 I-type granitoid와 S-type granitoid로 분류하였다. I-type granitoid는 화성 기원의 물질이 부분용융되어 형성된 花崗岩類이다. 化學組成의 특징을 살펴보면  $\text{Na}_2\text{O}$ 의 함량이 3.2 wt.% 이상으로 상대적으로 높고, molal  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}$ 의 비가 1.1 이하로 낮으며, Ca의 함량이 풍부하다. 특히 CIPW 노름치 가운데 corundum의 함량이 1% 이하이며 atomic  $\text{K}/\text{Na} + \text{K}$ 의 비율이 낮은 특성을 갖는 花崗岩類이다. 반면에 S-type granitoid는 퇴적기원의 물질이 부분용융되어서 생성된 花崗岩類로서 다음과 같은 특징이 있다. I-type granitoid와 비교하여 상대적으로  $\text{Na}_2\text{O}$ 의 함량이 3.2 wt.% 이하로서 낮고, molal  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}$ 의 함량비가 1.1 이상이며, CIPW 노름치 가운데 corundum의 함량이 1% 이상이며, Ca의 함량이 낮으며 atomic  $\text{K}/\text{Na} + \text{K}$ 의 비율이

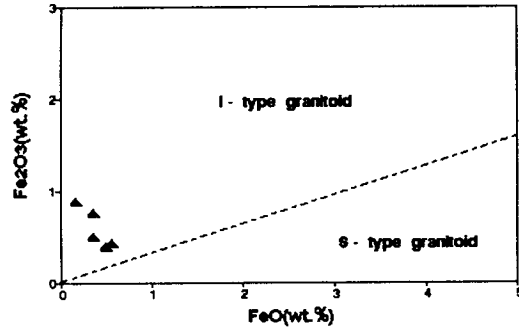


Fig. 6. Plots of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  vs  $\text{FeO}$  in wt.%. The boundary line based on Hine et al (1978).

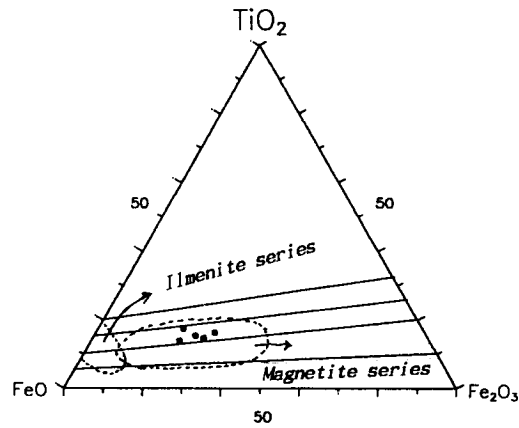


Fig. 7.  $\text{TiO}_2$ - $\text{FeO}$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (mole%) diagram of the Eonyang granites. The boundary lines are based on Tsusue and Ishihara (1974).

높은 특징을 갖는 花崗岩類이다. White and Chappell (1977)은 S-type granitoid는 I-type granitoid에 비하여 퇴적되는 도중에 원암내에 존재하는 탄소나 황으로 인하여 환원 환경에 놓이게 되어 상대적으로  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 의 비가 낮다고 보고하였다. 이러한 사실에 근거하여 Hine 등 (1978)이 제안한 방법을 이용하여 도시하면 이 花崗岩은 역시 I-type granitoid에 해당한다 (Fig. 6).

Tsusue and Ishihara (1974), Ishihara (1977, 1981)는 花崗岩의 산화정도를 알 수 있는 방법으로서 化學分析值 중에서  $\text{TiO}_2$ - $\text{FeO}$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 를 이용한 삼각도를 이용하여 자철석 계열과 일메나이트 계열로 구분하였다. 연구지역의 花崗岩類는 백악기 불국사 花崗岩類와 동일하게 자철석 계열에 해당한다 (Fig. 7).

### 流體包有物 研究

#### 수정의 產出狀態

수정은 애플라이트나 마이아롤리틱 花崗岩 중에서만 產出된

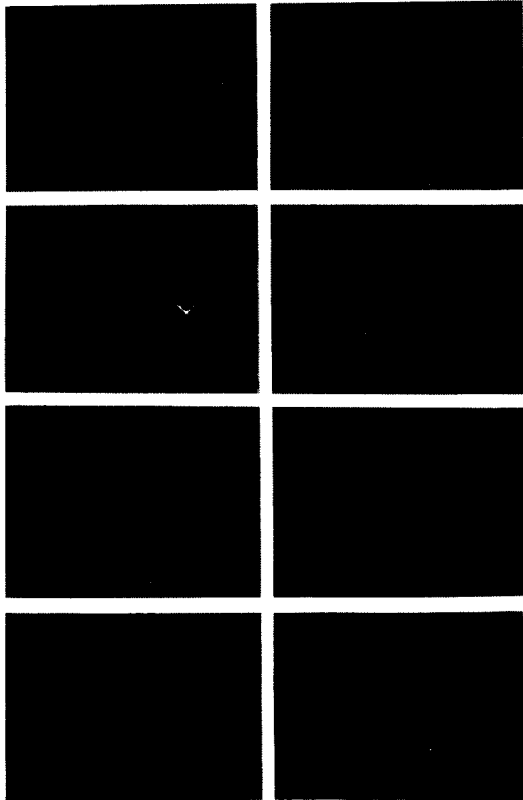


Fig. 8. Microphotographs of fluid inclusions. A; Type I inclusion, B; Type II inclusion, C,D,E,F and G; Type III inclusion, H; Type IV inclusion, L; liquid phase, G; gas phase, HA; halite, SY; sylvite, HM; hematite, AS; anisotropic solid, LCO₂; liquid CO₂.

다. 그러나 자수정의 대부분은 애플라이트에서 產出되기 때문에 애플라이트에 대해서만 기재하고자 한다. 수정이 產出되는 정동이 밀집된 부위는 현 광산 사무소 근처로서 관광을 목적으로 향내에 입항 할 수 있도록 시설이 되어 있다. 수정의 정동은 애플라이트에 발달되어 있는 페그마티틱 patch 나 렌즈에 형성되어 있는 것이 특징적이다. 이러한 페그마티틱 patch 는 애플라이트에서 정동쪽으로 가면서 문상구조대-長石 및 石英帶-수정대의 순서로 累帶構造를 갖는 것이 일반적이다. 애플라이트 중에서 페그마티틱 patch 가 존재하는 부위에 근접하면 岩石의 색깔은 담황색 또는 황갈색을 띤다. 이러한 부위의 岩石을 가지고 박편을 제작하여 편광현미경에서 관찰하면 퍼다이트(perthite) 를 주로 하는 알칼리長石의 함량이 높게 나타난다.

정동은 크기가 다양하다. 큰 것은 장축이 1 m 까지 되는 것도 있으나 대체적으로 장축은 10~30 cm, 단축은 10~20 cm 의 정동이 제일 많다. 정동이 밀집되어 분포하고 있는 지역을 구조적으로 규제한 구조가 무엇인지는 확인하지 못하였다. 애플라이트

트에 포함된 정동에서는 백색수정, 무색 투명한 수정, 연수정, 흑수정, 그리고 자수정등의 여러가지 색깔의 수정이 產出된다. 아울러 단일결정 내에서도 여러가지 색깔의 累帶構造를 이루고 있는 것이 많다. 이러한 色帶를 갖는 결정을 보면 色帶가 결정 표면과 평행배열을 하는 것으로 보아 色帶가 수정의 성장대에 해당하는 것으로 생각된다. 정동의 벽에 부착되어 성장한 단일 수정은 累帶成長하고 있다. 초기 성장한 최하부는 무색투명 또는 연색반투명 하며 그 상부는 백색반투명대, 그 위는 연색대, 최상부는 자색대로 색깔의 累帶構造를 보인다. 이와같은 產出狀態로 보아 자수정은 최말기에 성장한 수정이다. 色帶의 累帶構造를 보이는 단일결정에서 자수정 부분은 추면과 주면의 최상위부에 평행으로 성장하여 송이버섯 모양을 하거나 추면이나 주면의 일부에 평행연정을 이루며 부착되어 성장하고 있는 것이 특징이다. 이와같이 累帶成長한 수정을 선정하여 流體包有物 연구를 수행하였으며 특히 자수정 부분에 관심을 갖고 연구를 수행하였다.

**流體包有物의 분류**

流體包有物을 생성시기에 따라 분류하면 初生 包有物, 擬二次 包有物, 二次 包有物로 분류할 수 있다. 전술한 바와 같이 연구 지역의 수정은 共生鑛物이나 色帶의 차이로 보아 몇개의 생성 시기로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 주로 色帶를 보이며 累帶成長한 수정을 선택하여 편광현미경 관찰을 통하여 流體包有物의 형태, 充填度, 組成등을 검토한 다음 各帶를 대표할 수 있는 初生 包有物을 선정하여 다음과 같이 분류하였다.

**I형 包有物(氣相+液相):** 氣相과 液相으로 이루어진 包有物로서 液相의 充填度は 30~40% 이다. 이 包有物은 수정의 뿌리 부분에서 연수정 부분까지 初生 包有物로서 광범위하게 포함되어 있다. 이 流體包有物의 크기는 30~50 μ이 대부분이며 가열 실험시 氣相으로 均一化 된다 (Fig. 8-A).

**II형 包有物(液相+氣相):** 液相과 氣相으로 이루어진 流體包有物로서 液相의 充填도가 70~80% 정도로서 가열 및 냉각 실험시에 액체 CO₂ 가 관찰되지 않는 包有物이다. 연수정과 자수정 부분에서 初生 包有物로서 포함되어 있으며, 백수정 부분에서는 二次 包有物이다. 流體包有物의 크기는 30~100 까지 다양한 크기를 가지고 있으며 가열 실험시 液相으로 均一化 된다 (Fig. 8-B).

**III형 包有物(液相+氣相+固相):** 液相, 氣相 및 固相의 多相으로 구성된 流體包有物로서 각 상의 용적비는 液相, 氣相, 固相 순이다. 결정의 성장면에 평행하게 배열되어 있는 것이 대부분이다. 수정의 근저부에서 연수정 부분까지 포함되어 있으나 자수정

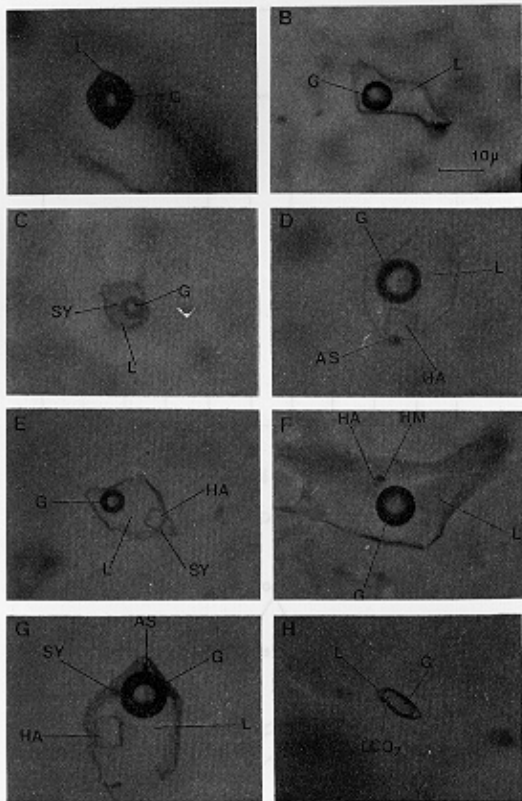


Fig. 8. Microphotographs of fluid inclusions. A; Type 1 inc-

Table 4. Homogenization temperatures and salinity of fluid inclusions.

Quartz	Inc. type	No. of tested inc.	Homoge. T(°C)	Salinity(wt.%)
White Qtz	I	13	440~485	
	III	15	400~	40~58
Smoky Qtz	I	14	224~384	
	II	10	227~315	15~28
	III	14	405~440	40~58
Amethyst	IV	11	240~295	
	II	18	133~186	1.0~8.7

부분에서는 관찰되지 않는다. 투명수정과 연수정 부분에서 初生 包有物로 생각되며 流體包有物의 크기는 50~200  $\mu$ 까지 다양하며 비교적 큰 것이 많다. 固相은 daughter mineral 이 대부분이다. daughter mineral 로는 편광현미경 하에서 광학적 등방성인 것과 이방성인 것이 있다. 등방성인 것은 결정의 모양이 입방체 인 halite (NaCl)와 부정형인 sylvite (KCl) 등이 있다. 이방성 固相중에는 간혹 적철석의 결정이 관찰된다 (Fig. 8-C,D, E,F,G).

**IV형 包有物(液相+氣相+액체CO₂):** 累帶成長 하고 있는 단일 결정의 자수정 하위부에서 액체 CO₂ 를 포함한 流體包有物이 관찰되는 것으로 보아 자수정에서의 初生 包有物로 생각된다. 일부 包有物은 편광현미경하에서 관찰시 실온에서는 液相包有物과 유사하나 냉각실험시 액체 CO₂ 가 확인되는 것도 있다. 액체 CO₂와 液相의 充塡度는 약 20~30 wt.% 정도 된다 (Fig. 8-H).

#### 均一化溫度

수정은 생성시기에 따라 백수정 연수정 자수정의 순서대로 정출하였다. 초기에 정출한 백수정에는 初生 包有物로 I형 包有物과 III형 包有物이 포함되어 있다. 중기에 정출한 연수정에는 初生 包有物로는 III형 包有物이고, 擬二次 包有物으로는 I,II형 包有物이 관찰된다. 연수정에는 비교적 후기 즉 자수정이 생성되기 전에 液相으로 均一化되는 II형 包有物과 氣相으로 均一化되는 I형 包有物이 밀접하게 관련되어 공존하는 경향이 관찰된다. 이러한 현상을 연수정이 생성되는 동안 沸騰이 일어났음을 시사한다. 沸騰이 일어나는 동안 鑛化流體의 증기압은 주위 압력과 같기 때문에 이 시기에 포획된 流體包有物은 압력 보정이 필요하지 않다. 따라서 均一化 溫度가 포획된 鑛化流體의 溫度가 된다. 최말기에 정출한 자수정에는 初生 包有物로 II형과 IV형 包有物이 존재한다. 백수정에 포함된 流體包有物 중에서 I형 包有物의 均一化 溫度는 440~485°C, III형 包有物의 均一化 溫度는 液相이 均一化되는 溫度는 측정이 불가능 하였다. 그러나 대체적으로 400°C에서 均一化 된다.

연수정에 포함된 流體包有物 중에서 I형 包有物의 均一化 溫

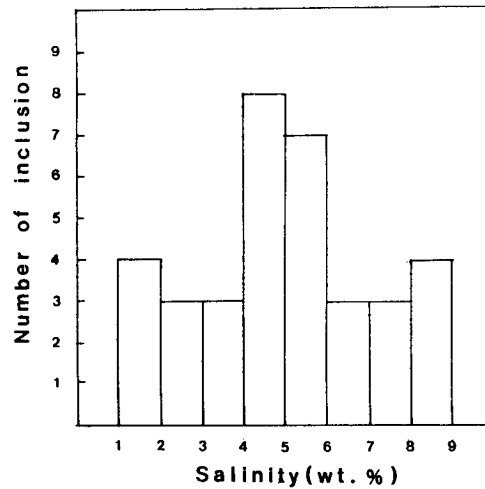
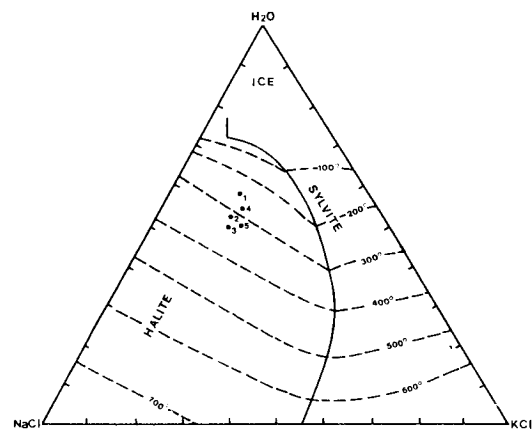


Fig. 9. Salinities of type II inclusions of amethyst.

Fig. 10. Triangular diagram of NaCl-KCl-H₂O system (Roedder, 1971).

도는 224~384°C, II형 包有物의 均一化 溫度는 227~315°C 이다. 그리고 III형 包有物은 백수정과 같이 液相과 氣相이 均一化 되는 溫度의 측정이 불가능 하였다. 그러나 固相중에 카리암염이 용해되는 溫度는 60~82°C, 암염이 용해되는 溫度는 184~256°C 이다. 백수정과 자수정에 포함된 III형 包有物중에서 암염과 카리암염과 암염이 용해되는 溫度는 측정이 가능하지만 氣相과 카리암염이 녹는 溫度는 鹽濃度를 구하는 중요한 자료가 된다. 자수정에 포함된 流體包有物 중에서 II형 包有物의 均一化 溫度는 133~186°C, 액체 CO₂를 포함하고 있는 IV형 包有物의 均一化 溫度는 240~295°C이다. 수정의 종류에 따라 均一化 溫度는 차이가 있다. 즉 백수정에서 연수정을 거쳐 자수정으로 가면서 均一化 溫度가 하강하는 경향을 보인다. 각 수정별로 측정된 均一化 溫度를 정리하면 Table 4와 같다.

**鹽濃度**

각 수정에 포함된 I형 包有物의 NaCl 상당 鹽濃度는 Roedder (1962, 1963)의 방법을 이용하여 측정하였다. Fig. 9에서 보 여지는 바와 같이 자수정에 포함된 II형 包有物의 NaCl상당 鹽濃度는 1.0~8.7 wt. % 에 해당한다. 반면에 연수정에 포함된 II형 包有物의 NaCl 상당 鹽濃度는 15.0~28.0 wt. %로서 연수정에서의 鹽濃도가 자수정에서 보다 높게 나타난다.

연수정과 백수정에 포함된 III형 包有物은 암염과 카리암염 또는 異方性 固相을 함유하고 있다. III형 包有物은 암염과 카리암염의 daughter mineral 을 가지고 있기 때문에 빙점강하를 이용하여 NaCl상당 鹽濃도를 측정하면 鹽濃도에 차이가 생긴다. 따라서 암염과 카리암염이 용해되는 溫度를 이용하여 Roedder (1971)가 제시한 방법을 이용하여 鹽濃도를 구하여야 한다. Fig. 10과 같이 H₂O-NaCl-KCl 삼각도에 암염과 카리암염이 용해되는 溫度를 표시하여 구한 NaCl 상당 鹽濃도는 40~58 wt. %로써 매우 높게 나타난다. NaCl 상당 鹽濃도 측정 결과 수정중에서 초기에 정출한 부분에서 연수정을 형성한 鑛化流體는 高鹽濃도를 나타내지만 자수정을 형성한 鑛化流體는 8.7 wt. % 이하의 낮은 鹽濃도를 나타낸다. Shoji and Than (1990)은 일본에 분포하는 많은 광상들을 연구한 결과 多相 包有物을 포함하는 包有物은 花崗岩質 貫入岩과 성인적으로 밀접한 관련이 있는 것으로 보고하였다. 또 Ahmad and Rose (1980)는 Santa Rita 광상과 반암동광상에 대한 流體包有物 연구결과 高鹽濃도를 나타내는 流體包有物을 형성한 열수는 마그마 기원으로 보고한 바 있다. 따라서 연구지역에서 產出되는 백수정과 연수정을 형성한 열수용액은 彦陽 花崗岩類를 형성한 마그마로부터 유래된 마그마 기원의 열수에서 형성되었을 것으로 생각된다. 균질한 鑛化流體가 진화과정에서 다른 성질을 갖는 유체로 변화할 수 있는 요인으로는 鑛化流體의 沸騰과 천수의 혼입을 생각할 수 있다. 연구지역의 流體包有物은 연수정이 정출되는 시기에 鑛化流體의 沸騰이 관찰된다. 따라서 연수정이 정출되면서 유체의 沸騰이 일어나면서 鹽濃도가 상대적으로 낮아지고, 낮은 鹽濃도를 갖는 鑛化流體에서 자수정이 정출되었을 것으로 생각된다. 이러한 현상은 流體包有物중에서 액체 CO₂ 를 갖는 包有物의 결과와도 일치한다. Shoji and Than (1990)은 高鹽濃도를 갖는 鑛化流體가 低鹽濃도를 갖는 鑛化流體로 변화하면서 CO₂가 농집된다고 보고하였다. 즉 高鹽濃도를 갖는 鑛化流體가 沸騰이 일어나면서 低鹽濃도를 갖는 鑛化流體로 변화하고, 동시에 鑛化流體에서 분리되어 농집된 CO₂가 자수정을 정출하는 시기에 유체속에 trap 되어 액체 CO₂상으로 되는 것이다. 연구지역에서 產出되는 수정중에서 연수정과 자수정의 경계부위에서 관찰되는 流體包有物중에 액체 CO₂ 를 갖는 流體包有物이 관찰되는 것과 잘 일치한다. 연구지역에서 產出되는 수정중에 포함된 流體包有物은 일반적으로 均一化 溫度가 높으면 鹽濃도도 높아지는 경향을 보

인다. 이러한 현상은 거의 대부분의 열수광상에서 보이는 결과와 동일하다.

**鑛床의 成因에 대한 考察**

**모암과의 관계**

彦陽 花崗岩類중 수정을 배태하고 있는 岩石은 대부분 애플라이트이다. 애플라이트내의 정동에서 발달한 수정내의 流體包有物의 연구를 통하여 모암인 애플라이트와 자수정광상의 성인적인 관계를 추정할 수 있다. Olsen and Griffin (1984a, 1984b)은 花崗岩內에 정동이 많으면 花崗岩이 결정작용을 하는 동안에 유체가 풍부하였음을 지시한다고 보고하였다. 애플라이트내에는 크고 작은 정동들이 다량 발달하고 있다. 이것은 마그마에서 鑛物들이 정출되어 화성암을 만들 때 마그마 속에 유체가 풍부하였음을 뜻한다. 彦陽 花崗岩類를 검토한 결과 이 岩石들은 비알칼리암이고, 칼크알칼리암에 속한다. 또한 화성기원의 I-type granitoid 이며, 자철석계열에 속하는 岩石이다. 지금까지 보고된 여러 연구 결과에 의하면 한국에 분포하는 광상중에서 백악기 화성활동에 수반되어 형성된 광상들의 관계화성암은 거의 대부분 I-type granitoid 이며, 자철석계열에 속한다. 流體包有物 연구결과 수정 중에서 초기에 해당하는 백수정에 포함된 流體包有物은 高鹽濃도를 보인다. 일반적으로 高鹽濃도를 보이는 鑛化流體는 마그마 기원의 열수에 해당한다. 따라서 流體包有物 연구결과와 化學組成을 검토한 결과 자수정광상의 모암인 애플라이트와 자수정과는 성인적으로 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다.

**鑛床의 生成溫度**

彦陽地域에 분포하는 彦陽 花崗岩類에는 정동이 많이 발달하고 있다. 彦陽花崗岩類中에서 애플라이트에는 정동이 특히 우세하게 발달한다. 정동에 발달하고 있는 수정에 포함된 流體包有物의 充填溫度는 다음과 같다.

백수정에서 初生 包有物로 생각되는 I형 包有物은 440~485 °C에서 均一化된다. 백수정이 정출한 시기에는 沸騰이 관찰되지 않아 均一化溫度에 압력보정을 하여야 生成溫度로 사용할 수 있다. 그러나 압력보정을 위한 자료가 충분하지 않다. 따라서 백수정이 정출할 때의 溫度는 均一化溫度 보다는 높았을 것으로 추정된다.

연수정이 정출한 시기는 氣相으로 均一化되는 I형 包有物과 液相으로 均一化되는 II형 包有物이 밀접하게 관련되어 產出된다. 전술한대로 이러한 원인은 유체가 포획될 당시에 沸騰이 있었음을 지시한다. 沸騰이 일어나는 동안 鑛化流體의 증기압은 주



위압력과 동일하기 때문에 압력보정이 필요하지 않다. 따라서 初生 包有物로 생각되는 I형 包有物과 II형 包有物의 均一化溫度가 연수정이 생성된 溫度로 간주할 수 있다. 그러므로 연수정이 생성될 때의 溫度는 대체적으로 약 224~384°C로 생각된다. 자수정은 가장 후기에 정출한 것으로 채굴 對象鑛物이다. 자수정이 정출할 때는 初生 包有物이 II형 包有物과 IV형 包有物이다. 이 중에서 전기에는 액체 CO₂를 포함한 IV형 包有物이 포획되었고, 후기에 液相으로 충진되는 II형 包有物이 포획되었다. 자수정이 정출할 때의 溫度는 압력보정을 필요로 한다. 그러나 대체적으로 300°C 이하의 비교적 낮은 溫度에서 자수정이 정출하였을 것으로 생각된다.

### 鑛床의 生成壓力과 生成深度

鑛化流體의 압력조건은 流體包有物 연구를 토대로 추정할 수 있다. 전술한 바대로 沸騰證據를 보이는 연수정이 정출할 때의 均一化溫度는 압력보정이 필요하지 않다. 따라서 이 때의 溫度를 이용하여야 가장 실제의 溫度에 근접한 溫度를 구할 수 있다.

따라서 유체의 압력을 알 때 덮고 있던 岩石의 두께 즉 수정이 정출된 장소의 심도를 추정할 수 있고, 그 위치에 있어서의 유체의 최대압을 추정할 수 있게 된다.

전술한대로 沸騰證據를 보이는 광화층기에 해당하는 연수정에 포함된 流體包有物의 均一化溫度와 鹽濃度 자료를 가지고 Haas (1971)가 제시한 방법을 이용하여 광상이 생성될 때의 대체적인 생성압력을 구할 수 있다. 광화작용이 일어나는 동안 유체의 밀도를 0.92 g/cm³, 均一化溫度의 평균치는 약 300°C, 鹽濃度の 평균치는 약 20 wt. %이다. 이 자료를 이용하여 구한 정수압은 약 72 bars이다. 이 정수압은 연수정이 정출할 때의 평균 압력이기 때문에 자수정이 정출할 때의 정수압은 이보다 낮은 상태에서 정출하였을 것이다. 이 압력을 생성심도로 환산하면 약 750 m이다.

### 鑛化流體의 化學組成

연구지역에서 產出되는 수정을 각 정출시기별로 鹽濃度を 측정하고 결과 시기별로 鹽濃度の 차이가 현저하게 나타난다. 광화초기에 정출한 백수정에 포함된 流體包有物의 鹽濃度は 40~58 wt. %이다. 광화중기에 해당하는 연수정에 포함된 流體包有物의 鹽濃度 역시 40 wt. % 이상의 高鹽濃度を 유지하다가 沸騰이 일어나면서 국부적으로 15~28 wt. %로 낮아진다. 沸騰이 일어난 후에는 갑자기 低鹽濃도가 되어 이 시기에 자수정이 정출하였다. 광화작용동안에 鹽濃度の 변화 양상은 광화후기로 가면서 낮아지는 경향이 뚜렷하다. 鹽濃도가 낮아지는 원인은 沸騰이 크게 영향을 주었을 것으로 생각되나 천수가 혼입되었는

지는 검토가 필요하다.

## 결론

彥陽 자수정광상에 대한 연구결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 彥陽 자수정광상 주변에는 경상계 신라통의 퇴적암류를 관입 또는 분출한 주산 안산암과 이를 관입한 불국사통의 彥陽 花崗岩類로 구성되어 있다. 彥陽 花崗岩類는 黑雲母 花崗岩, 반상黑雲母 花崗岩, 애플라이트, 마이아몰리틱 花崗岩 등으로 구성되어 있다.
2. 岩石化學적인 연구 결과 彥陽花崗岩類는 비알칼리암, 칼크 알칼리암, I-type 花崗岩, 자철석 계열에 속하는 岩石이다.
3. 수정은 대부분 애플라이트에 포함된 정동에서 產出되나 마이아몰리틱 花崗岩 중의 페그마티틱 patch나 lens중에서도 약간 產出된다.
4. 수정속에 포함된 流體包有物은 I형 包有物, II형 包有物, III형 包有物, IV형 包有物로 구분되며 包有物중 固相은 암염 및 카리아염 또는 異方性 固相이다. 異方性 固相 중에는 간혹 적철석의 결정이 관찰 된다.
5. 연수정 중에는 I형 包有物과 II형 包有物이 공존하는 것으로 보아 최소한 연수정 형성 당시 沸騰이 있었던 것으로 생각한다. 이 때의 압력은 72 bars, 생성 심도는 약 750 m 정도이다.
6. 수정이 생성될 때의 均一化 溫度는 백수정의 경우 I형 包有物은 440~485°C, 연수정의 경우 II형 包有物은 약 227~315°C, I형 包有物의 경우 224~384°C이다. 자수정의 경우 II형 包有物은 133~186°C에서 均一化된다.
7. 백수정, 연수정 부분에는 암염이나 카리아염의 固相이 존재하며 이때의 열수 용액의 鹽濃度は 40.0~58.0 wt. %로 급격한 鹽濃度の 변화를 보인다.
8. 流體包有物 연구 결과 자수정 정출시의 溫度는 133~186°C이며, 鹽濃度は 1.0~8.7 wt. %이다.

## 참고문헌

- 김정진 (1984) 연양자수정광산에 관한 연구. 부산대 논문집, v. 37, p. 357-360.
- 김원사, 신현숙, 이선숙 (1988) 彥陽자수정의 내포물에 관한 연구. 한국광물학회지, v. 1, p. 83-93.
- 박희인 (1974) 우리나라산 수정의 產出狀態와 정출환경에 관한 연구. 서울대학교
- 이윤중, 이인기 (1972) 彥陽도록 설명서. 국립 지질 조사소
- 이운중 (1980) 彥陽 및 울산지역 花崗岩질암류의 岩石化學적 연구. 광산지질, v. 13, p. 69-79.
- 장기홍 (1970) 경상북도에 있어서의 상부 중생대층의 지질. 지질학회지, v. 6, p. 1-12.
- 차문성, 김정진, 윤선 (1972) 부산시 일원 彥陽-동래지역의 화성활동과 광화작용에 관한 연구. 광산지질, v. 5, p. 151-162.
- Ahmad, S.N. and Rose, A.W. (1980) Fluid inclusions in porphyry

- and skarn ore at Santa Rita, New Mexico. *Econ. Geol.*, v. 70, p. 229-250.
- Chappell, B.W. and White, A.J.R. (1974) Two contrasting granite types. *Pacific Geol.*, v. 8, p. 173-174.
- Hass, J.L. (1971) The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Econ. Geol.*, v. 66, p. 940-946.
- Hine, R., Williams, I.S., Chappell, B.W. and White, A.J.R. (1978) Contrast between I-type and S-type granitoids of Kosciako batholith. *Jour. Geol. Soc. Australia*, v. 25, p. 219-234.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. Jour. Earth Sci.*, v. 8, p. 523-548.
- Ishihara, S. (1977) The magnetite series and ilmenite series granitic rocks. *Mining Geol.*, v. 27, p. 293-305.
- Ishihara, S. (1981) The granitoid series and mineralization. *Econ. Geol.*, 75th Anniv. vol., p. 458-484.
- Olsen, K.I. and Griffin, W.L. (1984) Fluid inclusion studies of the Drammen granite, Oslo paleorift, Norway. I. Microthermometry. *Contr. Min. Petrol.*, v. 87, p. 1-14.
- Olsen, K.I. and Griffin, W.L. (1984) Fluid inclusion studies of the Drammen granite, Oslo paleorift, Norway. II. Gas and leachate analyses of miarolytic quartz. *Contr. Min. Petrol.*, v. 87, p. 15-23.
- Roedder, E. (1962) Studies of fluid inclusion I: Low temperature application of a dual-purpose freezing and heating stage. *Econ. Geol.*, v. 57, p. 1045-1061.
- Roedder, E. (1963) Studies of fluid inclusion II : Freezing data and their interpretation. *Econ. Geol.*, v.58, p. 667-708.
- Roedder, E. (1971) Fluid inclusion studies on the porphyry type ore deposits at Bingham, Utah, Butte Montana and Climax, Colorado. *Econ. Geol.* v. 66, p. 98-120.
- Streckeisen, A.L. (1976) To each plutonic rocks and its proper name. *Earth Sci. Rev.*, v. 12, p. 1-33.
- Shoji, T. and Than, Z. (1990) Fluid inclusions of granitoids and their bearing on mineralization in south Korea. *Jour. Kor. Inst. Min. Geol.*, v. 23, p. 127-133.
- Tsusue, A. and Ishihara, S. (1974) The Iron-titanium oxides in the granitic rocks of south-west Japan. *Mining Geol.*, v. 24, p. 13-30.
- White, A.J.R. and Chappell, B.W. (1977) Ultrametamorphism and granitoid. *Tectonophy.*, v. 43, p. 7-22.

---

1994년 7월 14일 원고접수