

가사도 화산성 천열수 금은광상의 열수변질대 분포 및 성인: 탐사에서의 적용

Hydrothermal Alteration and Its Genetic Implication in the Gasado Volcanic-hosted Epithermal Gold-Silver Deposit: Use in Exploration

김 창 성 (Chang Seong Kim)¹ · 최 선 규 (Seon-Gyu Choi)^{1*} ·
최 상 훈 (Sang-Hoon Choi)² · 이 인 우 (In Woo Lee)³

¹고려대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-701, Korea)

²충북대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea)

³대한광업진흥공사

(Korean Resources Corporation, Seoul 156-706, Korea)

요약: 가사도 지역 금은광상은 후기 백악기 화산활동에 의해 형성된 화산쇄설암을 모암으로 하여 판상(sheeted) 및 망상(stockwork) 석영맥으로 산출되며, 빗살, 호상 및 깃털조직 등을 보이고 있다. 금은광화작용과 관련된 열수변질대는 광물 조합에 따라 고점토대(딕카이트-명반석-석영), 점토대(딕카이트-석영), 견운모대(석영-견운모-황철석) 및 프로필리틱대(녹니석-탄산염광물-석영-장석-휘석)로 구분된다. 고점토대는 등대맥 최상부인 노인봉을 중심으로 분포하고 있으며, 그 외각부에서 견운모대 및 프로필리틱대가 산출되고 있다. 석영맥은 석영, 옥수질석영, 아둘라리아, 탄산염광물 등의 맥석광물과 함께 미립의 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 함은광물, 에렉트럼 등 광석광물로 구성되며, 에렉트럼의 금함량은 14.6~53.7 atomic % Au이다.

유체포유물 및 에렉트럼-섬아연석 지질온도계로부터 추정된 광화작용 온도는 158°~285°C 범위로 전형적인 천열수광상의 온도범위를 보이고 있으며, 산소·수소 안정동위원소 연구 결과($\delta^{18}\text{O}_{\text{water}} = -10.1 \sim -8.0\%$, $\delta\text{D} = -68 \sim -64\%$) 동위원소 교환이 적게 진행된 천수로부터 유래된 광화유체로 추정된다. 이러한 변질대의 분포특성, 열수유체의 기원 및 생성환경을 종합해 볼 때, 현재 지표에 노출된 가사도 지역의 광화대는 온천형 저유황성 천열수 금은광상의 최상부에 해당하는 것으로 추정된다.

주요어: 금은광상, 저유황형, 천열수, 열수분출형, 아둘라리아

ABSTRACT: The gold-silver deposits in the Gasado district were formed in the sheeted and stockwork quartz veins which fill the fault fractures in volcanic rocks. K-Ar dating of alteration sericite (about 70 Ma) indicates a Late Cretaceous age for ore mineralization. These veins are composed of quartz, adularia, carbonate, and minor of pyrite, sphalerite, chalcopyrite, galena, Ag-sulfosalts (argentite, pearceite, Ag-As-Sb-S system), and electrum. These veins are characterized

*교신저자: seongyu@korea.ac.kr

by chalcedonic, comb, crustiform and feathery textures. Based on the hydrothermally altered mineral assemblages, regional alteration zoning associated with mineralization in the Gasado district is defined as four zones; advanced argillic (kaolin mineral-alunite-quartz), argillic (kaolin mineral-quartz), phyllic (quartz-sericite-pyrite) and propylitic (chlorite-carbonate-quartz-feldspar-pyroxene) zone. Phyllic and propylitic zones is distributed over the study area. However, advanced argillic zone is restricted to the shallow surface of the Lighthouse vein. Compositions of electrum ranges from 14.6 to 53.7 atomic % Au, and the depositional condition for mineralization are estimated in terms of both temperature and sulfur fugacity: $T=245^{\circ}\sim 285^{\circ}\text{C}$, $\log f_{\text{S}_2}=10^{-10}\sim 10^{-12}$. Fluid inclusion and stable isotope data show that the auriferous fluids were mixed with cool and dilute ($158^{\circ}\sim 253^{\circ}\text{C}$ and 0.9~3.4 equiv. wt. % NaCl) meteoric water ($\delta^{18}\text{O}=-10.1\sim -8.0\text{‰}$, $\delta\text{D}=-68\sim -64\text{‰}$). These results harmonize with the hot-spring type of the low-sulfidation epithermal deposit model, and strongly suggest that Au-Ag mineralization in the Gasado district was formed in low-sulfidation alteration type environment at near paleo-surface.

Key words : Au-Ag deposit, low-sulfidation, volcanic-hosted, hot-spring type, adularia

서 언

한반도 서남부 지역은 백악기 불국사 화산활동(103~85 Ma)과 관련된 다양한 화산성 열수 변질대가 광범위하게 분포하고 있으며(Koh *et al.*, 2000), 가사광상, 옥출광산, 성산광산, 부곡광산, 옥매광산, 해남광산, 덕천광산, 구시광산 및 노화광산 등 다수의 광산에서 납석 및 명반석의 생산이 보고된 바 있다(조한익, 문희수, 1978). 또한, 최근 전라남도 해남-진도지역에서 금은광산(은산지역)이 개발됨에 따라 이러한 화산성 천열수 금은광산에 대한 관심이 증대되고 있다(이인우 외, 2001). 진도 서측에 위치한 가사도 광화대는 화산암 지대의 전형적인 캐올린-명반석 변질대와 함께 다수의 석영맥이 확인되었고 고유황형 천열수 금은광상으로 보고된 바 있으며(고상모 외, 1992), 1999년부터 대한광업진흥공사에 의해 시추 탐광이 수행된 바 있다(강홍석, 2000; 이인우 외, 2000). 본 연구에서는 가사도 남부지역의 열수변질대 및 석영맥에 대하여 1999년과 2000년 실시된 등대맥 및 등대동맥에 대한 지표 및 시추시료를 대상으로 편광 및 광석현미경 관찰, XRD, EPMA 및 SEM분석을 통하여 열수변질대에 대한 광물학적 연구와 함께 광석광물의 공생관계를 비교 검토하였고, 유체포유물 및 안정동위원소 실험 연구를 통한 광화유체의 기원 및 진화과정과 함께 금은 광화작용시 물리·화학적 생성환경 변화에 따른 부존특성을 규명하고자 한다.

지질 및 광상개요

일반지질

가사도 지역의 지질은 주로 백악기 불국사 화산활동과 관련된 응회암류 및 퇴적암류로 이루어져 있으며(Fig. 1), 하부로부터 가사응회암류(래필리 응회암, 퇴적암류, 석영안산암질 응회암, 결정질 응회암, 유리질 응회암)와 이를 후기에 관입한 석영안산암 및 석영맥 등의 암맥류로 구성된다(김상욱, 윤윤영, 1971; 강홍석, 2000; 이인우 외, 2000). 본 지역과 동일시기로 대비되는 진도지역 화산암 중 응회암과 유문암의 K-Ar연대는 각각 73.9~76.3 Ma 및 72.5~75.4 Ma로 보고된 바 있다(Kim and Keisulce, 1992).

래필리 응회암은 담회, 담녹, 담갈, 녹회색을 띠는 유문암 내지 석영안산암에 해당되며, 1~6 cm 정도의 석영안산암질 부석암편, 퇴적암편 및 화산회암의 기질로 구성된다. 석영맥 부근에서는 열수변질작용에 의한 규화작용 및 건운모화작용이 관찰되며, 특히, 상향 조립화하는 경향과 함께 탄화목편이 발견되어 육성환경에서 분출하였음을 지시하고 있다(이인우 외, 2000). 퇴적암류는 응회암질 사암, 실트암 및 이암의 호층으로 구성되며, 석영안산암질 응회암 내에 협재하고 있어 응회암의 퇴적 휴지기에 이차적으로 형성된 것임을 지시한다. 가사도 남부지역에 광범위하게 분포하는 담녹회 내지 녹회색을 띠는 석영안산암질 응회암은 분급이 불량하며 석

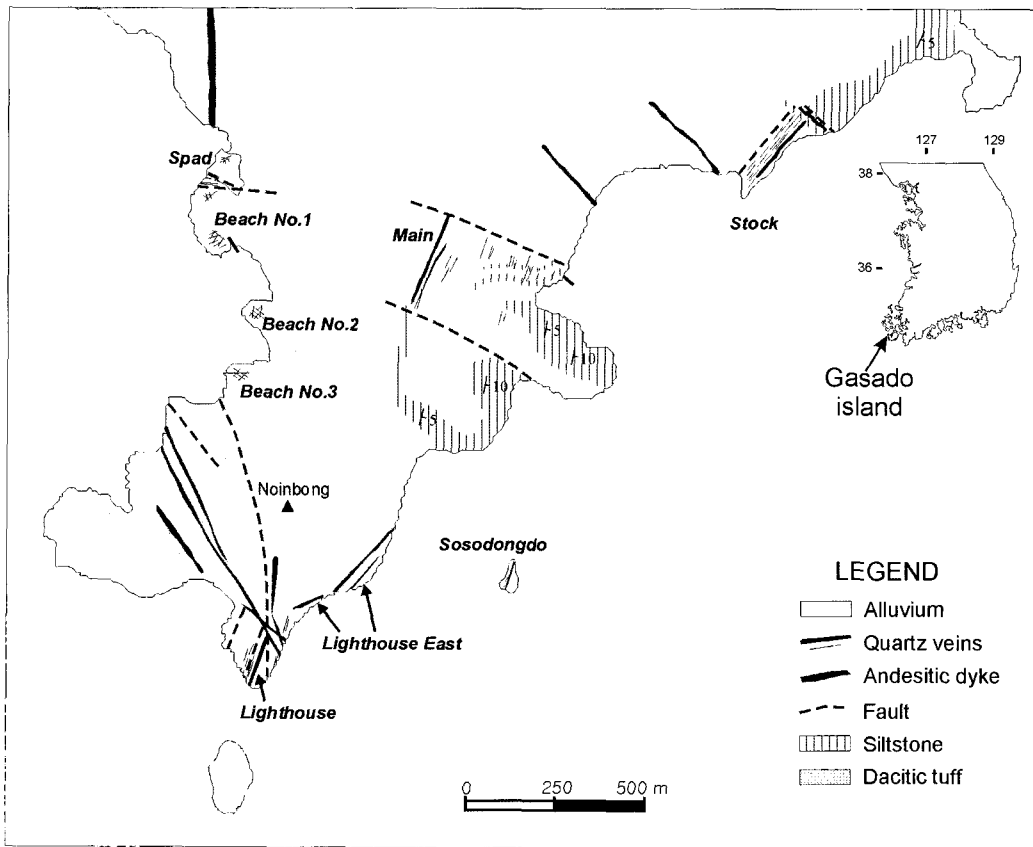


Fig. 1. Geological map of the southern part in the Gasado island.

영, 장석 및 흑운모 반정이 관찰된다. 노인봉을 중심으로 고도 40 m 이상 지역에 주로 분포하는 결정질 응회암은 담회색 내지 회색을 띠며 하부의 석영안산암질 응회암과 정합의 관계를 보인다. 본 암은 석영, 장석, 부석 및 퇴적암편 등의 반정과 함께 기질은 화산회로 구성되며, 첨가화산력이 관찰되기도 한다. 노인봉 정상부에 소규모로 발달하는 유문암 성분의 담회, 백, 황, 홍색을 띠는 유리질 응회암은 세립 응회암, 조립 응회암 및 래필리 응회암이 교호되어 층리가 잘 발달된다. 본 암은 열수변질작용에 기인한 고점도 변질작용의 광물조합(명반석, 석영, 디카이트 및 적철석)을 보인다.

석영안산암은 가사응회암류를 관입하고 있으며, 장석 반정과 함께 석영, 장석, 흑운모, 녹니석, 방해석 및 황철석 등으로 구성된다. 암회 내지 암녹색을 띠는 중성~염기성의 암맥류는 0.7~2.0 m 정도의 폭으로 산출되며, 사장석, 각섬

석 및 부분적으로 휘석으로 구성된다. 본 암맥은 등대동맥을 절단하고 있어 금은 광화작용 이후에 관입하였음을 시사하고 있다.

광상개요

석영맥은 주로 가사도 남부지역에 분포하고 있으며(강홍석, 2000), 등대맥, 등대동맥, 스파드맥, 스파드북맥, 스톡맥, 비치1,2,3호맥 등으로 구분된다(Fig. 1). 특히, 노인봉을 중심으로 표층부에 유백색내지 적갈색의 납석 변질대가 분포하며, 등대맥 및 등대동맥 등 다수의 합금 석영맥이 분포하고, 석영맥 주변부를 따라 규화작용이 확인된다. 등대맥 및 등대동맥의 주향과 경사는 N10°E, 70°N(등대맥), N60°E, 65°N(등대동맥)이며, 주로 관상 및 망상맥의 특성을 보인다(Table 1). 맥폭은 수십 cm에서 수 m까지 다양하며, 극미립~세립질의 황철석, 섬아연석, 황

Table 1. Characteristic features of Lighthouse and Lighthouse east veins

| | Lighthouse vein | Lighthouse east vein |
|------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Commodities (Fineness, Avg.) | 0.1 ~ 469.8, 34.57 | 0.1 ~ 129.7, 28.41 |
| Vein system | sheeted ≫ stockwork | sheeted ≈ stockwork |
| Strike and dip | N10E, 70N | N60E, 65N |
| Vein texture | | |
| Chalcedonic | *** | **** |
| Banded | **** | ** |
| Bladed | - | ** |
| Vuggy | ** | - |
| Feathery | ** | * |
| Vein minerals | quartz ≫ calcite | quartz ≥ calcite |
| Characteristic minerals | alunite, adularia | calcite, dolomite, adularia |

동석 등이 산점상으로 산출된다. 등대맥과 등대동맥에서 옥수질석영과 함께 빗살, 각력, 정동 및 호상조직 등이 우세하게 발달하며, 경하에서 깃털 및 치환조직 등이 관찰된다(Fig. 2a, b). 석영의 입자 크기는 대체적으로 등대맥이 등대동맥에 비하여 조립화하는 경향을 보이고 있으나, 전체적으로는 0.5 mm 이하의 세립질이 우세하다. 특히, 등대동맥의 상부에서 판상 방해석 및 판상 석영이 확인되며, 이러한 조직은 전반적으로 천연수 광상에서 CO₂ 비등현상을 암시하는 특징적인 조직이다. 금은 품위는 등대맥에서 2.3 g/t Au 및 109.9 g/t Ag와 등대동맥에서 0.9 g/t Au 및 196.1 g/t Ag로, 매장량은 등대맥에서 468,700 t과, 등대동맥에서 397,500 t으로 보고된 바 있으며(이인우 외, 2000), 변질대의 견운모에 대한 K-Ar연대는 70.1 ± 2.1과 70.5 ± 2.1 Ma이다(Koh *et al.*, 2000).

분석 방법

열수변질대 및 석영맥에서 산출되는 광물조합의 변화양상 및 화학조성을 파악하기 위하여 X-선 회절분석, EPMA 및 SEM 분석을 실시하였다. X-선 회절분석은 고려대학교 전략광물자원 연구센터(CMR)의 MXP3A-HA(MAC Science사)를 사용하였으며, 분석 조건은 CuK α (1.54056 Å), 가속전압 40 kV이며, 4 deg/min의 주사속도로 3~60° 범위에 대하여 분석하였다. EPMA 및 SEM 분석은 고려대학교 전략광

물자원연구센터(CMR)의 JXA-8600(JEOL Ltd.)을 사용하였으며, 변질광물은 가속전압 15 kV, 전류 10 nA, 직경 5 μ m의 조건으로, 황화광물 및 에렉트럼은 가속전압 20 kV, 시료전류 2.5 nA (PCD mode)에서 분석하였으며, 정량분석은 Oxford eXII EDS를 이용 live time 100초간 측정 후 ZAF법으로 보정하였으며, 에렉트럼은 α -factor로 보정하였다.

열수변질대

금은광상 주변부에서는 견운모가 광범위하게 산출되며, 석영맥 부근에서는 강한 규화작용을 받아 고지대를 형성하고 있으며, 특히, 등대맥의 상부에는 부분적으로 명반석, 디카이트, 석영으로 이루어진 변질대가 분포한다(Table 2). 시추시료를 통하여 확인된 열수변질대의 변화양상은 등대맥의 상부 시추시료에서는 석영맥 접촉부를 따라 수 mm 범위의 디카이트가 확인되었으나, 등대맥의 하부 시추시료 및 등대동맥에서는 존재하지 않는다. 또한, 녹니석 및 녹립석은 주로 광맥의 최외각 주변부에 분포하는 경향을 보인다. 이러한 열수변질대의 수직적 변화는 등대맥을 중심으로 유입된 열수유체의 조성변화에 기인한다. 이러한 변질광물 상의 조합에 따라 열수변질대는 석영맥을 중심으로 한 점토대, 견운모대 및 프로펠리틱대와 지표부근의 고점토대로 구분할 수 있다.

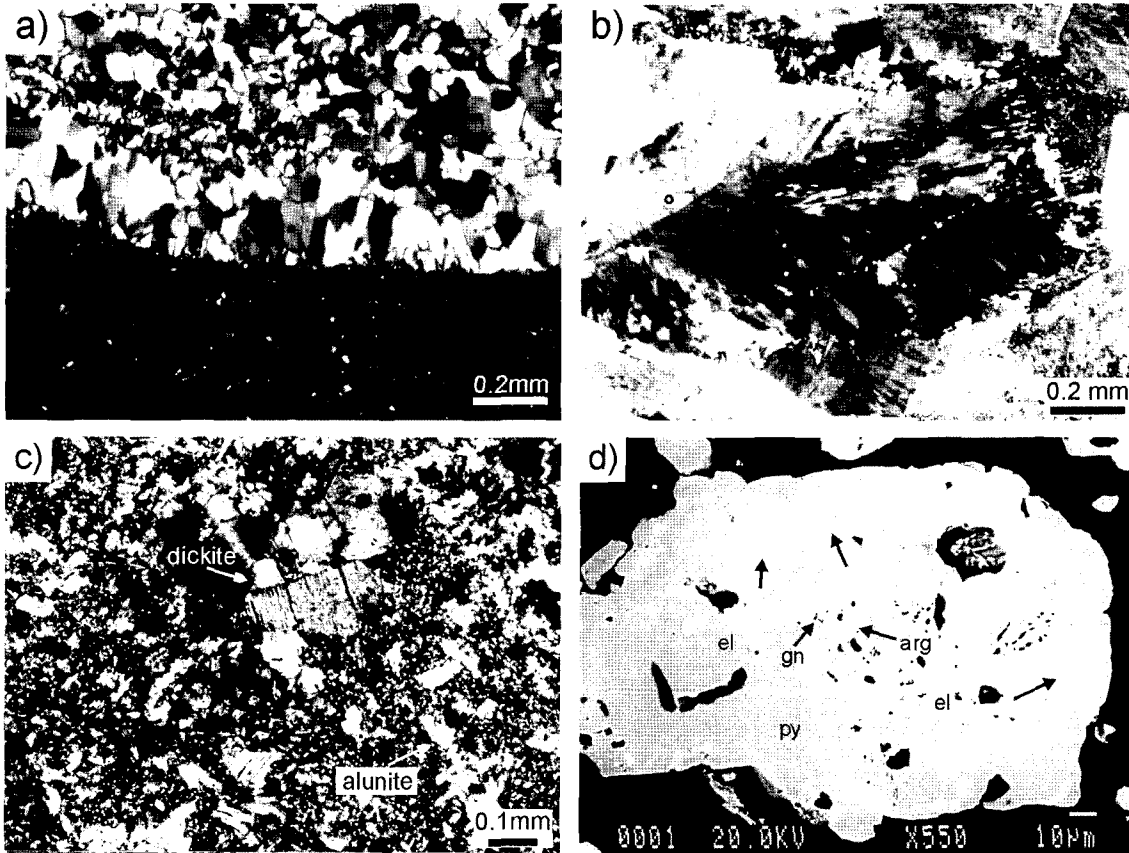


Fig. 2. Microphotographs showing the vein textures, alteration and ore minerals at the Gasado deposit; a) chalcedonic and crustiform texture, b) feathery texture, c) dickite, alunite and quartz (matrix), d) BEI of electrum(el) coexisting with galena(gn) and argentite(arg) in pyrite(py), arrows in (d) point to light parts by substitution of As for Fe in pyrite.

Table 2. Mineralogy of alteration zones in the Gasado district

| Alteration zone | Mineralogy | Depth |
|------------------------|--|-------|
| Advanced argillic zone | dickite + alunite + quartz | upper |
| Argillic zone | dickite + quartz (\pm sericite) | upper |
| Phyllic zone | sericite + quartz + pyrite (\pm dickite) | lower |
| Propylitic zone | chlorite + calcite + epidote + sericite + quartz | lower |

열수변질대의 특징

고점토대

딕카이트, 명반석 및 석영과 함께(Fig. 3a) 부분적으로 적철석이 산출하며 육안관찰시 유백색에서 적갈색을 띤다. XRD분석 결과 암상에 따라 광물간의 구성비를 서로 달리하고 있다. 명반석의 산출은 광화유체의 비등현상에 따른

CO₂, SO₄ 등 휘발성 물질의 농집에 따른 열수 유체의 pH 감소에 기인한 것으로 추정된다.

점토대

고점토대와 명반석의 존재 유무에 따라 구분되며, 석영, 딕카이트, 견운모, 정장석 및 황철석 등의 황화광물로 구성된다. 지표에서는 고점토대의 주변부에 동심원상으로 분포하며 유백

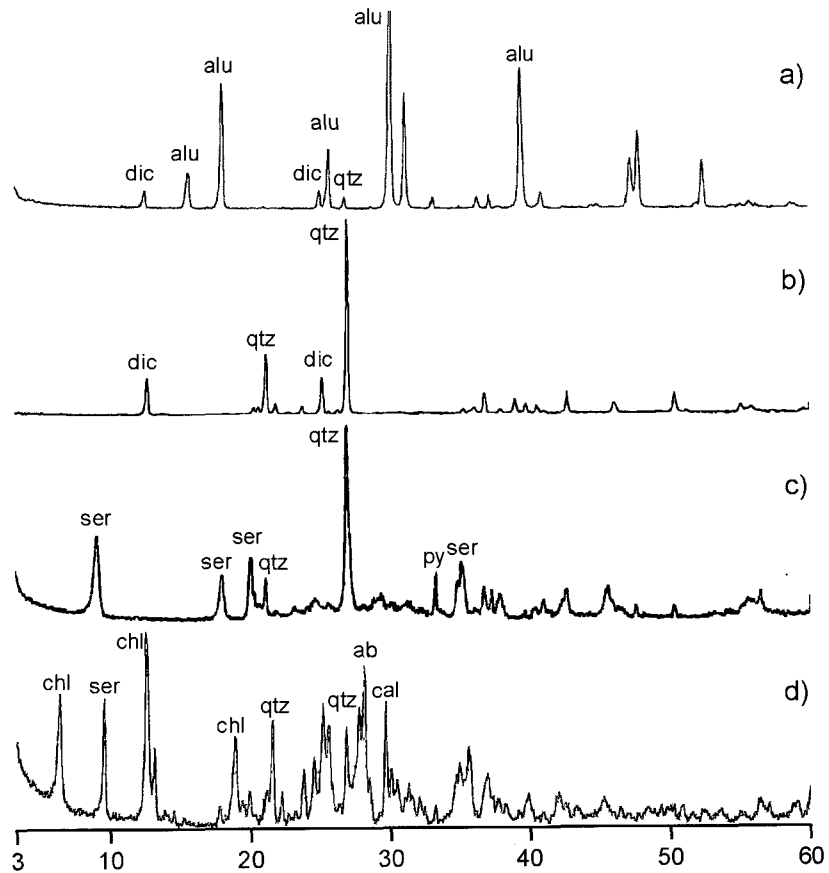


Fig. 3. XRD patterns of alteration zones. a) advanced argillic zone, b) argillic zone, c) phyllic zone, d) propylitic zone. ab: albite, alu; alunite, cal; calcite, chl; chlorite, dic; dickite, py; pyrite, qtz; quartz, ser; sericite.

색을 띠고, 석영맥 접촉부 수 mm의 국한된 범위에서 산출시 황철석 등 광석광물에 의해 회색으로 나타나며, 반정을 형성하는 장석은 대부분 견운모 및 디카이트로 변질되어 있다. XRD 분석에서는 석영-디카이트의 단순한 광물조합을 보이며, 일라이트도 소량 함유되어 있다(Fig. 3b).

견운모대

석영, 견운모 및 황철석의 단순한 광물들로 구성되며, 육안관찰시 담회색을 띤다. 석영맥을 중심으로 점토대와 점이적인 접촉을 하며 가사도 지역 변질대의 대부분을 구성한다. 점토대와는 디카이트의 유무로 구분된다. XRD분석 결과 일라이트-석영-황철석의 존재가 확인되었으며, 점토대와 마찬가지로 심한 규화작용에 의해

석영의 피크가 매우 크게 나타나고 있으며, 33° (2θ) 부근에서 황철석의 피크를 인지할 수 있다 (Fig. 3c). 석영맥으로부터 멀어질수록 열수변질 작용의 약화로 장석의 상대적인 함량이 증가하는 경형을 보인다.

프로필리틱대

녹니석, 방해석, 녹렴석, 석영 및 일차 광물인 장석, 휘석 등으로 구성되어 담녹-회녹색을 띠며, 모암의 일차 광물이 타 변질대보다 다수 포함되어 있는 경향을 보인다. 변질대의 최외각부를 형성하고 있어 지표에서는 일부지역에서만 확인되며, 견운모대의 외각에 분포한다. XRD분석을 통하여 변질광물인 녹니석-방해석 이외에도 정장석-사장석의 일차 광물이 동정되었다 (Fig. 3d). 휘석과 녹렴석은 현미경에서 소량 함

유된 것이 확인되었다.

열수변질광물의 산상 및 화학조성

아둘라리아

해남지역에서 처음 발견된 아둘라리아는 맥의 특정 광화기에 국한되어 산출되며, 정장석, 사장석에 대한 염색실험(Ruperto *et al.*, 1964)과 EPMA 정량분석을 통하여 확인하였다. 주사전자현미경(SEM) 관찰결과 석영보다 후기에 세맥 상으로 관입하고 있는 아둘라리아를 확인할 수 있다(Fig. 4a). 산소 8 기준에 따른 구조식은 $Si:Al:K=3.04:0.96:0.95$ 이며, Ca 및 Na는 검출한계 이하로 순수한 K-장석의 이상석과 잘 일치하고 있다(Table 2).

명반석

고점토대의 특징적인 변질광물로 디카이트, 적철석 및 석영과 함께 산출된다. 공동에서 결정상태로 정출하는 명반석에 대한 SEM 관찰결과 가상정육면체(pseudocubic)로 확인되었다(Fig. 4b). EPMA 정량분석시 S는 이론적 구조식에서 계산된 결과이며, K/(Na+K)비는 0.88로서 Na형보다는 K형으로 확인되었다(Table 3).

디카이트

고점토대 및 점토대에서 산출되며 전형적인 판상형태를 보인다(Fig. 2c). EPMA정량분석 결과 Si와 Al만 검출되었으며, 산소 7 기준에 따

른 구조식계산 결과 Si 2.03, Al 1.95로 전형적인 캐올린광물임을 알 수 있다(Table 3).

견운모

견운모대의 주 구성광물이며, 점토대에서도 소량 산출한다. 가사도 견운모는 산소 22 기준으로 K 함량이 1.38~1.61로서 전형적인 견운모 영역(Velde, 1992)에 해당한다(Table 3)

녹니석

주로 프로필리틱대에서 산출된다. 등대맥 하부 시추시료에서 산출되는 녹니석은 0.32~0.44의 Fe/(Fe+Mg) 값을 보여 Hey(1954)의 분류에 따르면 다이아벤타이트로 분류된다(Table 3).

금은 광화작용

광석광물은 황철석이 대부분을 차지하며, 소량의 섬아연석, 황동석, 방연석 및 자류철석과 함께 에렉트럼 및 함은광물들이 산출된다. 에렉트럼 및 함은광물은 대부분 황철석 내에 미립포유물로 산출하고 있다. 대한광업진흥공사에서 실시한 시추시료에 대한 금은광석의 fineness ($Au/(Au+Ag) \times 1000$)는 2~470(평균 34.6, 등대맥), 2~129(평균 28.4, 등대동맥)이다.

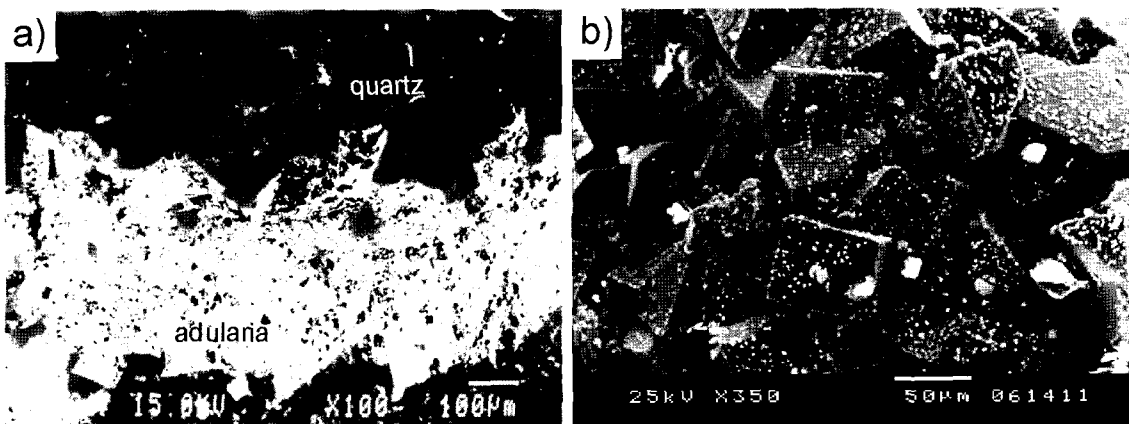


Fig. 4. Micrographs showing the occurrence of minerals; a) BSE image of adularia band(light part) in quartz(dark part) vein, b) SEM image of alunite showing rhombic(pseudocubic) form.

Table 3. Chemical compositions of alteration minerals in the Gasado district

| Mineral | Adu | Adu | Alu | Dic | Ser | Ser | Chl | Chl |
|--------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| SiO ₂ | 65.83 | 65.06 | 0.72 | 45.09 | 51.05 | 51.30 | 32.80 | 33.96 |
| Al ₂ O ₃ | 17.46 | 17.51 | 46.69 | 36.77 | 29.18 | 28.89 | 14.64 | 16.37 |
| Cr ₂ O ₃ | - | - | - | - | - | - | 0.31 | - |
| FeO | - | - | - | - | 1.51 | 1.52 | 19.06 | 17.05 |
| MnO | - | - | - | - | - | - | 0.42 | 0.86 |
| MgO | - | - | - | - | 2.61 | 2.50 | 19.18 | 20.28 |
| CaO | - | - | - | - | - | - | 0.36 | 0.66 |
| Na ₂ O | - | - | 0.52 | - | - | - | - | 0.29 |
| K ₂ O | 16.41 | 15.60 | 3.67 | - | 8.92 | 8.56 | - | - |
| SO ₃ * | - | - | 35.00 | - | - | - | - | - |
| H ₂ O* | - | - | 13.54 | 13.29 | 4.49 | 4.47 | 11.75 | 12.26 |
| Total | 99.70 | 98.16 | 100.14 | 95.14 | 97.76 | 97.14 | 98.53 | 101.72 |
| Si | 3.04 | 3.04 | 0.05 | 2.03 | 6.83 | 6.88 | 6.70 | 6.65 |
| Al ^{IV} | - | - | - | - | 1.17 | 1.12 | 1.30 | 1.35 |
| ΣT | - | - | - | - | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| Al ^{VI} | 0.95 | 0.97 | 3.65 | 1.95 | 3.42 | 3.44 | 2.22 | 2.42 |
| Fe ²⁺ | - | - | - | - | 0.17 | 0.17 | 3.25 | 2.79 |
| Cr | - | - | - | - | - | - | 0.05 | - |
| Mn | - | - | - | - | - | - | 0.07 | 0.14 |
| Mg | - | - | - | - | 0.52 | 0.50 | 5.84 | 5.92 |
| Ca | - | - | - | - | - | - | 0.08 | 0.14 |
| Na | - | - | 0.07 | - | - | - | - | 0.11 |
| K | 0.96 | 0.93 | 0.31 | - | 1.52 | 1.46 | - | - |
| S | - | - | 1.74 | - | - | - | - | - |
| Cations | 4.96 | 4.94 | 5.82 | 3.99 | 13.63 | 13.57 | 19.51 | 19.52 |
| Oxygens | 8 | 8 | 8 | 7 | 22 | 22 | 28 | 28 |

* calculated value

Mineral abbreviations: Adu: adularia, Alu: alunite, Chl: chlorite, Dic: dickite, Ser: sericite

광석광물의 공생관계 및 화학 조성

황철석

미립(10 μm)의 자형결정으로 산출되지만, 입자 크기가 증가함에 따라 반자형 집합체로 산출된다. 특히, 이러한 황철석은 부분적으로 성장 분대가 인지되며, 천연수광상에서 흔히 치환되는 비소의 함량은 1.83~4.05 wt.% As관계가 확인된다(Table 4). Figure 2d는 전자현미경 상에서 관찰된 성장분대를 보이는 황철석으로 화

살표로 표시된 밝게 보이는 외각부분이 비소가 치환된 부분이며, 점적으로 산출하는 에렉트럼, 휘은석 및 방연석 등은 비소에 의한 분대 이전 에 형성된 것이 확인된다.

섬아연석

황철석 내에 점적으로 또는 맥석광물 내에 단독으로 산출한다. 단독으로 산출시에는 용리 현상에 의해 섬아연석 내에 황동석이 점적으로 산출하기도 한다. 철함량은 등대맥 3.04~6.52

Table 4. Chemical compositions of sulfides, Ag-sulfosalts, and electrum in the Gasado district

| | Sph | Sph | Sph | Py | Py | Po | El | El | Arg | Pea |
|---------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| wt.% | | | | | | | | | | |
| Zn | 64.67 | 59.56 | 66.18 | - | - | - | - | - | 0.38 | - |
| Fe | 1.76 | 3.68 | 0.10 | 45.49 | 46.54 | 58.00 | - | - | - | 3.56 |
| Mn | 0.21 | 0.05 | 0.04 | - | - | - | - | - | - | - |
| Cd | 0.37 | - | 0.34 | - | - | - | - | - | - | 0.20 |
| Cu | 0.43 | 3.05 | 0.12 | - | - | - | - | - | - | 7.71 |
| S | 33.10 | 32.34 | 33.80 | 50.72 | 53.03 | 41.62 | - | - | 10.11 | 17.08 |
| Sn | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.19 | - |
| As | - | - | - | 4.05 | - | - | - | - | - | 5.67 |
| Sb | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1.36 |
| Ag | - | - | - | - | - | - | 75.75 | 61.02 | 89.73 | 65.33 |
| Au | - | - | - | - | - | - | 23.59 | 38.84 | - | - |
| Total | 100.54 | 99.08 | 100.58 | 100.26 | 99.57 | 99.62 | 99.34 | 99.86 | 100.41 | 100.90 |
| atomic% | | | | | | | | | | |
| Zn | 47.85 | 44.94 | 48.81 | - | - | - | - | - | - | - |
| Fe | 1.52 | 3.23 | 0.08 | 33.24 | 33.43 | 44.45 | - | - | 0.59 | 4.52 |
| Mn | 0.18 | 0.04 | 0.03 | - | - | - | - | - | - | - |
| Cd | 0.16 | - | 0.15 | - | - | - | - | - | - | 0.13 |
| Cu | 0.33 | 2.35 | 0.09 | - | - | - | - | - | - | 8.59 |
| S | 49.95 | 49.44 | 50.84 | 64.55 | 66.36 | 55.55 | - | - | 27.29 | 37.73 |
| Sn | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.14 | - |
| As | - | - | - | 2.20 | - | - | - | - | - | 5.36 |
| Sb | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.79 |
| Ag | - | - | - | - | - | - | 85.43 | 74.15 | 71.98 | 42.89 |
| Au | - | - | - | - | - | - | 14.57 | 28.85 | - | - |

Minreral abbreviation: Arg: argentite, El: electrum, Pea: pearceite, Py: pyrite, Po: pyrrothite, Sph: sphalerite

mole% FeS, 등대동맥 0.17~6.55 mole% FeS이다(Table 4, Fig. 5a).

자류철석

등대동맥에서만 관찰할 수 있으며, 황철석 내에 점적으로 소량 산출한다. S를 1로 보았을 때의 Fe의 구조식은 0.8~0.9이다(Table 4).

에렉트럼

섬아연석, 황동석, 합은광물 및 방연석과 공존하며, 대부분 황철석 내에 포유물 형태로 10 μm 이하의 미립으로 산출한다(Fig. 2d). 에렉트럼 내 금함량은 14.57~53.72 atomic% Au, 평균 31.97 atomic% Au이다(Table 4, Fig. 5b).

합은광물

황동석, 섬아연석, 에렉트럼 및 방연석과 공

존하며 황철석 내에 포유물로 산출하거나, 황철석의 균열대를 충전하고 있다. 합은광물은 EPMA 정량분석 결과 휘은석, 피어사이트 및 Ag-As-Sb-S계 광물로 동정되었다(Table 4).

생성환경

금은광물의 정출환경

에렉트럼의 은함량(Barton and Toulmin, 1964; Shikanzono, 1985, 1986; Shikanzono and Shimizu, 1987) 및 섬아연석의 철함량(Scott and Barnes, 1971; Barton and Skinner, 1979)은 유황분압·온도·압력·pH 등의 조건에 따라 변화하는 것으로 알려져 있으며, 에렉트럼, 휘은석, 섬아연석 및 황철석의 공생관계 및 화학조성을 근거로 생성환경을 추정할 수 있다. 가사도 지역에서 에렉트럼의 은함량 및 섬아연석의 철함

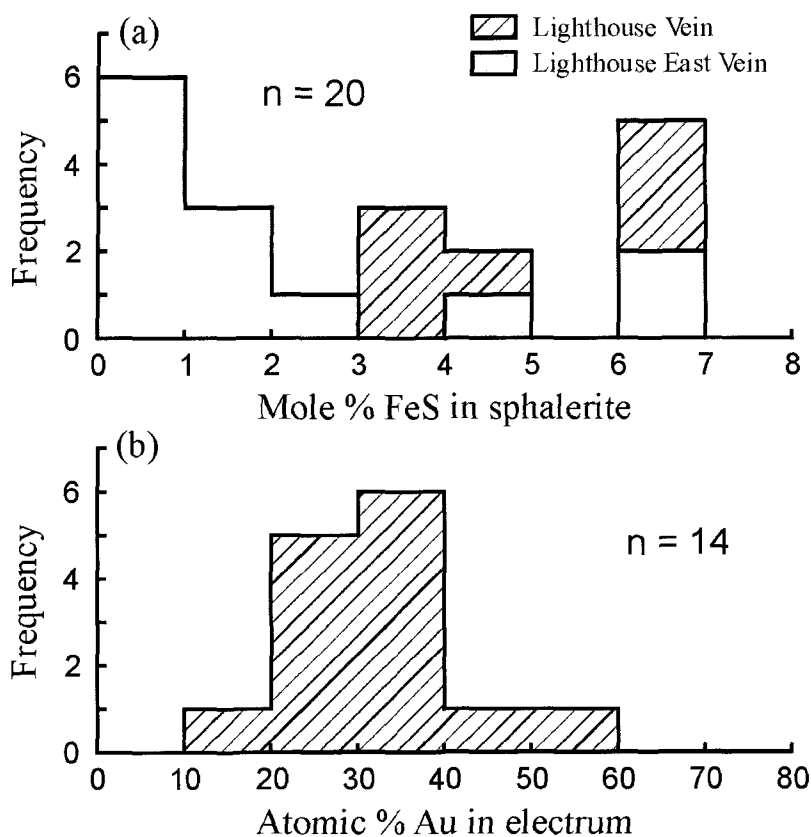


Fig. 5. Histograms of (a) the FeS content (mole%) of the sphalerites and (b) the Au content (atomic%) of the electrum.

량은 61.07와 74.89 atomic % Ag, 6.38와 6.52 mole % FeS로 생성온도 및 유황분압은 245~285°C, $10^{-12.64} \sim 10^{-10.42}$ atm으로 추정된다(Fig. 6). 이는 Fig. 6에 제시된 바와 같이 가사도 지역의 금은광화작용이 통영광산의 금 침전환경(약 240~310°C와 $10^{-12.5} \sim 10^{-9.5}$ atm; Shelton *et al.*, 1990)보다 비교적 낮은 생성온도 및 유황분압에서 형성되어 천열수광상 중에서도 천부영역으로 추정된다.

유체포유물 연구

광화작용시 주요 광석광물들의 정출온도를 비교검토하기 위하여 금은 광화작용과 관련된 맥상 석영을 대상으로 유체포유물 연구를 수행하였다. 연구지역의 맥상 석영이 매우 미립인 관계로 가열냉각실험은 제한된 시료에 대하여 수행되었으며, Linkam Scientific사의 THMS 600 heating/freezing stage와 Fluid사의 gas-flow

heating/freezing stage를 사용하여 냉각 및 가열실험을 실시하였으며, 냉각실험의 정확도를 높이기 위하여 Haynes(1985)의 반복냉각기법을 따랐다. 가열실험의 균질화온도 측정오차는 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 이다. 염농도는 H₂O-NaCl 계의 freezing-point depression(Potter *et al.*, 1978)을 이용하여 구하였다.

가사도 지역의 유체포유물은 모두 기상에 비해 액상이 우세하게 나타나며 고상의 포유물은 확인되지 않는다. 석영시료의 균질화온도 및 염농도는 158~253°C, 0.9~3.4 equiv. wt.% NaCl로서 비교적 낮은 온도와 염농도 범위를 보인다(Fig. 7). 균질화온도와 염농도의 상관관계는 미약하나마 동시에 감소하고 있는 경향을 보이고 있으며, 이는 광상 형성시 상대적으로 높은 온도와 염농도를 가진 유체와 낮은 온도와 염농도를 갖는 유체 사이의 혼합이 있었음을 유추할 수 있다. 가사도 지역의 유체포유물 연구

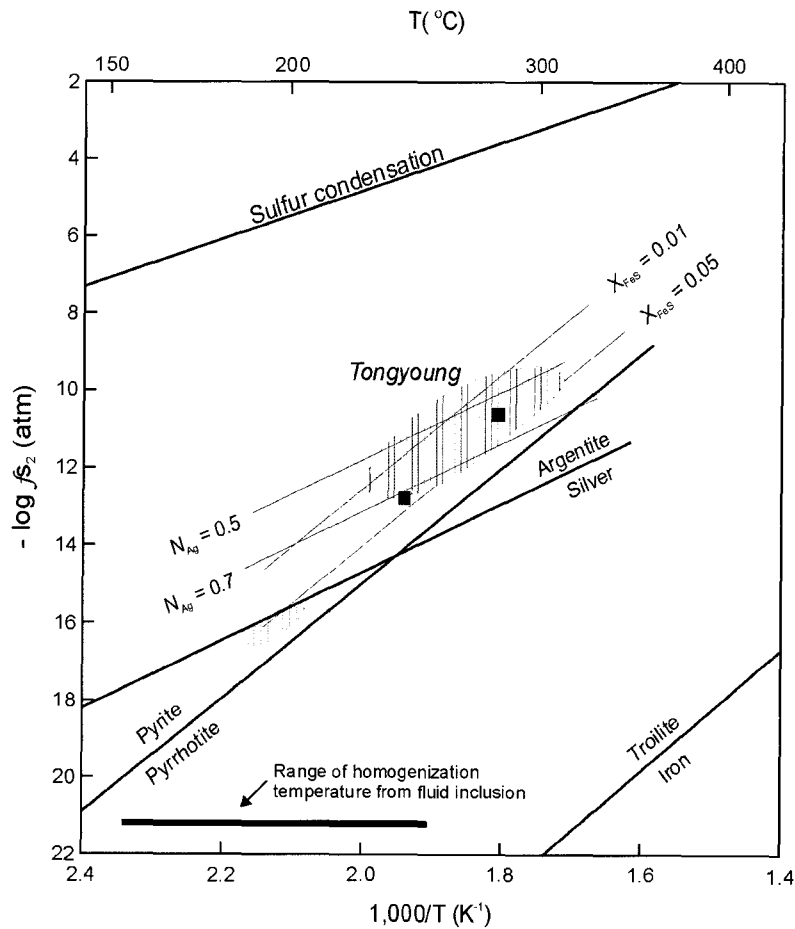


Fig. 6. Fugacity of sulfur versus temperature diagram showing sulfidation reaction pertinent to the Gasado mineral assemblages. N_{Ag} is the atomic fraction of Ag in electrum. X_{FeS} is the mole fraction of Fe in sphalerite. Isopleths for sphalerite are calculated from the equation of Scott and Barnes(1971).

결과는 통영광산의 금은광화작용(광화 I기 및 II기)과 관련된 유체포유물의 균질화온도(146~282°C)보다 상대적으로 낮은 온도환경을 지시하는 것으로 연구지역이 천열수광상의 상부지역에 해당하는 것으로 추정된다.

안정동위원소 연구

안정동위원소 연구는 광화작용과 직접적으로 관련된 맥상 석영을 대상으로 광화유체의 기원과 열수계의 진화과정 등을 규명함으로써 광상 생성 기구를 설정하고자한다. 석영 내 유체포유물의 유체를 추출하여 수소 동위원소 연구를

수행하였으며, 산소 동위원소는 석영 중의 산소 값을 분석하여 유체포유물의 균질화온도를 근거로 Matsuhisa *et al.*(1979)의 산소변환식에 적용하여 유체의 산소 동위원소 값을 구하였다. 실험에 사용된 표준시료는 VSMOW이며, 분석 오차는 산소 $\pm 0.1\%$, 수소 $\pm 1\%$ 이다. 연구지역의 광화유체에 대한 $\delta^{18}O$ 및 δD 값은 $-10.1 \sim -8.0\%$ 및 $-68 \sim -64\%$ 로 천수와 매우 유사한 값을 보이며(Fig. 8), 통영광산의 동위원소 값($\delta^{18}O = -9.4 \sim -6.8\%$, $\delta D = -61 \sim -44\%$; Shelton *et al.*, 1990)과 거의 일치하고 있다. 이는 가사도 금은광상의 광화유체가 천수의 유입에 의한 순

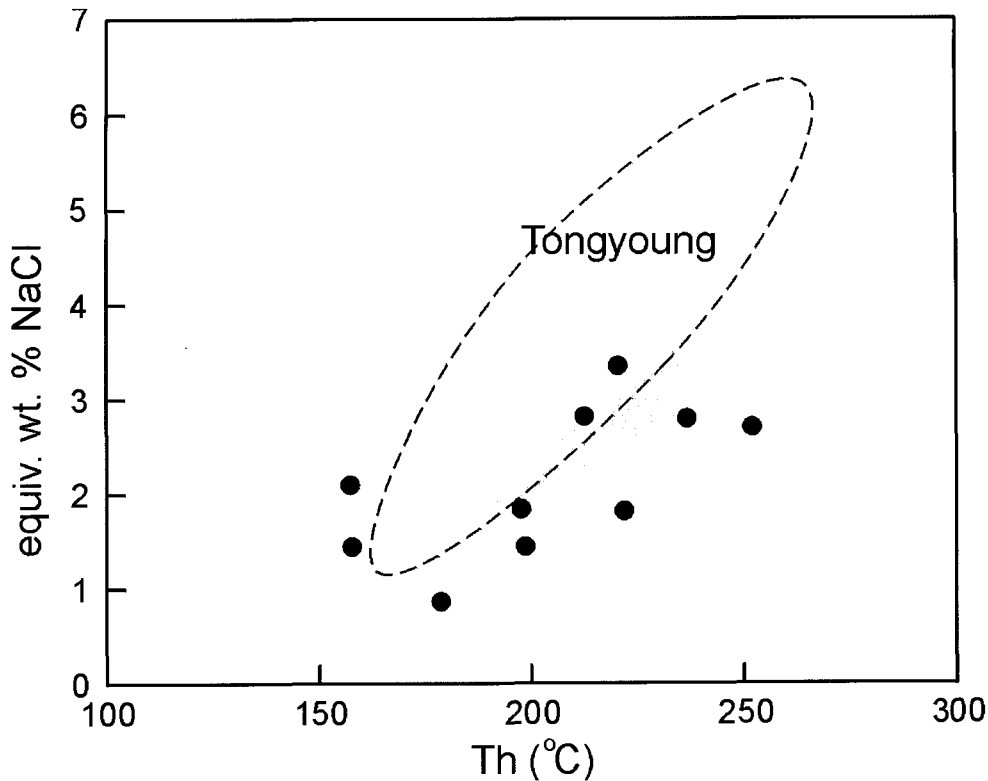


Fig. 7. Plots of homogenization temperature(Th) versus salinity (equiv. wt. % NaCl) of fluid inclusions in minerals from the Gasado deposit. The gradual decrease trend between temperature and salinity indicates that mineralization was a result of ore-forming fluid mixing with cooler, less saline meteoric water.

환수의 열수계에 의해 지배되었음을 시사하고 있다.

토 의

가사도 지역의 금은 광화작용과 관련된 석영 맥은 주로 석영 및 탄산염광물과 함께 저유황형 광상의 지시광물인 아틀라리아가 산출하며, 옥수질, 빗살, 정동, 호상 및 깃털조직 등 전형적인 저유황형 천열수광상의 조직을 보인다. 연구지역 변질대의 공간적 변화를 일반적인 열수 광상의 온도와 pH 변화에 따른 광물조합 변화와 비교하면, 지표부근에서 국부적으로 고유황형의 광물조합이 나타나지만, 시추 변질대 시료에서 확인된 바와 같이 저유황형의 광물조합이 전반적으로 우세하게 변화하는 양상을 보이고 있다(김창성 외, 2002). 명반석은 광상형성시 고

온(300~350°C)의 유체로부터 정출될 경우 상대적으로 조립의 판상 또는 주상의 형태로 산출하는 반면, 광상형성과 관련된 비등현상에 의해 지하수면 상부에 집적된 H₂S의 산화과정(H₂S+2O₂⇒H₂SO₄)에서 생성된 저온(100~150°C)의 열수유체에 의해 정출될 시에는 미립(<50 μm)의 가상정육면체로 산출하는 것으로 보고되어 있다(Hedenquist *et al.*, 2000). 그리고, 정출온도가 낮아질수록 K함량이 Na함량에 비해 상대적으로 증가하는 것으로 알려져 있다(Stoffregen *et al.*, 1989). 가사도 지역의 명반석은 가상정육면체로 산출되며, K/(Na+K)는 0.88로서 연구지역의 고점토대가 비등현상에 의한 유체에 의해 생성된 것임을 지시한다.

고유황형 광상에서 산출되는 에렉트럼은 일반적으로 매우 높은 금함량을 보이는 반면, 저유황형 광상은 이에 비하여 현저하게 낮은 금

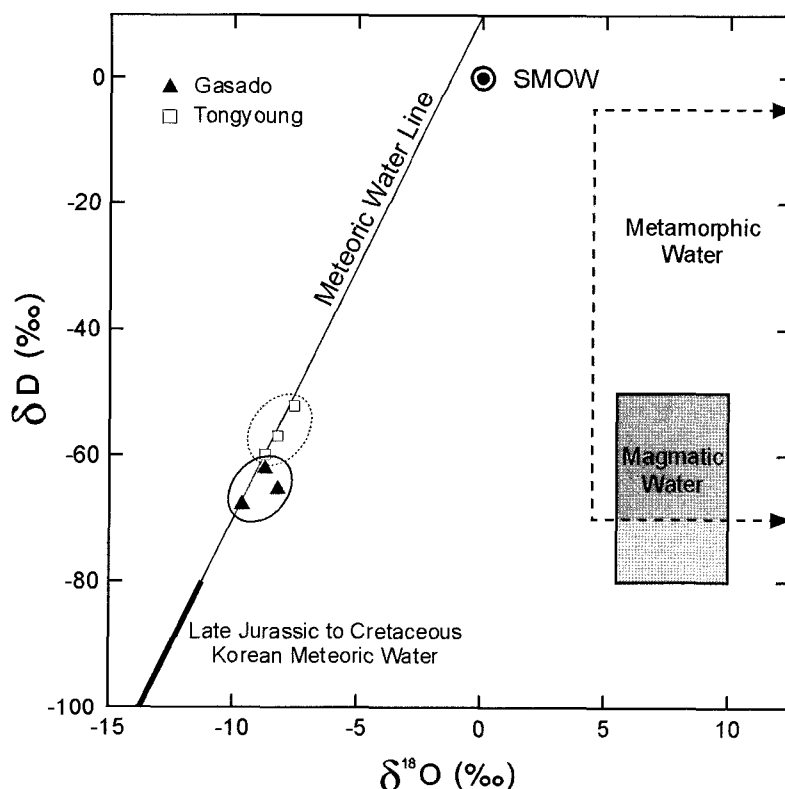


Fig. 8. Hydrogen versus oxygen isotope diagram displaying stable isotope systematics of hydrothermal fluid compositions. For comparison, the $\delta^{18}\text{O}$ - δD data from the Tongyoung mine (another example of epithermal gold mineralization in Korea; Shelton et al., 1990) are also shown.

함량의 특징을 보인다(Corbett and Leach, 1998). 가사도 등대맥에서 산출되는 에렉트럼의 금함량은 14.6~53.7 (평균 32.0) atomic % Au로서 전반적으로 낮은 금함량의 특징을 보이고 있으며 저유황형 광상 에렉트럼의 화학조성과 잘 일치하고 있다. 또한, 에렉트럼-섬아연석 지질온도계에서 추정된 245~285°C의 정출온도 및 유체포유물에서 측정된 균질화온도 및 염농도(158~253°C 및 0.9~3.4 equiv. wt.% NaCl)는 저유황형 천열수 광상에서 보고된 균질화온도 및 염농도의 범위인 <300°C와 <3.5 equiv. wt.% NaCl과 잘 일치하고 있다(Cooke and Simmons, 2000). 에렉트럼-섬아연석 지질온도계의 정출온도가 석영을 대상으로 한 유체포유물의 균질화온도에 비해 약간 높은 값을 보이는 것은 일반적으로 광상 형성시 광석광물은 특정 시기에 한정되어 산출하는 반면, 맥석광물은 광

화기 전반에 걸쳐 정출한 결과로 해석된다. 산소·수소 안정동위원소 연구결과 $\delta^{18}\text{O} = -10.1 \sim -8.0\text{‰}$, $\delta\text{D} = -68 \sim -64\text{‰}$ 의 범위로 광화유체의 기원은 상대적으로 동위원소 교환이 적게 진행된 천수이며, 이러한 천수의 순환에 의해 광상이 형성된 것으로 해석할 수 있다(Table 5).

옥수질 석영, 아둘라리아, 판상 방해석 또는 판상 석영 등은 천부 광화작용 시에 산출하는 일반적인 광물들이며, 이들의 존재유무는 천부 환경 조건에서 금의 침전과 연관된 비등현상의 간접적인 증거로 언급하였다(Hedenquist, 1991). 특히, 판상 방해석 및 판상 석영은 CO_2 비등작용과 관련하여 광체 상부에서 산출되며, 비등작용의 후기에 주로 정출되는 아둘라리아는 상부보다는 하부에서 증가하는 것으로 보고된 바 있다. 가사도 지역 등대맥에서 판상 방해석, 판상 석영 및 아둘라리아의 산출 양상과 천열수

Table 5. Chemical compositions of Lighthouse and Lighthouse east veins.

| | Lighthouse | Lighthouse east vein |
|---|--|----------------------|
| Fe-S mineral | pyrite ≫ pyrrhotite | pyrite |
| Mineral composition | | |
| Au (atomic%) in electrum (range, avg.) | 14.6 ~ 53.7, 32.0 | present |
| FeS (mole%) in sphalerite (range, avg.) | 3.0 ~ 6.5, 4.9 | 0.2 ~ 6.6, 2.0 |
| Fluid inclusion data | | |
| Homogenization temperature (°C) | | 158 ~ 253 |
| Salinity (equant. wt.% NaCl) | | 1.7 ~ 3.4 |
| Isotope analysis | | |
| Oxygen (‰) | | -10.1 ~ -8.0 |
| Hydrogen (‰) | | -68 ~ -64 |
| Implication of deposit type | volcanic-hosted low-sulfidation epithermal deposit | |

광상 형성시 비등현상에 의하여 금보다 상부에 집적되는 원소(Buchanan, 1981) 중 As가 황철석에 함유되어 산출되고 있어 비등현상이 발생된 심도가 현재 확인된 맥의 위치보다 하부에서 일어난 것으로 추정될 수 있다. 따라서, 가사도 지역의 이러한 열수변질대의 분포특성, 맥의 산상, 광석광물의 공생관계 및 화학조성, 유체포유물 및 동위원소의 분석자료, 광화유체의 기원 및 생성환경을 종합적으로 검토한 결과, 등대맥과 등대동맥의 현재 지표에 노출된 부분은 화산성 저유황형 천열수 금은광상의 최상부로 온천형 광상(hot-spring type)에 해당하며, 현 위치보다 심부에서 비등작용과 관련된 부광대의 부존 가능성을 예견할 수 있다.

결 론

1) 가사도 지역의 금은광상은 불국사 화산활동과 관련된 응회암, 석영안산암 및 유문암 등의 화산암류 및 퇴적암을 모암으로 하여 배태된 광상으로, 기 보고된 화산암류(76~72Ma) 및 건운모(70Ma)에 대한 절대연령에서 제시된 바와 같이 백악기 말 화산활동에 수반된 광상이다.

2) 열수변질대는 지표에서 등대맥 고점토대 및 점토대와 등대동맥 건운모대로 구분되지만(상부변질대), 시추시료에서는 전반적으로 건운모대가 우세하며, 부분적으로 점토대 및 프로필리틱대가 분포하고 있다(하부변질대). 특히, 광상주변 대부분의 변질대는 건운모대로 저유황형 변질광물의 변화양상을 보인다. 또한, 합금

석영맥은 옥수질조직, 빗살조직, 깃털조직 등 전형적인 천열수조직을 보이며, 석영, 판상 방해석, 아틀라리아 등의 맥석광물과 에렉트럼, 함은광물(황은석, 피어사이트 및 Ag-As-Sb-S계)과 함께 황철석, 섬아연석, 황동석, 자류철석, 방연석 등의 광석광물이 산출된다. 에렉트럼의 Au 함량(atomic%)은 14.57~53.72(평균 31.97)이다.

3) 유체포유물 자료에 의하면 광화유체의 온도 및 염농도는 158~253°C 및 0.9~3.4 equiv. wt. % NaCl이며, 에렉트럼-섬아연석 지질온도계를 통해 추정된 생성 온도 및 유황분압의 안정영역은 245~285°C, 10^{-12.64}~10^{-10.42} atm으로 천열수 광상 중에서도 비교적 낮은 생성온도 범위에 해당한다. 안정동위원소 자료에 의한 산소 및 수소 동위원소 값은 δ¹⁸O=-10.1~-8.0‰, δD=-68~-64‰로 천수의 순환에 의해 광상이 형성되었음을 지시한다.

4) 이러한 열수변질대의 분포특성, 맥의 산상, 유체포유물, 안정동위원소 연구를 종합해 볼 때, 가사도 지역 금은광상은 국내에서 처음으로 보고되는 화산활동과 관련된 전형적인 최천부 열수분출형(hot-spring type) 저유황성 천열수 광상으로 해석된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00407-0) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- 강홍석 (2000) 가사도지구 연구조사 보고서. 대한광업진흥공사, 17.
- 고상모, 박중권, 이형재 (1992) 가사도 변질대 연구: 화산원 천열수성 광상탐사 및 모델 정립(III). 과학기술처, 119-130.
- 김상욱, 윤윤영 (1971) 한국지질도(1:50,000), 진도·지산 도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 13-15.
- 김창성, 최선규, 박상준, 김유동, 지세정 (2002) 열수 변질대 탐사를 위한 단파장 적외선 분광법의 응용. 한국자원공학회지, 39, 231-241.
- 이인우, 김랑희, 김문섭, 김승태 (2000) 정밀조사보고서(금: 진도지구). 대한광업진흥공사, 8-11.
- 이인우, 이희숙, 유영준, 정연호 (2001) 정밀조사보고서(금: 해남지구). 정밀조사보고서(금속광: 해남, 음성, 포천지구), 대한광업진흥공사, 39-49.
- 조한익, 문희수 (1978) 한국의 명반석 광상. 자원개발연구소, 38-54.
- Barton, P.B., Jr. and Skinner, B.J. (1979) Sulfide mineral stabilities. In: Barnes, H.L. (ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (2nd Ed.). Wiley, New York, 278-403.
- Barton P.B.Jr. and Toulmin P. (1964) The electrometallurgical method for the determination of the fugacity of sulfur in laboratory sulfide systems. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 28, 619-640.
- Buchanan, L.J. (1981) Precious metal deposits associated with volcanic environments in the southwest. In: Dickinson, W.R. and Payne, W.D. (eds.), *Relations of Tectonics to Ore Deposits in the Southern Cordillera*. Arizona Geological Society Digest, 14, 237-262.
- Corbett, G.J. and Leach, T.M. (1998) Southwest Pacific rim gold-copper systems: structure, alteration, and mineralization. *Society of Economic Geologists, Special publication*, Vol. 6, 69-82.
- Cooke, D.R. and Simmons, S.F (2000) Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology, Society of Economic Geologists*, Vol. 13, 221-244.
- Haynes, E.M. (1985) Determination of fluid inclusion compositions by sequential freezing. *Econ. Geol.*, 80, 1436-1439.
- Hedenquist, J.W. (1991) Boiling and dilution in the shallow portion of the Waiotapu geothermal system, New Zealand. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 55, 2753-2765.
- Hedenquist, J.W., Antonio, A.R., and Eliseo, G.U. (2000) Exploration for epithermal gold deposit. *Reviews in Economic Geology, Society of Economic Geologists*, Vol. 13, 245-277.
- Hey, M.T. (1954) A new review of chlorites. *Mineral. Mag.*, 30, 278-292.
- Kim, I.J. and Keisuke, N. (1992) K-Ar ages of the hydrothermal clay deposits and the surrounding igneous rocks in Southwest Korea. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 1, 58-70.
- Koh, S.M., Tetsuichi, T., Kim, M.Y., Kazuki, N., Hong, S.S., and Sadahisa, S. (2000) Geological and geochemical characteristics of the hydrothermal clay alteration in South Korea. *Resource Geology*, 50, 229-242.
- Matsuhisa, Y., Goldsmith, J.R., and Clayton, R.N. (1979) Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water. In: Berger, B.R., and Bethke, M. (eds.), *Review in Economic geology; Geology and Geochemistry of Epithermal Systems*. Society of Economic Geologists, 2, 99-128.
- Potter, R.W. III., Clynne, M.A., and Brown, K.L. (1978) Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions. *Econ. Geol.*, 73, 284-285.
- Ruperto, V.L., R.E. Stevens, and M.B. Norman (1964) Staining of plagioclase feldspar and other minerals with F., D., and C. Red No. 2. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 501B, B152-B153. In: Hutchison, C.S. (ed.), (1974) *Laboratory Handbook of Petrographic Techniques*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 16-20.
- Scott, S.D. and Barnes, H.L. (1971) Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Econ. Geol.*, 66, 653-669.
- Shelton, K.L., So, C.S., Haeussler, G.T., Chi, S.J., and Lee, K.Y. (1990) Geochemical studies of the Tongyoung gold-silver deposits, Republic of Korea: Evidence of meteoric water dominance in a Te-bearing epithermal system. *Econ. Geol.*, 85, 1114-1132.
- Shikazono, N. (1985) A comparison of temperatures estimated from electrum-sphalerite-pyrite-argentite assemblage and filling temperatures of fluid inclusions from epithermal Au-Ag vein deposits in Japan. *Econ. Geol.*, 80, 1415-1424.
- Shikazono, N. (1986) Ag/Au total production ratio and Au-Ag minerals from vein-type and disseminated-type deposits in Japan. *Mining Geol.*, 36, 411-424.
- Shikazono, N. and Shimizu, M. (1987) The Ag/Au ratio of native gold and electrum and geochemical environment of gold vein deposits in Japan. *Mineral. Deposita*, 22, 309-314.
- Stoffregen, R.E. and Cygan, G.L. (1989) An experi-

mental study of Na-K exchange between alunite and aqueous sulfate solutions. *Am. Mineral.*, 75, 209-220.

Chapman & Hall, London, 71.

Velde, B. (1992) *Introduction to clay minerals*,

2002년 8월 28일 원고접수, 2002년 9월 13일 게재승인.