

# 페루 Pallancata 은 광산에서 산출되는 광물들의 산상 및 화학조성

## Occurrence and Chemical Composition of Minerals from the Pallancata Ag Mine, Peru

유봉철(Bong Chul Yoo)<sup>1,2,\*</sup> · 호르게 아코스타(Jorge Acosta)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 DMR융합연구단

(Convergence Research Center for Development of Mineral Resources, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Korea)

<sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교 광물지하수자원학과

(Department of Mineral and Groundwater Resources, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea)

<sup>3</sup>페루지질광업제련연구소

(Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET, Lima, Perú)

**요약 :** Pallancata 은 광산은 페루 수도 리마로부터 남동방향 약 520 km 떨어진 Ayacucho region 내에 위치한다. 광산일대의 주변 지질은 대부분 신생대의 화산암류로 구성되며 일부 관입암류가 관찰되며 구성암류는 응회암, 안산암질 용암, 안산암질 응회암, 화산쇄설성 용암, 화산 쇄설암, 유문암 및 석영 몬조라이트이다. 이 광산은 응회암내에 발달된 NW, NE 및 EW 방향의 구조대를 따라 충진한 100여 개의 석영맥들로 구성된다. 이들 석영맥의 은 품위는 40~1,000 g/t, 맥폭은 0.1~25 m 정도이고 연장성은 최대 3,000 m 정도이다. 석영맥은 대상, 정공, 괴상, 각력상, crustiform, colloform 및 comb 조직 등이 관찰된다. 모암변질작용은 규화작용, 견운모화작용, 황철석화작용, 녹니석화작용 및 점토화작용 등이 관찰된다. 산출광물은 석영, 방해석, 옥수, 빙장석, 형석, 금홍석, 저어콘, 인회석, 철산화물, REE계 광물, 크롬산화물, Al-Si-O계 광물, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 에렉트럼, proustite-pyrrargyrite, pearceite-polybasite 및 acanthite 등이다. 이 광산의 광물공생군과 화학조성을 토대로 구한 은 광화작용의 생성온도와 황분압( $f_{S_2}$ )은 각각 118~222 °C 및  $10^{-20.8}$ ~ $10^{-13.2}$  atm의 범위를 갖는다. 따라서 이 광산의 석영맥 조직, 산출광물, 화학조성 및 은 광화작용의 형성환경 등을 토대로, 이 광산의 은 광물들은 모암과의 반응에 의한 약산성화된 열수용액으로부터 순환천수의 혼입에 의한 냉각 및 비등에 의해 비교적 낮은 형성온도, 유히분압 및 산소분압하에서 침전되었으며 이 광산의 광상형은 전형적인 천열수 intermediate sulfidation형에 해당된다.

**주요어 :** Pallancata 은 광산, 석영맥, 모암변질, 산출광물, 화학조성

**ABSTRACT :** Pallancata Ag mine is located at the Ayacucho region 520 km southeast of Lima. The geology of mine area consists of mainly Cenozoic volcanic-intrusive rocks, which are composed of tuff, andesitic lava, andesitic tuff, pyroclastic flow, volcano clasts, rhyolite and quartz monzonite. This mine have about 100 quartz veins in tuff filling regional faults orienting NW, NE and EW directions. The Ag grades in quartz veins are from 40 to 1,000 g/t. Quartz veins vary from 0.1 m to 25 m in

\*Corresponding author: +82-42-868-3505, E-mail: chbong@kigam.re.kr

thickness and extend to about 3,000 m in strike length. Quartz veins show following textures including zonation, cavity, massive, breccia, crustiform, colloform and comb textures. Wallrock alteration features including silicification, sericitization, pyritization, chloritization and argillitization are obvious. The quartz veins contain calcite, chalcedony, adularia, fluorite, rutile, zircon, apatite, Fe oxide, REE mineral, Cr oxide, Al-Si-O mineral, pyrite, sphalerite, chalcocopyrite, galena, electrum, proustite-pyrrargyrite, pearceite-polybasite and acanthite. The temperature and sulfur fugacity ( $f_{S_2}$ ) of the Ag mineralization estimated from the mineral assemblages and mineral compositions are ranging from 118 to 222 °C and from  $10^{-20.8}$  to  $10^{-13.2}$  atm, respectively. The relatively low temperature and sulfur-oxygen fugacities in the hydrothermal fluids during the Ag mineralization in Pallancata might be due to cooling and/or boiling of Ag-bearing fluids by mixing of meteoric water in the relatively shallow hydrothermal environment. The hydrothermal condition may be corresponding to an intermediate sulfidation epithermal mineralization.

**Key words** : Pallancata Ag mine, quartz vein, wall-rock alteration, mineralogy, geochemistry

## 서 언

은(silver)은 우리 일상생활에서 매우 다양한 곳에 이용되는 원소이다. 왜냐하면 은은 전기, 열의 양도체이고 가공성 및 기계적 성질이 좋기 때문이다. 현재 세계 총생산량의 70 % 이상이 공업용으로 사용되고 있으며 나머지는 화폐용, 장식-공예용 및 사진공업용으로 사용되고 있다. 한 예로 2013년도 미국에서 사용된 은은 일반적으로 전기 및 전자용(35 %), 화폐 및 메달용(25 %), 사진용(10 %), 보석 및 은 제품용(6 %) 및 기타(24 %)로 사용되었다(http://geology.com). 2016년도 각국별 은의 생산량을 살펴보면, 멕시코(5,600 metric ton), 페루(4,100 metric ton), 중국(3,600 metric ton), 칠레(1,500 metric ton), 호주(1,400 metric ton), 폴란드(1,400 metric ton), 러시아(1,400 metric ton), 볼리비아(1,300 metric ton) 및 미국(1,100 metric ton) 순으로 페루는 세계에서 두 번째로 많은 양의 은을 생산하는 국가이다(USGS, 2017). 은 매장량을 기준으로 전 세계에서 가장 큰 10개의 은 광산을 소개하면, 1위는 멕시코의 Penasquito 광산, 2위는 폴란드의 Polkowice-Sieroszowice 동-은 광산, 3위는 볼리비아의 San Cristobal 은-연-아연 광산, 4위는 멕시코의 Pitarrilla 광산, 5위는 폴란드의 Lubin 광산, 6위는 폴란드의 Rudna 동-은 광산, 7위는 터키의 Gumuskoy 광산, 8위는 멕시코의 Fresnillo 광산, 9위는 페루의 Antamina 동-아연 광산 및 10위는 호주의 Cannington 광산이다(Gupta, 2013). 이들 광산들 중 일부는 은을 연-아연-동-금 채굴 시 부산물로 생산하는 광산들이다. 은은 일반적으로 다양한 종류의 광상유형에서 산출되며 일반적으로 금과

함께 수반되어지나 동 및 연-아연과 함께 산출되는 경우도 많다. 이와 같이 은은 과거 금에 비해 까다로운 정제법 때문에 쉽게 이용하지 못했던 금속이지만 꾸준히 고대시대부터 현재까지 인류에게 중요한 자원 중의 하나임에 분명하다.

앞에서 살펴본 것과 같이, 페루는 전 세계에서 두 번째로 은을 많이 생산하는 국가(Fig. 1a)로써 주요 은 생산 광산을 살펴보면, Antamina 광산(1,670만 온스), Uchuchacua 광산(1,200만 온스), Pallancata 광산(760만 온스), Animon 광산(700만 온스), Arcata 광산(540만 온스) 순이다(Acosta *et al.*, 2015). 따라서 페루의 Pallancata 광산을 대상으로 지질광상 조사를 수행한 것은 페루 은 광상의 성인 규명뿐만 아니라 페루 유망 광상의 부존을 확인하고 관련 자료를 국내기업에 소개함으로써 페루 광산개발을 계획하고 있는 국내기업에게 유용한 자료를 제공하는 데도 있다.

Pallancata 은 광산은 페루 수도 리마로부터 남동 방향 약 520 km 떨어진 Ayacucho region 내에 위치한다(Fig. 1a, b). 이 광산은 고도 4,000 m 내지 4,300 m 정도에 위치하며 주변에는 Inmaculada 및 Selene 은 광산들이 분포한다. 지금까지 이 광산과 관련된 연구는 Condori (2016) 및 Gamarra-Urrunaga *et al.* (2013)에 의한 Pallancata 맥의 산출광물, 화학조성 및 생성환경에 대한 연구 결과가 있다. 따라서 이 연구에서는 Yurika 맥을 중심으로 Pallancata 광산에서 산출되는 맥들에 대한 모암변질 및 광석 시료들을 대상으로 산출광물의 산상 및 화학조성에 대해 고찰해 보고자 한다.

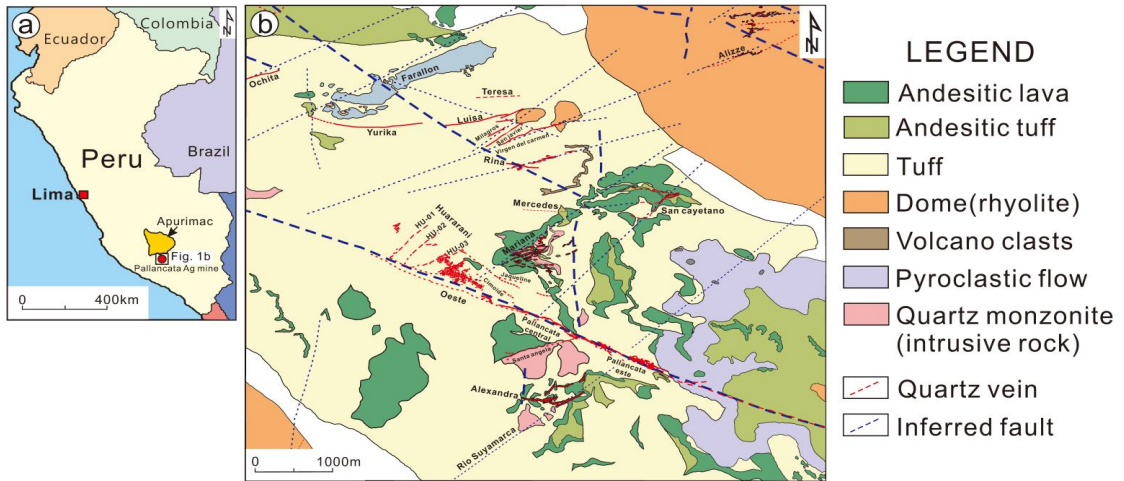


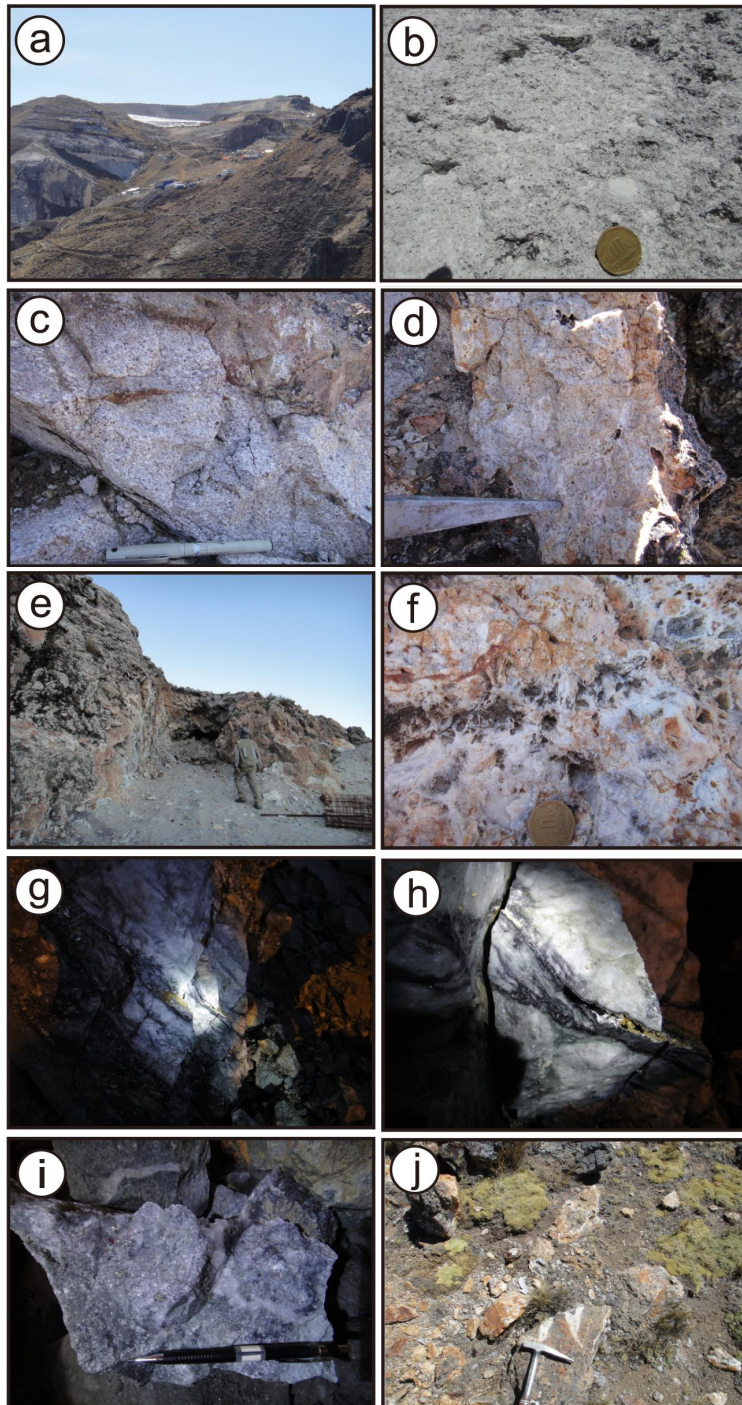
Fig. 1. Location and geological map of the Pallancata Ag deposit (Modified after Condori, 2016).

### 주변 지질

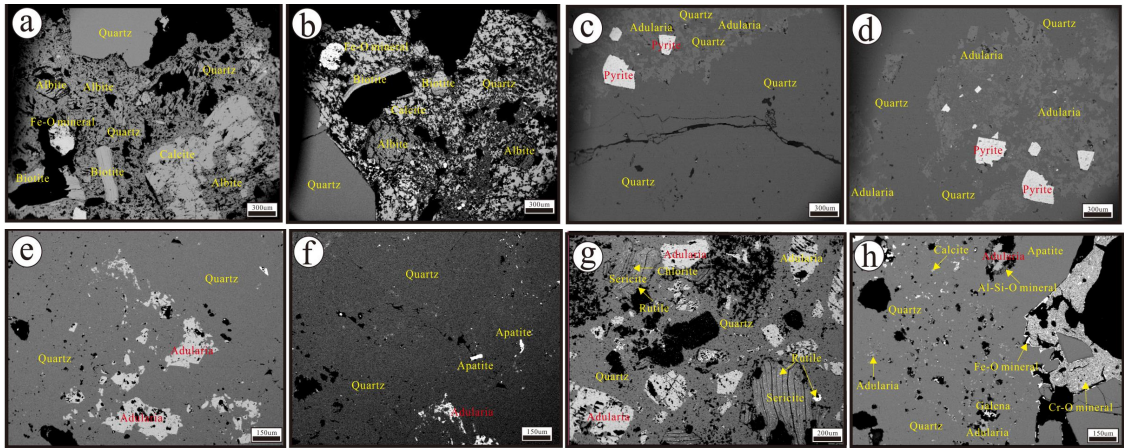
Pallancata 광산일대의 주변 지질을 살펴보면, 대부분 화산암류로 구성되며 후에 이를 관입한 일부 관입암류가 관찰된다(Fig. 1c). 이들 화산암류와 관입암류는 하부로부터 신생대 Neogene의 Aipabamba층, Aniso층 및 Saycata층으로 구성된다(INGEMMET, 2015). Aipabamba층은 주로 테사이트 또는 유문암질 테사이트 화산력 응회암으로써 층후는 약 1,000 m 정도이며 Tacaza 층군의 하부에 해당된다(Gamarra-Urrunaga *et al.*, 2013). 이 층군의 연대는 32~31 Ma로 보고되어 있다(Clark *et al.*, 1990). Aniso층은 테사이트 또는 유문암 회분 응회암으로써 층후는 약 500 m 정도이며 다수의 기공(pumice)이나 석영과 흑운모 결정들이 산출된다. 상부층인 Saycata층은 주로 안산암질 용암으로 구성되며 일부 반정조직을 가지며 반정으로는 사장석 및 각섬석이 관찰된다. 이 암석의 층후는 약 200 m 정도이다. Fig. 1c에서 보는 것과 같이, 화산암류에는 응회암, 안산암질 용암, 안산암질 응회암, 화산쇄설성 용암, 화산 쇄설암이 있으며 관입암류에는 석영 몬조라이트와 유문암이 산출된다.

응회암은 광산일대에 폭넓게 분포하며(Fig. 1c) 회백색을 띠고 주로 화산력(13 %)과 회분(85 %)으로 구성되며 일부 blocks와 bombs (2 %)가 관찰된다(Fig. 2a, b). 더불어 이 암석 내 결정으로 석영 및 흑운모가 육안으로 관찰되며 현미경하에서는 결정질 및 비결정질 석영, 흑운모, 사장석(알바이트),

철산화물 및 방해석 등이 산출된다(Fig. 3a, b). 이 암석의 전암분석 결과를 기초로 CIPW norm 계산하면 주로 석영(39.78 %), 정장석(19.36 %), 사장석(29.24 %)이고 소량 강옥(3.45 %), 적철석(2.13 %), 자소회석(1.46 %), 인회석(0.26 %) 및 티탄철석(0.13 %)으로 구성되며 유문암질 테사이트에 해당된다. 안산암질 용암과 안산암질 응회암은 이 광산의 중심부에서 NW 방향 또는 NE 방향으로 분포한다(Fig. 1c). 화산쇄설성 용암은 이 광산의 Pallancata 맥을 중심으로 양측에서 NW 방향으로 분포한다(Fig. 1c). 관입암류인 유문암은 이 광산의 북측에서 돔(dome) 형태로 소규모 분포되고 석영 몬조라이트는 Pallancata 맥의 동부 sector 남측에서 일부 소규모 분포하며 사장석이 반정으로 산출된다(Fig. 2c). 이 암석은 Gamarra-Urrunaga *et al.* (2013)에 의하면 안산암질 반암으로 보고되어 있다. 이 암석은 육안상 흑운모와 각섬석이 산출되며 흑운모의 함량이 각섬석의 함량보다 많으며 석영 세맥들이 다량 관찰된다(Fig. 2d). 이 암석은 부분적으로 사장석은 점토광물로 변질되어 산출되거나 흑운모와 각섬석은 변질되지 않았다. 이 암석의 전암분석 결과를 기초로 CIPW norm 계산하면 주로 석영(40.09 %), 정장석(21.96 %), 사장석(23.87 %)이고 소량 강옥(4.30 %), 적철석(3.56 %), 자소회석(2.08 %), 인회석(0.50 %) 및 티탄철석(0.11 %)으로 구성되며 유문암에 해당된다.



**Fig. 2.** Photographs of rocks and quartz veins from the Pallancata Ag deposit. (a) telescope of the deposit, (b) tuff showing rock fragments, crystal and matrix, (c) quartz monzonite from south Pallancata deposit, (d) quartz veinlet cutting quartz monzonite, (e) and (f) telescope and closed-up of the Pallancata vein, (g), (h) and (i) closed-up of the Yurica vein, (j) closed-up of NE quartz vein.



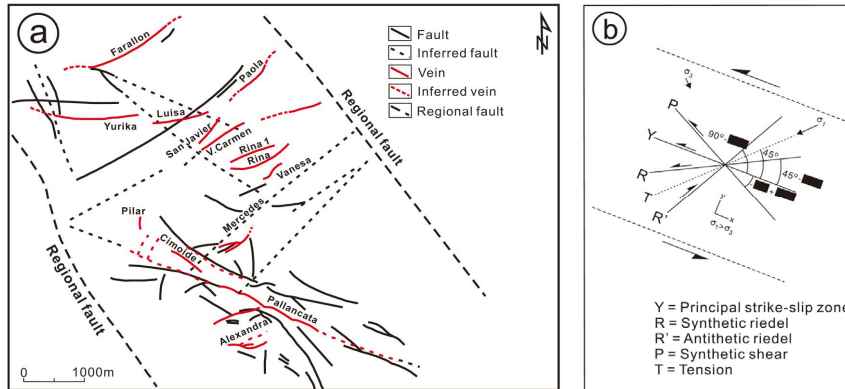
**Fig. 3.** Microphotographs of mineral associations in the Pallancata Ag deposit. (a) and (b) quartz, albite, biotite, calcite and Fe-O mineral in tuff, (c) and (d) pyrite inter-growing with quartz and adularia in the Pallancata vein, (e) and (f) adularia inter-growing with quartz and apatite in the Yurika vein, (g) and (h) quartz, galena, calcite and adularia being partially altered by sericite, chlorite, rutile and Al-Si-O mineral in the NE quartz vein.

### 광산 개요

Pallancata 광산은 주로 은을 생산하는 광산으로 페루에서 두 번째로 큰 광산이다. 이 광산 주변에는 Selene 광산(현재 휴광상태)과 Inmaculada 광산이 분포한다(Fig. 1). 이 광산은 1980년에 Pallancata 및 Mariana 맥들을 발견하였으며 2002년 International Minerals Corporation (IMZ)가 이 일대의 토지를 습득하고 2005년까지 탐사를 수행하였다. 2006년에 International Minerals Corporation (IMZ)는 Hochschild Mining과 Joint Venture 협약을 맺었으며 2007년에 생산을 시작하였다(Hochschildmining homepage: [http://www.hochschildmining.com/en/our\\_operations/current\\_operations/peru/pallancata](http://www.hochschildmining.com/en/our_operations/current_operations/peru/pallancata)). 이 광산은 2013년까지 Joint Venture 협약에 의해 Hochschild사 지분 60 %를 소유하고 나머지 40 %는 International Minerals Corporation (IMZ)이 소유하고 있었으나 현재는 Hochschild사가 지분 100 %를 갖고 있다. 더불어 이 광산에서 채굴된 광석은 22 km 떨어진 Selene 선광시설로 운반하여 선광처리를 하고 있으며 선광시설은 하루 1,000톤을 처리할 수 있다(Hochschildmining homepage).

이 Pallancata 광산은 연간 15 million Oz 생산하고 있으며 가장 많이 생산했을 때는 20 million Oz까지 생산하였다. 현재 이 광산은 갱내 채굴을 하고 있으며 주변에 위치하는 Selene 광산은 과거

> 17 million Oz 생산된 것이 보고되어 있다(Hochschildmining homepage). Pallancata 광산에는 약 100여 개의 석영맥들이 산출되며 주된 방향성으로 3종류의 맥들(NW 방향성 맥들, EW 방향성 맥들, NE 방향성 맥들)로 구분하였다(Fig. 1c). 이번 Pallancata 광산 방문 시 NW 방향성을 갖는 석영맥인 Pallancata 맥(Fig. 2e, f), EW 방향성을 갖는 Yurika 맥(Fig. 2g-i) 및 NE 방향성을 갖는 석영맥(Fig. 2j)에 대해 조사하였다. Pallancata 맥은 이 광산에서 주맥에 해당되며 연장성이 약 3 km 정도로 San Javier 또는 Virgen del Carmen 일대까지 연장되고 수직 연장성은 500 m 정도이다(Fig. 1c). 이 맥의 맥 폭은 지표에서는 최소 1 m에서 최대 25 m 정도이며 지하에서는 2 m에서 3 m 정도이다. 이 맥의 품위는 1~1.5 g/t Au, 250~350 g/t Ag이며 지금까지 채굴된 길이는 약 4.2 km 정도이다. Pallancata 맥은 다시 동부 sector, 중앙 sector 및 서부 sector로 구별되며 현재 갱내 채굴은 동부 sector에서 진행되고 있다(Fig. 1c). Fig. 1c에서 보는 것과 같이, 이 Pallancata 맥은 단층대에 규제되어 산출되며 그 단층대의 방향성은 주향이 NW이나 경사는 북서방향에선 70~85°SW 방향성을 갖으나 남동방향에선 NE 방향성을 갖는다. Yurika 맥은 방향성이 N75~80°E/40~50°SE이나 전반적으로 EW 방향성을 갖는다(Fig. 1c). 이 맥은 1~2.5 m의 맥폭을 가지며 연장성은 약 400 m 정도이고 품위는 800~1,000 g/t



**Fig. 4.** Structural framework of the Pallancata Ag deposit (Modified after Condori, 2016). (a) map showing distribution and orientation of the faults and quartz veins, (b) Riedel's model for the structural framework of the Pallancata Ag deposit.

Ag를 갖는다. NE 방향성의 석영맥은 맥폭이 0.1~1.0 m 정도이고 연장성은 300 m 정도이다(Fig. 1c). 이 석영맥은 모양이 응회암이며 품위는 40 g/t Ag로 저품위에 해당된다.

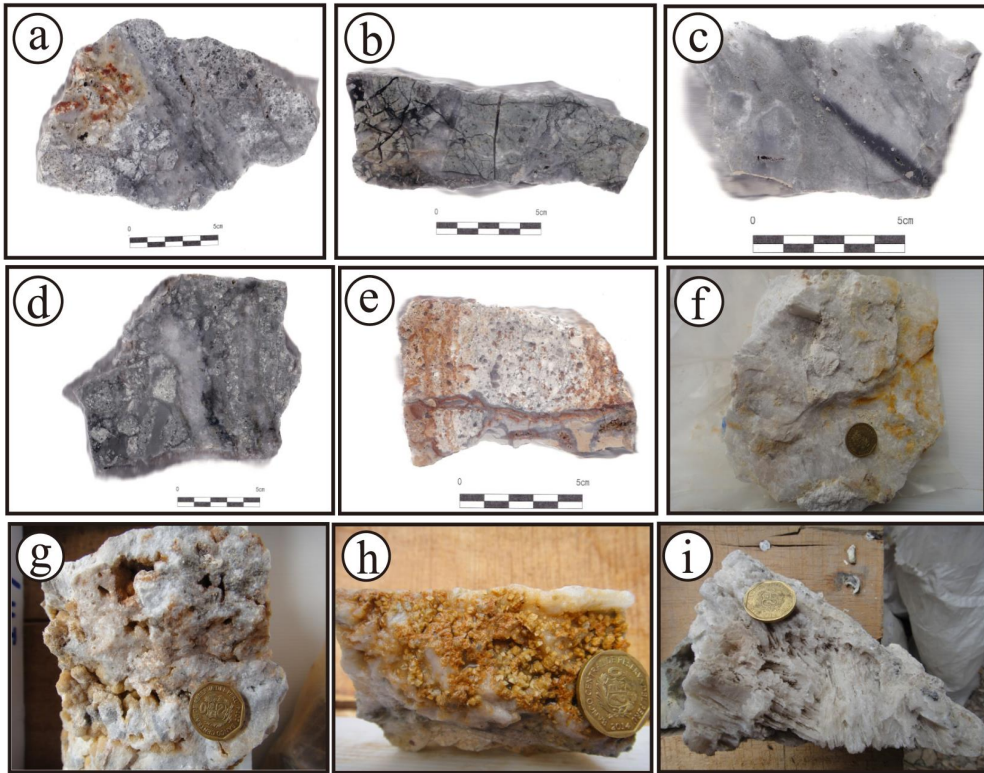
### 광물들의 산출상태 및 화학조성

Pallancata 광산에는 약 100여 개의 석영맥들이 여러 방향성을 갖는 구조대를 따라 산출된다(Fig. 4a). Pallanca 광산 일대에서 관찰되는 구조대 형성은 최하부층인 Tacaza층 형성(32~31 Ma) 후 Nazca 판이 남아메리카 판 아래로 수렴할 때 형성된 대규모 NNW 방향의 좌수향 이동 단층들과 이들 단층들에 의해 형성된 부수 단층들로 구성된다(Margirier *et al.*, 2015). Condori (2016)에 의하면 Pallanca 광산의 광화작용은  $16.58 \pm 0.16$  Ma 테사이트질 응회암 내에 산출된다고 보고하였다. 따라서 광화작용은 최소 이 테사이트질 응회암 퇴적된 후 형성된 것으로 해석되며 그 광화작용과 관련된 화성활동은 Huaylillas arc (24~10 Ma) 또는 Lower Barroso arc (10~3 Ma)과 관련하여 형성된 것으로 생각된다(Decou *et al.*, 2011). Fig. 4a에서 보는 것과 같이, 약 100여 개의 석영맥들은 NW, NE 및 EW 방향성을 갖는 구조대를 따라 산출되는데 이는 주 NW 방향의 좌수향 이동 단층에 의해 형성된 단열대들이며 전형적인 모델을 Fig. 4b로 표시하였다. Pallancata 맥과 같이 NW 방향성을 갖는 맥들은 Riedel synthetics에 해당되며 San Javier 맥, paola 맥, Rina 맥과 같이 NE 방향성을 갖는 맥들은

Riedel antithetics에 해당된다. 더불어 Yurika 맥, Luisa 맥과 같이 EW 방향성을 갖는 맥들은 Tension에 해당된다(Fig. 4b). 이 광산의 주 채굴이 되는 맥들은 Pallancata 맥, San Javier와 Mariana 맥들이다(Hochschildmining homepage).

이번 Pallancata 광산 방문 시 조사된 맥인 Pallancata 맥과 NE 방향성 맥은 지표에서 조사하였으며 단지 Yurika 맥만 채굴하고 있는 갱내에서 조사하였다. 이번 연구에서 은 광물들이 관찰된 맥은 단지 Yurika 맥에서만 산출되었다. 이들 맥들에 대한 산상 및 산출광물을 기재하면 다음과 같다.

Pallancata 맥은 지표에서 관찰하였으며 일부 과거 노천으로 채굴한 흔적도 관찰된다(Fig. 2e). 이 Pallancata 맥은 맥폭이 약 25 m 정도이며 주로 유백색 괴상 석영 및 옥수와 이를 절단하는 투명회백색 내지 암회백색 석영으로 산출된다(Fig. 5a, b). 이 유백색 괴상 석영 및 옥수 내에는 정동구조가 관찰되며 이 정동 내에는 자형의 투명 석영, 방해석, 방장석 등이 산출되나 불투명광물은 관찰되지 않는다(Figs. 2f and 5a, b). 이 석영맥은 대상(zonation), 정동(cavity), 괴상(massive), 각력상(breccia), crustiform, colloform 및 comb 조직들이 관찰되며 일부 방해석은 bladed하게 산출된다(Figs. 2f and 5g-i). 이 맥에서 관찰되는 모양변질로는 주로 규화작용이 맥 주변부를 따라 관찰되나 많은 곳에서 석영맥 내 모양과편들이 관찰되는데 이들 과편들은 대부분 규화작용, 황철석화작용 및 견운모화작용되어 산출된다(Fig. 5a, b). 황철석은 모양변질산물, 유백색 석영 및 투명회백색 내지 암회백색 석영 내에 자형



**Fig. 5.** Photographs of quartz veins in the Pallancata Ag deposit showing various alteration and textural features. (a) and (b) the Pallancata vein, (c) and (d) the Yurika vein, (e) the NE quartz vein, (f) sericite alteration (drilled core), (g) euhedral drusy quartz in cavity (drilled core), (h) adularia crystals in quartz vein (drilled core), (i) bladed calcite (drilled core).

의 단독 상태로 산출된다(Fig. 3c, d). 현미경하에서 산출되는 광물들은 석영, 황철석, 빙장석, 금홍석, 저어콘, 인회석 및 철산화물 등이고 합금은 광물은 관찰되지 않는다(Figs. 3c, d and 6a~c).

Yurika 맥은 해발(4,600 m) 지점에서 하부 200 m 지점인 갱내 4,432 m 지점 막장에서 관찰되었다. 이 맥은 유백색의 괴상으로 일부 정공이 관찰되며 주로 석영, 방해석, 빙장석, 옥수 및 일부 형석 등이 산출되며 이를 투명회백색 내지 암회백색 석영이 절단하여 산출된다(Fig. 2g~i). 모암변질로는 주로 규화작용이고 일부 황철석화작용, 견운모화작용 및 점토화작용 등이 관찰된다(Fig. 5c, d). 이 맥에서 산출되는 광석광물로는 주로 황철석이고 암회색의 은 광물들이 대상(1~2 cm) 또는 산점상으로 산출된다(Figs. 2h, i and 5c, d). 은 광물들은 투명회백색 내지 암회백색 석영과 관련되어 산출된다(Fig. 5c, d). 현미경하에서 관찰되는 광물은 석영, 빙장석,

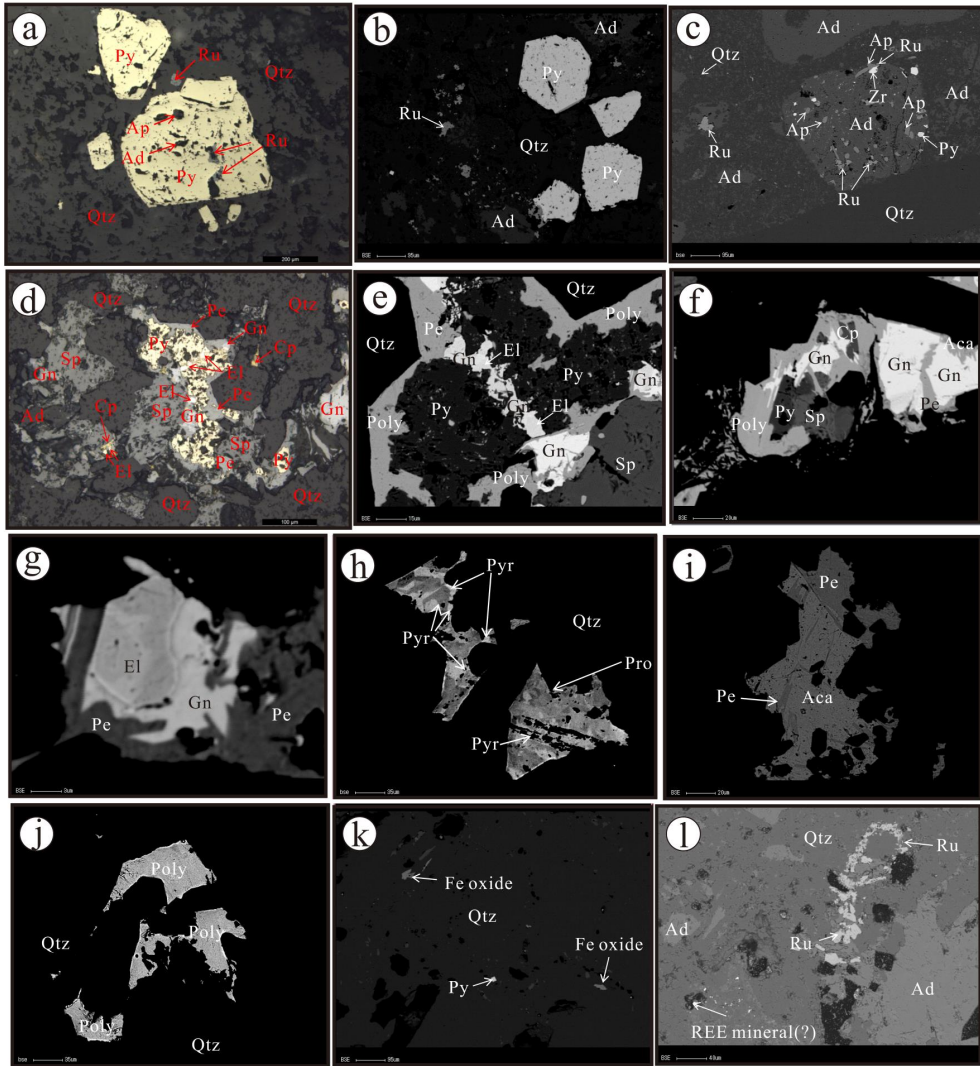
황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 에렉트럼, proustite-pyrargyrite, pearceite-polybasite 및 acanthite 등이다(Figs. 3e, f and 6d, i).

황철석은 모암변질산물 및 유백색 석영 내에 자형의 단독으로 산출된다. 그러나 회백색 석영 내지 암회백색 석영 내에서 관찰되는 황철석은 자형의 단독으로 맥의 주변부나 중심부에 산출되거나 섬아연석, 황동석, 방연석, 에렉트럼, proustite-pyrargyrite, pearceite-polybasite 및 acanthite과 함께 산출된다(Figs. 5c, d and 6d). EPMA에 의한 황철석의 정량분석 결과, 미량원소로 As 1.17 wt.%, In 0.07 wt.%, Zn 0.06 wt.%, Co 0.05 wt.% 및 Te 0.05 wt.%로써 As가 다소 높게 함유되어 있다(Table 1). 섬아연석은 회백색 석영 내지 암회백색 석영 내에서 산출되는 황철석 및 방연석과 함께 산출된다(Fig. 5c, d). 현미경하에서 섬아연석은 황철석, 황동석, 방연석, 에렉트럼 및 pearceite-polybasite와 함

**Table 1.** Chemical composition of sphalerite, pyrite and galena from Yurika vein of the Pallancata Ag mine

Sample No.	Weight %														Mole %				Mineral				
	Ag	Zn	Cu	Cd	Hg	Fe	Mn	Co	In	Pb	Ge	Ta	Te	As	Sb	Bi	Se	S		Total	FeS	CdS	MnS
6	0.00	65.50	0.00	0.60	0.00	0.41	0.15	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	32.78	99.54	0.72	0.52	0.27	Sphalerite
33	0.01	66.81	0.01	0.62	0.00	0.39	0.23	0.02	0.01	0.00	0.00	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	32.69	100.87	0.67	0.53	0.41	Sphalerite
34	0.00	65.98	0.01	0.54	0.00	0.37	0.18	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	32.63	99.78	0.65	0.47	0.33	Sphalerite
35	0.00	66.47	0.00	0.56	0.00	0.30	0.09	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.04	0.00	0.00	32.60	100.15	0.52	0.48	0.16	Sphalerite
36	0.03	66.71	0.04	0.57	0.04	0.32	0.18	0.01	0.08	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.84	100.88	0.55	0.49	0.32	Sphalerite
37	0.04	65.90	0.00	0.59	0.00	0.35	0.18	0.00	0.00	0.00	0.10	0.07	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	33.06	100.35	0.61	0.51	0.33	Sphalerite
38	0.00	66.21	0.01	0.56	0.00	0.41	0.20	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	32.85	100.29	0.71	0.48	0.36	Sphalerite
39	0.00	65.49	0.02	0.61	0.00	0.26	0.06	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.96	99.43	0.46	0.54	0.11	Sphalerite
44	0.03	66.11	0.03	0.39	0.00	0.95	0.07	0.01	0.01	0.00	0.10	0.05	0.02	0.06	0.04	0.00	0.00	32.54	100.41	1.64	0.33	0.13	Sphalerite
30	0.05	66.21	0.08	0.29	0.00	0.69	0.02	0.00	0.02	0.00	0.04	0.04	0.04	0.00	0.02	0.00	0.00	32.83	100.33	1.20	0.25	0.04	Sphalerite
31	0.02	67.52	0.05	0.30	0.00	0.68	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	32.85	101.46	1.16	0.25	0.00	Sphalerite
32	0.01	67.84	0.04	0.34	0.00	0.65	0.01	0.01	0.07	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	33.25	102.23	1.10	0.29	0.02	Sphalerite
7	0.02	0.06	0.03	0.00	0.02	45.31	0.00	0.05	0.07	0.00	0.01	0.03	0.05	1.17	0.00	0.00	0.00	53.81	100.63				Pyrite
4	0.00	1.01	0.00	0.00	0.10	0.34	0.00	0.00	0.01	85.42	0.09	0.00	0.04	0.00	0.00	0.02	0.04	13.90	100.97				Galena
5	0.00	0.38	0.07	0.00	0.00	0.44	0.01	0.02	0.01	84.58	0.12	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.13	13.65	99.43				Galena
8	0.04	1.53	0.00	0.00	0.10	0.25	0.00	0.00	0.05	84.95	0.12	0.08	0.00	0.00	0.02	0.06	0.03	13.68	100.91				Galena
18	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	85.66	0.07	0.03	0.01	0.00	0.00	0.10	0.00	14.17	100.10				Galena





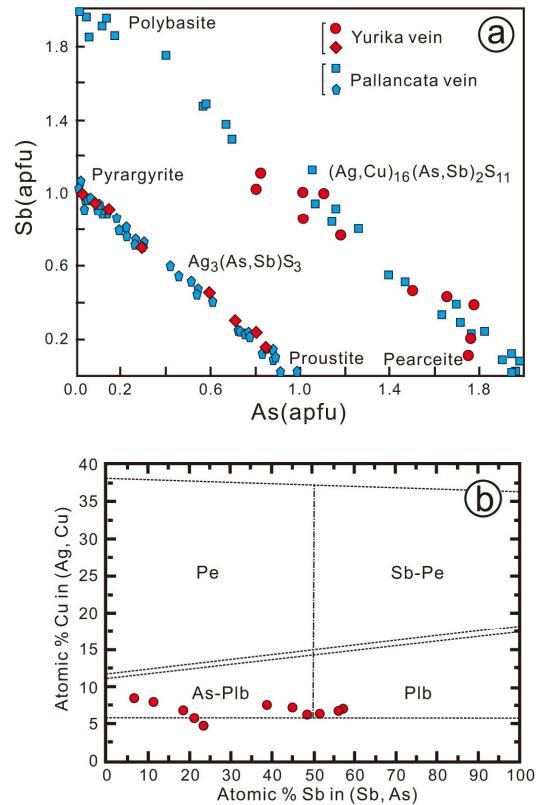
**Fig. 6.** Microphotographs of ore and gangue minerals in quartz veins of the Pallancata Ag deposit. (a), (b) and (c) pyrite inter-growing with rutile, apatite and adularia in the Pallancata vein, (d), (e) and (f) sphalerite inter-growing with pyrite, chalcopyrite, galena, electrum and pearceite-polybasite in the Yurika vein, (g) electrum inter-growing with galena and pearceite in the Yurika vein, (h) proustite-pyrrargyrite in the Yurika vein, (i) acanthite inter-growing with pearceite of the Yurika vein, (j) polybasite in the Yurika vein, (k) pyrite and Fe oxide in the NE quartz vein, (l) rutile inter-growing with adularia and REE mineral (?) in the NE quartz vein. Abbreviations; Aca = acanthite, Ad = adularia, Ap = apatite, Cp = chalcopyrite, El = electrum, Gn = galena, Qtz = quartz, Pe = pearceite, Poly = polybasite, Pro = proustite, Py = pyrite, Pyr = pyrrargyrite, Ru = rutile, Sp = sphalerite.

계 산출된다(Fig. 6d~f). EPMA에 의한 점아연석의 정량분석 결과, Fe 0.26~0.95 wt.%, Cd 0.29~0.62 wt.% 및 Mn 0.00~0.23 wt.%로써 Cd가 소량 함유되거나 거의 순수한 점아연석으로 산출된다(Table 1).

황동석은 육안으로 식별되지 않고 현미경하에서만 관찰되며 산출빈도와 산출량이 높지 않다. 현미경하에서 황동석은 점아연석, 에렉트럼 및 방연석과 함께 산출된다(Fig. 6d~f). 방연석은 황철석 및 점

아연석과 함께 산출되며 현미경하에서 황철석, 섬아연석, 황동석, 에렉트럼, acanthite, pearceite-polybasite 및 proustite-pyrargyrite와 함께 산출된다(Fig. 6d-g). EPMA에 의한 방연석의 정량분석 결과, Zn 0.00~1.53 wt.%, Fe 0.00~0.44 wt.%, Ge 0.07~0.12 wt.%, Bi 0.00~0.10 wt.% 및 Se 0.00~0.13 wt.% 까지 함유되어 있다(Table 1).

에렉트럼은 육안으로 식별이 되지 않고 현미경하에서만 관찰되며 산출빈도와 산출량은 높지 않다. 이 광물은 주로 황철석, 섬아연석, 방연석 및 pearceite-polybasite와 함께 산출된다(Fig. 6d, e, g). 에렉트럼에 대한 전자현미분석(EPMA)의 이차전자상(BSE) 관찰에서 2개의 상으로 관찰되며 이들 상에 대한 화학분석 결과 금과 은 조성 변화가 관찰된다(Fig. 6g). 이 광물의 화학조성은 Au 31.16~46.24 wt.%, Ag 48.73~65.56 wt.%이며 소량 Zn, Cd, Hg, Fe, In, Te, Bi 및 S 원소들이 검출된다(Table 2). Proustite-pyrargyrite은 육안으로 식별이 가능하며 산출빈도와 산출량이 높다. 이 광물은 주로 황철석, 섬아연석, 방연석, pearceite-polybasite 및 acanthite와 함께 산출되나 일부는 석영 내에 단독으로 산출되기도 한다(Fig. 6h). Proustite-pyrargyrite에 대한 전자현미분석(EPMA)의 이차전자상(BSE) 관찰에서 proustite는 어렵게 관찰되며 pyrargyrite는 밝게 관찰된다(Fig. 6h). 이 광물에 대한 EPMA 정량분석 결과는 Table 3과 같다. 이 도표에서 보는 바와 같이, Ag에 소량, Cu, Cd 및 In이 그리고 S에 소량 Se 및 Te이 치환되어 있음을 알 수 있다. 이 광물 내 미량원소 함량은 Gamarra-Urrunaga *et al.* (2013)에 의해 보고된 Pallancata 맥에서 산출되는 proustite-pyrargyrite 내 미량원소 함량보다 높게 산출된다. 또한 Fig. 7a에서 보는 것과 같이, Yurika 맥에서 산출되는 proustite-pyrargyrite의 화학조성은 Pallancata 맥에서 산출되는 proustite-pyrargyrite의 화학조성과 같이 전반적인 조성을 갖고 산출된다. Pearceite-polybasite은 육안으로 식별이 가능하며 산출빈도와 산출량이 높다. 이 광물은 주로 황철석, 섬아연석, 방연석, 에렉트럼, proustite-pyrargyrite 및 acanthite와 함께 산출된다(Fig. 6e-g, i). 이 광물에 대한 EPMA 정량분석 결과는 Table 4와 같다. 이 도표에서 보는 바와 같이, Ag 및 Cu에 소량 Zn, Cd, Fe 및 In이 그리고 S에 소량 Se 및 Te이 치환되어 있음을 알 수 있다. 이 광물 내 미량원소 함량은 Gamarra-Urrunaga *et al.* (2013)에 의해 보고된 Pallancata 맥에서 산출되는 pearceite-poly-



**Fig. 7.** (a) As vs. Sb (apfu) in minerals including pyrargyrite-proustite and polybasite-pearceite solid solution series in the Yurika vein and Pallancata vein (Gamarra-Urrunaga *et al.*, 2013), (b) relationship between the atomic % of Sb in (Sb, As) and the atomic % of Cu in (Ag, Cu) after Hall (1967).

basite 내 미량원소 함량보다 높게 산출되나 Cu 및 Au 함량은 낮게 산출된다. 또한 Fig. 7a에서 보는 것과 같이, Yurika 맥에서 산출되는 pearceite-polybasite의 화학조성은 Pallancata 맥에서 산출되는 pearceite-polybasite의 화학조성과 달리 pearceite 화학조성에 근접하여 산출된다. 이 광물에 대한 화학조성을 가지고 Hall (1967)이 제시한 광물분류 상관도에 도시하여 보면 대부분 As-polybasite 영역에 도시되고 일부 polybasite 영역에 도시된다(Fig. 7b). 최근 pearceite-polybasite group에 대한 Bindi *et al.* (2007)의 새로운 광물명 분류 연구에 의하면 Yurika 맥에서 산출되는 As-polybasite는 pearceite로 분류된다(Table 4, Fig. 7a). Acanthite ( $Ag_2S$ )은 육안으로 식별이 되지 않고 현미경하에서만 관찰되며 산출빈도와 산출량은 다른 은 광물들보다 낮다. 이

**Table 2.** Chemical composition of electrum from Yurika vein of the Pallancata Ag mine

Sample No.	Weight %														S	Total							
	Au	Ag	Zn	Cu	Cd	Hg	Fe	Mn	Co	Ni	In	Pb	Sn	Ge			Ta	Te	As	Sb	Bi	Se	
1	33.81	62.43	0.07	0.00	0.46	0.78	0.80	0.01	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.15	0.02	0.13	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.09	99.26
2	46.24	48.99	0.00	0.01	0.37	0.80	0.94	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	0.10	97.89
9	31.16	65.56	0.74	0.00	0.48	0.88	0.29	0.00	0.00	0.01	0.18	0.00	0.00	0.01	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.06	99.70
10	46.24	48.73	1.21	0.00	0.33	0.67	0.35	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.38	0.00	0.08	98.19

Sample No.	Atomic %														S	Ag/Au
	Au	Ag	Zn	Cd	Hg	Fe	Hg	In	Sn	Ge	Ta	Te	As	Sb		
1	21.91	73.89	0.14	0.52	0.50	1.83	0.24	0.26	0.18	0.13	0.15	0.09	0.43	1.93		
2	32.63	63.12	0.00	0.46	0.55	2.34	0.21	0.00	0.17	0.15	0.09	0.23	3.84			
9	19.85	76.26	1.42	0.54	0.55	0.65	0.20	0.02	0.17	0.17	0.10	0.23	1.92			
10	32.44	62.43	2.56	0.41	0.46	0.87	0.18	0.00	0.05	0.05	0.25	0.34	1.92			

**Table 3.** Chemical composition of proustite-pyrargyrite from Yurika vein of the Pallancata Ag mine

Sample No.	Weight %														S	Total	Mineral				
	Au	Ag	Zn	Cu	Cd	Hg	Fe	Mn	Co	Ni	In	Pb	Sn	Ge				Ta	Te	As	Sb
22	0.11	58.95	0.00	0.31	0.53	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.13	0.01	0.12	0.05	0.85	22.45	0.42	17.81	101.84	(Ag <sub>2.92</sub> Fe <sub>0.01</sub> Cu <sub>0.03</sub> Cd <sub>0.03</sub> In <sub>0.01</sub> ) <sub>2.99</sub> (Sb <sub>0.99</sub> As <sub>0.06</sub> ) <sub>1.05</sub> (S <sub>2.97</sub> Se <sub>0.03</sub> ) <sub>3.00</sub>	Pyrargyrite
23	0.00	60.19	0.00	0.15	0.51	0.00	0.01	0.00	0.02	0.14	0.01	0.05	0.09	4.22	16.36	0.45	18.22	100.43	(Ag <sub>2.91</sub> Cu <sub>0.01</sub> Cd <sub>0.02</sub> In <sub>0.01</sub> ) <sub>2.96</sub> (Sb <sub>0.70</sub> As <sub>0.29</sub> ) <sub>1.00</sub> (S <sub>2.97</sub> Se <sub>0.03</sub> ) <sub>3.00</sub>	Pyrargyrite	
24	0.00	61.32	0.01	0.18	0.49	0.00	0.05	0.01	0.00	0.02	0.13	0.00	0.00	0.05	12.55	4.20	0.05	19.21	98.27	(Ag <sub>2.84</sub> Cu <sub>0.01</sub> Cd <sub>0.02</sub> In <sub>0.01</sub> ) <sub>2.89</sub> (Sb <sub>0.17</sub> As <sub>0.84</sub> ) <sub>1.01</sub> S <sub>3.00</sub>	Proustite
25	0.08	58.68	0.00	0.30	0.52	0.00	0.07	0.00	0.00	0.04	0.12	0.03	0.04	0.06	1.19	21.72	0.12	17.91	100.88	(Ag <sub>2.91</sub> Fe <sub>0.01</sub> Cu <sub>0.03</sub> Cd <sub>0.02</sub> In <sub>0.01</sub> ) <sub>2.98</sub> (Sb <sub>0.95</sub> As <sub>0.08</sub> ) <sub>1.04</sub> (S <sub>2.99</sub> Se <sub>0.01</sub> ) <sub>3.00</sub>	Pyrargyrite
19	0.02	60.84	0.08	0.27	0.60	0.02	0.02	0.03	0.00	0.05	0.16	0.07	0.00	0.11	8.66	10.66	0.19	18.74	100.52	(Ag <sub>2.88</sub> Cu <sub>0.02</sub> Zn <sub>0.01</sub> Cd <sub>0.03</sub> In <sub>0.01</sub> ) <sub>2.95</sub> (Sb <sub>0.45</sub> As <sub>0.59</sub> ) <sub>1.04</sub> (S <sub>2.98</sub> Se <sub>0.01</sub> Te <sub>0.01</sub> ) <sub>3.00</sub>	Pyrargyrite-proustite
21	0.06	62.21	0.00	0.35	0.54	0.00	0.03	0.01	0.03	0.04	0.21	0.00	0.12	0.10	11.71	5.70	0.00	18.87	99.98	(Ag <sub>2.94</sub> Cu <sub>0.05</sub> Cd <sub>0.02</sub> In <sub>0.01</sub> ) <sub>3.00</sub> (Sb <sub>0.24</sub> As <sub>0.80</sub> ) <sub>1.03</sub> (S <sub>2.99</sub> Te <sub>0.01</sub> ) <sub>3.00</sub>	Proustite
53	0.11	61.44	0.06	0.38	0.68	0.00	0.05	0.00	0.00	0.12	0.00	0.09	0.11	10.75	7.24	0.07	19.25	100.35	(Ag <sub>2.84</sub> Cu <sub>0.03</sub> Cd <sub>0.03</sub> In <sub>0.01</sub> ) <sub>2.92</sub> (Sb <sub>0.30</sub> As <sub>0.71</sub> ) <sub>1.01</sub> (S <sub>2.99</sub> Te <sub>0.01</sub> ) <sub>3.00</sub>	Proustite	
54	0.00	58.29	0.15	0.40	0.51	0.00	0.01	0.03	0.06	0.17	0.04	0.00	0.06	1.93	21.30	0.00	18.00	100.95	(Ag <sub>2.89</sub> Cu <sub>0.03</sub> Zn <sub>0.01</sub> Cd <sub>0.02</sub> Ni <sub>0.01</sub> In <sub>0.01</sub> ) <sub>2.97</sub> (Sb <sub>0.93</sub> As <sub>0.14</sub> ) <sub>1.07</sub> S <sub>3.00</sub>	Pyrargyrite	

**Table 4.** Chemical composition of pearceite-polybasite from Yurika vein of the Pallancata Ag mine

Sample No.	Weight %											Total	Structural formulae	Old mineral-name <sup>1</sup>	New mineral-name <sup>2</sup>				
	Au	Ag	Zn	Cu	Cd	Hg	Fe	Ni	In	Ge	Te					As	Sb	Se	S
3	0.07	71.61	0.10	3.73	0.57	0.00	0.22	0.00	0.21	0.13	0.12	5.92	0.67	0.65	15.64	99.64	(Ag <sub>14.69</sub> Au <sub>0.01</sub> Fe <sub>0.09</sub> Cu <sub>1.30</sub> Zn <sub>0.03</sub> Cd <sub>0.11</sub> In <sub>0.04</sub> ) <sub>16.27</sub> (Sb <sub>0.12</sub> As <sub>1.75</sub> Ge <sub>0.04</sub> ) <sub>1.91</sub> (S <sub>10.80</sub> Se <sub>0.18</sub> Te <sub>0.02</sub> ) <sub>11.00</sub>	As-polybasite	Pearceite
11	0.12	72.12	0.13	3.55	0.51	0.00	0.01	0.00	0.15	0.00	0.56	6.16	1.27	0.50	15.88	100.96	(Ag <sub>14.55</sub> Au <sub>0.01</sub> Cu <sub>1.21</sub> Zn <sub>0.04</sub> Cd <sub>0.10</sub> In <sub>0.03</sub> ) <sub>15.94</sub> (Sb <sub>0.23</sub> As <sub>1.79</sub> 2.01(S <sub>10.77</sub> Se <sub>0.14</sub> Te <sub>0.10</sub> ) <sub>11.00</sub>	As-polybasite	Pearceite
12	0.03	71.42	0.08	3.16	0.58	0.12	0.44	0.00	0.20	0.00	1.21	2.69	5.61	0.62	15.28	101.44	(Ag <sub>14.75</sub> Fe <sub>0.18</sub> Cu <sub>1.11</sub> Zn <sub>0.03</sub> Cd <sub>0.12</sub> In <sub>0.04</sub> Hg <sub>0.01</sub> ) <sub>16.23</sub> (Sb <sub>1.05</sub> As <sub>0.80</sub> ) <sub>1.83</sub> (S <sub>10.61</sub> Se <sub>0.18</sub> Te <sub>0.21</sub> ) <sub>11.00</sub>	Polybasite	Polybasite
46	0.00	67.10	3.05	3.21	0.70	0.03	0.03	0.02	0.20	0.02	1.43	3.95	4.13	0.89	14.96	99.72	(Ag <sub>13.99</sub> Fe <sub>0.01</sub> Cu <sub>1.14</sub> Zn <sub>1.05</sub> Cd <sub>0.14</sub> Ni <sub>0.01</sub> In <sub>0.04</sub> ) <sub>16.38</sub> (Sb <sub>0.76</sub> As <sub>1.19</sub> Ge <sub>0.04</sub> ) <sub>1.96</sub> (S <sub>10.49</sub> Se <sub>0.25</sub> Te <sub>0.23</sub> ) <sub>11.00</sub>	As-polybasite	Pearceite
48	0.00	65.09	1.55	2.85	0.58	0.00	0.08	0.00	0.23	0.00	1.77	2.67	5.95	0.73	14.72	96.22	(Ag <sub>13.76</sub> Fe <sub>0.05</sub> Cu <sub>1.05</sub> Zn <sub>0.54</sub> Cd <sub>0.12</sub> In <sub>0.05</sub> ) <sub>15.52</sub> (Sb <sub>1.12</sub> As <sub>0.81</sub> ) <sub>1.93</sub> (S <sub>10.47</sub> Se <sub>0.21</sub> Te <sub>0.32</sub> ) <sub>11.00</sub>	Polybasite	Polybasite
52	0.00	65.35	3.26	2.90	0.60	0.00	0.04	0.06	0.16	0.00	1.91	3.54	4.64	0.68	14.99	98.13	(Ag <sub>13.57</sub> Fe <sub>0.02</sub> Cu <sub>1.05</sub> Zn <sub>1.12</sub> Cd <sub>0.12</sub> In <sub>0.03</sub> ) <sub>15.90</sub> (Sb <sub>0.85</sub> As <sub>1.06</sub> ) <sub>1.91</sub> (S <sub>10.45</sub> Se <sub>0.19</sub> Te <sub>0.34</sub> ) <sub>11.00</sub>	As-polybasite	Pearceite
45	0.15	65.80	1.86	2.57	0.85	0.00	0.09	0.03	0.20	0.00	3.35	3.37	5.68	2.05	13.36	99.36	(Ag <sub>14.31</sub> Au <sub>0.02</sub> Fe <sub>0.04</sub> Cu <sub>0.95</sub> Zn <sub>0.67</sub> Cd <sub>0.18</sub> Ni <sub>0.01</sub> In <sub>0.04</sub> ) <sub>16.21</sub> (Sb <sub>1.09</sub> As <sub>1.06</sub> ) <sub>2.15</sub> (S <sub>9.78</sub> Se <sub>0.61</sub> Te <sub>0.62</sub> ) <sub>11.00</sub>	Polybasite	Polybasite
48	0.00	66.06	1.48	2.57	0.83	0.00	0.04	0.02	0.21	0.00	2.22	3.50	5.28	0.71	14.07	96.99	(Ag <sub>14.48</sub> Fe <sub>0.02</sub> Cu <sub>0.96</sub> Zn <sub>0.54</sub> Cd <sub>0.17</sub> Ni <sub>0.01</sub> In <sub>0.04</sub> ) <sub>16.21</sub> (Sb <sub>1.05</sub> As <sub>1.10</sub> ) <sub>2.13</sub> (S <sub>10.38</sub> Se <sub>0.21</sub> Te <sub>0.41</sub> ) <sub>11.00</sub>	As-polybasite	Pearceite
51-1	0.00	65.75	2.70	2.84	0.72	0.00	0.11	0.05	0.16	0.00	2.44	5.77	2.07	0.83	14.35	97.79	(Ag <sub>14.05</sub> Fe <sub>0.05</sub> Cu <sub>1.05</sub> Zn <sub>0.95</sub> Cd <sub>0.15</sub> Ni <sub>0.02</sub> In <sub>0.03</sub> ) <sub>16.28</sub> (Sb <sub>0.39</sub> As <sub>1.78</sub> ) <sub>2.17</sub> (S <sub>10.33</sub> Se <sub>0.24</sub> Te <sub>0.44</sub> ) <sub>11.00</sub>	As-polybasite	Pearceite
59	0.00	69.86	0.00	1.56	0.89	0.00	0.09	0.00	0.13	0.00	0.41	4.58	2.35	1.06	13.85	94.78	(Ag <sub>15.88</sub> Fe <sub>0.04</sub> Cu <sub>0.60</sub> Cd <sub>0.19</sub> In <sub>0.03</sub> ) <sub>16.74</sub> (Sb <sub>0.47</sub> As <sub>1.50</sub> ) <sub>1.97</sub> (S <sub>10.59</sub> Se <sub>0.33</sub> Te <sub>0.08</sub> ) <sub>11.00</sub>	As-polybasite	Pearceite
60	0.00	67.59	0.00	2.12	0.71	0.07	0.00	0.00	0.18	0.00	0.71	5.45	2.31	1.20	14.84	95.18	(Ag <sub>14.25</sub> Cu <sub>0.76</sub> Cd <sub>0.14</sub> In <sub>0.04</sub> Hg <sub>0.01</sub> ) <sub>15.20</sub> (Sb <sub>0.43</sub> As <sub>1.05</sub> ) <sub>2.09</sub> (S <sub>10.53</sub> Se <sub>0.35</sub> Te <sub>0.13</sub> ) <sub>11.00</sub>	As-polybasite	Pearceite

<sup>1</sup> Hall (1967), <sup>2</sup> Bindi *et al.* (2007).

**Table 5.** Chemical composition of acanthite from Yurika vein of the Pallancata Ag mine

Sample No.	Weight %											Total	Structural formulae							
	Au	Ag	Zn	Cu	Cd	Hg	Fe	Mn	Co	Ni	In			Ge	Te	As	Sb	Bi	Se	S
14	0.01	85.33	0.00	0.00	0.68	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00	0.20	0.01	0.12	0.00	0.00	0.49	13.87	100.76	(Ag <sub>1.80</sub> Cd <sub>0.01</sub> In <sub>0.01</sub> ) <sub>1.82</sub> (S <sub>9.99</sub> Se <sub>0.01</sub> ) <sub>1.00</sub>	
16	0.05	85.50	0.00	0.08	0.78	0.04	0.03	0.00	0.00	0.06	0.11	0.00	0.07	0.00	0.00	0.85	12.88	100.45	(Ag <sub>1.92</sub> Cd <sub>0.02</sub> In <sub>0.01</sub> ) <sub>1.95</sub> (S <sub>9.97</sub> Se <sub>0.03</sub> ) <sub>1.00</sub>	
55	0.05	84.41	0.07	0.04	0.71	0.07	0.03	0.06	0.02	0.02	0.18	0.00	0.04	0.01	0.00	1.47	12.75	99.93	(Ag <sub>1.86</sub> Cd <sub>0.02</sub> In <sub>0.01</sub> ) <sub>1.91</sub> (S <sub>9.95</sub> Se <sub>0.04</sub> ) <sub>1.00</sub>	
56	0.00	84.07	0.00	0.07	0.64	0.08	0.00	0.04	0.00	0.03	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	13.28	99.09	(Ag <sub>1.85</sub> Cd <sub>0.02</sub> In <sub>0.01</sub> ) <sub>1.88</sub> (S <sub>9.98</sub> Se <sub>0.02</sub> ) <sub>1.00</sub>	
57	0.00	85.29	0.00	0.03	0.68	0.04	0.01	0.00	0.00	0.03	0.10	0.03	0.18	0.06	0.10	1.52	12.21	100.28	(Ag <sub>1.97</sub> Cd <sub>0.02</sub> In <sub>0.01</sub> ) <sub>2.00</sub> (S <sub>9.95</sub> Se <sub>0.05</sub> ) <sub>1.00</sub>	
58	0.13	85.63	0.00	0.12	0.74	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.07	0.01	0.00	0.05	1.01	13.23	101.19	(Ag <sub>1.86</sub> Cd <sub>0.02</sub> In <sub>0.01</sub> ) <sub>1.89</sub> (S <sub>9.97</sub> Se <sub>0.03</sub> ) <sub>1.00</sub>

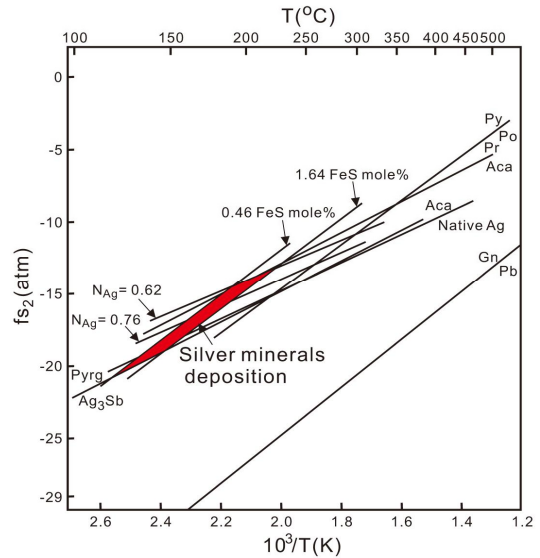
광물은 주로 황철석, 섬아연석, 방연석 및 pearceite-polybasite와 함께 산출된다(Fig. 6f, i). Acanthite에 대한 EPMA 정량분석 결과, Ag에 소량 Cd, In이 그리고 S에 소량 Se 및 Te이 치환되어 있음을 알 수 있다(Table 5).

NE 석영맥은 응회암 내에 산출되며 주로 백색 석영, 투명 석영, 옥수 및 방해석 등이 관찰되나 황철석 외 다른 황화광물이나 은 광물들은 관찰되지 않는다(Figs. 3j and 5e). 모암변질로는 주로 규화작용, 건운모화작용 및 점토화작용 등이 관찰된다(Fig. 5e). 이 석영맥은 대상, 정동, 괴상, 각력상, crustiform, colloform 및 comb 조직들이 관찰되며 일부 방해석은 bladed하게 산출된다. 황철석은 모암변질산물 및 유백색 석영 내에 자형의 단독 상태로 산출된다. 현미경하에서 산출되는 광물들은 석영, 방해석, 황철석, 방연석, 빙장석, 금홍석, 인회석, 건운모, 녹니석, REE계 광물, 철산화물, Cr-O계 광물 및 Al-Si-O계 광물 등이다(Figs. 3g, h and 6k, l).

추가적으로 이 광산 시추코아센터의 시추코아를 대상으로 석영맥 및 산출광물에 대해 기술하면 다음과 같다. 관찰된 시추코아들에 대한 정확한 산출맥에 대한 정보는 알 수 없었다. 건운모, 빙장석 및 bladed 방해석은 유백색 내지 회백색 석영과 함께 산출된다(Fig. 5f-i).

### 토의 및 결론

Pallancata 광산은 은을 주로 생산하는 광산으로 페루에서 두 번째로 큰 광산으로써 신생대의 화산암류 및 화성암류 내에 NW 방향의 좌수향 이동 단층에 의해 형성된 단열대들을 증진한 천열수성은 광상이며 석영맥은 대상, 정동, 괴상, 각력상, crustiform, colloform 및 comb 조직이 관찰된다. 광산의 야외조사와 광석의 산출상태, 광물의 공생관계 및 조성을 기초로 하여 광화시기를 나누면 이 광산은 유백색 석영 + 방해석맥(I 시기), 투명회백색 내지 암회백색 석영 + 방해석맥(II 시기), 서로 다른 3시기의 투명백색 석영 + 방해석맥들(III, IV, V 시기들)로 구성된다(Fig. 5a-e). I 시기인 유백색 석영 + 방해석맥은 주로 모암변질작용(규화작용, 건운모화작용, 황철석화작용) 및 천금속(base metal) 광석광물이 정출한 시기이다. 이 시기는 석영맥에서 모암으로 감에 따라 주변부에는 규화작용이 강하고 모암으로 감에 따라 건운모화작용이 관찰된

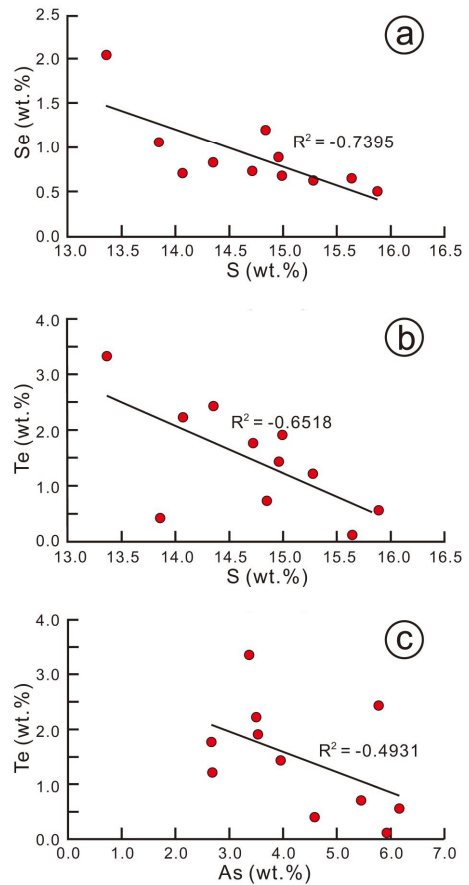


**Fig. 8.** Temperature vs. sulfur fugacity ( $f_{S_2}$ ) diagram estimated from mineral composition and mineral assemblage in the Yurika vein of the Pallancata Ag deposit.

다. 더불어 석영맥 내에 빙장석이 관찰되는 것으로 보아 초기 열수용액 내 높은 K/H 비율을 가지고 있었거나 모암 내 주 광물이었던 사장석(알바이트) 및 흑운모와 열수의 반응에 의해 칼리장석, 황철석 및 석영 형성과 더불어 Na 원소의 loss로 인해 형성되었으며 광화작용이 진행됨에 따라 열수용액의 pH는 약산성으로 변화되었음을 알 수 있다. 은 광물들의 정출과 관련된 시기는 II 시기인 투명회백색 내지 암회백색 석영 + 방해석맥으로 석영, 방해석, 빙장석, 건운모, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 에렉트럼, proustite-pyrargyrite, pearceite-polybasite 및 acanthite 등이 공생관계를 가지며 산출된다. 이 공생군을 이용하여 생성온도와 황분압( $f_{S_2}$ )을 추정하여 보았다. 이 공생광물들의 열역학적 자료, 섬아연석의 0.46~1.64 mole% FeS 값과 에렉트럼의 62.43~76.26 atomic % Ag 값을 이용하여 구한 생성온도와 황분압( $f_{S_2}$ )은 각각 118~222 °C,  $10^{-20.8}$ ~ $10^{-13.2}$  atm. 범위를 보인다(Fig. 8) 이 생성온도와 황분압( $f_{S_2}$ )은 Gamarra-Urrunaga *et al.* (2013)에 의해 보고된 Pallancata 맥의 은 광화작용과 관련된 생성온도(260~200 °C) 및 황분압( $f_{S_2}$ ) ( $10^{-16.0}$ ~ $10^{-8.0}$  atm)보다 낮은 값을 갖는 것으로 보아 Yurika 맥의 은 광화작용은 좀더 낮은 온도 및 황분압에서 형성 되었음을 알 수 있다.

특히, 섬아연석, 에렉트럼, proustite-pyrargyrite, pearceite-polybasite 및 acanthite은 소량 Cd, In, Te 및 Se 원소들이 함유되어 있다(Tables 1~5). 일반적으로 Cd은 아연광상에서 산출되는 섬아연석, 황동석, 황철석 및 방연석 내에 소량 함유되며 특히 섬아연석의 경우 최대 5 wt.% Cd를 함유하는 것으로 보고되어 있다(Schwartz, 2000). In 함량은 섬아연석, 황동석, 황석석 및 주석에서 높게 산출되며 철, 구리, 주석, 비소 등의 원소를 치환한다고 보고하였다(Schampera and Herzig, 2002). 가장 중요한 In 함유 광물은 섬아연석 및 황동석으로 Zn 및 Cu의 함량과 매우 밀접하다(Schampera and Herzig, 2002). Yurika 맥에서 산출되는 섬아연석 내 Cd 함량은 Zn 및 Fe 함량과 반비례하여 Zn 또는 Fe을 치환하고 있음을 알 수 있다. 에렉트럼 내의 Cd 함량은 Au, Zn, Fe 및 Bi 함량과 반비례하여 이들 원소들을 치환하고 있음을 알 수 있다. Proustite-pyrargyrite 내의 Cd 함량은 Fe 및 In 함량과 반비례하고 pearceite-polybasite 내의 Cd 함량은 Cu, Fe 및 In 함량과 반비례한다. Acanthite 내 Cd 함량은 In 함량과 반비례한다. 이것은 Yurika 맥의 은 광화작용 말기로 감에 따라 Cd 함량이 In 함량과 반비례하여 In을 치환하고 있음을 알 수 있다. Kubo *et al.* (1992)은 저온에서 정출한 섬아연석일수록 카드뮴과 망간의 함량이 높다고 보고하였다. 또한 Lee *et al.* (1992)에 의하면 대봉광상에서 산출되는 섬아연석 내 카드뮴의 함량은 저온성광물과 공생관계를 갖는 섬아연석에서 높은 함량을 갖는다. 중봉광상의 사면동석 내 카드뮴 함량은 채굴 고도가 증가할수록 카드뮴의 함량이 증가한다(Park and Hwang, 1992). 따라서 Yurika 맥에서 산출되는 광물들 내 Cd 및 In 함량은 온도에 의존하는 것으로 생각된다. 그리고 McIntyre *et al.* (1984)에 의한 황화광물((Zn, Fe, In, Ag)S) 내 Ag 및 In의 해리에 대한 일반적인 원소들 간의 치환 반응식( $Ag^+ + In^{3+} = 2Zn^{2+}$ )에 부합된다. Jovic *et al.* (2011)에 의하면 아르헨티나의 천열수 Pinguino 광상에서 높은 In 함량은 새로운 지화학적 중요성에 대해 보고하였다. 그러므로 Yurika 맥에서 산출되는 은 광물들 내 Cd 산출은 은 광물의 선광 및 제련 시 친환경적 요소를 고려해야 할 것이며 In 산출은 남미의 볼리비아, 아르헨티나와 독일 및 일본의 합 In 다금속 맥들과의 유사성에 대해 고려해 볼 필요가 있다.

또한 에렉트럼, proustite-pyrargyrite, pearceite-polybasite 및 acanthite 내 Te 및 Se 함량은 각



**Fig. 9.** Binary correlation diagrams of some elements in the pearceite-polybasite in the Yurika vein of the Pallancata Ag deposit. (a) S vs. Se (wt.%), (b) S vs. Te (wt.%) and (c) As vs. Te (wt.%).

광물마다 다르지만 주로 S 치환하여 산출된다(Fig. 9). Shikazono *et al.* (1990)은 일본 내 천열수 금 광상들에 대해 Se-형과 Te-형으로 분류하였으며 Pallancata 광산의 연구결과를 적용하면 Se-형에 해당된다. 따라서 Pallancata 광산의 I 및 II 광화작용은 비교적 낮은 유헤분압 및 산소분압에서 있었으며 열수용액의 산도는 high 환경이었음을 알 수 있다. Heald *et al.* (1987)는 천열수 광상에 대해 광석, 맥석 및 변질광물 공생관계, 이들 공생관계의 시공간적 분포, 모암 조성, 광화시기, 광화규모, 광화작용 온도, 열수용액의 성분, 열수용액의 기원, 광화작용 형성 깊이 및 주변 지질조건에 따라 acid-sulfide형과 adularia-sericite형으로 분류하였다. 이들 형에 대한 Pallancata 광산의 I 및 II 광화작

**Table 6.** Characteristics distinguishing the acid-sulfate type and adularia-sericite type deposits

Acid-sulfide type	Adularia-sericite type	This study
Enargite + pyrite ± covellite	No enargite	No enargite
Extensive hypogene alunite	Sericitic alteration dominant	Sericitic alteration dominant
Major hypogene kaolinite	Sometimes kaolinite	No found
No adularia	Adularia	Adularia
No selenides	Often selenides	No found
Chlorite rare	Often chlorite	Oftenchlorite <sup>1</sup>
Sometimes bismuthinite	No bismuthinite	No bismuthinite
Noteworthy Cu production	Variable base metal production	No data

<sup>1</sup> Gamarra-Urrunaga *et al.* (2013).

용은 adularia-sericite형에 해당된다(Table 6). 또한 adularia-sericite형은 Hedenquist *et al.* (2000)에 의해 intermediate sulfidation형 및 low sulfidation형으로 분류하였다. Pallancata 광산의 I 및 II 광화시기에 산출되는 광물공생군을 토대로 Einaudi *et al.* (2003)가 제시한 열수유체의 상대적 sulfidation state 다이어그램에 도시하여 보면 intermediate에 해당된다. 따라서 Pallancata 광산의 은 광물들은 비교적 모암과의 반응에 의한 약산성화된 열수용액으로부터 순환천수의 혼입에 의한 냉각 및 비등에 의해 비교적 낮은 형성온도, 유허분압 및 산소분압하에서 형성되었다. 또한 이 광산의 광상형은 전형적인 천열수 intermediate sulfidation형에 해당함을 알 수 있다.

## 사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “해외/북한/북극권 광물자원탐사 및 부존잠재성 평가(15-3217, 16-3217)” 및 “3D 지질모델링 플랫폼 기반 광물자원 예측 및 채광효율 향상기술 개발(19-3211-1)” 과제의 일부로 수행되었으며 이에 사의를 표한다. 바쁘신 와중에도 이 논문의 미비점을 지적, 수정하여 주신 인하대학교 서정훈 교수님과 익명의 심사위원님께 깊이 감사드립니다.

## REFERENCES

Acosta, J., Santisteban, A., Huanacuni, D., Valencia, M., Villarreal, E., Heo, C.H., Lee, B.H., and Nam, H.T. (2015) Silver in Peru: Present status and future challenge. *Economic and Environmental Geology*, 48, 169-175.

Bindi, L., Evain, M., Spry, P.G., and Menchetti, S.

(2007) The pearceite-polybasite group of minerals: Crystal chemistry and new nomenclature rules. *American Mineralogist*, 92, 918-925.

Clark, A.H., Farrar, E., Kintak, D.J., Langridge, R.J., Arenas F., M.J., France, L.J., McBride, S.L., Woodman, P.L., Wasteneys, H.A., Sandeman, H.A., and Archibald, D.A. (1990) Geologic and geochronologic constraints on the metallogenic evolution of the Andes of southeastern Peru. *Economic Geology*, 85, 1520-1583.

Condori, N.K. (2016) The Ag-Au Pallancata mine: A low-sulphidation epithermal system in southern Peru. *Universidade Federal de Mato Grosso*, 39p.

Decou, A., Eynatten, H.V., Mamani, M., Sempere, T., and Wörner, G. (2011) Cenozoic forearc basin sediments in Southern Peru (15-18°S): Stratigraphic and heavy mineral constraints for Eocene to Miocene evolution of the Central Andes. *Sedimentary Geology*, 237, 55-72.

Einaudi, M.T., Hedenquist, J.W., and Inan, E.E. (2003) Sulfidation state of hydrothermal fluids: The porphyry-epithermal transition and beyond. In: Simmons, S.F., Graham, I.J. (Eds.), *Volcanic, Geothermal and Ore-forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth: Society of Economic Geologists and Geochemical Society. Special Publication*, 10, 285-313pp.

Gamarra-Urrunaga, J.E., Castroviejo, R., and Bernhardt, H.J. (2013) Preliminary mineralogy and ore petrology of the intermediate-sulfidation Pallancata deposit, Ayacucho, Peru. *The Canadian Mineralogist*, 51, 67-91.

Gupta, A. (2013) The 10 biggest silver mines in the world. <https://www.mining-technology.com/features/feature-the-10-biggest-silver-mines-in-the-world/>.

- Hall, H.T. (1967) The pearceite and polybasite series. *American Mineralogist*, 52, 1311-1321.
- Heald, P., Foley, N.K., and Hayba, D.O. (1987) Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposit: Acid-sulfate and adularia-sericite types. *Economic Geology*, 82, 1-26.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. and Gonzalez-Urien, E. (2000) Exploration for epithermal gold. In: Hagemann, S.G., Brown, P.E. (Eds.), *Gold in 2000. Reviews in Economic Geology*, 13, 245-277.
- INGEMMET (2015) Metallogenetic study of Cu-Au mineralization in porphyry and epithermal belts of Apurimac: Southeast Peru, Exploration and potential evaluation of overseas/North Korea/Arctic circle mineral resources, 624-788.
- Jovic, S.M., Guido, D.M., Ruiz, R., Páez, G.N., and Schalamuk, I.B. (2011) Indium distribution and correlations in polymetallic veins from Pingüino deposit, Deseado Massif, Patagonia, Argentina. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 11, 107-115.
- Kubo, T., Nakato, T., and Uchida, E. (1992) An experimental study on partitioning of Zn, Fe, Mn and Cd between sphalerite and aqueous chloride solution. *Mining Geology*, 42, 301-309.
- Lee, H.K., Yoo, B.C., and Kim, S.J. (1992) Mineralogy and ore geneses of the Daebong gold-silver deposits, Chungnam, Korea. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 25, 297-316.
- Margirier, A., Audin, L., Carcaillet, J., Schwartz, S., and Benavente, C. (2015) Tectonic and climatic controls on the Chuquibamba landslide (western Andes, southern Peru). *Earth Surface Dynamics*, 3, 281-289.
- McIntyre, N.S., Cabri, L.J., Chauvin, W.J., and Laflamme, J.H.G. (1984) Secondary ion mass spectrometric study of dissolved silver and indium in sulfide minerals. *Scanning Electron Microscopy*, 1984, III, 1139-1146.
- Park, H.I. and Hwang, J. (1992) Chemical compositions of tetrahedrite-series minerals from Eunchi and Jungbong silver deposits. *Journal of the Geological Society of Korea*, 28, 615-626.
- Schampera, U.S., and Herzig, P.M. (2002) *Indium: Geology, Mineralogy, and Economics*. Springer, 237p.
- Schwartz, M.O. (2000) Cadmium in zinc deposits: Economic geology of a polluting element. *International Geology Review*, 42, 445-469.
- Shikazono, N., Nakata, M., and Shimizu, M. (1990) Geochemical, mineralogic and geologic characteristics of Se- and Te-bearing epithermal gold deposits in Japan. *Mining Geology*, 40, 337-352.
- USGS (2017) Mineral Commodity Summaries, 152-153. <http://geology.com>.

---

Received March 5, 2019, Revised March 18, 2019, Accepted March 26, 2019, Associate Editor: Dong Bok Shin