

페루 남동부 쿠스코주 콘스탄시아 반암동-몰리브데늄 광산의 지질 및 광화작용

양석준¹ · 허철호^{2,3*}

¹한국지질자원연구원 DMR융합연구단 광물자원기술연구팀

²한국지질자원연구원 광물자원연구본부 광물자원연구실

³과학기술연합대학원대학교 광물·지하수자원학과

Geology and Mineralization in Constancia Porphyry Cu-Mo Mine, Cusco State, Southeastern Peru

Seok-Jun Yang¹ and Chul-ho Heo^{2,3*}

¹Mineral Resources Technology Research team, Convergence Research Center for Development of Mineral Resources, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Korea

²Mineral Resources Department, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Korea

³Department of Mineral and Groundwater Resources, University of Science and Technology(UST), Daejeon 34113, Korea

(Received: 25 March 2016 / Revised: 21 June 2016 / Accepted: 22 June 2016)

Constancia mine is a deposit developed within Andahuaylas-Yauri Cu-Mo-Au metallogenic belt, southeastern Peru and is located in the southwestern part of Abancay deformation zone structurally as the porphyry copper deposit type. Mineralized zone in Constancia mine are composed of leached zone, secondary enrichment zone(ca. 1% Cu), mixed zone, primary mineralized zone(ca. 0.5%), skarn zone(ca. 1.5% Cu) from the upper part. Main country rock is monzonitic porphyry. Leached zone are characterized by the precipitation of limonite and looks brown in the outcrop. Oxidized zone have green due to the occurrence of copper oxide and secondary enrichment zone are characterized by the occurrence of chalcocite. Skarn zone are characterized by the occurrence of magnetite and garnet. Now, Hudbay, Canadian mining company, have 100% share about Constancia mine and started to produce commercially from January, 2015.

Key words : porphyry copper, geology, mineralization

콘스탄시아 광산은 페루 남동부 안다우아이아스-야우리 Cu-Mo-Au 광화대 내에 발달하는 광상으로서, 구조적으로는 아방까이 변형대의 남서쪽에 위치하며 반암동광형태로 부존한다. 콘스탄시아 광산의 광화대는 상부로부터 용탈대, 2차부화대(약 1% Cu), 혼합대, 초생광화대(약 0.5%), 스카른대(약 1.5% Cu)로 구성되어 있다. 주요 모암은 몬조니 반암이다. 용탈대는 갈철석 침전이 특징적이며 노두상에서는 갈색으로 보인다. 스카른대는 자철석과 석류석의 산출이 특징적이다. 현재 콘스탄시아 광산은 캐나다의 Hudbay사가 100% 지분을 보유하고 있으며, 2015년 1월부터 상용생산을 시작하였다.

주요어 : 반암동, 지질, 광화작용

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

*Corresponding author: chheo@kigam.re.kr

1. 서 론

페루 남동부는 나즈카판의 섭입으로 인하여 다금속 광화대가 대상으로 발달하고 있으며, 주로, 철, 동-몰리브덴-금, 동-연-아연-은, 주석-텅스텐-은-안티모니-비스무스 금속광화대가 발달한다(Stoll, 1965; Grant *et al.*, 1980; Fig. 1). 페루의 동 광화대는 페름기부터 효신세에 걸쳐 북서-남동 방향의 대상으로 형성 되었으며, 페루 남동쪽에는 주로 반암동, 스카른형 동광상들이 우세하게 발달한다. 특히, 페루는 세계 최대 동 생산국 중의 하나로, 현재까지 반암동 광화대로부터 생산된 동은 총 2,800만톤에 이르며, 특히, 또께빨라(Toquepala), 꾸아호네(Cuajone), 쎄로베르데(Cerro Verde) 광상들이 포함된 팔레오세 광화대로부터 생산된 동은 페루 총 동 생산량의 57%를 차지한다(Acosta *et al.*, 2013; USGS, 2015). 본 해설은 2015년도 한국지질자원연구원(KIGAM)-페루 지질광업체련연구소(INGEMMET)간의 공동 지질광상조사 대상지역인 페루 남동부 꾸스코(Cusco)주에 부존하고 있는 반암동 광화대에 대한 조사결과로 현재 가행중에 있는 콘스탄시아 동광산의 지질 및 광화작용 등 현황을 국내자원 관련 유관기업에 소개할 목적으로 작성 되었다.

2. 광산 개요

콘스탄시아 광산은 페루의 수도 리마시로부터 남동쪽으로 약 600 km 떨어진 곳에 위치하고 있으며 (Fig. 1), 해발 고도 약 4,200 m에 위치하고 있다(경도

$71^{\circ}47'$, 남위 $14^{\circ}27'$). 리마로부터는 항공편이 꾸스코(Cusco)나 아레키파(Arequipa)까지 개설되어 있고, 그 후 자동차로 접근이 가능하며 도로는 포장도로이다. 꾸스코에서 광산까지는 약 300 km 정도 떨어져 있으며, 자동차로 약 7시간 소요된다. 광산은 카나다의 Hudbay사가 100% 지분을 가지고 있으며, 현재 2015년 1월부터 상용생산을 시작한 광산이다.

3. 지 질

페루 남동부 안다우아일라스-야우리(Andahuaylas-Yauri) 저반의 Cu-Mo-Au 광화대 내에 발달하는 꾸스코(Cusco)주 콘스탄시아(Constacia) 광산은 아방까이(Abancay) 변형대의 남서쪽에 위치하며 반암동광 형태로 발달한다(Fig. 2, 3). 광역적으로 연구지역은 뼈스테(Piste)층(흑색 세일 및 실트암), 쥬끼밤비야(Chuquibambilla)층(혈암, 사암과 석회암), 소라야(Soraya)층(석영 사암), 마라(Mara)층(적색 사암과 세일)과 페로밤바(Ferrobamba)층(석회암과 점토)으로 구성되는 쥬라기 상부 및 백악기 하부의 퇴적암을 기반암으로 하고 있다. 이후 주로 칼크-알칼리계 성분의 암석들과 올리고세 하부의 암주(29.17 Ma)들에 관입을 받기 시작하면서, 광화작용과 관련이 있는 반상 몬조니암(28.9 Ma)으로의 진화가 발생했다. 그 외에 플라이오세의 퇴적암과 관입암들이 발달하며, 이들은 화산성 쇄설암인 석영안산암 - 안산암 층(타카자(Tacaza)층군, 알파밤바(Alpabamba) 화산암층 및 마이오세-플라이오세 바로소(Barroso)층군(안산암질-현무암질 용암))에 의해 부정합

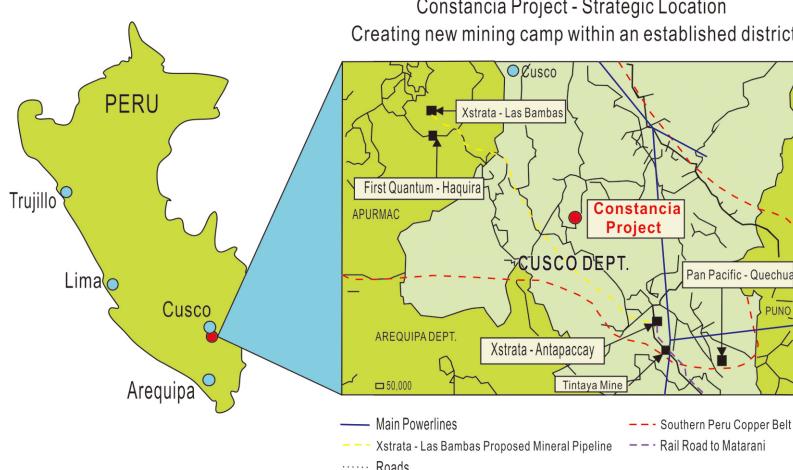


Fig. 1. Location map of Constancia mine in Cusco, Peru (modified from Hudbay(2013)).

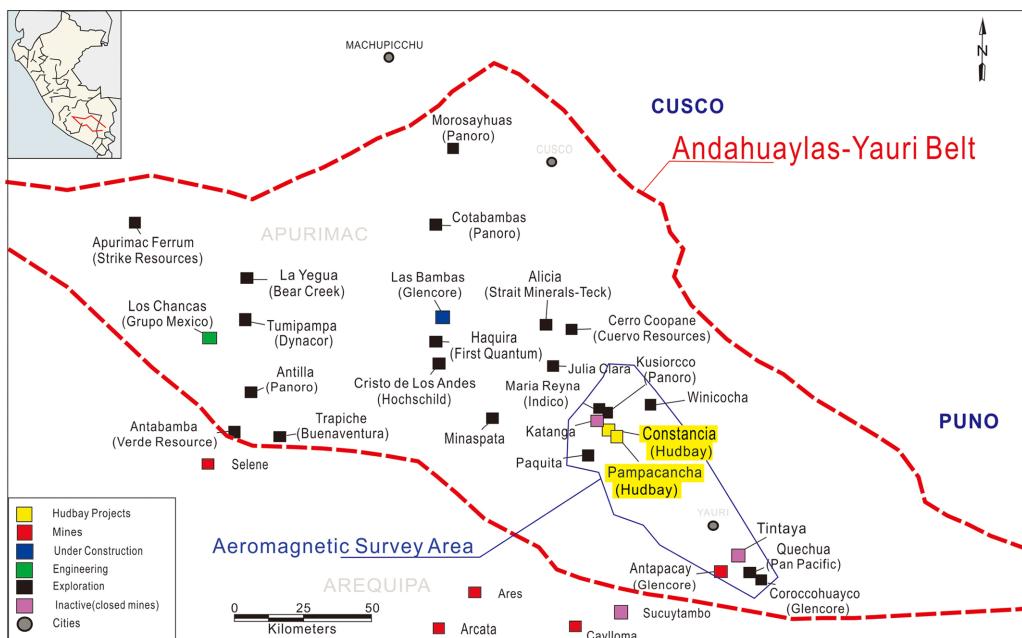


Fig. 2. Cu-Mo-Au ore-deposit in Andahuaylas-Yauri belt (modified from Hudbay(2013)).

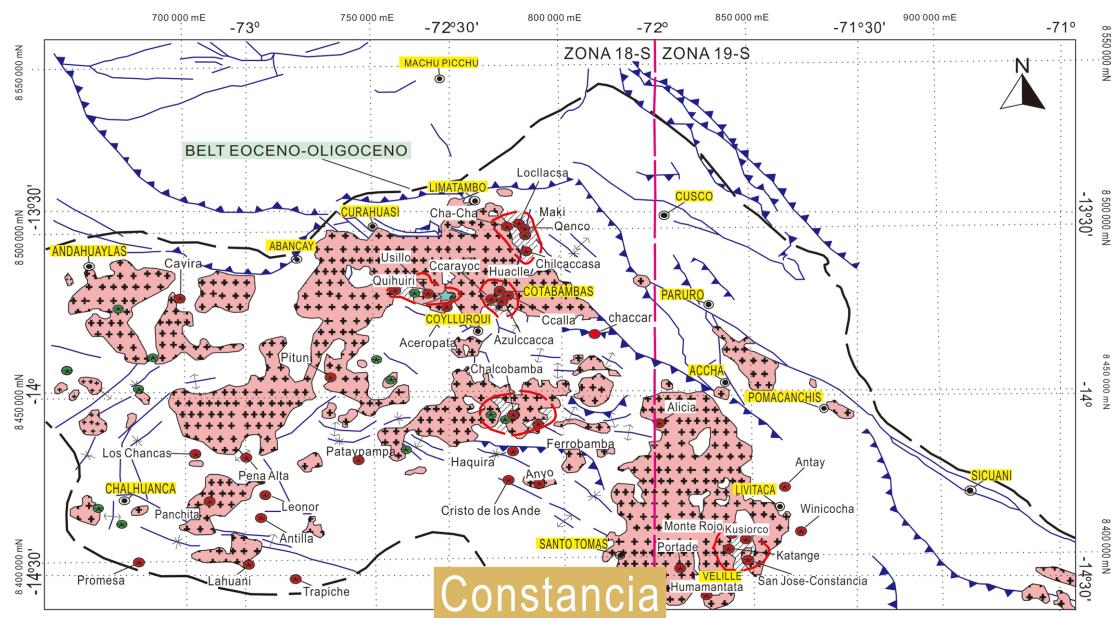


Fig. 3. Simple Geological map showing the major structures, granites and ore-deposits near the Constancia mine (modified from Hudbay(2013)).

적으로 편복되고 있다. 콘스탄시아 광산 지역을 둘러싸며 발달하는 단층들 중 세로 콜로라도(Cerro Colorado) 단층이 반암상 몬조니암과 각력상 파이프의 형성과 관련된다(Fig. 2). 콘스탄시아 광구는 콘스탄시아와 팜파

칸차(Pampacancha) 광상으로 나뉘며, 일대의 지질은 다상의 몬조나이트나 반상 몬조나이트가 백악기의 석회암, 이암, 사암층을 관입하고 있다(Fig. 3).

콘스탄시아 광산의 Cu-Mo-Au 광화작용은 바라이트

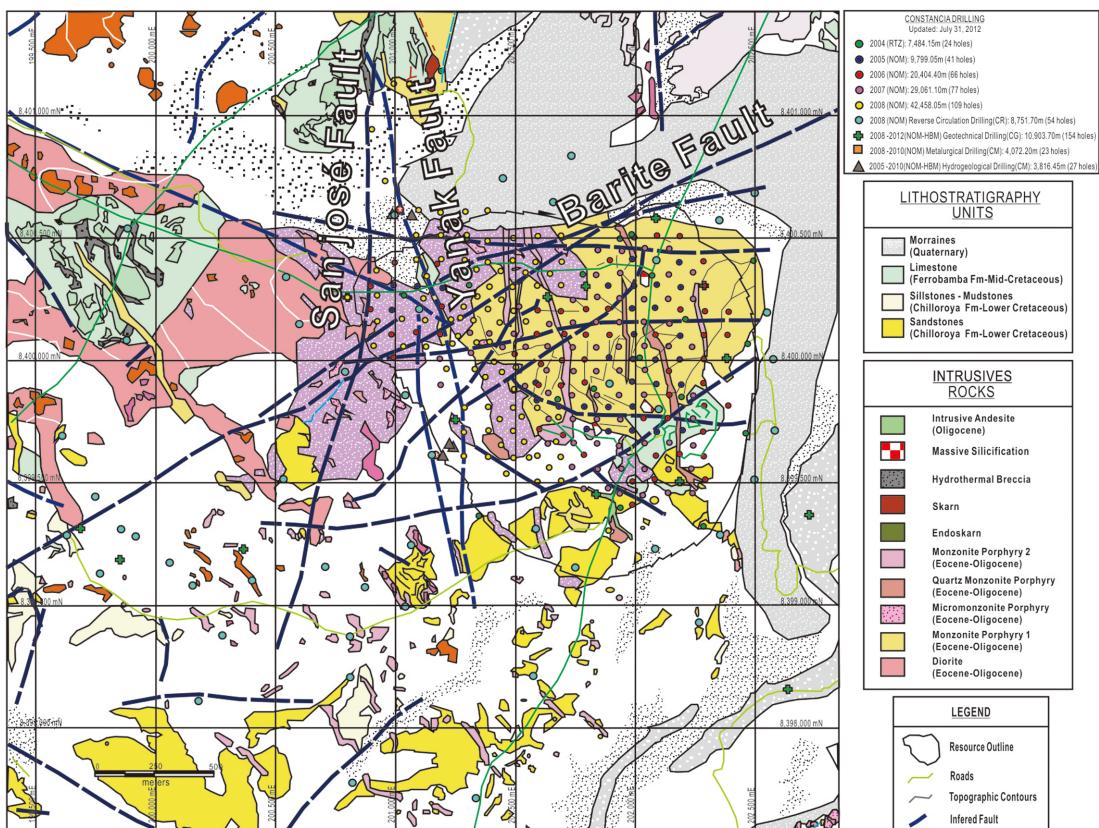


Fig. 4. Geological map of Constancia mine, which has drill-hole locations (modified from Hudbay(2013)).

단층(Barite fault)계에 속하는 북동 방향의 단열대와 밀접한 연관이 있다(Fig. 4). 콘스탄시아와 산호세(San José) 지역 사이에 발달하는 바리아이트 단층은 약 5-10 m의 폭으로 발달하며, 각력화된 몬조나이트-중정석-석영-동 산화물과 방연석의 발달이 특징적이다. 세부적으로 세맥들은 안행상 배열을 보이며, 장력틈(tension gash)에서 상대적으로 높은 광화작용이 확인된다. 수많은 탐사들이 이 단층을 따라 약 1 km 이상 수행되었다. 단층대 내에는 단층과 평행한 방향의 세맥들이 형성되어 있고, 중정석 및 비금속광화물이 산출되며, 이를 바라이트계(Barite system)라고 한다. 산호세 단층은 바라이트 단층 후기로 추정되며, 남북 방향으로 발달한다. 이들은 산호세광산의 광화작용 일부와 대부분의 규화된 각력암의 형성을 제어한 것으로 알려져 있다(Hudbay, 2013). 또한, 이들은 광화작용 후기의 남북방향 암맥들과 평행한 방향을 가지고 있는데, 이 때문에 이들의 형성기작이 두 가지 가능성으로 제기되고 있다. 이들이 바리아이트 단층에 의해 형성된 장력틈을 따라

형성되었을 가능성과, 째로 콜로라도 단층 연결부의 인장단열을 따라 형성되었을 가능성이 있다. 즉, 북서 방향의 째로 콜로라도 단층의 분절들은 주로 남북 또는 북북서 방향으로 휘게 되는데, 이는 우수향운동 감각을 지시하는 것으로 해석된다. 이러한 우수향 운동에 의해 형성된 남북 또는 북북서 방향의 인장단열에 의해 규제되었을 가능성이 있다. 마지막으로 최후기에 형성되었을 것으로 추정되는 북북서-남남동 방향의 야나(Yanak) 단층이 있다. 이 단층은 넓은 범위에 걸쳐 단층 점토대를 형성시켰다(Hudbay, 2013).

4. 광화작용

반암형의 동-몰리브덴 광상으로서, 함동 스카른 광화작용도 동시에 나타나고 있다. 대부분의 광화작용은 칼륨 변질대나 석영맥들내에 발생하였으며, 황동석(또는 반동석)-회수연석-황철석이 산출된다(Fig. 5, 6, 7). 동 품위는 보통 0.2%~4% 정도이며, 품위가 가장 높은

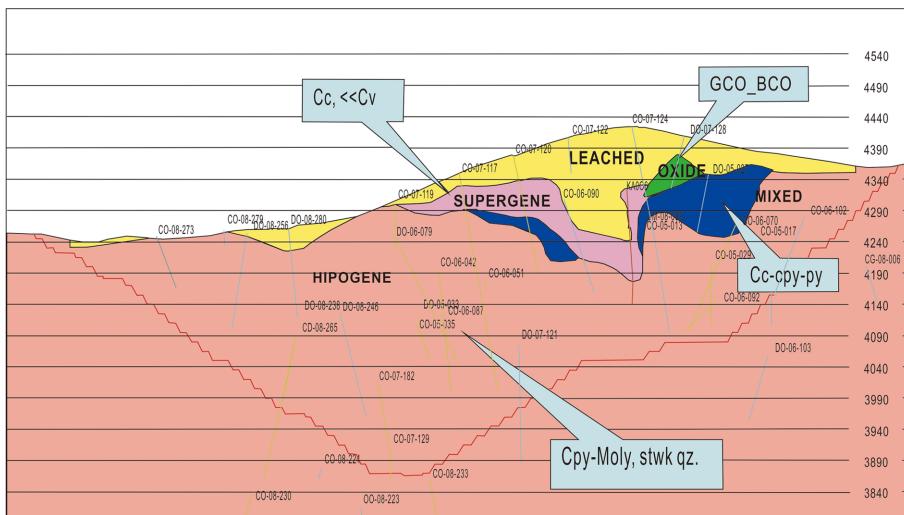


Fig. 5. Cross-section of Constancia mine showing mineralized zones (modified from Hudbay(2013)).

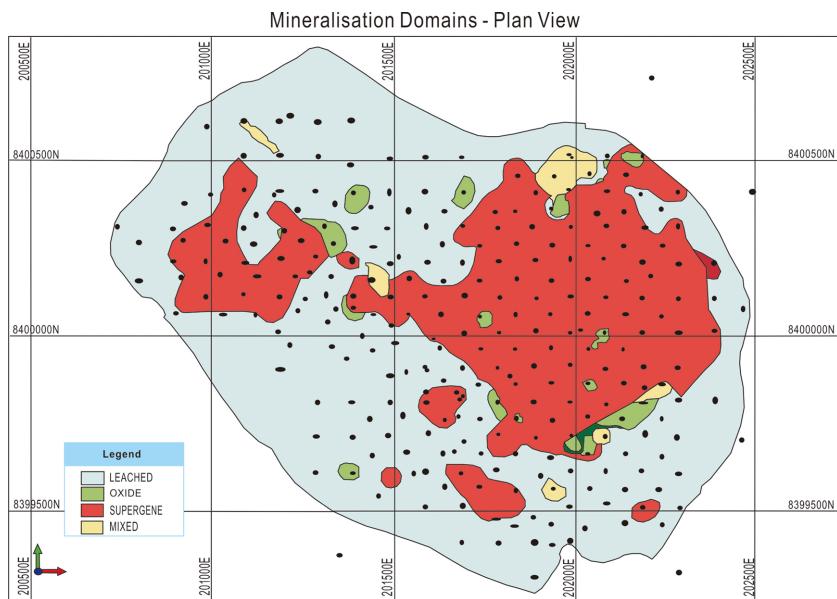


Fig. 6. Plan view of mineralized zones of Constancia mine (modified from Hudbay(2013)).

곳은 열극을 채우는 곳에서 나타나는데, 이전에 형성된 산포상의 동 광화작용과 중첩되기도 한다.

황철석/황동석 비는 전반적으로 낮은 편으로 1:1~2:1 정도이다. 회수연석은 심도에 따라 증가하는 경향이 있는데, 보통 세맥 형태로 발달한다. 반동석은 심부에서 나타나는데 금과 관련이 있는 것으로 보고되고 있다 (Hudbay, 2013). 프로필리티 변질대는 칼륨 변질대의 가장자리에 나타나며, 관입 반암의 접촉부로부터 약

1 km 까지 발달하고, 녹염석-녹니석-황동석-능망간석이 산출된다. 황동석은 이러한 변질대에는 부차적으로 나타나거나, 열극을 채우거나 유색광물들을 교대하기도 한다. 섬아연석-병연석 세맥이나 맥들은 프로필리티 변질대에서 동-몰리브덴 광화작용과 관계되어 나타나며, 반암동이 나타나는 곳으로부터 3 km까지 발달하고 있다. 필릭 변질대는 표면에만 나타나는 형태를 보이고, 가끔 칼륨 변질대와 중첩되기도 한다. 필릭 변질대는

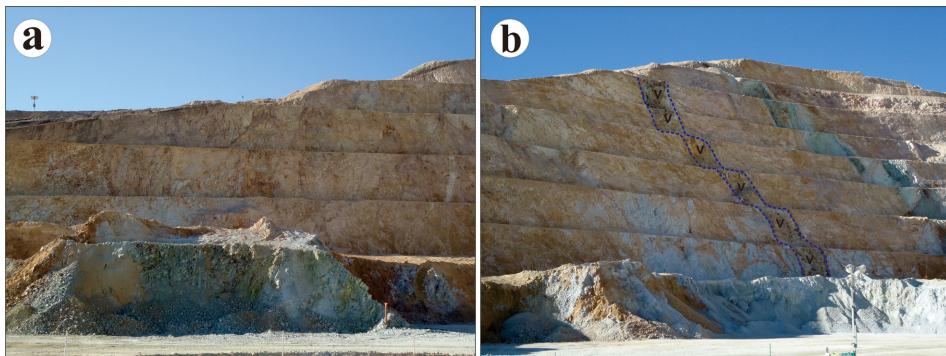


Fig. 7. (a) Oxidation zone of Constancia mine. (b) NS-trending dyke cut the oxidation zone.



Fig. 8. (a) Dressing plant of Constancia mine. (b) Figure shows mining in Constancia open-pit mine for Cu.

일차 암석조직을 거의 완전히 파괴하는 형태로 나타는데, 광물조합은 견운모-석영-황철석 형태로 나타나며, 황동석은 맥이나 세맥상으로 드물게 산출된다.

관입암과 석회암의 접촉대에서는, 자철석±석류석 스카른대가 발달하고, 반면 휘석-투휘석(석류석-녹염석) 광물조합은 보통 치요로아층의 석회질 사암에서 일반적으로 나타난다. 스카른 광화작용은 전체 체적으로 볼 때 규모는 작지만, 품위는 보통 높게 나타난다.

열수 변질과 동-몰리브데늄-은-금 광화작용 그리고 스카른 형성에 연구지역의 구조적인 지질작용이 중요한 역할을 하고 있다. 주요 광화작용과 후기 광화작용과 관련된 열극시스템은 북동방향으로 발달한다. 이러한 시스템은 거의 평행한 맥들이나 단층들로 구성된다. 두 번째로 중요한 시스템은 남북 시스템이며, “San José Pit” 광화작용과 대부분의 규화 각력암을 제어하는 시스템이다. 또, 이러한 남북 시스템을 따라 은 광화 후기의 암맥들이 관입하였다.

팜파칸챠 지역은 스카른 시스템과 관계되는 반암광상으로 광화작용을 받지 않은 올리고세 섬록암이 스카

른 광화작용의 근원으로 볼 수 있는 반상의 섬록암에 의해 관입당하면서 광상이 형성되었다. 이러한 반상 섬록암은 몬조니 관입암에 의해 절단되는데, 이로 인해 동과 금의 국부적인 부화를 가져오고, 지역적으로 스카른형의 동 및 금광화작용도 가져왔다. 석회암층의 상부나 하부 연변부에 스카른 광체가 잘 발달되고 있다. 전진 자철석-황동광-황철석이 나타나는 전진 스카른대에서 변두리로 가면서 약한 광화작용을 받은 석류석 및 휘석이 발달하는 스카른대로 이화되며, 국부적으로는 녹염석을 함유하는 후퇴 스카른대에 의해 중첩되기도 한다. 저유황계의 석영-황화물 동-금 유형의 천열수 광화작용은 보통 표성 금 이상 부화대를 형성시켰는데, 반암 인근의 열수변질대나 맥들과 같은 방향을 따라 부화대를 형성시키고 있다.

5. 광물 선광 및 정련

콘스탄시아 광산은 현재 선광장이 건설되어 정광을 생산하고 있으며, 선광 자료는 얻을 수 없었으나 구두

Table 1. Recovery rate of concentrate according to the mineralized zone in Constantia mine

Mineralized zone	Recovery rate of Cu concentrate					Recovery rate for Mo
Constantia	Cu %	Zn %	Pb %	Au %	Ag %	Mo %
Hypogene	90.5	30.0	41.4	60.0	72.0	55.0
Supergene	88.4	80.0	41.4	60.0	90.0	55.0
Mixed	88.4	30.0	41.4	60.0	90.0	55.0
Skarn	84.4	30.0	41.4	60.0	52.0	55.0
High Zn	84.4	30.0	41.4	60.0	52.0	55.0
<i>Pampacancha</i>	85.0	30.0	41.0	60.0	65.0	55.0

Data from Hudbay(2013)

로 획득한 자료를 개략 기술하면 다음과 같다. 선광은 기본적으로 볼밀(ball mill)로 파쇄를 하고 있는데, 200 톤 규모로 야외에 4개가 설치되어 있다. 부선 시설이 되어있고 동과 몰리브덴을 회수하고 있는 것으로 보인다(Fig. 8a). 광석에 아연이 소량 섞이는데 동정광의 순도를 높이기 위해 아연은 회수를 하지만, 기타 금속들은 회수하지 않는다.

콘스탄시아 광산의 선광공정을 살펴보면, 철저한 광물연구를 통해 광화대별로 선광 공정을 시험하여 동과 몰리브덴의 회수율을 높이고 있다(Table 1). 정광 회수율은 광화대 특성상 초생 광화대의 경우 구리 회수율이 높고, 아연 회수율은 표성 광화대가 높은 것으로 나타나고 있다. 팜파칸챠 광상의 광석 시험은 광석 내 광물입자가 더 미분인 관계로 더 많은 마광이나 부선이 필요할 것으로 사료된다.

6. 결 론

콘스탄시아 광산은 카나다의 Hudbay사가 100% 지분을 보유하고 있는 광산으로서, 2015년 1월부터 상용 생산을 시작한 광산이다. 광산주기는 22년으로 추정하고 있으며, 탐사부터 개발까지 10년이 소요된 광산이다. 현재까지 약 20만m³ 시추를 수행했으며, 광산의 광화대는 상부로부터 용탈대, 2차부화대(약 1% Cu), 혼

합대, 초생광화대(약 0.5%), 스카른대(약 1.5% Cu)로 구성되어 있다. 주요 모암은 몬조니 빈암이며, 용탈대는 갈철석 침전이 특징적이며 노두상으로 갈색으로 보이며 산화대는 산화동 산출의 영향으로 녹색을 띠고 2차부화대는 회동석의 산출이 특징적이다. 스카른대는 자철석과 석류석의 산출이 특징적이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원(KIGAM)이 수행하고 있는 <해외/북극권 광물자원탐사 및 부존잠재성 평가(16-3217)>과제에서 지원되었습니다.

References

- Acosta, J., Bustamante, A., Cardozi, M., Heo, C.H. and Kim, E.J. (2013) Copper in Peru: Present status and future challenge. Econ. Environ. Geol., v.46, p.561-568
- Grant, J. N., Halls, C., Sheppard, S. M. F., Avila, W. (1980) Evolution of the porphyry tin deposits of Bolivia, Min. Geol. Spec. v.8, p.151-173.
- Hudbay (2013) Constancia Site Visit Presentation, Hudbay Minerals Inc.
- Stoll, W. C. (1965) Metallogenic provinces of South America: mining magazine, 112, 22-33 and 90-99.
- USGS, (2015) Copper, Mineral Commodity Summaries.