

페루 북부 천열수 금 및 반암형 동광화대의 지질 및 광상

Geology and Ore Deposits of the Epithermal Au and Porphyry Cu Mineralized Zone, Northern Peru

고 상 모 (Sang-Mo Koh)^{1,*} · Luis Humberto Chirif² · Jorge Luis Quispe² · Jorge Acosta Ale²

¹한국지질자원연구원 지질기반정보연구부

(Geology and Geoinformation Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Daejeon 305-350, Korea)

²페루지질광업계련연구소

(Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Peru)

서 론

페루는 은, 주석, 연, 아연, 동, 금, 비스무스 및 몰리브데늄의 세계적인 산지로서 그 생산량은 세계 2~5위를 차지하고 있으며, 텔루리움 및 셀레늄 등의 희유금속도 많이 생산하는 세계 주도적 광업국가이다(표 1). 광업 분야는 1994년부터 2005년 동안 연평균 9.26% 성장을 기록하였고, 동 기간 중 페루의 경제성장도 연평균 4.51%를 유지하였으며 광업 분야가 대외수출의 절반을 차지하였다(외교통상부, 2006). 동, 금, 아연 등이 주요 수출 광물로서 Southern Peru (21억 1,853만 US\$; 페루 전체 수출의 12.5%) 및 Antamina (16억 7,981만 US\$) 동광업체가 페루의 양대 수출업체이며, 페루의 10대 수출업체가 모두 자원분야 업체이다(외교통상부, 2006). 페루의 광물자원 중 동 광상은 페루 전역에 산재되어 분포하며, 금 광상은 북중부 및 남부 지역에 집중 분포하고 아연 광상은 중부에 밀집 분포하고 있다(그림 1). 세계적인 금 광산은 북부 지역의 Yanacocha 광산과 Alto Chicama 광산, 동 광산은 남부 지역에 분포하는 Las Bambas 광산과 동-아연 광산은 Anta-

mina 광산 등이다(그림 1).

2005년부터 추진되는 페루의 주요 광업프로젝트와 투자비는 표 2와 같으며, 이들 중 일부 광상들은 현재 가행 중에 있다. 또한 페루에 진출한 외국계 광업사는 캐나다 광업사인 Noranda, Barrick Gold, Newmont, Teck-Cominco 및 Cambior사, 미국 광업사인 Phelps Dodge 및 Anglo Gold사, 영국 광업사인 BHP-Billiton, 멕시코 광업사인 Grupo Mexico와 Penoles사 및 일본 광업사인 Mitsui 및 Mitsubishi사가 있다. 페루는 세계 광업 투자국 중에서 5번째로 투자가 많은 국가로서 2006년 투자비는 375백만 US\$이다.

조사가 수행된 지역은 페루 북부 반암형 동광화대와 천열수 금광화대가 분포하고 있는 Ancash 및 La Libertad 지역으로서, 페루의 광상생성구 분류에서 광상생성구 XVI (올리고세-플라이오세 천열수 Au-Ag 광화대) 및 XVII (마이오세 반암형 Cu-Mo-Au-W 광화대)에 해당되는 지역이다(INGEMMET, 2007a).

이 지역에 분포하는 광상 중 가행중인 광산은

*교신저자: kohsm@kigam.re.kr

Table 1. Situation of production of mineral resources in Peru (USGS, 2007 Minerals Yearbook). The production amount is all the metal-based

Mineral commodity	Production amount (2006)	Production rank in the world	Production rank in the Latin America	Production proportion in the world (%)	Resources proportion in the world (%)
Ag	3,200 ton	1	1	16.4	6.5
Sn	42,200 ton	3	1	15.5	9.1
Pb	320 ton	4	1	9.5	2.9
Zn	1,210 ton	3	1	12.1	7.3
Cu	1,050 ton	3	2	6.9	6.4
Au	210 ton	5	1	8.4	4.6
Mo	17,500 ton	4	2	9.8	1.2
Bi	960 ton	3	1	17.1	6.2
Te	33 ton	2	1	25.8	6.0
Se	17 ton	8	2	1.2	4.7

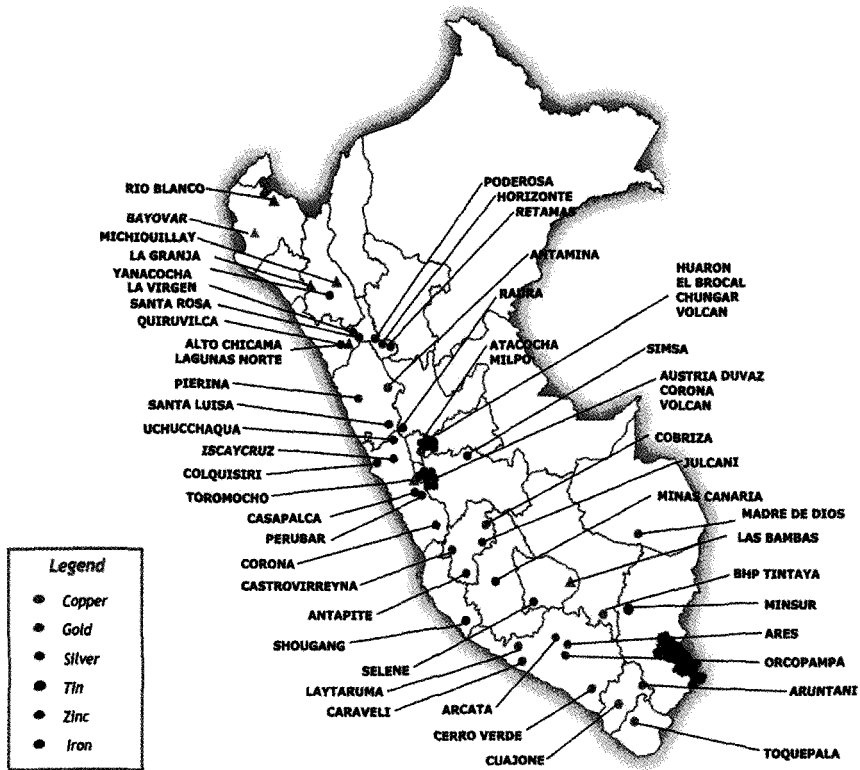


Fig. 1. Distribution map of major metallic deposits in Peru (circle and triangle symbols represent operating mine and exploring deposit, respectively).

Alto Chicama Au 광상, Quiruvilca Au-Ag 광상, Pasto Bueno W-Cu-Zn 광상, La Virgen Au 광상 및 Santa Rosa Au 광상이며, 탐사와 타당성 조사가 진행 중인 광상은 Magistral Cu-Mo 광

상, La Arena Au 광상이다. 또한 수십여 개의 지역에서 탐사가 진행 중이다. 이 지역은 페루 북서부 Cajabamba 1:100,000 도폭(도폭기호 16-g) 및 Pallasca 1:100,000 도폭(도폭기호

Table 2. Main mining investment projects (2005~2009) in Peru

Stage / Project name	Company	Investment (US\$ million)
Under construction		
Alto Chicama	Barrick	350 (2005)
Fundición de Ilo	Southern Peru	400
Advance		
Sulfuros Primarios	Cerro Verde	800
Exploration		
Toromocho	Peru Copper Syndicate	300~500
Las Bambas	Xstrata	1000
Cerro Corona	Goldfields	150
Cerro Lindo	Milpo	65
Rio Blanco	Monterrico Metals	191
Privitization Processes or Concessions		
Bayovar	-	300
La Granja	-	1000
Michiquillay	-	1000

17-h) 지역에 속한다(그림 2).

페루 광상생성구 자료는 페루지질광업제련연구소(Instituto Geológico Minero y Metalúrgico: INGEMMET)에서 2007년 새로 작성된 내용을 고상모 외(2007)가 정리하여 보고하였으며 이 보고된 내용을 여기에 간략히 소개한다. 조사지역의 지질에 관련된 자료는 INGEMMET에서 발간한 지질도폭자료(INGEMMET, 1980; 1995; 2007b) 및 광산회사에서 정리된 자료(Barrick, 2007)를 근거하여 인용하였고, 단위광상에 대한 자료는 INGEMMET에서 조사광상별로 정리한 자료(INGEMMET, 2007a)와 광산에서 제공한 자료(Barrick, 2006; 2007; Dynacor, 2007a; 2007b) 및 저자들에 의해 현지 광산조사에서 조사된 결과를 종합적으로 정리하였다.

페루 광상생성구

페루의 광상생성구는 고생대 오르도비스기부터 신제3기 마이오세까지 형성되어 총 18개의 광상구로 구분된다(그림 3). 18개 광상구는 1) 오르도비스기 및 실루리안-데본기 변성퇴적암류 내 배태된 금광화대(Metallogeny I), 2) 페름기 Cu 스카른 및 중열수 광화대(Metallogeny II), 3) 석탄기-페름기 Au-Pb-Zn-Cu 중열수 광화대(Metallogeny III), 4) 트라이아스기-쥬라기

석회암 내 배태된 미시시피벨리형(MVT) Zn-Pb 광화대(Metallogeny IV), 5) 후기 쥬라기암에 배태된 반암형 Cu-Au 및 스카른 광화대(Metallogeny V), 6) 후기 쥬라기-백악기 알비안기 Cu-Zn-Au 화산성괴상황화물(VMS) 광화대(Metallogeny VI), 7) 중기 쥬라기-초기 백악기 Cu-Fe-Au 광화대(Metallogeny VII), 8) 초기 백악기 반암형 Cu-Mo 광화대(Metallogeny VIII), 9) 후기 백악기층에 배태된 중열수 Au-Pb-Zn-Cu 광화대(Metallogeny IX), 10) 후기 백악기 Pb-Zn-Cu 화산성괴상황화물(VMS) 광화대(Metallogeny X), 11) 후기 백악기 반암형 Cu-Mo 광화대(Metallogeny XI), 12) 후기 백악기 Au-Ag 천열수 광화대(Metallogeny XII), 13) 제3기 팔레오세-에오세 반암형 Cu-Mo 광화대(Metallogeny XIII), 14) 제3기 에오세-올리고세 반암형 Cu-Mo (Fe, Au) 및 스카른 광화대(Metallogeny XIV), 15) 제3기 올리고세-마이오세 Sn 광화대(Metallogeny XV), 16) 제3기 올리고세-플라이오세 Au-Ag 천열수 광화대(Metallogeny XVI), 17) 제3기 마이오세 반암형 Cu-Mo(-Au,-W) 광화대(Metallogeny XVII) 및 18) 제3기 마이오세 다금속 광화대(Metallogeny XVIII)이다.

페루의 광상생성구는 중생대부터 신생대에 걸쳐 활동적으로 일어난 화성활동(Andean magmatism)을 포함한 안데스 조산운동(Andean or-

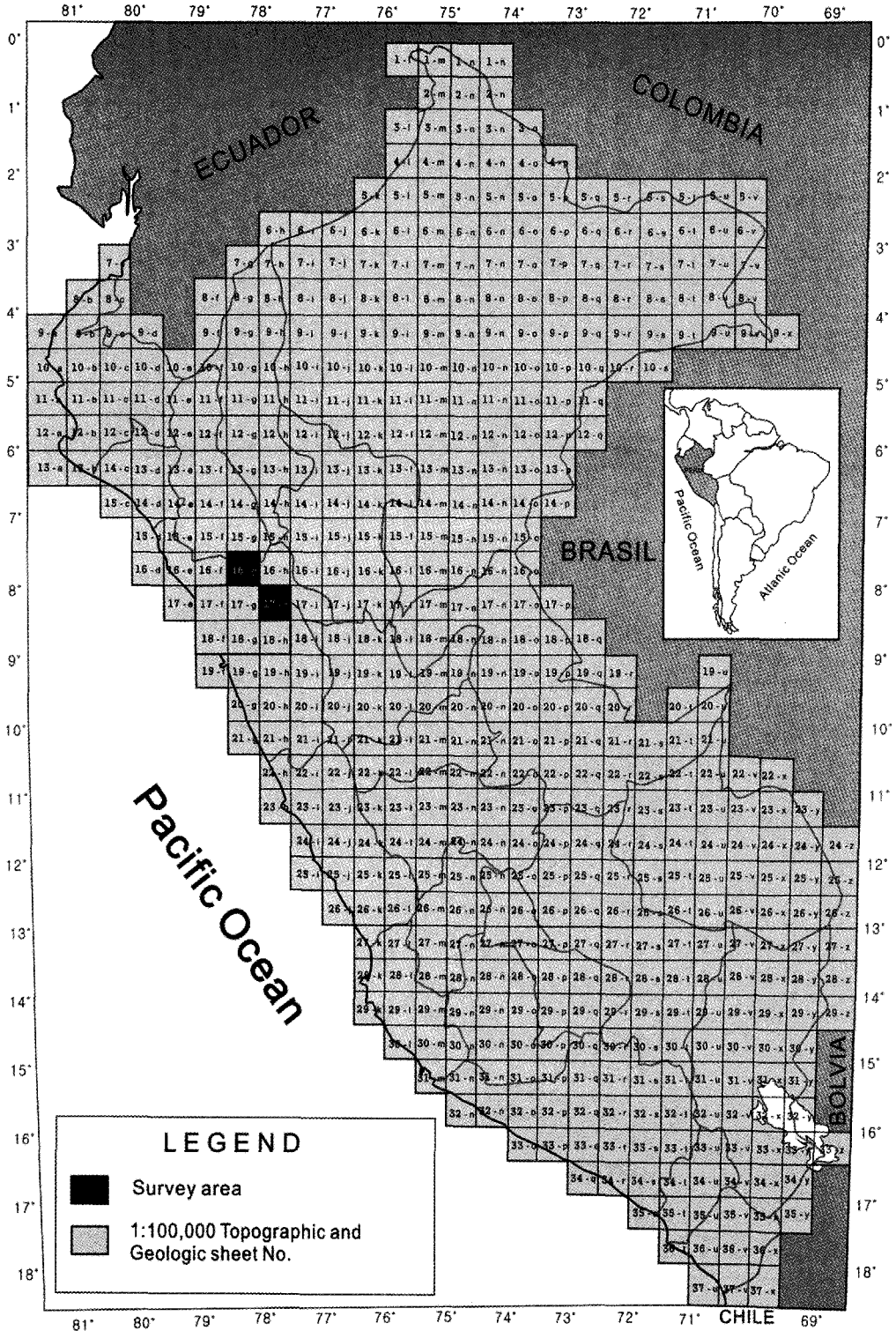


Fig. 2. Survey area (16-g and 17-h) represented in the 1:100,000 topographic and geologic sheet map.



Symbol	Description
[Pattern]	Miocene polymetallic metallogenic belt
[Pattern]	Miocene porphyry Cu-Mo (Au, W) metallogenic belt
[Pattern]	Oligocene-Pliocene Au-Ag epithermal metallogenic belt
[Pattern]	Oligocene-Miocene Sn metallogenic belt
[Pattern]	Eocene-Oligocene porphyry Cu-Mo (Fe, Au) and skarn metallogenic belt
[Pattern]	Paleocene to Eocene porphyry Cu-Mo metallogenic belt
[Pattern]	Late Cretaceous Au-Ag epithermal metallogenic belt
[Pattern]	Late Cretaceous porphyry Cu-Mo metallogenic belt
[Pattern]	Late Cretaceous Pb-Zn-Cu Volcanogenic Massive Sulphides (VMS) metallogenic belt
[Pattern]	Mesothermal Au-Pb-Zn-Cu metallogenic belt in Upper Cretaceous rocks
[Pattern]	Early Cretaceous porphyry Cu-Mo metallogenic belt
[Pattern]	Middle Jurassic to Early Cretaceous Cu-Fe-Au metallogenic belt
[Pattern]	Late Jurassic to Albian Cu-Zn-Au Volcanogenic Massive sulphides (VMS) metallogenic belt
[Pattern]	Porphyry Cu-Au and skarn metallogenic belt in Upper Jurassic rocks
[Pattern]	Metallogenic belt of Zn-Pb Mississippi Valley Type (MVT) in Triassic-Jurassic rocks
[Pattern]	Carboniferous-Permian Au-Pb-Zn-Cu mesothermal metallogenic belt
[Pattern]	Permian Cu skarn and mesothermal metallogenic belt
[Pattern]	Au metallogenic belt in Ordovician and Siluro-Devonian metasedimentary rocks

Fig. 3. New metallogenic map of Peru (INGEMMET, 2007).

ogeny)에 의해 안데스 광상구(Andean metallogenic province)가 형성되었으며, 페루는 안데

스 광상구의 북부 Cu-Fe(-Au), Cu-Mo(-Au) 및 Cu-Pb-Zn-Ag 광화대를 이루며 이는 칠레로 연속적인 연장을 보인다(고상모 외, 2007).

이 연구는 광상생성구 XVI (올리고세-플라이오세 천열수 Au-Ag 광화대) 및 XVII (마이오세 반암형 Cu-Mo-Au-W 광화대)에 해당되는 페루 북부 Ancash 및 La Libertad 지역에 분포하는 대표적 광화대를 대상으로 수행되었다.

광역지질

페루 북부 안데스 산맥의 중앙부에 위치하는 천열수 금 및 반암형 동광화대에는 Alto Chicama Au, Quiruvilca Au-Ag, Pasto Bueno W-Cu-Zn, La Virgen Au 및 Santa Rosa Au 광상과 Magistral Cu-Mo 및 La Arena Au 광상들이 분포한다. 이 광상지역의 동편은 선캄브리아기 및 고생대 기반암, 트라이아스기 및 쥐라기의 퇴적암류, 백악기 화산암류 및 퇴적암류(Calipuy층군)가 분포하며, 광상지역은 제3기 화산암류(Calipuy층군) 및 관입암류(Cordillera Blanca batholith)로 주로 구성된다(그림 4). 대부분 지층들의 분포가 남에서 북으로 갈수록 북서 → 남북 → 서북서 방향으로 발달하며 이 방향의 지질구조적 요인에 의해 규제된 양상을 보인다(그림 4). 광상들의 분포 역시 지질구조 방향과 유사한 방향으로 분포하는데, 북쪽의 Yanacocha Au 광상에서부터 연구지역의 Alto Chicama-Pasto Bueno-Magistral 광상들과 남쪽의 Pierina Au 광상으로 연결되는 방향 역시 북서 방향이다.

광산지역 지질

Cajabamba 지역은 Alto Chicama Au, La Arena Au 및 La Virgen Au 광상이 분포하며 Maria Angola 및 La Capilla를 포함한 많은 탐사지역이 위치하고 있는 천열수 금 광화대에 속한다. 이 광상지역은 초기 쥐라기 Chicama층(사암이 우세하고 석탄층을 포함하는 호성 퇴적암층)이 기반암을 이루고, 이를 부정합으로 초기 백악기 퇴적층인 Santa층(석회질 이암 및 석회암으로 주 구성), Carhuaz층(셰일 및 사암으로 주 구성), Farrat층(사암 및 규암으로 주 구성)이 피복하며, 이를 후기 백악기의 Inca층, Chuléc층, Pariatambo층이 정합적으로 피복된다

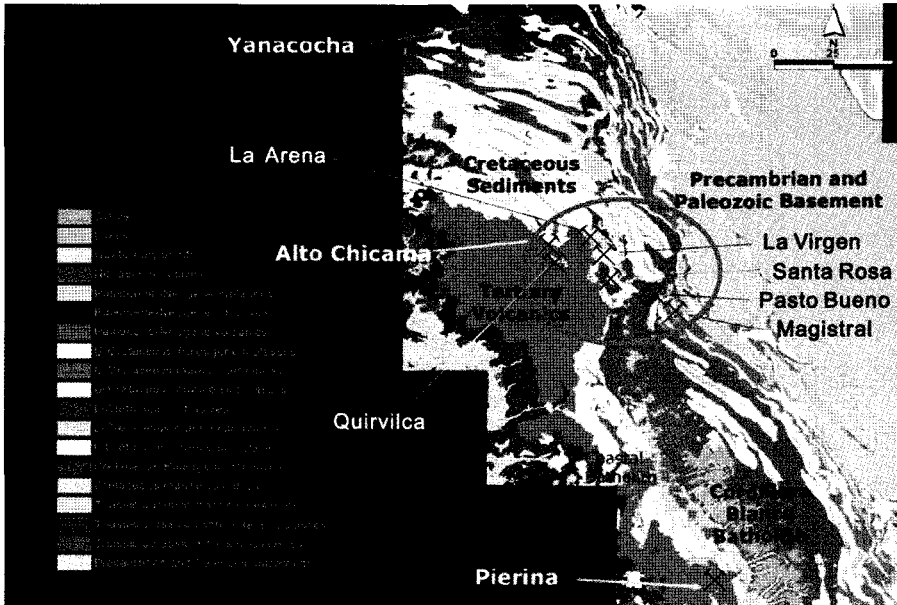


Fig. 4. General geologic map of the surveyed mining area, showing structurally controlled characteristics (Barrick, 2007).

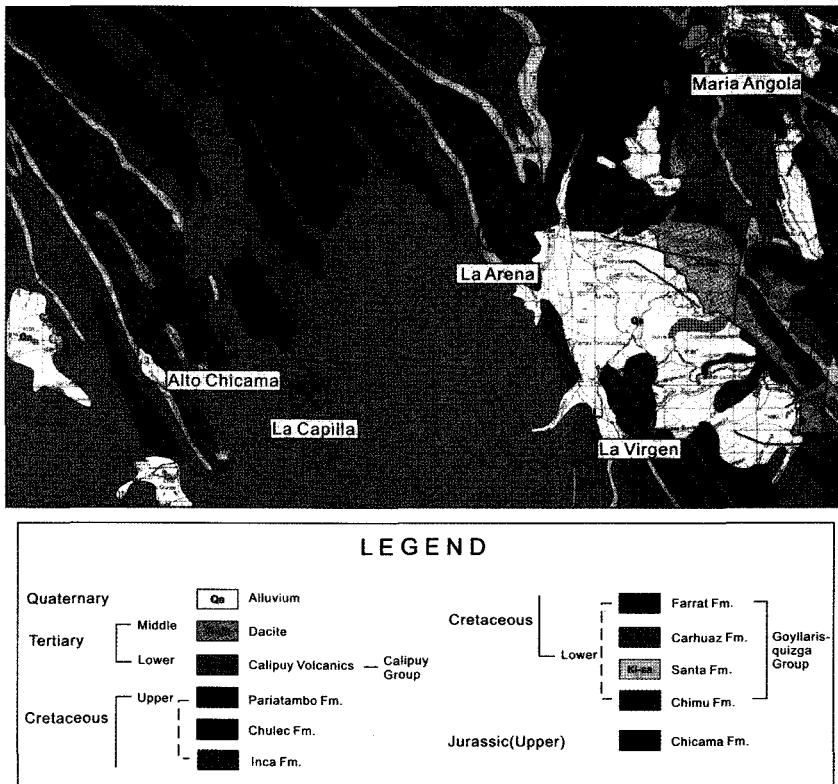


Fig. 5. Geologic map of Alto Chicama, La Arena, and La Virgen mining area in Cajabamba sheet (from 1:100,000 Mapa Geológico del Cuadrángulo de Cajabamba, 1980, INGEMMET).

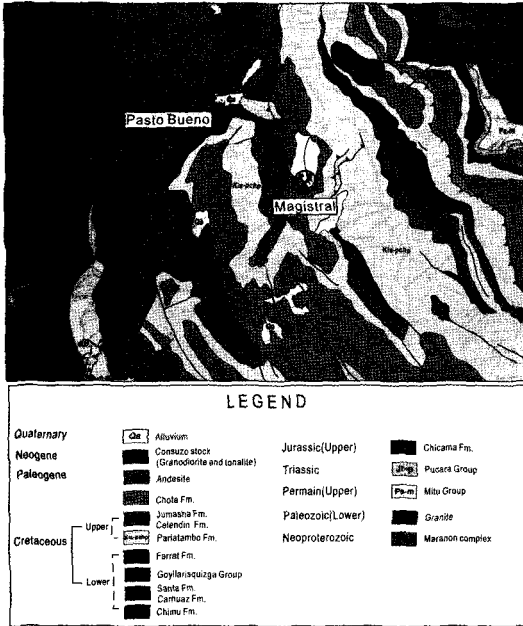


Fig. 6. Geologic map of Pasto Bueno and Magistral mining area in Pallasca sheet (from 1:100,000 Mapa Geológico del Cuadrángulo de Pallasca, 1995, INGEMMET).

(그림 5). 이 지층들을 백악기말-제3기 Calipuy 층군(화산암류 및 화산쇄설성 퇴적암류) 및 반암류(안산암질 및 석영안산암질)가 광범위하게 관입하고 있다(그림 5). 광상들은 주로 반암류의 주변에 분포하며, 광화작용은 반암류의 관입 활동과 성인적 관련성을 가지는 것으로 해석한다(INGEMMET, 2007a).

Pallasca 지역은 Pasto Bueno 광상과 Magistral 탐사지역이 분포하는 지역이다(그림 6). 이 광상지역의 북동부에는 이 지역의 최고기암류인 초기 고생대 화강암류와 페름기 Mitu층군을 구성하는 화산암류가 분포한다. 광상이 위치하는 중부 및 북서부지역은 쥐라기 Chicama층(세일 및 점판암 우세)이 기반암을 이루고, 이를 부정합으로 백악기초 Chimu층(사암이 우세하고 석탄층을 포함하는 호성 퇴적암층), Santa층(세일 및 사암으로 주로 구성), Carhuaz층(세일 및 사암으로 주로 구성), Farrat층(사암 및 규암으로 주로 구성), Pariatambo층(석회질 이암 및 석회암으로 주로 구성)과 백악기말 Jumasha층(석회암 및 백운암으로 주로 구성)이 피복한다(그림 6). 이 층들을 부정합으로 안산암질암이 관

입 내지는 분출하고, 제3기 관입암체(Consuzo stock)인 석영-몬조나이트 또는 화강섬록반암체가 관입하는데(그림 6), 연대는 9.5 Ma로 알려져 있는데(INGEMMET, 2007a), 이 관입암이 관계화성암으로 인지되고 있다. Cajamarca 지역과 Pallasca 지역에 주로 분포하는 지층들의 특성은 다음과 같다.

Chicama층은 쥐라기 초기에 형성되었으며 층리가 잘 발달된 암회색 또는 흑색 세일이나 엽리가 잘 발달된 점판암이 우세하고, 회색 또는 베이지색의 사암류가 협재되어 있다. 어떤 곳에서는 석영안산암질 조성의 암상이나 반암류가 수반되기도 하는데, 이와 성인적인 관련성이 있는 것으로 판단되는 금광상 또는 Hg-As-Ag-Pb-Zn-Cu 다금속광상이 배태되기도 한다.

Chicama층을 부정합으로 피복하는 Chimu층의 하위부는 사암, 규암 및 이암으로 주로 구성되고 상위부는 두꺼운 백색 규암으로 구성된다. 이 지층은 천열수 금광상이 배태되는 모양으로서 이 지층 내 La Viregen 광상과 La Arena 광상들이 대표적으로 분포한다.

Santa층은 백악기 초기의 Chimu층을 정합적으로 피복하며, 이암, 석회질 이암, 석회암 및 회색 사암으로 주로 구성된다.

Carhuaz층은 백악기 초기에 형성되었으며 Santa층을 정합적으로 피복하고, 주로 회색 세일 및 사암이 서로 교호하여 산출한다. 석회질 암이 부분적으로 협재되기도 하며 밴드를 이루기도 한다.

백악기 초기에 형성된 Farrat층은 중립 및 조립질의 백색 사암이나 규암으로 주로 구성되며, 층후는 약 500 m이다. Carhuaz층을 정합적으로 피복하는 이 지층은 투수성이 커서 광화작용을 초래시키기 양호한 조건을 갖추고 있어 El Toro 금 광상을 배태시켰다.

백악기 후기의 Pariatambo층은 Farrat층을 정합적으로 피복한다. 주로 이암 및 흑색 세일로 구성되며 부분적으로 석회암이 협재된다. Llamelín 지역의 서편에서는 현무암질 용암류가 산출되기도 한다.

Jumasha층은 후기 백악기에 형성되었으며 Pariatambo층을 정합적으로 피복한다. 회색의 석회암과 백운암으로 주로 구성되며, 세일이 부분적으로 협재되기도 한다.

Calipuy층군은 백악기말과 제3기초 화산활동

에 의해 형성된 지층으로서 유문암, 유문석영안산암, 석영안산암 조성의 화산암류(용암, 응회암, 화산쇄설암)로 주로 구성되며, 세일이나 사암류가 협재된다. 안산암 용암이나 반암류가 가장 우세하게 산출한다. 이 층군은 Cajabamba 도쪽 남부 및 남서부에 매우 광범위하게 분포한다(그림 5). 화산암류의 K-Ar 연대측정 결과 18.9~16.5 Ma (INGEMMET, 2007a)로서 마이오세 초기를 나타낸다. 이 층군을 형성시킨 화산활동은 천열수 Au-Ag 광상 및 Ag을 포함하는 다금속광상들과 시·공간적 관련성을 보인다.

Consuzo암주로 불리는 심성암체는 제3기 초에 형성된 석영-몬조나이트(또는 화강섬록반암) 조성을 보이며 Pallasca 지역에 암주상으로 분포한다. 이 암주의 면적은 약 40 km²이며 불규칙한 타원체이다(그림 6). 주요 구성광물은 석영, Na-사장석, 정장석, 미사장석 및 흑운모이며 인회석, 자철석 및 저어콘이 수반된다. 저어콘 U-Pb 연대 측정결과 9.5 Ma로서 마이오세 말기이다(INGEMMET, 2007a). Pasto Bueno W-Cu 광상은 이 암체의 동남부에서 유라기 Chicama 층의 접촉부에 위치한다(그림 6).

광 상

Alto Chicama Au 광상

이 광산은 La Libertad Department., Otuzco Province, Usquil District에 소재하며, 동편 해안 지대에 위치한 Trujillo시로부터 동쪽 140 km 지점에 위치한다. 이 지역의 위경도는 S 7° 50'57" 및 W 78°15'00"이고, 해발고도 4,000~4,400 m의 평평한 고산대지로서 안데스 산맥의 중앙부에 위치한다.

이 광산은 캐나다 광업회사인 Barrick사의 현지 자회사인 Minera Barrick Misquichilca S.A. 사에 의해 개발되고 있다. 2001년 2월부터 탐사가 시작하여, 2002년 4월 광상을 발견하였으며 2004년 12월부터 약 4백만 US\$를 투입하여 개발설비를 갖추어 2005년 6월 생산을 시작하였다. 2006년 생산량은 금 원광기준으로 약 42백만톤이며, Au 금속기준으로 약 3톤이다. 총 종업원수는 약 2,000명(외부인력 1,500명)이다. 노천채굴에 의해 광석을 채광하며 주 노천채굴장의 크기는 동서 1.1 km와 남북 1.4 km이다(그

림 7-C 및 7-D). 금 추출법은 시안화(cyanization)를 이용한 퇴적침출(dump leaching 또는 heap leaching)법에 의해 금을 추출하며 침출시간은 45~60일 정도이다.

광산 지역은 산림이 없고 노두의 노출이 좋아 지질현상을 이해하기가 다소 용이하다(그림 7-A). 이 지역은 유라기 Chicama 호성퇴적층이 기반암을 이루고 있으며, 이를 부정합으로 백악기 초 Chimu층 퇴적암류(주로 사암류)가 이를 피복하고 있다(그림 7-B). Chimu층을 제3기 Calipuy층군이 부정합으로 피복하며, 이 층군은 해성기원의 쇠설성 퇴적암류 및 탄산염암류, 화산암류(안산암질암 및 석영-안산암질암)로 주로 구성된다. Calipuy층군 상위에는 화산각력암(열수각력암)이나 응회각력암으로 주로 구성되는 화산쇄설암류와 안산암질 용암류가 부정합으로 피복한다(그림 7-B). 광산 지역의 주요단층은 북동 방향의 역단층이 우세하게 발달하는데, Calipuy층군과 Chimu층의 접촉대에서 뚜렷하다.

이 광상은 고유황형(high sulfidation type) 천열수 금광상에 속한다. 광범위한 열수변질작용을 수반하며, 진전된 니질 변질작용(advanced argillic alteration) 및 강한 규화작용이 주된 변질작용이다. 금 광화작용은 열수변질작용과 밀접한 관련성을 가진다. 광화작용은 Chimu층의 퇴적암류인 사암층과 Calipuy층군의 화산암류에 초래되어 있으며(그림 8-A 및 8-B), Calipuy층군 최상위층인 화산쇄설암류와 용암류는 거의 변질작용이나 광화작용이 초래되지 않아 그 경계가 매우 뚜렷하다. 광체형은 각력상, 세맥군, 열극충진 및 광염상이다. 고품위 광석의 특성은 규화 각력암(그림 8-C, 8-D 및 8-E) 및 다공질 규화암이다(그림 8-F 및 8-G). 품위가 높은 광화암은 대체적으로 각력상을 나타내는데, 이는 다이아트립이 광화유체의 주요 통로로서 작용했을 가능성을 시사하며 다이아트립 구간 외에 나타나는 광화 각력암들은 열수변질작용에 의해 초래된 열수각력암에 속한다. 이 역시 광화작용과 관련성이 높아 주요 채광 대상이 된다. 주 광체의 최고 품위는 8~15 g/t Au, 최저개발품위는 0.3 g/t이며 평균품위 1.34 g/t이다. 집계된 매장량은 Au 금속량으로 250톤으로서 부존량 규모에서 대규모 광산에 속한다. 산화철광물이 우세한 산화암에서 강한 광화작용이 초래되기도 하는데 이는 이차적으로 부화된

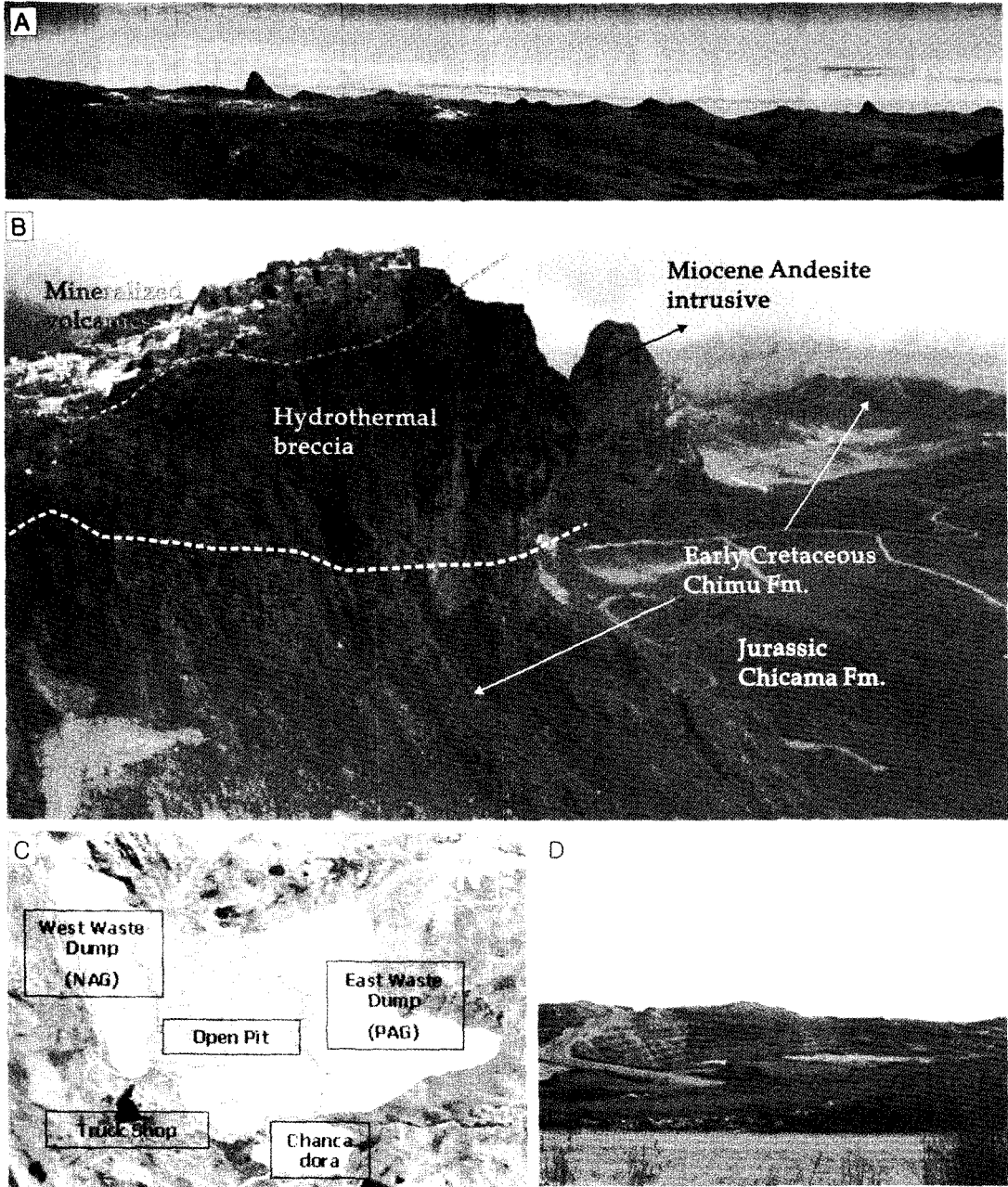


Fig. 7. Photographs showing topography (A), geological stratification (B) and open pit situation (C and D) of the Alto Chicama mine.

2차 부화대로서 금광화작용의 성인과는 직접적 관련성이 없는 것으로 보인다. 관계화성암류는 Calipuy층군의 반암류로서 형성시기는 14~17 Ma로 알려져 있다(INGEMMET, 2007a).

주요 광석광물은 자연금과 일렉트럼이다. 이 광산은 페루에서만 아니라 남미지역에서도 잘 알려진 대규모 천열수 금광산이다.

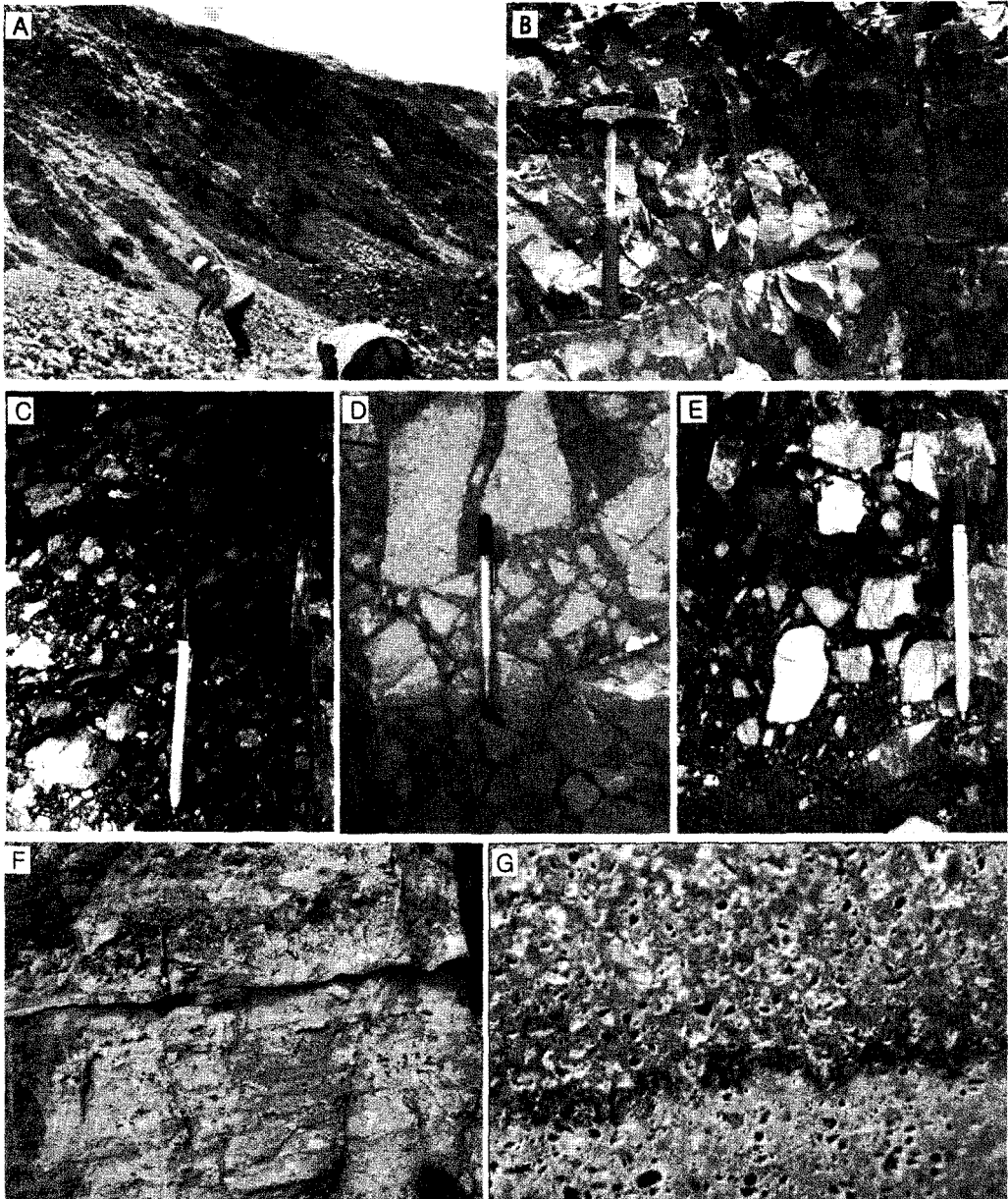


Fig. 8. The strong mineralized zone in the Chimu Fm. (A), mineralized sandstone (B), breccias (C, D, and E), bedded silicified and leached rock with vuggy texture of the Chimu Fm. (F), and vuggy silica (G) in the Alto Chicama mine.

Pasto Bueno W-Cu 광산

이 광산은 Ancash Department., Pallasca Province, Pampas District에 위치하며, 위경도는 S 8°08'49"와 W 77°51'10"이다. 해안도시인 Truji-

llo시로부터 동쪽 285 km 지점에 위치한다. 이 광산지대는 안데스 산맥의 일부인 Blanca 산맥의 북편 확장대에 위치하며, 해발고도 4,200 m의 험준한 고산대지이다(그림 10-A).

이 광산은 1910년에 발견되어 1916년부터 가

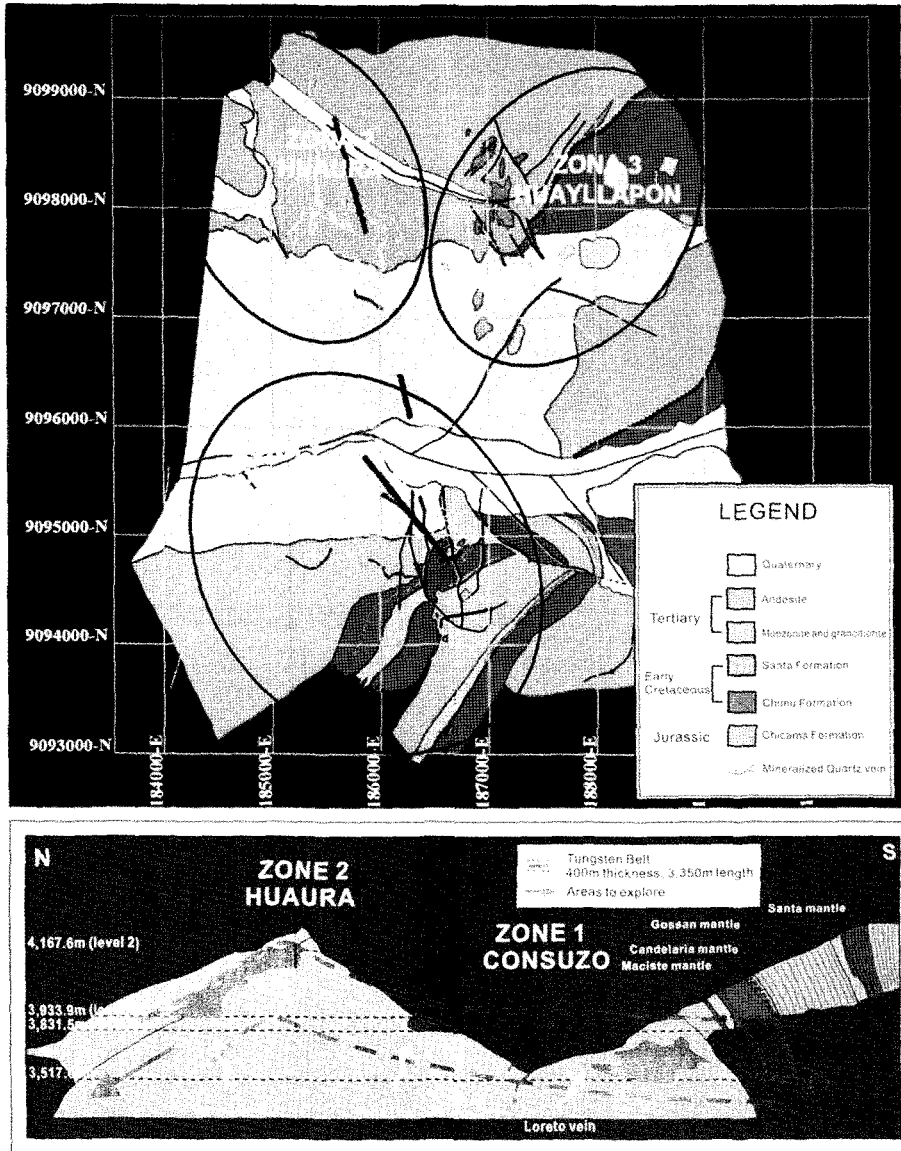


Fig. 9. Three mineralized zones of Pasto Bueno W-Cu-Zn deposit (upper figure) and cross section of the Mineralized Consuelo vein system (lower figure).

행하기 시작하였으며, 1차 세계대전 직후 중석 가격의 폭락으로 가행이 한때 중단된 적이 있다. 1934년 재가동하기 시작하여 2차 세계대전 동안 최고조의 생산을 기록하였으며, 1940년에는 0.65% WO₃ 2,300,000톤을 생산하였다. 그 후 다시 중단되었다가 Minera Dynacor del Peru S.A.C.사가 1996년부터 재가동을 시작하여 2006년부터 생산에 들어갔으며 총 종업원수는

약 600명이다.

이 지역은 변성암, 퇴적암 및 화성암류로 주로 구성된다. 변성암류는 후기 쥐라기의 Chicama층(점판암 및 천매암), 상위의 Chimu층(초가 백악기)으로서 주로 치밀 견고한 유백색의 규암으로 구성된다(Wilson and Reyes, 1964; 1967). 퇴적암류는 백악기 초의 Santa층(세일 및 사암으로 주 구성)과 Farrat층(사암 및 규암으로 주

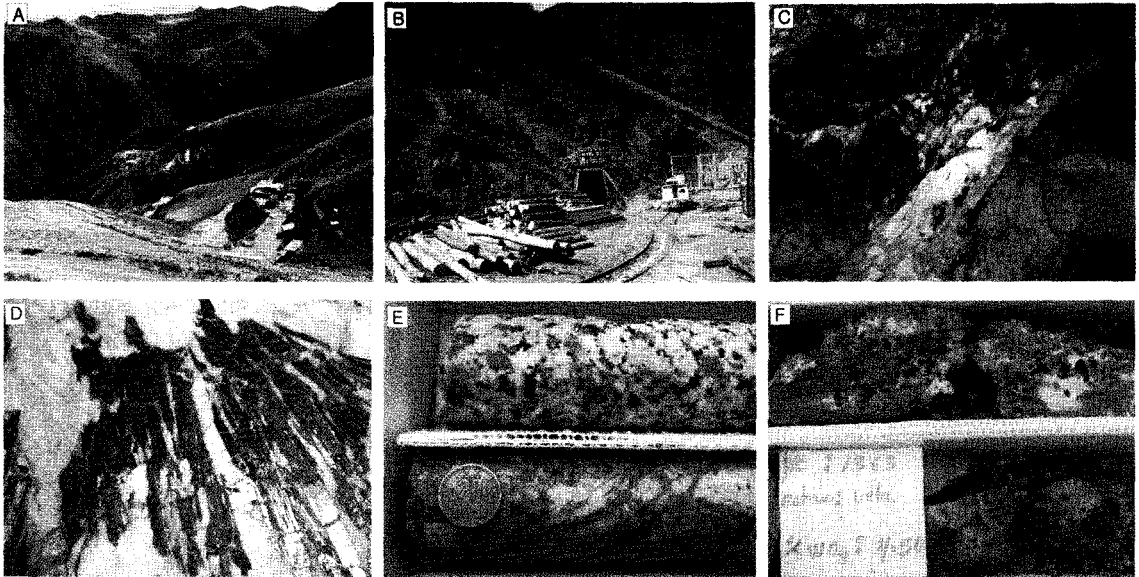


Fig. 10. Photographs showing mine office (A), adit of underground level 10 (B), tennantite-wolframite bearing quartz vein (C), large crystals of wolframite in quartz vein (D), and hosted granodiorite (E), and drill core samples with high grade mineralization (F) in the Pasto Bueno deposit.

구성이다. 화성암류는 제3기 초의 암맥이나 암상으로 산출하는 화산암류, Consuzo 석영-몬조나이트 암주 및 제3기 말의 반심성암류로 구성되며, 이들은 동일 마그마 기원으로 해석되고 있다(Landis and Rye, 1974). 광화작용은 제3기 초 Consuzo 석영-몬조나이트 암주 내 배태되는 거의 수직에 가까운 석영맥에서 초래된다(Landis and Rye, 1974). 석영-몬조나이트암체(또는 화강섬록암체)의 관입연대는 9.5 Ma로 알려져 있다(Dynacor, 2007a). 이 광상 지역은 두개의 지질구조선인 남북계와 북동계로 특징된다. 남북계는 동 방향의 석영맥을 형성시킨 구조적 요인이며, Consuzo 암주, Chicama층 및 Chimu층에 주입된 Consuzo 석영맥이 이에 해당한다(Fig. 9). 북동계는 저각의 정단층이며, 변성암류의 엽리 방향과 정합적으로 발달한다. Alonso 맥, Macista 및 Fenix맥이 여기에 속하며, 대체적으로 N40-50°E의 주향과 45°NW 경사를 나타낸다. 또한 Pasto Bueno 배사구조가 특징적으로 나타나는데, 이는 돔 형태의 석영-몬조나이트암체(또는 화강섬록반암체)인 Cosuzo 암주의 정치에 지배된 구조이다.

이 광상은 그라이젠(greisen) 및 열수맥상 W-Cu-Zn 광상으로 알려져 있다. 이 광상은 Con-

suzo, Huaura 및 Huayllapon zone으로 구분한다(그림 9). 총 25개의 맥으로 구성(1~15 m 폭)된 석영 맥상형 W-Cu 광상이다. 광화맥은 제3기 석영-몬조나이트암체(또는 화강섬록반암체), 주라기 Chicama 퇴적층인 점판암, Chimu층 규암, Santa층과 Carhuaz층인 탄산염암에 배태되어 있다(그림 9). 광상을 구성하는 주요광맥은 Cosuelo, Alonso, Chabuca 및 Loreto광맥이며, 각 주요 광맥의 특성은 다음과 같다. Consuelo 광맥은 Huaura zone(그림 9)에서 가장 중요한 광맥이며 주향 N5°W, 경사 80°SE를 나타내며, 맥폭은 2~10 m, 연장 약 3 km 이상으로서 가장 큰 규모의 광맥이다. 이 맥은 최근까지 0.59% WO₃ 350,000톤을 생산하였으며, 점판암과 관입암(석영-몬조나이트) 접촉부에 국한되어 분포한다. 이 맥은 남쪽의 Maria Ofelia광맥과 Loreto광맥 방향으로 확장된다. Alonso광맥은 이 광상에서 가장 주된 광체이며, 성층상의 점판암에 정합적으로 배태된다. 주향은 N35°E, 경사 40°NW이고 맥폭은 0.5~5 m, 연장은 약 200 m이다. 이 광맥은 10~11 갱도사이에 부분포하여 중석광 290,000톤을 생산하였으며, 12 갱도 이하에서 가장 잠재력이 큰 광맥으로 평가된다. 최근 2.50% WO₃ 품위의 광체가 개발

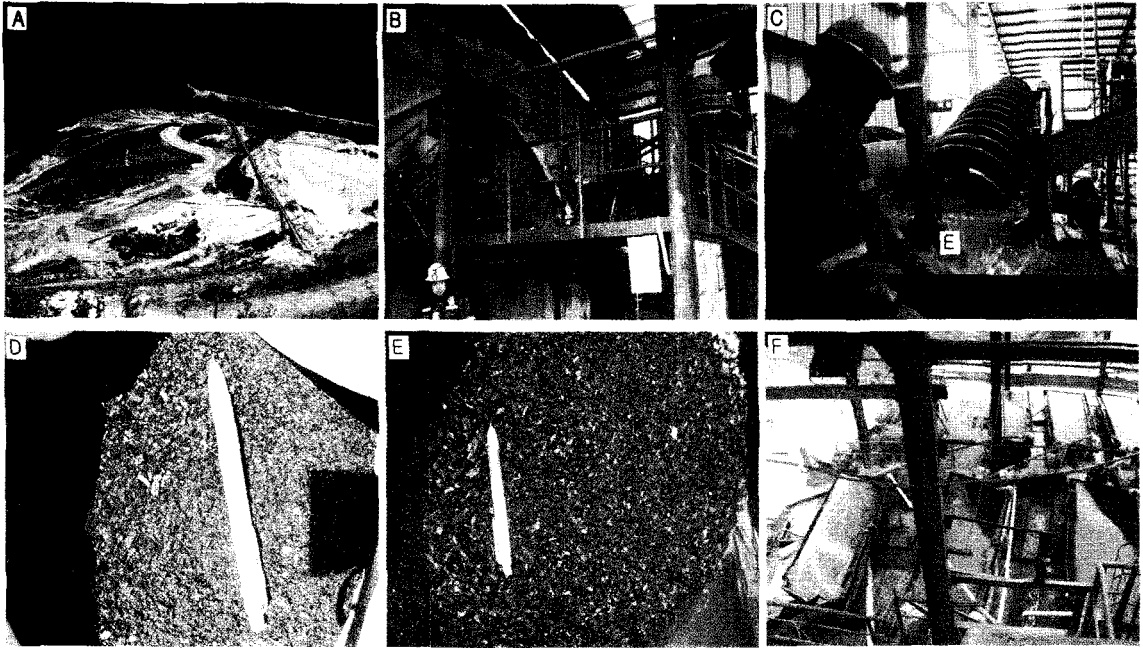


Fig. 11. Photographs showing tailing pond (A), crushing processing (B), size screening for wolframite recovery (C), 1st product (D) and 2nd product of size screening (E), and flotation procedure (F) of the Pasto Bueno mine.

중이다. Chabuca광맥은 Huayllapon zone (zone 3)에서 가장 중요한 광맥으로서, 주향 N10°E, 경사 80°SE이며 맥폭은 1.5 m이다. 이 맥의 6 갱도까지 0.80% WO₃ 459,000톤을 생산하였으며, 보다 심부 Cosuzo 암주 내 남서 방향으로 연장되는 경제적인 광체가 기대된다. 따라서 8 갱도(4,044 m)까지 탐사가 계획되고 있다. 이 맥은 유일하게 슈린키지 채광업(shrinkage stopping)에 의해 채광되는 유일한 광맥이다. Loreto 광맥은 Consuzo zone (zone 1)에서 가장 중요한 광맥으로서 Consuzo 암주 내 배태된다. 주향은 N35°W, 경사 70°SW이며 맥폭은 2~10 m이다. 이 맥에서 0.95% WO₃ 550,000톤을 생산한 바 있다. 최근에는 Maciste 광맥이 위치하는 Santa 층 석회암 분포지인 남쪽으로 연장됨이 확인되었다. 강한 광화작용이 초래된 광맥의 경우 2~3% WO₃ 품위를 보이며 주된 채광대상이다. 이 광상 지역은 2개의 주요 맥계(vein system)를 가지며, 지질구조에 규제된 남북맥계와 북동맥계를 형성하고 있다. 광화작용을 초래시킨 관계 화성암은 9.5 Ma에 관입된 석영-몬조나이트로 해석하고 있다(Dynacor, 2007a). 평균품위는 0.8

~1.0% WO₃, Cu 0.2~0.3%이며 매장량은 원 광석 기준 2백만톤(0.8~1% WO₃)이다. 주요 광석광물은 철망간중석, 비사면동석, 방연석이며 맥석광물은 석영 및 형석이다. 기타 수반되는 광석광물은 hubnerite, ferberite, 회중석, 황철석, 황동석, 섬아연석, 사면동석, 유비철석 등이며 맥석광물로는 백운모, 녹부석, 전기석 등이다. 가장 흔히 산출되는 주요 광석광물은 철망간중석이며 석영 맥내 큰 주상 결정으로 산출하며(그림 10-D 및 10-F), 흔히 비사면동석과 수반되기도 한다(그림 10-C).

모든 광맥을 연결하여 광화구간을 도시하면 그림 9의 아래 그림처럼 맥폭 약 400 m이고 연장 약 3.4 km의 대규모로 발달되어 있다.

이 광상에서는 그라이젠, K-변질, 니질변질 및 프로피리틱 변질이 초래된 것으로 보고되어 있다(Landis and Rye, 1974; Medina, 1978). 그라이젠 변질대는 주로 형석, 전기석, 철망간중석 및 황동석이 산출하며 석영, 건운모 및 황철석이 수반된다. K-변질대에서는 알카리 변성교대작용의 결과 K-장석, 흑운모, 석영, 건운모 및 사장석이 산출한다. 니질 변질대에서는 녹

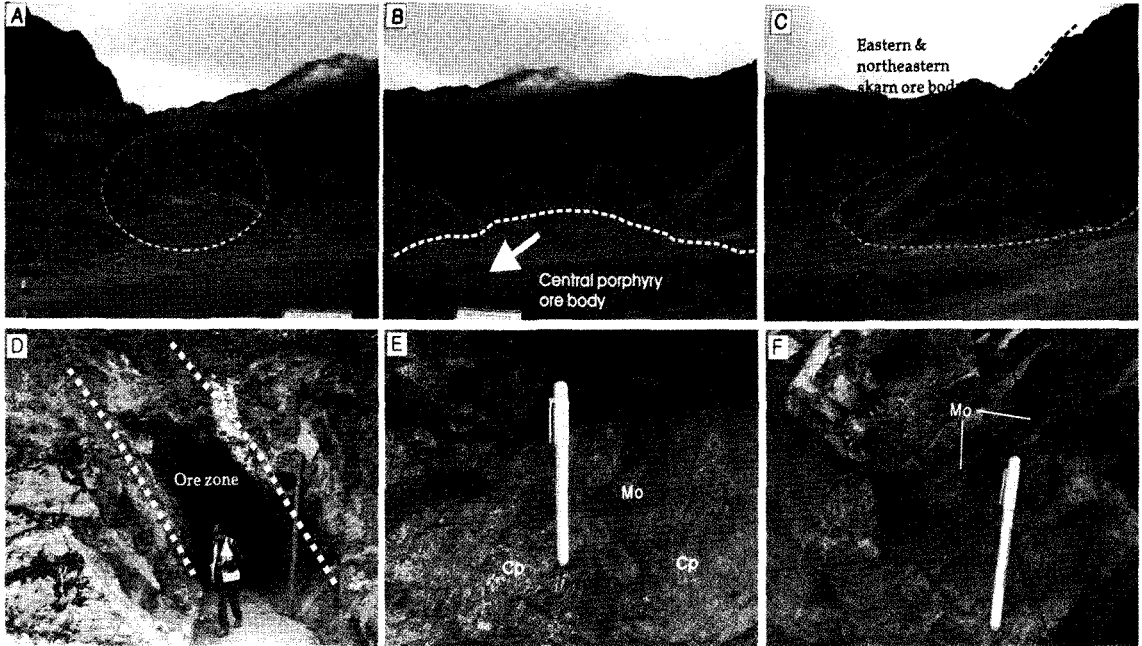


Fig. 12. Photographs showing north skarn ore body (A), central porphyry ore body (B), eastern and northeastern skarn ore body (C), ore zone controlled by NW fault in eastern skarn ore zone (D), chalcopyrite-rich ore body (E) and molybdenite rich ore body (F) in distal skarn zone (diopside-garnet zone) of the Magistral deposit.

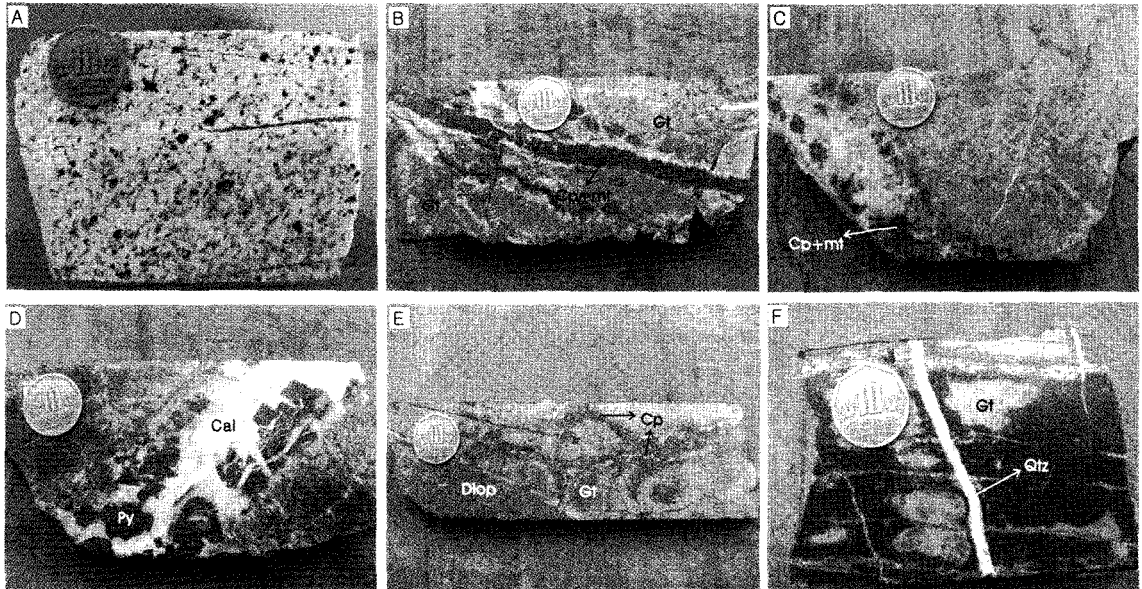


Fig. 13. Photographs showing hosted granodiorite porphyry (A), chalcopyrite+magnetite (Cp+mt) veinlet injected into garnet skarn (B), mineralized quartz veinlet with chalcopyrite+magnetite (Cp+mt) in granodiorite (C), calcite veinlet (Cal) with pyrite aggregate (Py) spot in silicified matrix (D), chalcopyrite veinlet (Cp) injected in diopside (Diop)-garnet (Gt) skarn (E), and garnet (Gt) skarn relics in silicified matrix with quartz veinlets (Qtz) (F) of the Magistral deposit.

니석, 견운모, 형석, 황철석 및 석영이 산출한다. 프로피리티크 변질대는 녹니석, 녹염석, 및 알바이트가 산출하는데 외곽에서 특징적으로 나타난다.

이 광산은 향내채광을 하며 현재 10, 11, 12 경도에서 작업 중이다(그림 10-B). 향후 현재 작업중인 하부 경도인 13, 14, 15 경도에서의 채광을 계획하고 있다. 경도 간격은 140 m이며 경도 변경은 사갱으로 한다. 채굴법은 충전식 채굴법을 적용하고 있다.

광석은 직경 2인치 크기로 1차 파쇄를 하고, 직경 0.25인치 크기로 2차 파쇄 후 입도분리(0.5인치 크기 및 3/8인치 크기)한다(그림 11-B 및 11-C). 맥석은 2 mm로 파쇄 후 비중선별 처리하여 광석을 회수한다(그림 11-F). 직경 6~7 mm 크기의 정광 품위는 WO_3 50%, Cu 10% 이나, 4 mm 이하 크기의 정광은 WO_3 20%, Cu 12%의 품위를 보인다(그림 11-D 및 11-E). 정광은 전량 OSRAM 제련소로 판매된다.

Magistral Cu-Mo 광상

이 광상은 Ancash Department, Pallasca Province, Conchudos District에 위치하며 위경도는 S 8°13'03"와 W 77°46'13"이다. 해안도시인 Chimbote시로부터 북동부 100 km 지점에 위치한다. 이 지대는 안데스 산맥의 중앙부에 위치하고, 해발고도 4,000~4,400 m의 다소 평평한 고산대지이다(그림 12-A 및 12-B).

이 광상은 캐나다 광업사인 Inca Pacific사가 1999년 인수하여 자회사인 Minera Ancash Cobre S.A.사를 설립하고 탐사를 포함한 타당성조사를 진행 중에 있다. Minera Dynacor del Peru S.A.C.사에서 노천조사 및 향내굴진에 의해 탐사를 수행하고 있으며, 최근까지 285개공 60,000 m의 시추가 수행되었다.

이 지역은 유라기 Chicama 퇴적층 및 변성퇴적층(세일, 점판암, 천매암으로 구성)이 기반암을 이루고, 이를 부정합으로 백악기 초 Chimu층(사암 우세)이 피복하고 이를 Jumasha층(탄산염암 우세)이 부정합으로 피복한다. 광산 지역의 북편에서는 Chimu층이 Jumasha층을 오버스라스트로 접하고 있다. 이들 지층들을 제3기 석영-몬조나이트 또는 화강섬록암체가 광상 중앙부에 관입하고 있으며, 이 관입암체가 광화작용

을 초래시킨 관계화성암으로 인지되고 있다.

광상 지역은 광역적인 북서 방향의 단층대에 위치하고 있으나 광상지역에서는 남북 방향을 보이며, 북편으로 갈수록 북북서 방향으로 변화된다. Jumasha층은 심한 습곡작용을 받고 있으며 광상 서편에서는 역단층들이 존재한다. 광상은 경사 약 40°의 남북 방향의 단층이 우세하며, 관입암체의 정치나 변질작용은 이 방향의 단층과 관련 있는 것으로 해석하고 있다.

이 광상은 반암형 및 스카른형 Cu-Mo 광상이다. 이 광상지역의 중앙부에 제3기 관입암체인 석영-몬조나이트 또는 화강섬록반암체가 분포하며 관입암체 내부는 반암형이, 주변부 Jumasha층과 관입암체의 접촉부에는 스카른형 Cu-Mo 광상을 형성시켰다(그림 12-A, 12-B 및 12-C). 따라서 모암은 Chimu층 사암, Jumasha층 탄산염암과 화강섬록반암체이다. 반암형 광체의 변질분대 특성은 K-변질대 → 필릭 변질대(규화대 포함) → 프로피리티크 변질대로 이화되는 특성을 가진다. 이 형 광체의 주요 광화대는 규화대에 배태(실리카 망상세맥, 괴상규화 및 실리카 맥상으로 발달)된다. 화강섬록반암체의 크기는 600 m (EW) × 800 m (NS)로서 타원체의 형태를 보이며, 반암형 광체는 반암체 내 500 m (EW) × 500 m (NS) 크기의 원형상의 형태를 보인다. 반암형 광체의 품위는 Cu 0.7%와 Mo 0.03 %이며, 주요 광석광물은 황동석 및 비사면동석이다. 스카른광체의 변질분대 특성은 반암(관계화성암) → 석류석-투휘석대(석류석 매우 우세) → 석류석-투휘석대(석류석 다소 우세) → 투휘석-석류석대(투휘석 다소 우세) → 투휘석-석류석대(투휘석 매우 우세) → 규회석대로 이화된다. 주요 광화대는 석류석-투휘석대에 배태된다. 스카른 광체의 특성은 광체 형이 툴형이며 광체의 크기는 심도 150 m, 두께 70 m이며 연장은 900 m이다. 스카른 광체의 품위는 1~3% Cu이며, 주요 광석광물은 황동석, 휘수연석, 비사면동석, 자철석, 황철석이 산출된다(그림 12-E 및 12-F). 현재까지 집계된 매장량은 원광석 기준 1억5천만톤(0.7% Cu, 0.04% Mo)이다. 관계화성암은 화강섬록반암체로서 정치시기는 19 Ma로 알려져 있다(INGE-MMET, 2007a).

요 약

페루는 은, 주석, 연, 아연, 동, 금, 비스무스, 몰리브데늄, 텔루리움 및 셀레늄 등을 주로 생산하는 세계 주도적 광업국가이다.

천열수 금 및 반암형 동광화대가 분포하는 페루 북부 La Libertad 및 Ancash 지역의 지질은 선캄브리아기 및 고생대 기반암, 트라이아스기 및 쥐라기의 퇴적암류, 백악기 화산암류 및 퇴적암류가 분포하며, 광상이 주로 분포하는 광화대는 제3기 화산암류 및 관입암류로 주로 구성된다. 대부분 지층들의 분포가 남에서 북으로 갈수록 북서 → 남북 → 서북서 방향으로 발달하는 지질구조적 양상을 보인다.

조사지역의 대표적 천열수 금 및 반암형 동광상으로는 Alto Chicama Au, Quirvilca Au-Ag, Pasto Bueno W-Cu-Zn, La Virgen Au 및 Santa Rosa Au 광상과 Magistral Cu-Mo 및 La Arena Au 광상이다. 이 지역은 페루의 광상생성구 분류에서 광상생성구 XVI (올리고세-플라이오세 천열수 Au-Ag 광화대) 및 XVII (마이오세 반암형 Cu-Mo-Au-W 광화대)에 해당된다.

Alto Chicama 금광산은 대규모의 고유황형 천열수 금광상에 속한다. 광화작용은 Chimu층의 퇴적암류인 사암층과 Calipuy층군의 화산암류에 초래되어 있으며, 광체형은 각력상, 세맥군, 열극층진 및 광염상이다. 주 광체의 최고 품위는 8~15 g/t Au, 평균품위 1.34 g/t으로서 집계된 매장량은 Au 금속량으로 250톤이다. 관계화성암류는 Calipuy층군의 반암류로서 형성시기는 14-17 Ma로 알려져 있다.

Pasto Bueno W-Cu 광상은 중규모의 그라이젠(greisen) 및 열수맥상 W-Cu-Zn 광상이다. 이 광상의 광체는 Consuzo, Huaura 및 Huayllapon zone으로 구분하며, 총 25개의 광화 석영맥으로 구성(1~15 m 폭)되어 있는 석영 맥상형 W-Cu 광상이다. 평균품위는 WO_3 0.8~1.0%, Cu 0.2~0.3%이며, 매장량은 원광 기준 약 2백만톤(0.8~1% WO_3)이다. 주요광석광물은 철망간중석과 비사면동석이다. 이 광산은 과거 개설된 갱도를 이용하여 채광을 수행하고 있어 효율적인 측면에서 다소 떨어진다. 현대식 설비를 이용한 채광이 이루어진다면 그 잠재성은 매우 높다고 판단된다.

Magistral Cu-Mo 광상은 FS가 진행중인 반암

형 및 스카른형 Cu-Mo 광상이다. 이 광상 지역의 중앙부에 제3기 관입암체인 석영-몬조나이트 또는 화강섬록반암체가 관입하며, 관입암체 내부는 반암형 광상이, 주변부 Jumasha 층과 관입암체의 접촉부에는 스카른형 Cu-Mo 광상이 형성되어 있다. 반암형 광체의 품위는 Cu 0.7%와 Mo 0.03 %이며, 주요 광석광물은 황동석, 비사면동석이다. 스카른 광체의 크기는 심도 150 m, 두께 70 m이며 연장은 900 m이다. 품위는 1~3% Cu이며, 주요 광석광물은 황동석, 휘수연석, 비사면동석, 자철석, 황철석이다. 매장량은 원광석 기준 1억5천만톤(0.7% Cu, 0.04% Mo)이다. 관계화성암은 화강섬록반암체로서 정치시기는 19 Ma로 알려져 있다. 이 탐사지역은 현재까지의 탐사결과에 의하면 잠재성이 높은 중규모의 Cu-Mo 광상으로 평가되며, 계속해서 탐사계획이 수립되고 있어 새로운 광체 확보가 가능하여 매장량은 계속 증가할 것으로 예측된다.

사 사

자세하게 교열해 주신 경상대학교 조현구 교수님과 부산대학교 양경희 교수님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 고상모, 류충렬, Humberto, L. and Luis J. (2007) 페루의 광상생성구. 한국지질자원연구원 논문집, 11, 116-129.
- 외교통상부 (2006) 남미 10개국 자원 현황, 525p.
- Barrick (2006) Summary of Mina Alto Chicama. Barrick Co. Ltd.
- Barrick (2007) Geología Mina Lagunas Norte-Alto Chicama. Minera Barrick Misquichilca S.A.
- Dynacor (2007a) Summary of Mina Pasto Bueno. Minera Dynacor del Peru S.A.C.
- Dynacor (2007b) Visita Técnica a la Mina Pasto Bueno. Minera Dynacor del Peru S.A.C.
- INGEMMET (1980) 1:100,000 Mapa Geológico del Cuadrángulo de Cajabamba.
- INGEMMET (1995) 1:100,000 Mapa Geológico del Cuadrángulo de Pallasca.
- INGEMMET (2007a) Guia de Campo. Alto Chicama, Quirvilca, La Arena, La Virgen, Magistral y Pasto Bueno.

- INGEMMET (2007b) New Metallogenic Map of Peru.
- Landis, G.P. and Rye, R.O. (1974) Geologic Fluid Inclusion and Stable Isotope Studies of Pasto Bueno Tungsten-Basemetal Ore Deposit, Northern Peru. *Economic Geology*, 69, 1025- 1507.
- Medina, M. (1978) La Mineralización de Fluorita y Tectónica en la Mina Pasto Bueno. *Convención de Ingenieros de Minas 14*, Lima 1978, Trabajos técnicos. Lima: Instituto de Ingenieros de Lima del Perú, 2, 55-70.
- USGS (2007) Minerals Yearbook.
- Wilson, J. and Reyes, L. (1964) Geología del Cuadrángulo de Pataz; Boletín N° 9 Serie A. *Carta Geológica Nacional INGEMMET Lima*, 20-49.
- Wilson J. and Reyes L. (1967) Boletín 16 serie A carta Geologica Naconal Geologia de los Cuadrangulos de Payasaca, Tayabamba, Corongo, Pomabamba. 79p.
-
- 2008년 1월 30일 원고접수, 2008년 3월 16일 게재승인.