



볼리비아의 금속광상 성인개요

허철호

한국지질자원연구원 광물자원연구본부 해외광물자원연구실

볼리비아의 국토면적은 백만km²를 약간 넘으며 오래동안 세계에서 가장 놀라울 정도로 금속이 풍부한 지역들 중 하나로 인지되어 왔었다. 많은 금속광상들은 3천년 이상 알려져 왔으며, 은, 금, 동 및 주석은 잉카 초기부터 채굴되어 왔다(Capriles, 1977; Mesa et al., 1997). 1530년대 스페인인들에 의해 볼리비아(Upper Peru)가 정복된 직후, 매우 부화된 Cerro Rico de Potosi 맥들의 발견은 볼리비아를 2세기 이상 세계에서 가장 큰 은 생산국으로 만들었다. 1900년대초, 거대한 주석 광상이 발견되었고 국가경제를 위해서 가장 가치 있는 금속으로서 은을 대체했으며 1985년 주석시장의 붕괴까지 상황은 지속되었다. 20세기에는 광업이 볼리비아의 1등 산업이었으며, 세계 안티모니, 비스무스, 연, 은, 주석, 텅스텐 및 아연의 대부분을 생산했다. 볼리비아는 주석 및 아연은 제 4위, 텅스텐은 제 6위 뿐만 아니라 안티모니는 세계 제3위 생산국이다. 게다가, 남부 알티플라노의 소금호수(salar)는 세계 리튬 자원의 50% 이상을 차지하는 것으로 평가되고 있다. 최종적으로, 볼리비아는 금, 백금, 팔라듐, 탄탈륨, 크롬, 니켈, 카드뮴, 인듐, 비스무스, 안티모니, 칼륨, 붕소, 철광석, 천연가스, 석유와 같은 자

원을 보유하고 있다. 오늘날 볼리비아가 탐사중이고 개발중인 매우 광범위한 자원들은 현대 산업에 필수적인 요소로서 고려되고 있다(Arce-Burgoa, 2007, 2009).

다양한 금속 광상 유형이 볼리비아의 지질학적으로 다양하고 금속광상성인적으로 유리한 환경에서 인지되어왔다. 볼리비아의 선캠브리아 순상지를 표현하는 구아포레 순상지는 볼리비아의 동부 하부에 놓여있으며, 자원잠재력은 매우 부실한 것으로 알려져 있다. 볼리비아의 가장 자원이 풍부한 지역은 볼리비아 서부의 중앙 안데스 지역이다. 주석과 천금속이 풍부한 다금속 맥상광상은 볼리비아의 이 지역에서 부존하고 있다. 그러나 볼리비아는 역시 경제적으로 중요한 천열수 귀금속 광상, 슬레이트벨트의 조산성 금, 염기성 및 초염기성 관입체의 백금 족금속 및 니켈, 화산성 과상황화물 및 퇴적분기성 광상의 천금속, 호상철광상의 철로도 유명하다. 광업은 전통적으로 갱내 작업으로 수행되었다. 1983년 Kori Kollo 금광상의 개발은 볼리비아에서는 최초의 대규모 노천채굴 작업으로 알려졌다. 계속해서, Toldos, Don Mario, Kori Chaca (Iroco) 및 San Cristobal에서 추가적인 노천채굴 작업이 진행되었다.

볼리비아의 지질

볼리비아의 지질-지체구조환경은 6개로 구분된다. 동쪽에서 서쪽으로, 이들은 선캄브리아 순상지, Chaco-Beni 평원, Subandean 지대, 동부 코르달레라, 알티플라노 및 서부 코르달레라이다(그림 1). 후자의 4개 지역이 볼리비아의 중생대-신생대 안데스 조산대를 구성하며, 풍부한 광상을 배태하고 있고, 대부분 수세기동안 채광되어왔다(Arce-Burgoa, 2002, 2007). 안

데스의 동쪽까지 멀리 노출된 大陸向 선캄브리아 순상지는 상당한 광물잠재력을 지닌 지역이나 제한된 탐사가 진행되었었다.

볼리비아 최동단의 선캄브리아 순상지의 암석들은 보통 아마존 강곡의 남서부를 정의하는 것으로 제안되고 있으며 약 200,000km² 또는 볼리비아 국토면적의 18%를 차지하고 있다(그림 1). 암층들은 주로 중기원생대의 중내지 고변성도 변성퇴적암 및 변성화성암이며, 제3기 라테라이트 및 제4기 충적성 분지 광상에 의해

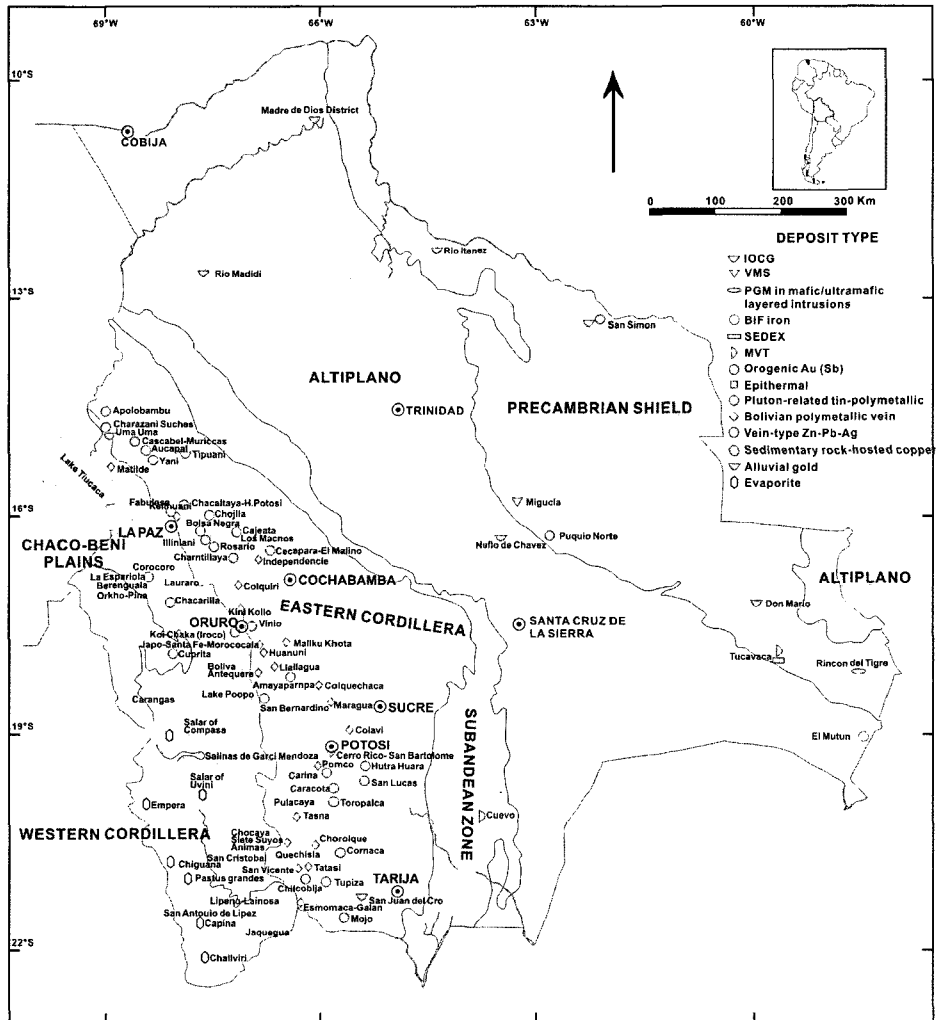


그림 1. Major ore deposits in the physiographic province of Bolivia.

넓게 덮혀있다. 이전의 연구자들은 이것을 구아포레 강곡으로 언급해왔으나, Santos 등(2008)은 이것을 강곡의 기저암이 아니라 차라리 강곡 연변부를 따라 형성된 약 1.45-1.10Ga의 순사스 강곡안에 있는 작은 내좌층을 표현한다고 제안한다. 조산대에서 주요한 지체구조사건은 1465-1420, 1370-1320, 1180-1110 Ma이다. 후속되는 브라질 지체구조작용(약 600-500Ma)은 조산대에 단지 미미한 효과를 끼친 것으로 사료된다(Litherland et al., 1986, 1989).

Chaco-Beni 평원은 볼리비아의 중심부에 위치하고 있고 볼리비아 면적의 40%를 차지하고 있다. 지형은 남서부의 아마존 분지 습지에 영향을 받고 있으며, 250m 고도아래에 놓여 있으며 용기부나 노두가 거의 없다(그림 1). 이들 연장성있는 평원들은 중앙 안데스의 갑(峯)분지의 일부이며 서쪽으로는 신생대 갑층적성 퇴적물과 동쪽으로 훨씬 얇은 퇴적물을 포함한다(Horton and DeCelles, 1997). 이들 층은 층후가 6km 이상인 제3기 적색층 퇴적물위에 놓여 있으며 동쪽으로는 선캠브리아기 결정질 기저암과 서쪽으로는 고생대 및 중생대 퇴적암을 덮고 있다. 이들 층적성 퇴적물은 동부 안데스 및 고원의 몇 번의 신생대 내지 중생대 시기의 후기동력작용 및 후조산성운동의 산물로 사료된다.

볼리비아 안데스 조산대의 암석들은 볼리비아 면적의 약 42%를 차지하고 있으며 Subandean 지대, 동부 코르딜레라, 알티플라노, 서부 코르딜레라를 포함한다. 이들 지형들은 북-남 주향을 가지며 일련의 산맥, 고립된 산맥 및 평원들을 형성한다(Ahlfeld and Schneider-Scherbino, 1964; 그림 1). 이 부분의 조산대는 연장 1,100km, 최대 폭 700km, 평균 지각두께 70km이며, Arica Elbow(18°-19°S)에서 뚜렷한 굴곡이 나타난다.

Subandean 지대는 조산대-평행습곡-트리스

트대의 층이 얇은 내륙성 연변부이며, 부분적으로 활동성 갑분지의 서편 퇴적물에 덮혀있다(그림 1). 특징적으로 고도가 500-2000m인 북남 주향의 좁은 산맥들이 부존하고 있다. 이 지역의 암석유형은 고생대 규산쇄설 해양성 퇴적암 및 중생대-제3기의 대륙성 퇴적암으로 구성되어 있다.

동부 코르딜레라는 안데스 트리스트대의 용기된 내부로서 다변성된 오르도비스기 내지 근세의 셰일, 실트암, 석회암, 사암, 슬레이트, 규암 층서를 구성하고 있다(그림 1). 이들 고생대 쇄설암 및 변성암은 약 280,000km²의 면적을 차지하며 고대 곤드와나 연변부를 따라 퇴적되었고 중기 내지 후기 고생대에 처음으로 변형되었던 플리쉬 분지 퇴적물을 나타낸다. 페름기 내지 쥐라기 열극작용후에, 이층들은 높은 고도까지 용기되었고 후기 백악기 초엽정도에 시작되었던 안데스 압축작용시 다시 습곡을 받고 트리스트를 받았다(McQuarrie et al., 2005).

알티플라노는 일련의 산간 대륙분지이며, 연장은 약 850km, 평균 폭은 130km이고 면적은 110,000km²이다. 이들은 3600m 및 4100m의 고도에 높은 대지를 형성한다(그림 1). 지형학적으로, 이 지형은 고립된 산맥에 의해 간섭을 받는 연장성이 있는 평평한 평원으로 구성되어 있다. 지각수축, 빠른 침강, 동시에 15km 정도의 퇴적작용이 안데스 조산운동시 발생했다(Richter et al., in USGS and GEOBOL., 1992). 분지충전은 후기 에오세-올리고세 동안 서부 코르딜레라의 침식에 의하여 이루어졌으나, 동부 코르딜레라 및 Subandean 지대의 신생대 수축작용은 동쪽으로부터 유래된 얇은 퇴적물이 지배적이다(Horton et al., 2002).

서부 코르딜레라는 연장 750km 이고 평균 폭이 < 40km인 화산산맥으로 구성되어 있으며 면적은 약 30,000km²이다(그림 1). 후기 쥐라기 및 초기 백악기의 화산쇄설암, 사암 및 실트

암 층서는 페루 및 칠레의 코르딜레라에서도 지배적이다. 소량의 후기 백악기 대륙성 퇴적물은 해양성 암석위에 퇴적되었다. 동시에 대부분 거대한 반암동 광체와 관련이 있는 거대한 화강암류 심성암들이 인접한 페루 및 칠레의 해안을 따라 정치되었다. 볼리비아에서, 이 지역은 좁은 주요 중앙 안데스 마그마호이며 약 28Ma경 형성된 안산암질내지 석영안산암질 층상화산암이 지배적이다.

금속광상분포

볼리비아는 3개의 중요한 남미 금속광상구중 일부를 포함하고 있다: 선캄브리아기 순상지, Chaco-Beni 평원 및 중앙 안데스. 선캄브리아기 지층들은 많이 조사되지 않았으나 광물자원 잠재성이 상당하다. Chaco-Beni 평원은 광범위한 사금 회수지역이었으며, 중앙 안데스는 볼리비아에서 알려진 중요한 맥상 금속광상의 대부분을 배태하고 있다.

동부 볼리비아: 선캄브리아 순상지 및 Chaco Beni 평원

비록 탐사실적이 저조하더라도, 선캄브리아기 순상지의 연대미상의 소수의 분산된 고품위 조산성 금광상은 상당한 자원 잠재력을 지시한다. 보통 안상광맥을 따라 부존하고 있는 금맥은 브라질 경계 근처의 San Simon 지역, Paragua 순상지 금-망간 벨트라 불리는 지역에서 산출된다(SERGEOMIN-YFPB, 2000; 그림 2).

1700년대 중반이래로 소규모로 채광했던 22톤의 San Simon 광상은 약 1450 Ma의 잡사암에 배태되고 있다. 몇 개의 합금 사광은 San

Simon 산맥에 부존하고 있는 금맥의 침식과 연관되어 있다. Sunsas 지역의 서부 연변부를 따라 San Ramon 내에 부존하고 있는 10톤 규모의 금을 함유한 Puquio Norte 광상은 Sunsas 조산대의 중기원생대 초기 호상철광상에 배태되어 있는 석영-탄산염 맥들로 구성되어 있다. 이들 광상들은 인접한 브라질의 Guapore 금벨트의 광상들과 관련 있으며, 이들은 최근에 개발된 Sao Francisco(금 40톤)와 Sao Vincente(금 19톤)광상을 포함한다. 금광화대에서 1.0 및 0.8Ga사이에 광화작용과 관련된 연대들이 산포되어 있으며, 이는 Sunsas 지체구조작용과 동시기이며 그 당시 광역적인 금속광화작용이 발생했음을 지시한다.

선캄브리아기 순상지의 고품위 편마암은 Don Mario 광상과 유사한 금-은-동 유망광구를 배태하고 있으며, 1700년대 시작무렵부터 동산화물이 채광되었고, 연, 아연, 중석, 비스무스가 역시 부화되어 있다(Arce-Burgoa, 2007). 광석을 함유하는 맥 및 망상세맥은 자철석이 풍부한 스키르나 중첩되어 있는 것으로 기재되어 있다. 이들 합금 산출지는 IOCG 광상으로 언급되어 왔으나, 철-동-금 스키르나계의 가능성도 배제할 수 없다.

산점상내지 괴상의 다금속 황화물 광상은 볼리비아 선캄브리아기, 특히 650×55km Tucavaca 분지의 남부에 있는 신기원생대 열극 분지와 관련되어 있다. 산점상의 동-연-아연 광화작용과 석영-중정석-방연석 맥들은, 주로 산화된 쇄설성 암층과 환원된 흑색셰일 암층의 암상접촉부를 따라 부존되어 있으며 SEDEX 광상에 대한 잠재력을 제시하고 있다. Tucavaca 분지의 북부에 있는 스트로마톨라이트 맥과 함철 돌로마이트에 배태되어 있는 연-아연이 풍부한 지역은 미시시피 계곡 유형(MVT) 광상의 잠재력을 지시한다. 게다가, Mutun-Tucavaca 철망간 광화대는 크기가 대략 230×30km 이며 북서주향이고 볼리비아에서 대규모의 고품위

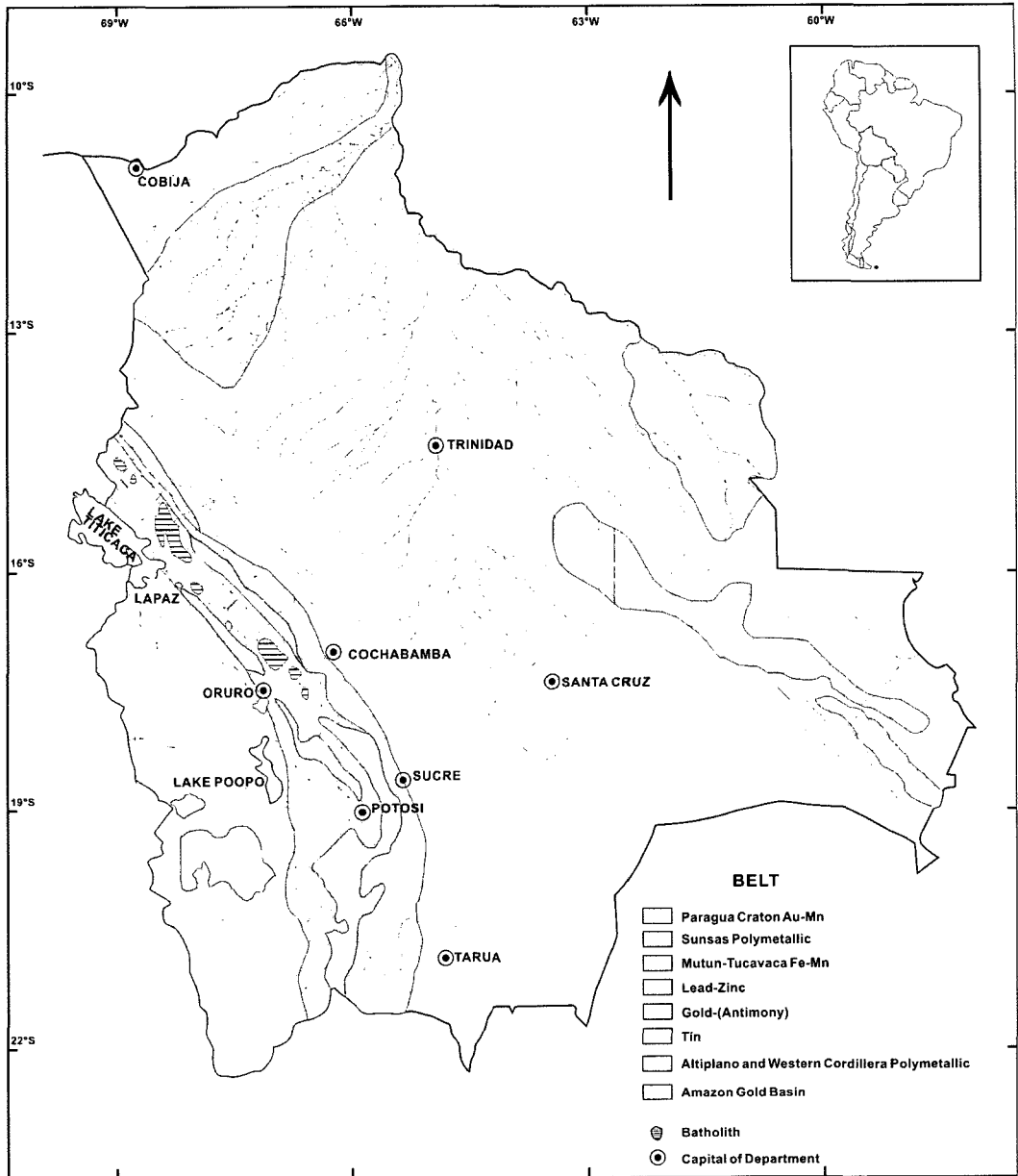


그림 2. Metalliferous provinces in Bolivia modified from SERGEOMIN-YPPFB(2000).

퇴적기원 철-망간 광석을 배태하고 있다(그림 1). 이들 Rapiton 유형의 BIF층들은 Tucavaca 분지의 지구대에 위치하고 있는 El Mutun, Cerro Rojo 및 Cerro Colorado-Murcielago

광상을 포함한다. 이들 광상들은 Rapitan 유형의 BIF내에 배태되어 있다. 이 지역의 서부 연변부를 따라 부존되어 있는 Guarayos 녹색암대는 동-금-은-아연 화산성괴상황화물광상 산

출지를 배태하고 있다. 그리고, 주로 La Pastora 층에 부존하고 있으며 20km 정도의 주향연장을 따라 노출되어 있다. Miguela 광상의 괴상 내지 판상의 황철석-황동석±방연석-섬아연석 광체는 중기원생대 유문암 및 변성퇴적암에 배태되어 있다(Arce-Burgoa, 2009).

마그마 관련 광물 산출지는 선캠브리아기 순상지에서 인지되고 있다. 편암을 절단하는 동시기 내지 후기 동력학적인 약 1.0 Ga의 페그마타이트(예., Los Patos, La Bella, Acencion de Guarayos)는 베릴륨, 주석, 탄탈륨, 니오븀, 토륨 및 우라늄 자원을 함유하고 있다(Bennet and Zerain, 1985). 또한, 열수광화작용은 쥘라기-백악기(Velasco 및 Manomo Hill)와 원생대(Mercedes 열극 및 El Tigre Complex) Lovozero 유형의 Nb, Ta, REE 광화작용을 배태하고 있는 알카리 섬장암질 암체의 정치와 관계가 있다(Fletcher and Litherland, 1981; Fletcher et al., 1981; Arce-Burgoa, 2007, 2009; SERGEOMIN-YFB, 2000). 볼리비아 선캠브리아기 지역의 남부경계 가까이에 있는 중기원생대 변성퇴적암은 남미에서 가장 큰 염기성-초염기성 복합체들중 하나이며, 1,100km 연장의 관입체로 된 북-남벨트의 일부분인 약 990Ma의 Rincon del Tgre 복합체에 의해 관입되었다(Annels et al., 1986; Arce-Burgoa, 2009). Santos et al.(2008)의 지구연대측정에 의하면, 이들 관입체들이 비록 Rincon del Tigre 복합체가 정치후에 때때로 변형되었을지라도 Sunsas 후기의 A유형 마그마작용의 대표적인 암상임을 제시한다. 복합체 상부의 자철석 반려암은 경제성이 떨어지는 백금족원소와 금이 농집되어 있다(Prendergast, 2000).

거대한 Madera, Madre de Dio, Beni 및 Mamore 강 및 그들의 수많은 지류들은 중앙안데스와 그들의 풍부한 고생대 조산성 금광상의 북동부 경사지로 흘러들어가며 그 다음에는 Chaco-Beni 평원의 북부를 가로지르며 이들은

소위 아마존 금분지라 불리운다(그림 1). 사광은 비록 일부 지역에서 품위가 4 g/m^3 를 넘을지라도 평균 품위가 대략 0.5 g/m^3 이다(Heuschmidt and Miranda, 1995). 이들 사광은 >1,200톤 금이 매장되어 있는 것으로 평가되었다(Arce-Burgoa, 2009). 대부분의 금은 제3기 후기 Cangalli 층으로부터 회수되었으며, 현재의 하천 수로에 의해 재식되었다. 상당한 자원은 아직도 이들 충적성 광상에 존재하며, 예를 들면 Alto Madidi 강의 상류에서는, 일련의 두꺼운 역암들이 0.05g/m^3 금품위로 54Mt 이나 매장되어 있다.

서부 볼리비아: 중앙 안데스

중앙 안데스의 볼리비아 부분은 다양한 광상들과 금속광상벨트가 특징적이다(그림 1 과 2). 여기에는 알티플라노 및 서부 코르딜레라의 마이오세 내지 플라이오세의 적색층 동광상 및 천열수 광상, 마이오세 주석벨트, 고생대 금-안티모니 벨트 및 동부 코르딜레라에서 주로 연대측정이 되어 있지 않는 연-아연 벨트가 부존하고 있다. 게다가, 알티플라노 및 서부 코르딜레라의 고염호는 세계 리튬 자원의 50% 이상을 차지하는 경제적으로 중요한 증발암을 포함한다.

알티플라노의 퇴적암에 배태된 동광상

80개 이상의 마이오세 내지 플라이오세 층상 동광상은 볼리비아 알티플라노의 연장을 따라 산포되어 있다. 이들은 가장 생산적인 Corocoro 지역을 포함하며, 잉카시대부터 채광되어왔다(Arce-Burgoa, 2009). 적색 동광석은 일반적으로 제3기층간 접촉부와 부정합을 따라서 산

출한다. 비록 넓게 퍼져 있지만, 이들 광상들은 Corocoro 및 Chacarilla를 제외하고는 일반적으로 규모가 작으며 이는 세계적인 광화대에서 볼수 있는 대륙성 적색층위의 유리한 환원제를 만들기 위해서 요구되는 광범위한 해양성 해 침층서의 부재를 반영한다(USGS-GEOBOL, 1992). 알티플라노의 가장 중요한 동광상은 국지적 환원제 트랩으로 사료되는 석고 다이아피르 층과 밀접하게 연관되어 있다.

알티플라노 및 서부 코르딜레라의 다금속 벨트

알티플라노 및 서부 코르딜레라 지역의 800×200km 다금속 벨트는 주로 천열수 은-금-연-아연-동 광상으로 구성되어 있다(그림 2). 이들은 중기-후기 마이오세와 플라이오세 초기동안 형성되었으며, 이때 화산작용 및 천부 마그마작용이 광범위하게 작용하여 귀금속 및 친금속 함유 천열수 광상을 형성했다(USGS-GEOBOL, 1992; Redwood, 1993). 가장 중요한 광상성인적 특징은 화산 칼데라와 연관이 있는 중간 및 고유황형 천열수 광화작용을 포함한다. 거대한 San Cristobal 산점상은 및 아연이 풍부한 광상은 호성 환경에서 반암돔이 정치되었음을 반영한다(Phillipson and Romberger, 2004). 대부분의 광상들은 선구조, 거대 단층 및 국지적 규모의 장력열개를 따라 구조규제를 받는다. 광화작용의 유형은 맥 및 망상세맥으로부터 각력암, 다공성 화산쇄설암 및 반암의 산포상까지 다양하다. 광화암은 보통 호상이며, 각력화되어 있고, 다공성내지 정동이 있다. 수직의 심부내지 천부의 금속누대는 때때로 중첩되어 있으며, 연-연-(은), 연-(은)의 부화를 보이면서 지표면 가까이 가면 은-(금)이 산출된다.

은이 풍부한 천열수광상은 주로 중간 유황형

이다(Arce-Burgoa, 2009). 이들중 중요한 예로는 Pulacayo, Berenguelo, Carangas, Salinas de Garci Mendoza, San Cristobal, San Antonio de Lipez 및 Jaquagua가 있다. 고유황형 천열수광상은 흔하지 않으나 알티플라노에는 Laurani에 부존하는 것과 서부 코르딜레라의 La Espanola를 들수 있다. La Espanola에서, 석영-명반석 변질작용은 초기의 저유황형 광화작용과 중첩되는 것처럼 보인다(Arce-Burgoa, 2009). 중간 유황형 천열수 광상은 약 15.7Ma의 Kori 광상을 포함하며, 매장량이 161톤 금과 907톤 은이고 1990년대 초기에 남미에서 가장 큰 금생산 광산이었다. Lipena-Lamosa 천열수 광상에서는, 금, 비스무스, 등이 식민지시대부터 채광되었다(Redwood, 1993).

볼리비아 주석 벨트

볼리비아 주석벨트는 볼리비아의 동부 코르딜레라의 북서 내지 북-남 주향의 방향으로 약 900km 정도 연장되어 있으며, 대륙지각이 가장 두꺼운 부분이다(Turneaure, 1971; Arce-Burgoa, 1990; 그림 2). 고품위(1-5% Sn) 열수 주석맥은 전형적으로 상당량의 은 및 중석을 포함하고 있는데 공간적으로 과알루미나 화강암 및 제3기 후기의 반암 관입체와 관련이 있다. 관입체는 고생대 퇴적암으로 구성된 심부지각멜트의 조성을 지니고 있다. 주석벨트의 광상들은 4개의 그룹으로 나눌수 있다. 반암-(주석), 화산암-(주석-은-연-아연, 부광대 유형의 은-주석도 포함한다), 퇴적암에 배태된 (주석-은-연-아연) 그리고 심성암과 관련된 주석-다금속 광상(주석-금-중석-아연)으로 정의된다(Arce-Burgoa, 2009).

볼리비아 주석벨트의 남반부에 위치하는 다금속 맥상광상은 다양한 모암내에 맥, 세맥, 망

상세맥, 산점상 광석을 포함한다. 광화연령은 22~4Ma 이다. 반암에 배태된 맥은 주로 석영 안산암 및 래타이트 암체에 배태되어 있다. >1Mt 주석을 생산한 Llallagua 광상은 아마도 세계에서 현재까지 발견된 가장 큰 주석 맥상 광상일 것이다. 모암 반암의 연변부를 따라 맥 들로부터 회수된 광석은 12~15% 주석이다. 그러나, 대부분의 저품위 광석은 일반적으로 0.2~0.3% 주석을 함유한다. 이들 광상들은 정 마그마 작용 후기의 산물로 인지된다(Sillitoe et al., 1975).

부광대형 은-주석 맥들은 유문석영안산암질, 석영안산암질, 및 석영 래타이트질 조성의 화산 돔 복합체에 배태되어 있다(Cunningham et al., 1991). 주석 산출지의 남부에서 부광대를 형성한 시기는 18~16Ma 였다(Grant et al., 1979; SERGEOMIN-YPFB, 2000). Cerro Rico de Potosi 복합금속 맥상광상은 1500년대 중반 부터 채광해왔는데 세계에서 가장 큰 은광상이다. 이 광산은 60,000톤의 은을 생산했으며 평균 자원량은 품위 102g/t 은과 0.10~0.17%의 주석으로 540Mt이다(Bernstein, 1989). 광상은 약 13.8~13.5Ma에 형성되었고 계속해서 7백5십만년동안 2차부화 산화작용을 겪었다(Rice et al., 2005). 퇴적암에 배태된 다금속 맥들은 비록 화성암들이 이들 광상들에서 수 km내에 존재한다고 할지라도 고생대 초기 및 제3기 암석의 쇄설성층에서 발견된다.

심성암과 관련된 주석-다금속 맥상광상은 코르딜레라 레알지역에서 지배적이다. 이 지역에서는 두개의 뚜렷한 광화작용이 인지된다. 광석은 고생대 퇴적암, 접촉 혼룬, 페그마타이트 및 관입복합체에 배태되어 있다. 페름기 후기 내지 쥬라기의 화성암들은 벨트의 북부에서 주석-텅스텐±금-비스무스-아연-연-은-안티모니 맥상 광상과 관련이 있다(La Chojilla, Enramada, Bolsa Negra, Milluni; Grant et al., 1979). 코르딜레라 레알 남부의 주석 및 다금속광화작

용은 28~19Ma의 화강암류 심성암 및 고생대 퇴적암에 배태되어 있다(Rosario de Araca, Colquiri; Grant et al., 1979). 이들 광상들은 국지적으로 중첩되어 있으며 핵심부는 중석-주석±금이고 외곽부는 천금속이 풍부한 맥이다.

동부 코르딜레라의 금-안티모니 벨트

조산성 금±안티모니 광상으로 구성된 3개의 뚜렷한 벨트는 500개 이상의 알려진 광상과 산출지를 포함하며 동부 코르딜레라의 연장을 따라 인지되고 있다(Tistl, 1985; Lehrberger, 1992; 그림. 2). 이들은 (1) La Paz 가까이로부터 Oruro-Challapata 벨트를 통해서 Amayapampa 지역까지의 북서주향 벨트; (2) Caracota-Carma 지역에서부터 아르헨티나 국경의 Candelario 지역까지의 북남 주향 벨트; (3) 페루국경 근처의 Apolobamba 지역에서부터 Aucapata-Yani 및 Cajuata-Los Machos 지역을 통해서 Cocapata-EI Molino 지역까지 북서주향벨트. 3개 벨트의 선형관계는 중앙 안데스의 주요 지각 구조와 일치한다. 전자의 두개의 벨트는 알티플라노-동부 코르딜레라 경계를 따르는 반면, 후자 벨트는 볼리비아 동부 코르딜레라 북반부의 중심 안에 있다. 많은 금산출지역들은 중생대 및 제3기 관입체와 관련된 주석광화작용을 배태하는 동부 코르딜레라의 같은 부분에 분포하고 있다.

조산성 금광상은 리본맥, 망상세맥, 안상맥, 산점상 광석을 형성하며 주로 중기 오르도비스기 내지 초기 실루리아기 퇴적암에 배태되고 있다. 특별히 Caracota-Carma-Candelaria 벨트의 많은 광상들은 10~20%의 안티모니를 함유한다. 이들중 대부분은 안티모니를 위해 채광되었다. 이들 광상들은 전형적으로 비교적 균질한 광물조성을 보이며 두개의 주요 광화시기가 나타난다. 초기 광화작용에는, 우유빛 석영내

금, 황철석, 유비철석 및 텅스텐을 함유하고 있는 광물을 포함한다. 후기 광화작용에는 미립 청회색 석영내 연-아연-동 및 안티모니 함유 황화물을 포함한다(Lehrberger, 1992; Dill, 1998; Arce-Burgoa, 1999, 2002). 논쟁이 되고 있는 약 314Ma(K-Ar)와 59Ma(Ar-Ar)의 광화연령은 San Bernardino 광상의 특징이다(Arce-Burgoa, 2007). 더욱 오래된 연대가 페루 및 아르헨티나의 인접한 동부 코르딜레라에서 조산성 금형성의 시기에 근거해서 더욱 현실적으로 보인다(Haeberlin et al., 2002).

이들 광상들중 Amayapampa 광산은 금매장량이 16톤이고 Amayapampa 지역 전체는 80톤의 금이 매장되어 있는 것으로 추정되지만 대부분은 식민지시대 전부터 현재까지 소규모로 가행되어 왔다. 다른 중요한 금자원으로는 El Molino(15.5톤 금), Oruro 지역의 Iroco(Kori Chaca, 32톤의 금이 볼리비아의 가장 최근의 노천광에서 회수되었다), Carma(24톤 금), 및 San Bernardino(73톤 금)광산이 있다. 게다가, 이들 광상들은 Subandean 지대와 Chaco-Beni 평원의 수많은 사광상에서 금의 주요원천이었다(Arce-Burgoa, 2007). 대부분의 금광상들은 평균 1-3g/t의 품위를 나타내며, 조산성 금맥에 비해서 약간 낮은 편이다.

동부 코르딜레라의 연-아연 벨트

금과 안티모니 함량이 높고 마그마 중심부와는 명백한 관계가 없는 일련의 퇴적암에 배태된 은-연-아연 맥들은 볼리비아의 최남단 동부 코르딜레라 중앙부의 연장을 따라 위치하고 있다(그림 1 및 2). 중요한 지역으로는 Huara Huara, San Lucas, Toropalca, Cornaca, Tupiza 및 Mojo가 있다. 광상들은 10% 아연, 5-7% 연 및 70-80g/t의 은을 함유한 40-45 Mt의

다금속자원을 보유하고 있다(Arce-Burgoa, 2009). 이들 Coeur d Alene-유형 맥들은 주로 오르도비스기 세일 및 실트암의 습곡축 및 단층을 따라 산출하고 있다. 이들의 연대는 불확실하다. 이들은 본질적으로 조산성 금형성과 같은 시기인 남부 볼리비아의 320-290Ma 변형사건의 주요 시기동안 형성되었을 것으로 사료된다(Jacobs-hagen et al., 2002). 또한, 이들은 비록 광상과 관입체간의 공간적 연관성이 부족하지만 후기 제3기 마그마작용동안 형성되었을 가능성도 있다. 일부 SEDEX 광화작용은 경제적이다. 예를 들면 아르헨티나의 국경을 가로지르는 Aguilar 광상을 들 수 있다(Gemmell et al., 1992).

알티플라노 및 서부 코르딜레라의 증발형 광상

남서 볼리비아의 알티플라노 및 서부 코르딜레라의 수십개 염호들은 다량의 B, K, Li, Mg, 및 다른 증발성 광물을 함유한다. 폐쇄된 분지에서 증발작용은 잔류 염수에 이들 원소들을 농집시키고 염류를 침전시켰다. 리튬-이온 자동차 배터리의 미래사용과 관련한 최근의 전지구적 관심이 주어져서, 볼리비아의 리튬 자원은 많은 관심을 끌고 있다. Salar de Uyuni의 염수는 8.9Mt 리튬을 함유하는 것으로 평가되고 있으며, 194Mt 칼륨, 7.7Mt 붕소, 211Mt 마그네슘 뿐만 아니라 세계에서 리튬으로는 가장 큰 자원량을 보유하고 있다(Arce-Burgoa, 2009). 염호의 표면적은 대략 10,000km²이고, 현재 호수 표면 아래의 평균 121m 심도의 고대 염호층을 형성한 증발작용은 3,520년전에 완결되었다. 소금지각표면 아래 5-20cm에 위치한 현재의 염수는 80-1150ppm의 리튬 농도를 지니고 있다(Garrett, 2004). 그러나, 이들 염수

의 비교적 높은 Mg/Li 비율은 리튬 회수를 방해할 수 있다.

결 론

동부 볼리비아의 선캠브리아기 지층은 중기 원생대 내지 고생대 초기의 귀금속-(조산성 금, IOCG) 및 천금속-(VMS, MVT, SEDEX, 퇴적기원 철-망간)을 함유하는 광상의 발견을 통해서 큰 잠재력을 지니고 있다. Chaco-Beni 평원은 세계에서 가장 큰 충적성 금을 함유하고 있으며, 근원은 볼리비아 최북단의 동부 코르딜레라의 고지대에 있는 것으로 사료된다. 중앙 안데스의 광물 산출의 풍부함 및 광상성인의 다양함은 안데스의 이 지역에서 복잡한 지체구조 체계를 반영하고 있다. 이 지역의 특징은 조산대의 연장을 따라서 대부분의 지각수축이 있다는 것이다(McQuarrie et al., 2005).

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 “해외 광물자원 협력 및 기술정보 구축 (09-1121)”과제에서 지원되었습니다.

참고문헌

- Ahlfeld, F., and Schneider-Scherbino, A. (1964) Los yacimientos minerales y de hidrocarburos de Bolivia. Departamento Nacional de Geologia (DENAGEO), Bolet. 5 (especial), 388p.
- Annels, R.N., Fletcher, C.J.N., Burton, C.C.J., and Evans, R.B. (1986) The Rincon del Tigre igneous complex: A major layered ultramafic-mafic intrusion of Proterozoic age in the Precambrian shield of eastern Bolivia. I, Geology and mineral potential: Overseas Geology and Mineral Resources, 1-24.
- Arce-Burgoa, O. (1990) Fundamental study on processing of ore from the Huanuni mine, Bolivia: Unpublished Ph.D.thesis, Sendai, Japan, Tohoku University, 168p.
- Arce-Burgoa, O. (1999) Sediment-hosted gold mineralization at Pederson (San Bernardino) project, Bolivia: Bolivia Mining Conference, Santa Cruz, Bolivia, 10p.
- Arce-Burgoa, O. (2002) Potencial geologico-minero de Bolivia: Memorias del XV Congreso Geologico Boliviano, Santa Cruz, Bolivia, October 2002, Revista Tecnica de YPF, 20, 18-24.
- Arce-Burgoa, O. (2007) Guia a los yacimientos metaliferos de Bolivia: La Paz, Bolivia, SPC Impresores, Minera San Cristobal and Empresa Minera Unificada S.A. (EMUSA), 298p.
- Arce-Burgoa, O. (2009) Metalliferous ore deposits of Bolivia: 2nd edition, La Paz, Bolivia, SPC Impresores, S.A., 233p.
- Bennet, M.J. and Zerain, M. (1985) The La Bella pegmatite field: Santa Cruz, Bolivia, Informe No. 22. Proyecto Precambrico(IGS-GEOBOL), Unpublished report, 92p.
- Bernstein, M. (1989) Expectations for bulk tonnage hard rock and alluvial ores [Cerro Rico]: United Nations Development

- Program, Project BOL/87/012, La Paz, Bolivia, Unpublished report, 18p.
- Capriles, O. (1977) Historia de la mineria Boliviana: Banco Minero de Bolivia, La Paz, 256p.
- Cunningham, C.G., McNamee, J., Pinto Vasquez, J., and Ericksen, G.E. (1991) A model of volcanic dome-hosted precious metal deposits: Economic Geology, 86, 415-421.
- Dill, H.G. (1998) Evolution of Sb mineralization in modern fold belts: a comparison of the Sb mineralization in the Central Andes (Bolivia) and the Western Carpathians(Slovakia): Mineralium Deposita, 33, 359 -378.
- Fletcher, C.J.N., Appleton, J.D., Webb, B.C. and Basham, I.R. (1981) Mineralization in the Cerro Monomo carbonatite complex, eastern Bolivia: Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 90, B37-50.
- Fletcher, C.J.N. and Litherland, M. (1981) The geology and tectonic setting of the Velasco Alkaline Province, eastern Bolivia: Journal of the Geological Society of London, 138, 541-548.
- Garrett, D.E. (2004) Handbook of lithium and natural calcium chloride: San Diego, Academic Press, 476p.
- Gemmell, J.B., Zantop, H., and Meinert, L.D. (1992) Genesis of the Aguilar zinc-lead-silver deposit, Argentina: Contact metasomatic vs. sedimentary exhalative: Economic Geology, 87, 2085-2112.
- Grant, J.N., Halls, Avila, W. and Snelling, N.J. (1979) K-Ar ages of igneous rocks and mineralization in part of the Bolivian tin belt: Economic Geology, 74, 838-851.
- Haeberlin, Y., Moritz, R., and Fontbote, L. (2002) Paleozoic orogenic gold deposits in the eastern Central Andes and its foreland, south America: Ore Geology Reviews, 22, 41-59.
- Heuschmidt, B. and Miranda, R. (1995) Precious-metals districts and resources of Bolivia: La Paz, Bolivia, Bolinvest, Publication Especial, 162p.
- Horton, B.K. and Decelles, P.G. (1997) The modern foreland basin system adjacent to the Central Andes: Geology, 25, 895-898.
- Horton, B.K., Hampton, B.A., LaReon, B.N., and Baldellon, E. (2002) Tertiary provenance history of the northern and central Altiplano (Central Andes, Bolivia)-A detrital record of plateau-margin tectonics: Journal of Sedimentary Research, 72, 711-726.
- Jacobshagen, V., Muller, J., Wemmer, K., Ahrendt, H., and Manutsoglu, E. (2002) Hercynian deformation and metamorphism in the Cordillera Oriental of southern Bolivia, central andes: Tectonophysics, 345, 119-130.
- Lehrberger, G. (1992) Metallogenese von Antimonti-Gold Lagerstätten in marinen Sedimenten der Ostkordillere Boliviens: Muncher Geologische Hefte, 6, 204p.
- Litherland, M., Annels, R.N., Appleton, J.D., Berrange, J.P., Bloomfield, K., Burton, C.C.J., Darbyshire, D.P.F., Fletcher, C.J.N., Hawkins, M.P., Klinck, B.A., Llanos, A., Mitchell, W.I., O'Connor,

- E.A., Pitfield, P.E.J., Power, G., and Webb, B.C. (1986) The geology and mineral resources of the Bolivian Precambrian shield: Overseas Memoirs British Geological Survey, No. 9, 153p.
- Litherland, M., Annels, R.N., Darbyshire, D.P.F., Fletcher, C.J.N., Haekins, M.P., Klinck, B.A., Mitchell, W.I., O' Connor, E.A., Pitfield, P.E.J., Power, G., and Webb, B.C. (1989) The Proterozoic of eastern Bolivia and its relationship to the Andean mobile belt: Precambrian research, 43, 157-174.
- McQuarrie, N., Horton, B.K., Zandt, G., Beck, S., and Decelles, P.G. (2005) Lithospheric evolution of the Andean fold-thrust belt, Bolivia, and the origin of the central Andean plateau: Tectonophysics, 399, 15-37.
- Mesa, J., de Mesa, T.G., y Mesa, C. (1997) Historia de Bolivia: Editorial Gisbert, 779p.
- Phillipson, S.E. and Romberger, S.B. (2004) Volcanic stratigraphy, structural controls, and mineralization in the San Cristobal Ag-Zn-Pb deposit, southern Bolivia: Journal of south American Earth Sciences, 16, 667-683.
- Prendergast, M.D. (2000) Layering and precious metals mineralization in the Rincon del Tgre Complex, Eastern Bolivia: Economic Geology, 95, 113-130.
- Redwood, S. (1993) The metallogeny of the Bolivian Andes: Vancouver, British Columbia, Mineral Deposit Research Unit, Short course no. 15, 59p.
- Rice, C.M., Steele, G.B., Barfod, D.N., Boyce, A.J., and Pringle, M.S. (2005) Duration of magmatic, hydrothermal, and supergene activity at Cerro Rico de Potosi, Bolivia: Economic Geology, 100, 1647-1656.
- Santos, J.O.S., Rizzotto, G.J., Potter, P.E., McNaughton, N.J., Matos, R.S., Hartmann, I.A., Chemale Jr., F., and Quadro, M.E.S. (2008) Age and autochthonous evolution of the Sunsas orogen in West Amazon craton based on mapping and U-Pb geochronology: Precambrian Research, 165, 120-152.
- SERGEOMIN-YFPB(Servicio Nacional de Geologia y Minería and Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos) (2000) Compendio de Geología de Bolivia: Revista Técnica de YFPB, 18, 212p.
- Sillitoe, R.H., Halls, C., and Grant, J.N. (1975) Porphyry tin deposits in Bolivia: Economic Geology, 70, 913-927.
- Turneaure, F.S. (1971) The Bolivian tin-silver province: Economic Geology, 66, 215-225.
- USGS and GEOBOL (U.S. Geological Survey and Servicio Geológico de Bolivia) (1992) Geology and Mineral Resources of the Altiplano and Cordillera Occidental, Bolivia: USGS Bulletin 1975, 365p.