

칼린형 금광상 탐사와 국내 적용성 연구

박맹언¹⁾ · 성규열²⁾ · 백승관¹⁾ · 김필근¹⁾ · 강홍석³⁾ · 문영환³⁾

1. 서론

국내 광업은 1990년대 이후 매장량의 고갈과 새로운 광상 모델에 의한 탐사 활동의 소극성 등으로 인하여 경쟁력을 상실하였으며, 거의 모든 광산이 폐광 또는 휴광되었다. 특히, 새로운 유형의 광상 탐사에 의한 매장량을 확보하지 못하여 신규 광산개발은 거의 전무한 상태이다. 광업에 대한 인식 부족으로 인해 새로운 투자가 이루어지지 않고 있으며, 기간산업에 필요한 대부분의 금속자원을 외국에 의존하고 있는 실정이다. 최근 중국의 경제 성장으로 인한 원자재의 수요급증이 겹쳐 심각한 수급의 어려움을 겪고 있다.

James and Park(2000)과 James et al.(2001)에 의해 국내 태백산 분지의 지질조건이 네바다 지역과 유사한 점이 확인하고, 칼린형 금광상의 잠재력을 보고한 바 있으며, 이 후 활발한 연구가 진행 중이다(박맹언 등, 2002, 2004). 체계적인 칼린형 금광상의 탐사를 위해서는 조구조적 환경, 퇴적환경 및 퇴적상에 대한 이해, 모암의 특징과 열수변질 작용, 광물공생관계 및 특정 원소들의 분산 특성에 대한 연구가 선행되어야 하며, 광화작용과 관련된 국부적인 구조운동, 화성암의 분포 특성, 금의 침전환경과 화성암과의 관련성에 대한 연구가 수행되어야 한다. 이 연구에서는 태백산 분지 함백향사 서북측의 예미지역을 대상으로 칼린형 금광화작용에 대한 국내 적용성을 검토하였다.

칼린형 금광상의 지질 및 지구화학적 특성이 가장 잘 연구되어 있는 네바다주 칼린형 금광상 모델에 대한 탐사기술을 도입하여, 이를 바탕으로 국내에 적용할 수 있는 저비용의 한국형 탐사기술 개발에 필요한 자료를 구축하고, 칼린형 금광화작용의 존재 가능성을 평가하는 것을 목적으로 하는 초기단계의 결과이다. 연구 결과는 한반도에서의 칼린형 금광상의 잠재력 파악과 금광상 탐사에 적용할 수 있을 것으로 기대되며, 정밀조사 지역 선정에 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 지질환경

태백산 분지는 옥천 습곡대의 북서부에 위치하며, 선캠브리아기 변성퇴적암류와 이를 관입한 전기 및 후기 원생대 화강암, 그리고 캠브리아기의 탄산염암과 쇄설성 퇴적암으로 구성되어 있으며, 지질구조는 동서방향의 스러스트 단층과 남-북방향의 단층계 및 습곡구조로 구분되는 수 개의 구조구로 구분된다(김정환, 1990). 북동-남서방향의 스러스트 단층과 함백 스러스트 단층 및 이로부터 분기된 스러스트 단층에 의해 퇴적층들이 반복적으로 분포한다. 예미지역은 수 조의 스러스트 단층이 배사와 향사 습곡에 의해 지층이 반복되어 나타나는 일종의 복구조를 보인다. 대부분의 단층들과 스러스트들은 남-북방향과 북동동-남서서방향으로 중첩되어 발달하고 있으며, 단층대 주변에는 단층 점토나 파쇄암이 발달된다. 또한, 단층대를 따라서 강한 열수변질대가 형성되기도 한다.

주요어: 칼린형 금광상, 열수변질대, 원소부화도, 탄소와 산소 동위원소, 예미지역

¹⁾부경대학교 환경지질학과(mepark@pknu.ac.kr)

²⁾고려대학교 지구환경과학과(geochemsky@paran.com)

³⁾대한광업진흥공사

연구지역의 지질은 조선누층군에 속하는 막골층, 직운산층, 두위봉층 및 예미각력암대와 평안누층군 홍점층에 속하는 암층 및 소규모 중생대 백악기 규장반암의 관입암체로 구성되어 있다(Fig. 1). 예미지역은 스러스트 단층을 비롯한 수직단층 및 습곡으로 구성된 뚜렷한 구조적 규제를 받았으며, 높은 각도의 단층과 투수성이 큰 암층(예미각력암 및 호층의 석회질 이암층)과 결합되므로, 단층규제에 의한 수평층의 광역 열수변질대가 형성될 가능성이 높다. 태백산 지역의 지질환경과 광화작용 양상은 단층이나 습곡 등과 같은 선구조에 의해 다양한 금속 광상의 형성이 시·공간적으로 중복되어 산출된다는 점에서 미국 네바다 지역의 칼린형 금광상과 매우 유사하다.

예미지역은 태백산 분지 내에 북동-남서 방향으로 신장되어 분포하는 고자력대의 경계부에 위치하며, 신예미 광산과 거도 광산 일대는 비교적 높은 자력 이상대를 형성하고 있다. 연구지역의 북동부에 위치하는 낙동, 일동, 백전 광산 일대에서도 상대적으로 높은 이상대가 분포하며, 이는 화성암체의 분포지역과 비교적 잘 일치한다. 예미도폭 항공자력도(한국동력자원연구소, 1988)를 재처리한 결과, 연구지역의 동부 지역이 서부 지역에 비해 높은 자력 이상대를 형성하고 있으며, 항공중력도(한국동력자원연구소, 1988)에서 다수의 중력 이상대가 관찰된다. 동부 지역의 낮은 중력 이상대는 낮은 자력 이상대와 잘 일치하며, 남부 지역의 높은 중력 이상대 역시 신예미 광산의 높은 자력 이상대와 잘 일치한다.

3. 지구화학 및 동위원소 특성

연구지역에서 채취된 시료들에 대한 주성분 원소 분석 결과는 일부 시료를 제외하면 대부분의 시료들이 수 십 %의 높은 LOI 값(최대 44.16%)을 보인다. 대부분의 시료에서 높은 함량은 보이는 것은 CaO로서, 5%이하의 낮은 함량을 보이는 일부 시료를 제외하면 12.23-52.42%의 함량 범위를 보인다. 5%이하의 낮은 함량(0.28-2.57%)을 갖는 시료들은 SiO₂의 함량이 50%이상으로서 규질 쇄설성 암석의 특징을 나타낸다. CaO 함량이 낮은 시료들은 상대적으로 MgO의 함량이 높으며, 돌로마이트화 변질작용을 받았음을 시사한다.

연구지역에 대한 분석 결과, 모든 시료들이 금의 검출한계(0.05ppm) 이하로 분석되어, 금과 칼린형 금광상의 전형적인 지시원소들과의 지구화학적 상관관계를 확인할 수 없지만, 금과 지구화학적 거동이 동일한 은의 함량은 0.29~161.31ppm 범위를 보인다.

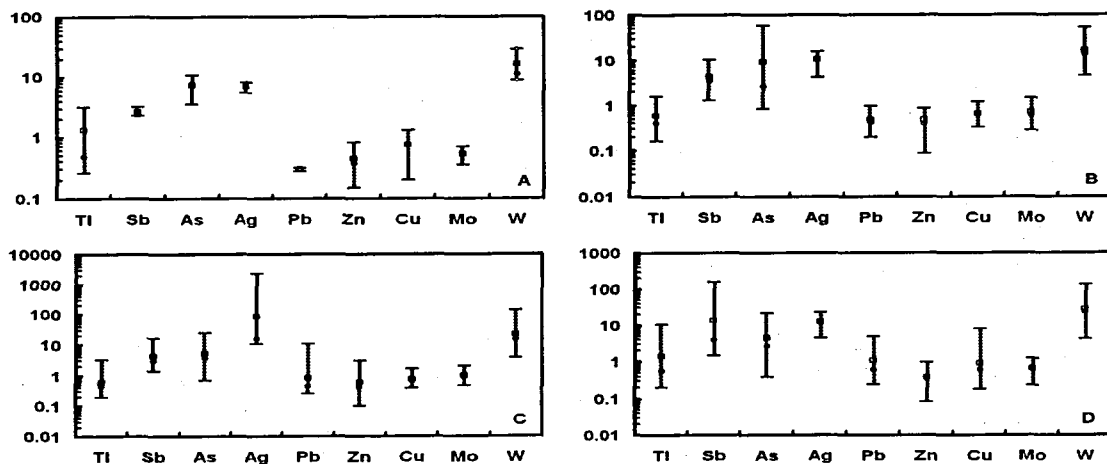


Fig. 1. Enrichment factors of limestone from the Yemi area. (A) Duwibon Formation; (B) Jeongseon Formation; (C) Makgol Formation; (D) Yemi Breccia. Open square: mean value; open circle: median value.

칼린형 금광상의 지시원소 및 천금속류에 대한 원소부화도는 광석의 원소 함량을 지각의 평균 원소 함량으로 나눈 값으로 표현된다. 칼린형 광상에 수반되는 전형적인 원소들은 왼쪽에 배열되어 있고, 은과 기타 천금속들은 오른쪽에 배열되어 있다. 연구지역에서 산출되는 반송층, 염기성 암맥 및 고성 석회암은 비소 함량이 매우 낮으며, 예미 각력암을 비롯한 막골층과 일부 정선층의 석회암들의 비소 함량은 일부 시료에서 높은 값을 나타낸다(Fig. 1) 또한, 이들 지역에서 칼린형 금광상의 지시원소인 안티몬과 텅스텐이 지각의 평균 함량에 비해 상당히 부화되어 있는 특징을 보여준다.

방해석과 백운석이 우세한 탄산염암의 동위원소 자료는 유체의 기원과 물-암석 상호반응에 대한 유용한 정보를 제공한다. 칼린형 금광상에서 변질되지 않은 탄산염암의 $\delta^{18}\text{O}$ 와 $\delta^{13}\text{C}$ 는 각각 $+18\sim+24\%$ 와 $-2\sim+1\%$ 의 범위를 갖는다(Arehart, 1996).

연구지역의 탄산염암의 탄소 및 산소에 대한 동위원소 분석 결과, 반송층은 한 개의 시료만이 분석되어 대표성을 가질 수 없지만, 분석결과는 $\delta^{13}\text{C}=-1.57\%$ 이고 $\delta^{18}\text{O}=20.25\%$ 이다. 고성층 석회암의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 $-3.84\sim-1.96\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 는 $21.73\sim22.33\%$, 정선층 석회암의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 $-3.04\sim-1.08\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 는 $14.81\sim22.20\%$, 막골층의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 $-5.52\sim-1.09\%$ 를, $\delta^{18}\text{O}$ 는 $15.13\sim21.87\%$, 예미 각력암의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 $-3.92\sim-1.15\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 는 $12.37\sim22.64\%$ 의 범위를 보인다(Fig. 2).

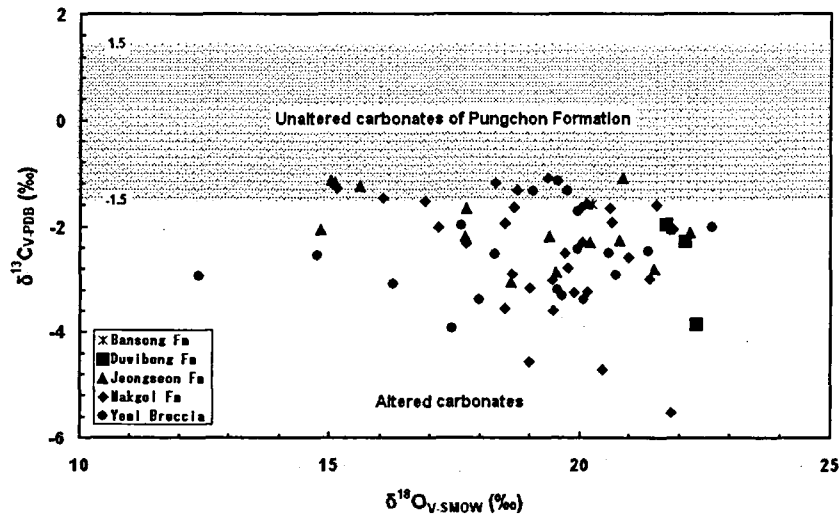


Fig.2. Variation diagram for stable isotope oxygen vs. carbon of limestone according to the rock formation from the Yemi area.

4. 토의 및 결론

항공 자력탐사는 다른 지구물리 탐사에 비해 분지의 구조적 특성을 파악하고, 상대적으로 얇은 곳에 위치하는 기반암과 관입암체의 정치자세에 대한 유용한 정보를 제공한다. 예미 도폭의 동부 지역에는 낮은 자력 이상대가 형성되어 있으며, 남부 지역의 높은 자력 이상대는 신예미 광산의 위치와 비교적 잘 일치하고 있다. 퇴적암의 유형에 따른 자력 이상은 구분되지 않으며, 자력선의 구조는 이 지역에 발달된 스러스트 단층 및 습곡축과 같은 구조적 약선대의 방향과 잘 일치한다. 이는 이들 구조적 약선대가 화성활동 내지는 열수작용의 통로 역할을 했을 가능성을 시사하고 있다. 중력 이상대의 분포는 대체적으로 북동-남서 방향으로 연장되어 있으며, 이는 단층, 스러스트 단층, 또는 퇴적암의 분포 양상을 반영한 결

과로 여겨진다.

전형적인 칼린형 금광상의 원소 부화도는 비소가 상당히 부화되어 있고, 은의 함량은 다른 금광상에 비해 상대적으로 낮은 특징을 보여준다. 연구지역에서 산출되는 반송층, 염기성 암맥 및 고성 석회암에 대한 원소 부화도는 비소의 함량이 너무 낮아 칼린형 금 광화작용이 수반되었을 가능성은 매우 희박하다. 예미 각력암, 막골층과 정선층의 일부 석회암은 높은 비소 함량을 보이며, 원소의 분포 패턴이 네바다 지역과 매우 유사하다. 이러한 지구화학적 유사성은 이들 광상이 비슷한 화학조성을 가진 유체로부터 형성되었음을 지시해 준다.

연구지역의 석회암들은 유사 칼린형(Carlin-like) 금광상인 백전광산의 모암인 풍촌층 석회암보다 탄소 동위원소는 대체적으로 낮은 값을 보여주며, 산소 동위원소는 유사하거나 다소 높은 값을 보여준다. 일반적으로 칼린형 금광상의 산소 동위원소 값들도 상당히 넓은 범위를 가진다. 연구지역의 낮은 탄소 동위원소 값은 열수의 영향을 반영한 값이며, 높은 산소 동위원소 값은 심부로 순환하면서 형성된 지하수 또는 열수와 산소 동위원소 교환반응이 있었음을 지시한다.

일반적으로 칼린형 금광상의 금은 비소와 뚜렷한 정의 상관관계를 가지므로(Talusani, 2001), 동위원소와 비소의 상관관계를 파악함으로써 광화작용의 가능성을 간접적으로 확인할 수 있다. 연구지역에서 산출되는 탄산염암의 탄소 및 수소 동위원소와 비소와의 상관관계를 Fig. 3에 도시하였다. 탄소는 비소와 뚜렷한 상관관계를 보이지 않고 수평적으로 넓게 분포하는 양상을 보여주는 반면, 산소는 비소와 정(+)의 상관관계를 보이고 있다. 네바다 지역의 칼린형 금광상에 대한 산소와 탄소는 뚜렷한 정(+)의 상관관계를 보이고, 금은 산소 동위원소와 뚜렷하진 않지만 약한 정(+)의 상관관계를 보여 준다(Stenger et al., 1998). 따라서, 탄소 및 산소 동위원소와 금을 비롯한 칼린형 금광상의 주요 지시원소(비소와 안티몬 등)와의 상관관계를 파악하는 것은 칼린형 금광화작용의 가능성을 평가하는데 유용한 탐사 수단으로 활용될 수 있다.

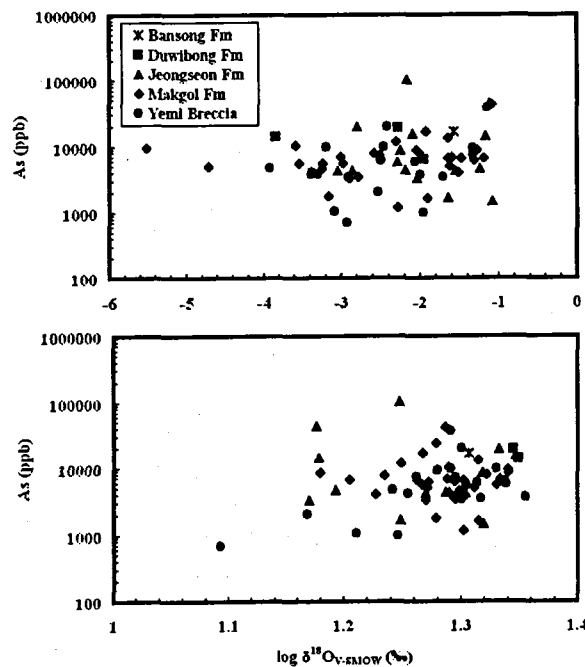


Fig. 3. Variation diagram for carbon and oxygen isotope vs. As of limestone from the Yemi area.

예미지역은 스러스트 단층과 수 개조의 SE-NW 방향의 습곡구조와 이에 직교하는 습곡축이 결합되어 있어 대규모 열수의 이동과 결집이 가능한 곳으로 생각된다. 광화대는 육안 및 현미경 관찰에서 확인이 용이하지 않고, 정밀한 금의 분석(ppb 단위)에 의해 칼린형 금광화작용의 잠재력 확인이 가능하기 때문에 암석 노두보다는 토양을 대상으로 하는 지구화학 탐사를 실시, 정밀 조사지역을 선정하는 것이 필요하다. 정밀탐사에 의해 칼린형 금광화작용과 수반되는 지구화학적 이상대의 구분과 금의 확인이 필요하며 이를 근거로 종합적인 정밀조사가 요구된다.

5. 참고문헌

- 김정환 (1990) 태백산 광화대 일대의 지질구조의 특성, 태백산 광화대 연구 제 4 세부과제, 한국과학재단, pp. 420-532.
- 박맹언, 성규열, 문영환 (2002) 칼린형 금 광상 탐사 기술. 대한광업진흥공사, 135p.
- 박맹언, 성규열, 백승균, 김필근, 박호섭, 엄결, 김의준, 문영환, 손승학, 강홍석 (2004) 2004 벤처탐사 학술연구 용역보고서(금, 예미지구). 대한광업진흥공사, 67p.
- 한국동력자원연구소 (1988) 1:50,000 항공방사능 및 자력도. 한국동력자원연구소.
- Arehart, G.B. (1996) Characteristics and origin of sediment-hosted disseminated gold deposits: a review. *Ore Geol. Rev.*, v. 11, pp. 383-403.
- James, L.P. and Park, M.E. (2000) Distal skarn and disseminated gold deposits associated with base metal and magnetic skarn: Potential in Korea based on southeast Aisan and America. *Proceeding of 2003 Annual Meeting, The Geological Society of Korea*, p. 74.
- James, L.P., Park, M.E. and Shin, H.C. (2001) Sediment-Hosted-Disseminated and Skarn Gold Mineralization in the Taebaegsan Region, South Korea: Occurrence and Environment of Formation, *International Symposium on Gold and Hydrothermal System, 2001, Fukuoka, Japan* p. 145.
- Stenger, D.P., Kesler, S.E. and Vennemann, T. (1998) Carbon and oxygen isotope zoning around Carlin-type gold deposits: a reconnaissance survey at Twin Creeks, Nevada. *J. Geochemical Exploration*, v. 63, pp. 105-121.
- Talusani, R.V.R. (2001) Possible Carlin-type disseminated gold mineralization in the Mahakoshal fold belt, central India. *Ore Geology Review*, v. 17, pp. 241-247.