

칼린형 금광상 탐사와 국내 적용성 연구

박맹언¹ · 성규열^{2*} · 백승균¹ · 김필근¹ · 강흥석³ · 문영환³

¹부경대학교 환경지질학과, ²고려대학교 지구환경과학과, ³대한광업진흥공사

Exploration for the Carlin-type Gold Deposits and Its Potential to Korea

Maeng-Eon Park¹, Kyu-Youl Sung^{2*}, Seung-Gyun Baek¹, Pil-Geun Kim¹, Young-Hwan Moon³ and Heung-Suk Kang³

¹Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

²Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-701, Korea

³Korea Resources Corporation, Seoul 156-706, Korea

Abstract Based on the characteristics of Carlin-type gold deposit in Nevada district, a potential in Korea is evaluated to the Yemi area where is structurally controlled by folds and trust fault. The fault of high angles are combined with a more permeable rocks such as the Yemi breccia and laminated silty limestone. The pattern of enrichment factors for Tl, Sb, As, Ag, Pb, Zn, Cu, Mo and W of limestones in the southern area are geochemically similar with those reported from the Carlin-type gold deposit. Moreover, the oxygen and carbon isotopes show a hydrothermal alteration is widely developed in this area. According to the result of geophysical interpretation, stable isotope, alteration mineralogy, geochemical study, and geological structure, this mineralized zone may be extended to the NE direction, so a detailed systematic exploration is required to identify this alteration zone.

Key words : Carlin-type gold deposit, alteration zone, enrichment factor, carbon and oxygen isotope, Yemi area

미국 네바다주의 칼린형 금광상을 모델로 강원도 예미지역에 대한 칼린형 금광상의 잠재력을 평가하였다. 연구지역에 분포하는 고생대 퇴적암은 스트러스트 단층 및 습곡으로 구성된 뚜렷한 구조적 규제를 받았으며, 고각의 단층과 투수성이 큰 예미각력암 및 호층의 석회질 이암층이 결합되어 있다. 남부 지역에 분포하는 석회암에 대한 탈륨, 안티몬, 비소, 은, 납, 아연, 구리, 몰리브덴 및 텅스텐에 대한 원소부화도의 분포 양상은 칼린형 금광상과 지구화학적 유사성을 나타낸다. 또한, 탄소와 산소동위원소 값은 이들 지역이 광역적으로 열수의 영향을 받았음을 지시한다. 연구지역에 대한 지질구조, 화학분석, 변질광물 감정 및 안정 동위원소 분석 및 지구물리학적 해석 결과, 광화대는 북동부 방향으로 연장될 가능성이 높으며 이를 확인하기 위해서 앞으로 체계적인 정밀탐사가 필요하다.

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

1. 서 론

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.

현재 국내 광산에서 극히 소량의 금이 제한적으로 생산되고 있으나, 거의 전량을 수입에 의존하고 있다. 통계상 우리나라는 2003년 한 해동안 약 415톤의 금을 수입하였으며, 금액으로는 25억 4,800만 달러가 소

*Corresponding author: geochemsky@paran.com

요된 것으로 보고되어 있으나(대한광업진흥공사, 2004), 실제로는 더 많은 양의 금이 국내에 반입되었을 것으로 추정된다. 현재 금은 전자 및 통신산업 등에 200여 톤이 소모되며, 금의 생산이 전무한 현실을 고려할 때, 안정적인 수급을 위해서 해외 투자와 함께 국내 자원의 탐사와 개발을 통하여 대외 경쟁력을 확보하는 것이 중요하다.

최근 금광상의 탐사와 개발은 고품위 천연수형 금광상과 대규모의 스킨 및 칼린형 금광상(Carlin-type gold deposits)을 대상으로 활발히 진행되고 있다. 그 중 칼린형 금광상은 석회암내에 극미립의 금(μm 크기)이 산점상으로 산출되는 새로운 유형의 금광상으로서, 광상분류상 퇴적암 내의 산점상 금 광상(sediment-hosted disseminated gold deposit; SHDG)의 영역으로 분류되기도 한다. 금은 일반적으로 함비소 황철석(arsenian pyrite)에 수반되어 산출되는 것이 특징적이며, 모암은 주로 실트질 탄산염암이지만, 관입암체뿐만 아니라 규질 또는 규질화된 암석에서도 광화작용이 수반된다. 광화작용에 수반되는 변질작용은 탈탄산염화작용(decarbonatization), 규화작용(silicification; 벽옥광물 형성)과 고령토화작용(argillization) 등이며, 일반적으로 현저한 구조(단층)와 층서(조성/투수성)적 규제를 보여 준다.

1962년부터 1965년까지 미국 네바다주의 칼린광산에서 대규모의 저품위 금광상이 발견되어 개발되기 전까지는(Hausen and Kerr, 1968), 새로운 금광상의 유형으로 인식되지 않았다. 미국에서는 주로 네바다주에 밀집되어 분포하며(Arehart 1996; Hofstra *et al.*, 1999; Hofstra and Cline, 2000), 5,000톤 이상의 금이 매장되어 있는 것으로 추정되고 있는 경제적으로 가장 중요한 유형의 금광상이다(Hofstra and Cline, 2000). 지구화학적 연구와 시추 탐사에 의해 칼린형 금광상에 대한 상세한 지질환경 특성이 밝혀짐에 따라, 유레카-배틀 마운틴 트렌드(Eureka-Battle Mountain Trend)와 제리트 캐년 트렌드(Jerritt Canyon Trend) 등에서 새로운 광산이 추가로 발견되었으며, 노천 채광이나 지하 채광에 의해 개발되고 있다(Bettles, 2002).

석회암, 실트암, 이암 및 셰일 등의 퇴적암 내 극미립의 산점상으로 산출되는 칼린형 금광상의 금은 특징적으로 함비소 황철석에 수반된다. 금의 입자가 너무 작고 금의 분포 지역이 광범위하여 사광상(placer deposit)으로부터 광화대의 근원지를 추적하는 전통적인 금광 탐사 방법은 칼린형 금광상 탐사법으로는 적합하지 않다. 네바다지역과 중국에서는 새로운 광상을

발견하기 위해 광역적인 하상퇴적물과 광구/광체 규모(district- and orebody scale)의 토양과 암석을 대상으로 지구화학탐사가 수행되었다.

중국에서도 칼린형 금광산인 쓰시아(Shixia)광산이 처음 발견된 이후, 1980년대 중반부터 미국지질조사소(USGS)와의 대규모 공동탐사에 의해 100여 개의 칼린형 금광상이 추가로 확인되었다(Li and Peters, 1998). 중국에서 발견된 칼린형 금광상의 지질, 지구화학 및 광화작용의 특성은 미국 네바다 지역과 매우 유사하며(Hu *et al.*, 2002), 그 중 20여 개의 광상은 높은 품위와 대규모 매장량을 갖는 것으로 확인되었다.

미국 네바다주를 모델로 한 칼린형 금광상에 대한 경제적인 가치와 학문적인 중요성이 높아지면서, 지질조건이 유사한 지역을 대상으로 새로운 탐사와 개발이 활발히 진행되고 있다. 외국에서는 칼린형 금광상이 가장 중요한 금자원임에도 불구하고 국내에서는 아직 칼린형 금광상에 대한 실질적인 이해와 연구가 부족하며, 연구나 탐사가 극히 초기단계에 머물고 있는 실정이다(이찬희와 박희인, 1993, 1996; 이찬희와 이인성, 1997; James and Park, 2000; James *et al.*, 2001).

지질학적인 관점과 산업적인 측면에서 국내 칼린형 금 광화작용의 잠재력에 대한 체계적인 연구의 필요성이 높아지고 있다. 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 함백항사 서북측의 예미지역을 대상으로 칼린형 금 광화작용에 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, 선

캠브리아기 변성퇴적암류와 이를 관입한 전기 및 후기 원생대 화강암, 그리고 캠브리아기의 탄산염암과 쇠철성 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. 각 지층들은 시기를 달리하는 지질구조의 규제를 받으며, 예미지역을 중심으로, 북동-남서방향을 기준으로 하여 동쪽은 동서방향의 향사 및 배사 구조를 이루고 있고, 북쪽은 완만한 습곡구조를 형성하고 있다(김정환과 최원학, 1990). 북동-남서방향 단층계의 서쪽은 습곡구조가 발달되어 있지 않으며, 북동방향의 주향과 북서방향의 경사를 가지는 완만한 지층들로 구성되어 있다. 한편, 조선누층군의 최하부인 규암층과 기반암류의 부정합면을 따라 고생대 초기 한반도에서 발생한 조구조 활동에 의해 형성된 암쇄대가 분포하며(김정환, 1990), 퇴적층 내에는 층간 각력대가 분포하고 있다.

예미지역은 수 조의 스러스트 단층이 배사와 향사 습곡에 의해 지층이 반복되어 나타나는 일종의 복외구조를 보인다(Fig. 1). 대부분의 단층들과 스러스트들은

남-북방향과 북동동-남서서방향으로 중첩되어 발달하고 있으며, 단층대 주변에는 단층 점토나 파쇄암이 발달된다. 또한, 단층대를 따라서 강한 열수변질대가 형성되기도 한다.

태백산 지역 내에 분포하는 광상에 대한 광화시기 연구는 일부 광산을 제외하고는 광화시기가 구체적으로 연구되어 있지 않은 실정이다. 태백산 지역의 주된 화성활동은 111-92 Ma로서 열수광상의 생성시기 93-75 Ma와 스카른 광상 형성시기 93-73 Ma로 성인별로 구분되며, 광상 유형별 생성시기는 W-Mo는 84-81 Ma, Au-Ag는 93-75 Ma, 다금속 광상은 98-52 Ma 등으로 다양하다. 태백산 지역 북동부에 산재해 있는 금·은을 함유하는 석영맥은 북동 방향의 단층을 따라서 관입한 화성암 또는 단층운동을 따라서 형성된 스러스트판에 평행하거나 직교하는 인장 단열계를 따라서 형성되었다.

태백산 지역의 금속광상이 밀집되어 있는 지역에 분포하는 화성암체와 스카른 광상의 형성 시기는 후기 백악기에서 신생대 제 3기층에 해당된다. 제 3기 초의 광화작용(원동 광산: 51.97±1.8 Ma)은 백악기 말에서 제 3기 초에 걸쳐서 일어난 조산운동 후기의 열수용액에 의한 것으로 보고되었다(윤석규, 1985). 거대 광산의 광화작용과 관련된 화성암인 석영몬조니암과 화강



Fig. 1. Geological map shown sampling site of the study area.

섬록암을 구성하는 흑운모에 대한 K-Ar 연대는 107-105 Ma(Kim, 1971; Farra *et al.*, 1978)로 보고된 바 있으며, 스카른 광물 중의 금운모에 대한 연대는 98Ma로 다소 젊은 연대를 나타낸다(박희인 등, 1988). 신예미 광산에 분포하는 화강암에 대한 연대는 60 Ma(김옥준과 김규한, 1978), 스카른 광물 중 금운모에 대한 연구는 그보다 오래된 77.8 Ma로 보고되었다(박희인 등, 1988). 상동 광산의 심부 시추에서 채취된 화강암 중 견운모에 대한 K-Ar 연대는 85 Ma(문건주, 1987)로서 광맥 중의 백운모에 대한 연대 결과인 81 Ma(Farra *et al.*, 1978)보다 다소 높은 연대를 갖는다. 이목 광산(Fe 스카른)과 유전 광산(Fe, Pb-Zn 스카른)의 관련 화성암으로 추정되는 이목화강암의 연대는 96-94 Ma(김옥준, 1970; Yun, 1983; Hong, 1986)로 보고된 바 있다. 금호 연-아연 광산 일대에 분포하는 춘양화강암의 백운모는 136-169 Ma인 반면 광상 주변의 열수변질산물인 견운모의 생성시기는 65-88 Ma로 보고되었다(이현구 등, 1994). 한편, 울진광산의 스카른 광화작용과 관련된 알카리 화강암과 유문암의 연대는 49 Ma로서(Yun and Silberman, 1979), 상기의 광상들과는 다소 차이를 보인다.

연구지역의 지질은 조선누층군에 속하는 막골층, 직운산층, 두위봉층 및 예미각력암대와 평안누층군 홍점층에 속하는 암층 및 소규모 중생대 백악기 규장반암의 관입암체로 구성되어 있다. 예미지역은 스투스트 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. 연구지역의 남부는 약산성 열수 유체에 의해 형성된 일라이트, 견운모, 몬모릴로나이트 및 카오리나이트를 주 구성광물로 하는 열수변질대가 광역적으로 분포하며, 이들 열수변질대의 광물조성은 칼린형 금광상에 수반되는 변질 환경과 유사한 특징을 갖는다. 열수변질대는 중심부를 따라 부분적으로 규화되어 있으며, 미립의 황철석 광염대가 발달되어 있다. 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.

3. 연구방법

칼린형 금광상의 효율적인 탐사를 위해서는 대표적

인 모델 지역인 네바다주의 지질환경, 금의 산출 특성, 변질 및 지구화학적 특성 등에 대한 기존 연구결과를 활용하여 칼린형 금광상의 생성환경과 광화작용 특성을 이해하는 것이 중요하다. 이를 위해 문헌연구와 함께 네바다 지역에 분포하는 주요 칼린형 금 광산(Carlin, Twin Creek, Post, Betze, Deep Post 광산 등)에 대한 현장 답사 및 야외 조사가 수행되었다. 또한, 네바다지역 칼린형 금광상 연구의 권위자인 미국 지질연구소(Denver 소재)의 Al H. Hofstra와 칼린형 금광상의 생성환경과 광화작용 특성을 중심으로 토의, 우리나라 지질특성과 비교하였다. 또한, 중국 칼린형 금광상 탐사시 미국측 책임자였던 Reno 대학의 Stephen G. Peters와 중국 칼린형 금광상의 탐사, 한국의 지질 특성과 발견 가능성에 대한 제반사항을 논의하였다.

이번 연구는 조구조 환경과 지질 특성이 네바다주와 유사하다고 추정되는 태백산 지역의 함백향사 서북측에 위치한 예미지역을 대상으로 GIS기반 자료를 이용한 선구조 분석, 지구물리 및 지구화학 자료의 해석, 안정동위원소 연구 등 다양한 탐사기술을 도입하여 칼린형 금광상의 부존 가능성을 평가하였다.

예미지역의 선구조 분석을 위해 위성영상, 수치표고 모형(DEM; Digital Elevation Model) 자료 및 지질도의 단층 및 습곡 자료를 이용하였으며, 30m급 해상도의 Landsat TM 위성영상(2001년 4월 18일 촬영)을 이용하여 광역적인 선구조를 분석하였다. 1/5,000 수치지도로부터 지상기준점(GCP; Ground Control Point)을 선정하여 Landsat TM 위성영상에 대하여 기하보정을 실시한 후, Laplacian와 Sobel 필터 등의 공간 필터링 기법을 적용하여 영상에서 선적인 요소를 강조하여 선구조 추출을 용이하게 하였다. 한편, 항공자력도는 예미도폭 항공자력도(한국동력자원연구소, 1988)를 재처리하여 활용하였다. 정량적인 선구조 분포 특성을 파악하기 위해 전체지역을 36개의 소지역으로 나누고, 소지역별 선구조의 빈도와 길이를 평균값으로 나누어 각각의 값을 더하는 방식으로 선구조 분포밀도를 계산하였으며, 선구조 밀도 분포도 작성을 위한 선구조는 음영 기복도로부터 추출되었다. 음영기복도 작성에 필요한 수치표고모형은 1/5,000 수치지도로부터 등고선을 추출하여 TIN(Triangular Irregular Network)을 형성한 후, 그리드(GRID) 자료로 변환하여 5m 격자의 자료를 구성하였다. 5m 격자의 수치표고모형 자료는 30m급 해상도의 위성영상에 비해 지형기복이 상세하며 정밀 선구조 분석이 가능하다.

에미 지역에 대하여 칼린형 금광화작용의 가능성을 파악하기 위하여 지표 노두시료 100여개를 대상으로 주성분 및 미량성분을 분석하였다. 주성분 분석은 부경대학교 공동실험실습관의 X선 형광분석기(XRF-1700, SHIMADZU)를 이용하였으며, 유리 비드(glass bead)를 제작하여 10종의 주성분 원소들과 함께 LOI 값을 측정하였다. 동일한 시료에 대하여 혼합산을 이용한 완전용해법으로 전처리하여 용액화한 후 중금속 및 미량성분 분석을 실시하였다. 분석은 충남대학교 공동실험실습관의 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS; Elan 6000, Perkin Elmer)와 기초과학지원연구원의 ICP-AES(Optima 4300DU; Perkin Elmer)와 ICP-MS(PQ3; VG Elemental Ltd.)를 이용하였다. 금, 칼린형 금광상의 지시원소들(탈륨, 안티모니, 비소, 은 등)와 천금속류(납, 아연, 구리, 폴리브데늄, 텅스텐 등), 희토류 원소들(REEs) 그리고 기타 중금속들을 분석하였다.

4. 결 과

4.1. 선구조 분석

선구조는 지각구조를 반영하는 직선 또는 완곡의 지형요소로서, 단층, 절리, 암맥, 지층 경계 및 습곡 등과 같은 구조적 불연속면과 연관되므로, 구조조 환경 해석, 지질구조 및 광상 탐상 등에 활용된다. 길이가 500 m 이상인 것을 선구조로 간주하였으며, 선구조 분석 결과 연구지역 내에서 121개의 선구조가 추출되었다(Fig. 2). 음영기복도로부터 추출된 선구조와 트러스트를 종합한 선구조 분석 결과 N10°~40°E 방향의 주 선구조군과 N60°~80°E 및 N50°~80°W 방향의 2개의 부 선구조군을 파악하였다. 위성영상자료로부터 1개의 주 선구조군과 2개의 부 선구조군이 추출되었으며, 주 선구조군과 부 선구조군의 주향은 각각 N50°~80°W와 N70°~80°E이다(Fig. 3).

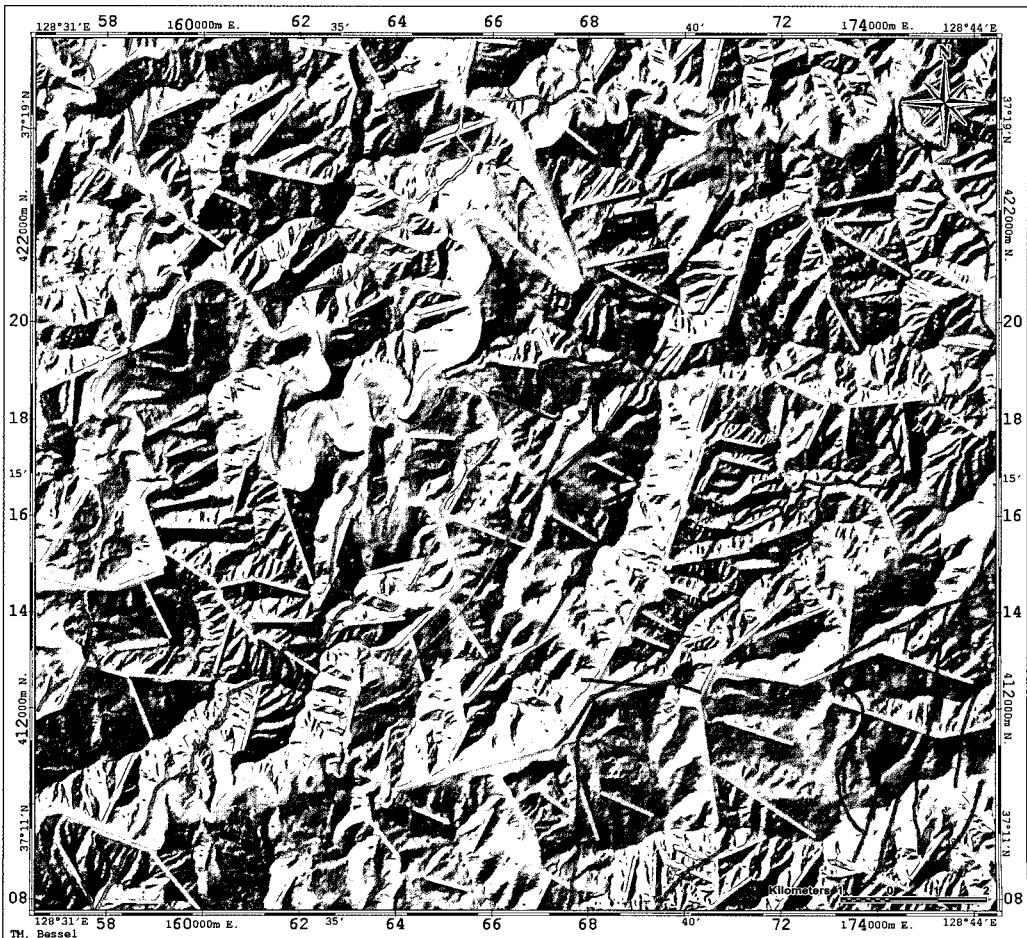


Fig. 2. Result of lineament analysis from shaded relief map.

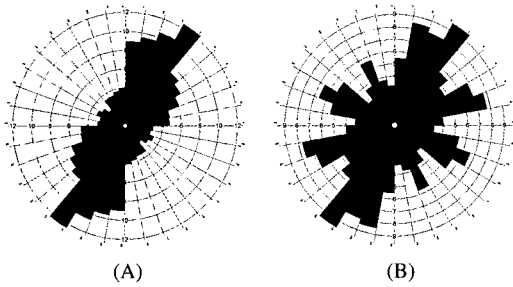


Fig. 3. Rose diagram for result of analysis of lineament from satellite image. (A) frequency rose diagram; (B) total length rose diagram.

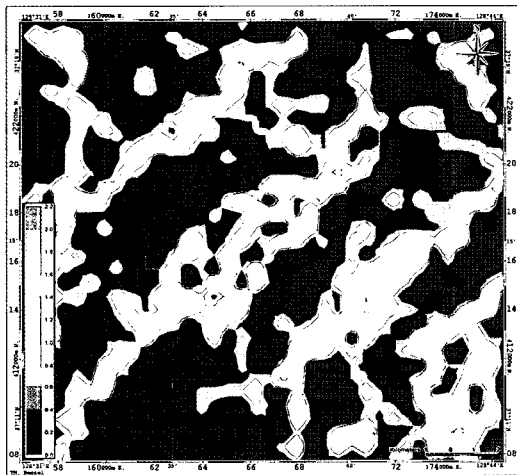
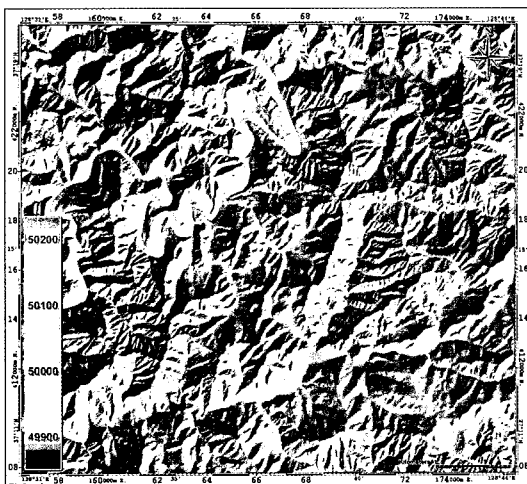
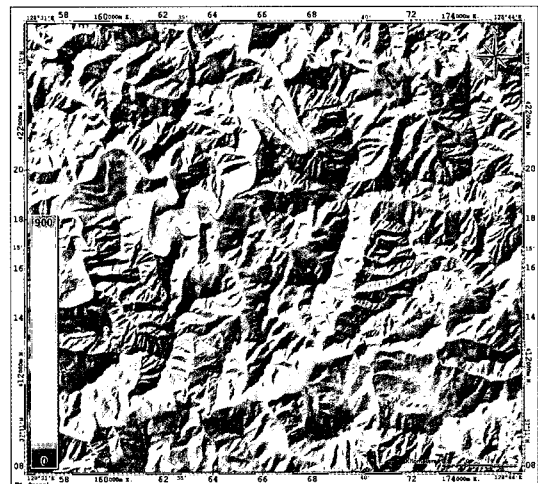


Fig. 4. Iso density map of lineament analyzed from lineament of relief map and trust fault.



(A)



(B)

Fig. 5. (A) Aero magnetic map, and (B) Aero gravity map of the Yemi geological sheet.

음영기복도로부터 300 m 이상되는 총 202개의 선구조가 추출되었으며, 각각 2개의 주 선구조군과 부 선구조군이 나타났다. 이들의 주향은 각각 주 선구조군이 N60°-N80E와 N50°-N80°W이고, 부 선구조군이 N30°~40W와 N10°~40°E로서 방향성은 위성영상 자료로부터 분석된 결과와 잘 일치하고 있다. 음영 기복도로부터 분석된 선구조와 지질도로부터 분석된 스트러스트 단층을 종합하여 작성된 선구조 밀도 분포도에서 수개의 고밀도 지역이 관찰되며, 이들은 주로 북동방향으로 연장되어 분포한다(Fig. 4).

4.2. 지구물리탐사 자료

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 있다(Fig. 5).

연구지역의 항공중력도(한국동력자원연구소, 1988)에서 다수의 중력 이상대가 관찰된다(Fig. 5). 동부 지역의 낮은 중력 이상대는 낮은 자력 이상대와 잘 일치하며, 남부 지역의 높은 중력 이상대 역시 신예미 광산의 높은 자력 이상대와 잘 일치한다.

4.3. 지구화학적 특성

4.3.1. 주성분 및 미량 원소

연구지역에서 채취된 시료들에 대한 주성분 원소 분

석 결과는 일부 시료를 제외하면 대부분의 시료들이 수
 십 %의 높은 LOI 값(최대 44.16%)을 보인다(Table 1).
 이는 석회암의 주 구성광물인 방해석과 돌로마이트에

Table 1. Descriptive statistics of chemical composition of major elements in samples from the study area.

Elements	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI ¹⁾	Total	
Duwibong Fm. ²⁾ (No. ³⁾ =6)	Mean	16.32	4.74	0.42	2.74	0.03	3.97	36.63	0.13	2.25	0.11	33.16	100.51
	median	11.59	3.08	0.21	1.80	0.03	1.47	37.58	0.13	1.53	0.09	35.55	99.62
	Std. Dev. ⁴⁾	12.19	3.81	0.47	2.40	0.02	6.55	12.56	0.03	1.86	0.09	9.42	1.59
	Min. ⁵⁾	5.40	1.43	0.03	0.64	0.01	0.88	22.22	0.08	0.63	0.02	20.53	99.28
	Max. ⁶⁾	33.45	9.68	1.09	6.31	0.05	17.33	51.68	0.16	4.95	0.24	43.85	102.65
Jeongseon Fm. (No.=11)	Mean	21.30	6.39	0.37	2.28	0.02	4.60	31.97	0.28	2.51	0.11	30.49	100.31
	median	22.80	6.55	0.23	1.48	0.02	2.02	28.84	0.15	2.24	0.05	30.04	100.08
	Std. Dev.	12.91	4.74	0.41	2.44	0.01	5.02	11.30	0.43	1.92	0.10	10.00	1.25
	Min.	4.84	0.84	0.01	0.15	0.00	0.54	18.54	0.10	0.21	0.01	17.85	98.71
	Max.	37.62	12.97	1.13	7.11	0.05	17.02	52.42	1.56	5.68	0.29	41.81	102.78
Makgol Fm. (No.=33)	Mean	21.99	5.70	0.21	1.73	0.02	6.92	30.83	0.13	2.39	0.05	30.99	100.95
	median	12.18	2.34	0.05	0.70	0.01	2.59	32.49	0.12	1.19	0.03	38.28	100.61
	Std. Dev.	20.04	5.99	0.28	2.00	0.02	6.51	16.14	0.11	2.61	0.05	13.64	1.98
	Min.	4.85	0.97	0.01	0.16	0.00	0.88	0.28	0.04	0.14	0.01	2.55	97.59
	Max.	66.84	19.90	0.83	6.57	0.10	18.95	51.60	0.68	9.45	0.20	44.16	104.82
Yemi Breccia (No.=21)	Mean	22.85	5.99	0.31	2.17	0.02	8.08	27.83	0.10	2.48	0.09	30.66	100.58
	median	15.03	3.04	0.09	0.56	0.01	8.35	31.26	0.10	1.52	0.04	37.12	100.54
	Std. Dev.	17.64	5.85	0.47	3.41	0.04	5.89	13.66	0.05	2.39	0.10	13.18	1.87
	Min.	5.10	1.39	0.02	0.22	0.00	0.84	0.57	0.00	0.47	0.01	3.54	97.03
	Max.	59.18	19.39	1.89	12.40	0.21	18.30	48.15	0.21	8.75	0.36	44.05	104.26

¹⁾ LOI: Loss of Ignition; ²⁾ Fm.: Formation; ³⁾ No.: Number of samples; ⁴⁾ Std. Dev.: Standard Deviation; ⁵⁾ Min.: Minimum value; ⁶⁾ Max.: Maximum value

Table 2. Descriptive statistics of concentration of trace elements and heavy metals in samples from the study area.

Sample	Ag	As	Ba	Bi	Cu	Pb	Tl	Zn	Sb	Mo	W	
Hongjeom Fm. (No.=7)	Mean	1.75	29.03	353.72	0.36	43.58	24.62	8.17	70.98	1.35	2.38	211.30
	Median	1.31	19.28	292.46	0.29	40.86	21.20	4.79	59.66	1.26	0.96	115.62
	Std. Dev.	0.77	26.59	143.61	0.26	10.51	12.22	13.09	40.08	0.57	2.67	196.14
	Min.	1.13	4.86	220.72	0.19	32.79	9.61	0.72	35.44	0.58	0.44	1.94
	Max.	2.99	70.20	577.34	0.95	63.75	43.78	37.49	137.18	2.07	7.89	521.93
Duwibong Fm. (No.=3)	Mean	0.48	13.12	92.14	0.16	40.29	3.80	0.65	30.41	0.53	0.78	24.02
	Median	0.50	13.96	95.93	0.11	39.87	3.91	0.24	25.20	0.47	0.80	16.51
	Std. Dev.	0.09	6.43	45.00	0.09	29.85	0.23	0.81	23.23	0.10	0.26	16.19
	Min.	0.38	6.31	45.36	0.11	10.66	3.53	0.13	10.23	0.46	0.51	12.94
	Max.	0.56	19.09	135.13	0.26	70.36	3.95	1.58	55.80	0.64	1.03	42.60
Jeongseon Fm. (No.=15)	Mean	0.72	16.14	147.73	0.12	35.57	6.17	0.30	32.80	0.84	1.05	23.77
	Median	0.71	4.72	109.68	0.12	37.60	5.33	0.20	27.66	0.70	0.91	19.88
	Std. Dev.	0.25	26.82	110.69	0.04	14.57	2.38	0.20	14.97	0.52	0.51	19.16
	Min.	0.29	1.47	33.89	0.06	17.75	2.50	0.08	5.80	0.25	0.41	6.66
	Max.	1.06	104.34	443.80	0.19	65.14	12.52	0.78	58.48	2.03	2.16	78.61
Makgol Fm. (No.=34)	Mean	5.99	9.14	239.00	0.49	39.18	10.49	0.29	39.53	0.83	1.43	32.33
	Median	1.08	6.63	246.74	0.36	34.60	5.65	0.22	28.17	0.58	1.32	22.28
	Std. Dev.	27.45	8.37	119.64	0.44	16.04	22.68	0.27	37.39	0.70	0.59	37.54
	Min.	0.74	1.18	66.59	0.13	20.21	3.26	0.10	6.83	0.27	0.67	5.48
	Max.	161.31	42.21	482.48	1.93	87.03	134.53	1.56	201.85	3.18	2.96	203.36
Yemi Breccia (No.=21)	Mean	0.85	8.04	103.44	2.45	48.98	13.71	0.70	26.34	2.68	0.96	41.33
	Median	0.88	4.78	100.47	0.15	33.06	7.88	0.28	23.58	0.77	0.92	35.12
	Std. Dev.	0.33	8.93	62.82	10.37	86.75	15.68	1.32	15.53	6.69	0.44	41.64
	Min.	0.31	0.70	12.73	0.06	9.59	3.05	0.10	5.58	0.29	0.33	6.23
	Max.	1.59	37.67	229.22	47.68	424.09	62.31	5.07	66.90	31.33	1.82	196.62

포함된 탄소가 전처리 과정(950°C 이상으로 가열)에서 CO₂ 가스로 빠져나가기 때문이다. 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.

금, 칼린형 금 광상의 지시원소들(탈륨, 안티몬, 비소, 은 등)와 천금속류(납, 아연, 구리, 몰리브덴, 텅스텐 등), 그리고 기타 중금속들에 대한 분석결과는 Table 2와 같다. 모든 시료에서 금은 분석한계 이하로 검출되어 칼린형 금광상 탐사를 위해서는 ppb 단위의 보다 정밀한 분석이 요구된다.

일반적으로 칼린형 금광상들은 원소간의 상관분석에서 비소, 탈륨과 크롬은 금에 대하여 정(+)의 상관관계를 나타내며, 바륨, 우라늄, 납과 아연은 금에 대하여 명백한 음의 관계를 나타낸다. 반면, 안티몬 및 수은과 금 사이의 관계는 분명하지 않다. 연구지역에 대한 분석 결과, 모든 시료들이 금의 검출한계(0.05 ppm) 이하로 분석되어, 금과 칼린형 금광상의 전형적인 지시원소들과의 지구화학적 상관관계를 확인할 수 없지만, 금과 지구화학적 거동이 동일한 은의 함량은 0.29~161.31 ppm 범위를 보인다.

4.3.2. 원소 부화도

칼린형 금광상의 지시원소 및 천금속류에 대한 원소 부화도는 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. 6) 또한, 이들 지역에서 칼린형 금광상의 지시원소인 안티몬과 텅스텐이 지각의 평균 함량에 비해 상당히 부화되어 있는 특징을 보여준다.

4.3.3. 안정 동위원소

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~+24‰와 -2~+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(Table 3). 고성층 석회암의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -3.84~-1.96‰, $\delta^{18}\text{O}$ 는 21.73-22.33‰, 정선층 석회암의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -3.04~-1.08‰, $\delta^{18}\text{O}$ 는 14.81~22.20‰, 막골층의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -5.52~-1.09‰를, $\delta^{18}\text{O}$

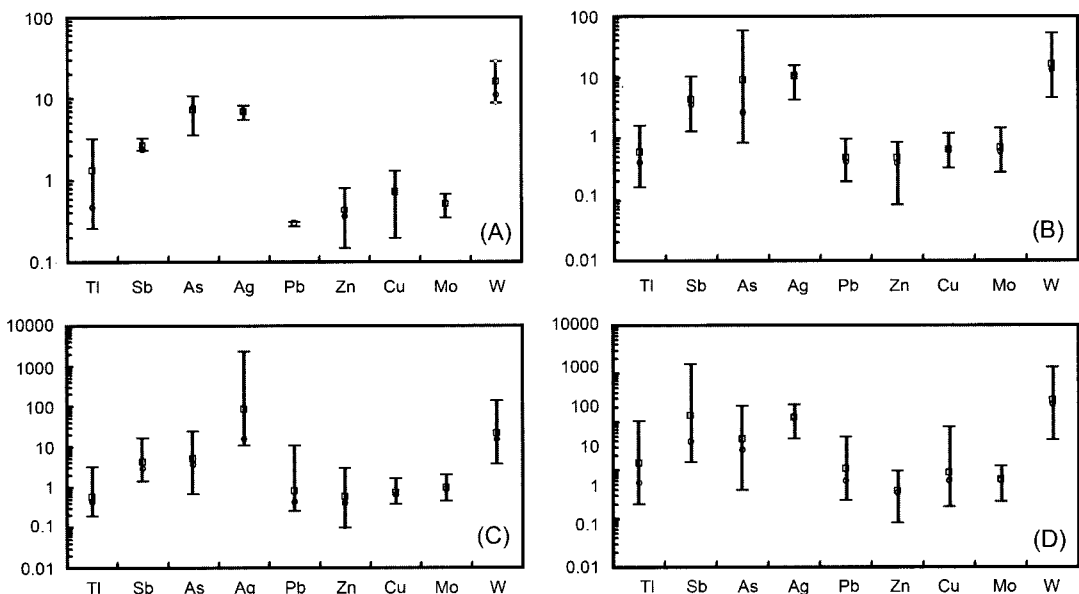


Fig. 6. Enrichment factors of lime stone sampled from the Yemi area. (A) Duwibong Formation; (B) Jeongseon Formation; (C) Makgol Formation; (D) Yemi Breccia. Open square: mean value; open circle: median value.

Table 3. Descriptive statistics of carbon and oxygen stable isotopes of limestone sampled from the Yemi area (unit in ‰).

Sample		$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}^{(1)}$
Duwibong Fm. ²⁾ (No. ³⁾ =3)	Mean	-2.69	-8.87	22.06
	Median	-2.27	-8.82	22.10
	Std. Dev. ⁴⁾	1.01	0.29	0.30
	Min. ⁵⁾	-3.84	-9.18	21.73
	Max. ⁶⁾	-1.96	-8.60	22.33
Jeonseon Fm. (No.=15)	Mean	-1.97	-12.22	18.60
	Median	-2.10	-11.48	19.36
	Std. Dev.	0.65	2.43	2.50
	Min.	-3.04	-15.90	14.81
	Max.	-1.08	-8.72	22.20
Makgol Fm. (No.=30)	Mean	-2.51	-11.54	19.31
	Median	-2.30	-11.40	19.44
	Std. Dev.	1.11	1.58	1.63
	Min.	-5.52	-15.58	15.13
	Max.	-1.09	-9.05	21.87
Yemi Breccia (No.=20)	Mean	-2.50	-11.87	18.96
	Median	-2.51	-11.26	19.59
	Std. Dev.	0.77	2.36	2.43
	Min.	-3.92	-18.27	12.37
	Max.	-1.15	-8.30	22.64

¹⁾ The values of VSMOW were calculated by using below equation; $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = 1.03091 \times \delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}} + 30.91 \text{ ‰}$;

²⁾ Fm.: Formation; ³⁾ No.: Number of samples; ⁴⁾ Std. Dev.: Standard Deviation; ⁵⁾ Min.: Minimum value; ⁶⁾ Max.: Maximum value

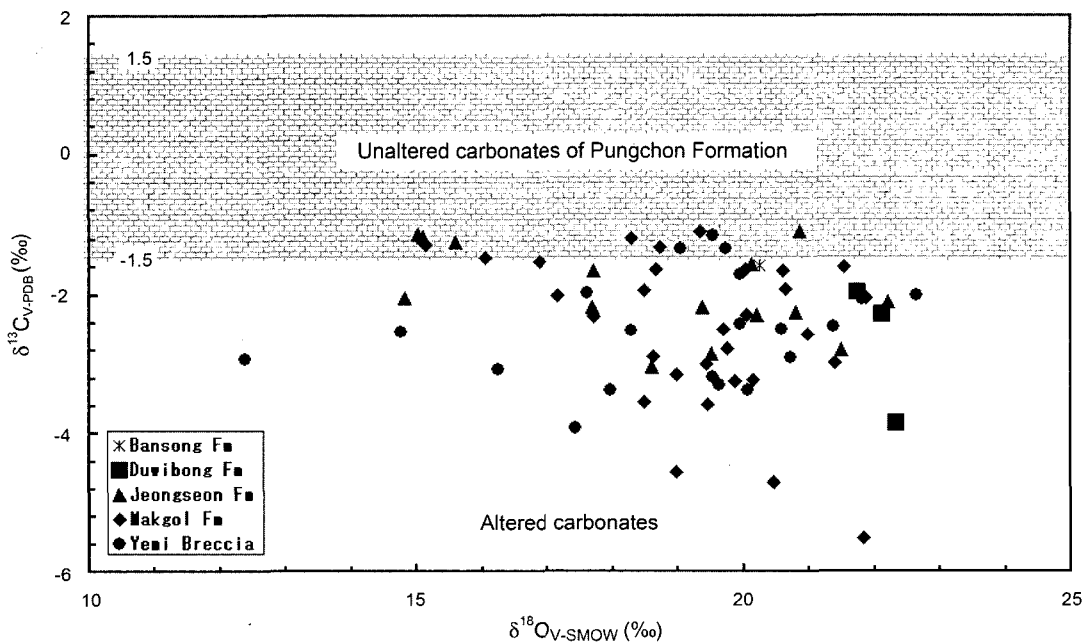


Fig. 7. Variation diagram for stable isotope oxygen vs. carbon of lime stones according to the rock formation sampled from the Yemi area.

는 15.13~21.87 ‰, 예미 각력암의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -3.92~ (Fig. 7).
-1.15 ‰, $\delta^{18}\text{O}$ 는 12.37~22.64 ‰의 범위를 보인다

5. 토 의

5.1. 칼린형 금광상의 지질환경

미국의 그레이트 분지(Great Basin) 북부에 위치한 칼린형 금광상은 후기 시생대의 짧은 기간동안에 형성되었으며, North American Cordillera의 일부분에 한정되어 분포한다(Hofstra and Christensen, 2002). 모암은 실트질 탄산염암에서 석회질 실트암과 석회질 셰일 등이며, 칼린(Carlin), 포스트/베체(Post/Betze) 광산 등과 같은 대규모 광상은 주로 실루리아기-데본기의 로버트 마운틴층(Roberts Mountain Formation)층과 포포비치층(Popovich Formation)을 모암으로 형성되었다(Evans, 1980). 칼린형 금광상은 연속적인 화성활동과 열수작용이 수반되는 중생대 열곡대에 의해 형성된 심부 지각 단층대를 따라 분포하며, 대부분의 광체는 광석을 형성함에 있어 층서적으로 강하게 규제되어 있다. 또

한, 광화대의 국지성은 습곡과 단층으로 구성된 뚜렷한 구조적 규제를 수반하며, 광화대의 일반적인 형태는 열수 공급대(feeder zone)로서 고각도(high angle)에 의해 규제된 정단층(드물게는 역단층)과 상부층에 형성되었다. 포스트/베체 광산과 같이 규모가 큰 광체는 단층 규제를 강하게 받는 수평층의 광화대가 발달되며(Arehart *et al.*, 1993; Leonardson and Rahn, 1996), 일부 지역에서는 추가적으로 광화대에 주요한 습곡작용이 수반되기도 한다. 금광상은 암석의 화학 및 물리적 특성이 중요한 요소로 데본기 암석에서 주로 산출되며, 투수성이 낮은 덮개암의 하부에서 산출된다.

중국의 칭링(Qinling)과 꾸이조우(Guizhou) 지역에서 산출되는 대부분의 금광상은 트라이아스기의 퇴적암을 모암으로 하고 있지만, 또한 모암이 데본기와 캄브리아기의 퇴적층으로 확장되어 분포되기도 한다. 이들 광상은 일반적으로 주라기 또는 그 이후 습곡된 암석 내에

Table 4. Comparison between characteristics of mineralization and depositional condition of the Taebaegsan area and Carlin-type deposits in southwest China and Nevada (modified Park *et al.*, 2004; Hu *et al.*, 2002; Hofstara *et al.*, 1999; Lee and Park, 1996).

Characteristics	Nevada	China	Taebaegsan area
Host rocks	Calcareous marine sedimentary rocks	Calcareous marine sedimentary rocks	Calcareous marine sedimentary rocks and oolitic limestone
Relation to coeval plutons	No consistent spatial or genetic relationship	No consistent spatial or genetic relationship	No consistent spatial or genetic relationship
Deposit control	Intersections of near vertical faults and fractures with permeable reactive strata and locally low angle faults	Intersections of near vertical faults and fractures with permeable reactive strata	Intersections of near (thrust) faults and fractures with permeable reactive strata
Age of deposits	Mid-Tertiary	Cretaceous	Cretaceous?
Alteration	Decarbonation, silicification, argillization, sulfidation	Silicification, argillization, sulfidation	Carbonatization, sericitization, chloritization, argillization
Ore and gangue minerals	Arsenian pyrite and marcasite, arsenopyrite, native arsenic, orpiment, realgar, stibnite, cinnabar, thallium-sulfides, quartz, barite, calcite	Arsenian pyrite, arsenopyrite, orpiment, realgar, stibnite, cinnabar, thallium sulfides, quartz, calcite	Arsenian pyrite, arsenopyrite, pyrite, magnetite, sphalerite, calcopyrite, stibnite, quartz, calcite
Residence of gold	Mainly in arsenian pyrite and marcasite as submicron inclusions and solid solution	Submicron inclusions in arsenian pyrite and arsenopyrite	Submicron inclusions in arsenian pyrite and arsenopyrite, electrum
Homogenization temp.	200±50°C	200±50°C	200±50°C
Salinity	4±4 equiv. wt% NaCl	5±4 equiv. wt% NaCl	0.0-4.8 equiv. wt% NaCl
pH	Moderately acidic 4 to 5.5	Moderately acidic 4 to 6	Moderately acidic 4 to 6
Source of H ₂ O	Variably exchanged meteoric in most districts; metamorphic or magmatic and meteoric at Getchell	Variably exchanged meteoric	Variably exchanged meteoric
Gold deposition	Sulfidation, cooling, dilution, boiling	Sulfidation, cooling, dilution	Sulfidation, cooling, dilution?

분포하며, 단층에 의해 제한된다. 중국의 지구조 환경은 네바다 지역과 매우 유사하며, 태백산 분지의 광화작용 특성도 이들 두 지역과 매우 유사하다(Table 4).

5.2. 칼린형 금광상의 국내 잠재력

항공 자력탐사는 다른 지구물리 탐사에 비해 분지의 구조적 특성을 파악하고, 상대적으로 얇은 곳에 위치하는 기반암과 관입암체의 정치자세에 대한 유용한 정보를 제공한다. 칼린형 금광상의 탐사에는 전기비저항 탐사와 항공 자력탐사 결과가 부분적으로 활용되고 있으며, 일부 칼린형 금광상의 광화대는 낮은 비저항대와 연관된다고 알려져 있다(Bettles, 2002). 네바다지역에서 칼린형 금광상의 주요 분포지는 공간적으로 화성암체의 관입과 스카른 광상 분포지역의 자력선 구조대를 따라 분포하며, 항공자력 탐사는 칼린형 금광상이 이미 발견된 지역에서 광화대의 공간적이 연장성을 추정하는데 이용되고 있다. 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 스투스트 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, 스투스트 단층, 또는 퇴적암의 분포 양상을 반영한 결과로 여겨진다.

전형적인 칼린형 금광상의 원소 부화도는 비소가 상당히 부화되어 있고, 은의 함량은 다른 금광상에 비해 상대적으로 낮은 특징을 보여준다. Hofstra and Christensen(2002)은 중국의 칼린형 금광상 중 친링 지역에서는 구리 및 폴리브테늄 농도가 높지만, 꾸이조우 지역과 친링 지역의 원소 부화도는 네바다 지역과 매우 유사하다고 보고하였다. 또한, 인도네시아 메셀(Mesel) 광산의 원소 부화도 역시 네바다 지역과 유사한 특징을 나타낸다(Hofstra and Christensen, 2002). 연구지역에서 산출되는 반송층, 염기성 암맥 및 고성 석회암에 대한 원소 부화도는 비소의 함량이 너무 낮아 칼린형 금광화작용이 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. 일반적으로 금, 비소, 안티몬과 수은은 네바다와

중국 칼린형 금광상 모두에서 동일한 원소군의 부화도를 나타낸다(Liu *et al.*, 1994; Li and Peters, 1998).

조선누층군의 석회암의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 $-4.5\sim+1.3\%$ 이고 $\delta^{18}\text{O}$ 은 $8.8\sim 23.3\%$ 로서, 평균값이 각각 -1.07% 와 $+16.03\%$ 이다(김규한, 1980). Keith and Weber(1964)의 자료와 비교해 볼 때, 평균 해성 석회암보다 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 1.7% , $\delta^{18}\text{O}$ 값은 9% 정도 가벼우며, 캄브리아기-오오도비스기의 석회암의 평균값보다 $\delta^{13}\text{C}$ 은 1.3% , $\delta^{18}\text{O}$ 은 6.2% 가볍다. 각 층별로 보면 풍촌층은 $\delta^{13}\text{C} = -1.2\sim+1.3\%$, $\delta^{18}\text{O} = 10.6\sim 18.7\%$, 화질층은 $\delta^{13}\text{C} = -4.5\sim+0.9\%$, $\delta^{18}\text{O} = 15.4\sim 21.1\%$, 두무동층은 $\delta^{13}\text{C} = -1.0\sim+0.2\%$, $\delta^{18}\text{O} = 12.7\sim 18.4\%$, 막골층은 $\delta^{13}\text{C} = -4.5\sim-1.4\%$, $\delta^{18}\text{O} = 8.8\sim 23.3\%$ 이다. 한편, $\delta^{18}\text{O}$ 의 값은 변화의 폭이 넓으며, Keith and Weber(1964)가 측정한 변질을 받지 않은 고생대층의 것보다 $4\sim 8\%$ 정도 가볍게 나타난다. 김규한(1980)은 $\delta^{13}\text{C}$ 은 중부 캄브리아기의 풍촌층에서 중부 오오도비스기의 막골층으로 감에 따라 가벼워지고 $\delta^{18}\text{O}$ 변화가 크다고 밝히고, 이는 퇴적환경의 변화에 기인하는 것으로 해석하였다.

연구지역의 석회암들은 유사 칼린형(Carlin-like) 금광상인 백전광산의 모암인 풍촌층 석회암보다 탄소 동위원소는 대체적으로 낮은 값을 보여주며, 산소 동위원소는 유사하거나 다소 높은 값을 보여준다. 백전광산 지역 풍촌석회암의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 $-0.83\sim-1.10\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 값이 $11.59\sim 20.04\%$ 로 분산되어 나타나며, 이러한 결과는 퇴적 후에 낮은 값의 $\delta^{18}\text{O}$ 를 함유하는 용액과 동위원소의 교환이 있었음을 암시한다. 일반적으로 칼린형 금광상의 산소 동위원소 값들도 상당히 넓은 범위를 가진다. 산소 동위원소는 온도 변화에 대하여 많은 영향을 받지 않으며, 천수와 퇴적암과의 물-암석 상호반응에 의해 물/암석 비에 따라 다양하게 변화될 수 있다. 만약 방해석이 심부로 순환한 천수 기원의 용액으로부터 침전되었다면, 높은 산소 동위원소 값을 가질 것이다. 네바다 지역 Alligator광산에서 금을 포함하는 벽옥(jasperoid)은 높은 산소 동위원소 값을 가지며(Ilchik, 1990), 맥석의 벽옥은 낮은 산소 동위원소 값을 가진다(Holland *et al.*, 1988). 따라서, 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 변질되지 않은 순수한 석회암에서는 은이 거의 산출되지 않으나, 연구 지역의 석회암에는 각각의 평균 함량보다 수 배에서 수 십 배까지 부화되어

있다. 이는 열수 변질작용 또는 광화작용의 영향을 간접적으로 반영하는 것으로 판단된다. 따라서, 정선층, 막골층과 예미 각력암에 대한 정밀한 ppb 단위의 금분석이 이루어져, 보다 정밀한 광화대의 구분이 이루어져야 할 것이다.

분석된 모든 시료들이 금의 검출한계(0.05 ppm) 이하로 분석되어, 연구지역의 금과 동위원소와의 상관관계를 여기서 언급할 수 없다. 그러나, 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. 8에 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 수

단으로 활용될 수 있다.

5.3. 탐사에 대한 제안

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 정밀 조사가 요구된다.

연구지역은 상대적으로 강한 열수변질대로서 칼린형 금광상의 지구화학 원소 부화도와 유사한 특징을 나타낸다. 또한, 연구지역의 예미 각력암은 국부적으로 열수작용에 의한 강한 점토화작용과 황철석화 및 규화작용을 형성하였다. 이들 변질대는 주로 점토광물과 철산화광물에 의해 각력이 충전되어 있으며, 황철석을 수반하는 석영 세맥과 후기의 방해석 맥이 발달한다. 연구지역의 남부는 상대적으로 약산성 열수유체에 의한 열수변질대가 광역적으로 분포하며, 이들 열수변질대는 칼린형 광화작용에 수반되는 변질 환경과 유사한 특징이 나타난다. 상기 열수변질대는 중심부를 따라 부분적으로 규화되어 있으며, 미립의 황철석 광염대가 발달되어 있다. 탄소와 수소 동위원소 및 미량원소의 부화 특성(원소 부화도)이 칼린형 저온 열수의 특징을 반영하는 점 등으로 미루어 지속적인 탐사가 요구된다.

동위원소, 변질대 특성, 원소 부화도 및 중금속 및 미량원소 함량 등을 종합하여 추정 광화대를 선정하고 저비용의 효율적인 종합적인 탐사계획을 수립하여 태백산 지역에 대한 지속적인 칼린형 금광상 탐사가 이루어져야 할 것이다. 연구지역에 대한 화학분석, 변질 광물 감정 및 동위원소 분석 결과, 광화대가 북동부로 연장될 가능성이 높으며 차후 이를 확인하기 위해서 체계적인 정밀탐사가 필요하다.

6. 결 론

예미지역에 대한 국내 칼린형 금광상의 잠재력을 연구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 예미지역은 스러스트 단층을 비롯한 수직단층 및 습곡으로 구성된 뚜렷한 구조적 규제를 받았으며, 높

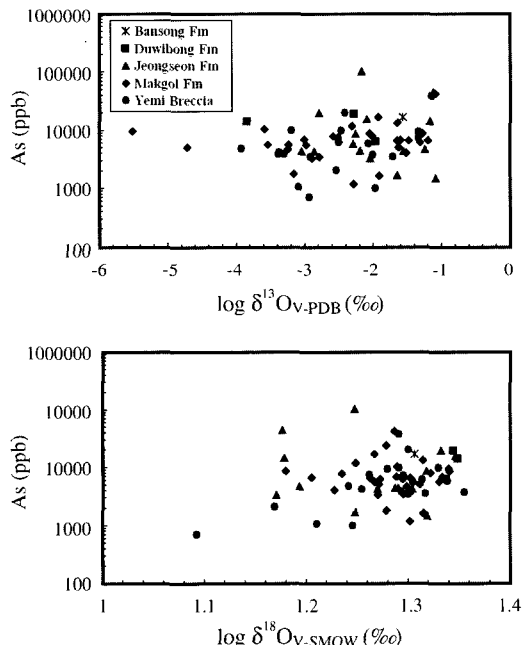


Fig. 8. Variation diagram for carbon and oxygen isotope vs. As of altered limestone sampled from the Yemi area.

은 각도의 단층과 투수성이 큰 암층(에미각력암 및 호층의 석회질 이암층)과 결합되므로, 단층규제에 의한 수평층의 광역 열수변질대 형성이 가능한 것으로 생각된다.

나. 연구지역 남부 지역에 분포하는 석회암의 탈륨, 안티몬, 비소, 은, 납, 아연, 구리, 몰리브데늄, 및 텅스텐에 대한 원소부화도는 칼린형 금광상과 지구화학적 유사성을 갖는다.

다. 연구지역의 석회암에 대한 탄소와 수소동위원소 분석결과는 이들 지역이 광역적으로 열수변질작용이 수반되었음을 지시한다.

라. 연구지역에 대한 화학분석, 변질광물 감정 및 동위원소 분석 결과, 광화대의 연장은 북동부로 연장될 가능성이 높으며 차후 칼린형 금광상의 부존 가능성을 확인하기 위해서 체계적인 정밀탐사가 필요하다.

사 사

이 논문은 2002년도 부경대학교 연구년 교수지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다. 또한, 본 논문의 심사과정에서 중요한 관점에 대하여 지적과 수정을 해 주신 충남대학교 이현구 교수님과 익명의 심사위원님께 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

김규한 (1980) 한국 태백산지역에 분포하는 고생대 석회암의 탄소와 산소 동위원소에 관한 연구. 광산지질, 13권, p. 21-27.
 김옥준 (1970) 남한의 금-은 광상구. 광산지질, 3권, p. 163-168.
 김옥준, 김규한 (1978) 태백산 광화대 에미지역 광상의 성인에 대하여. 연세대 연세논총, v. 2. p. 71-94.
 김정환 (1990) 태백산 광화대 일대의 지질구조의 특성. 태백산 광화대 연구 제4 세부과제, 한국과학재단, p. 420-532.
 김정환, 최원화 (1990) 삼청탄전 중산-사북지역의 지질구조. 지질학회지, 26권, p. 154-164.
 대한광업진흥공사 (2004) 광업요람. 대한광업진흥공사.
 문건주 (1987) 상동광산의 화강암과 태백산통내 함회중석 석영맥의 존재의의. 지질학회지, 23권, p. 306-316.
 박맹연, 성규열, 백승근, 김필근, 박효섭, 임결, 김의준, 문영환, 손승학, 강홍석 (2004) 2004 벤처탐사 학술연구용역보고서(금, 에미지구). 대한광업진흥공사, 67p.
 박희인, 장호완, 진명식 (1988) 태백산지역내 광상의 생성연령. 광산지질, 21권, p. 57-67.
 윤석규 (1979) 태백산남부 광상 관련 화성암류의 암석화학-열수변질-미량원소의 지화학. 지질학회지, 15권, p. 141-167.
 윤석규 (1985) 스카른 광상과 관련화강암의 심부동일기원. 광산지질, 18권, p. 93-105.

이찬희, 박희인 (1993) 둔전 및 백전광상에서 산출되는 액트럼의 산출상태와 조성변화. 한국광물학회지, 6권, p. 94-104.
 이찬희, 박희인 (1996) 탄산염암 층준교대형 백전광상의 천연수 금-은 광화작용과 생성환경. 자원환경지질, 29권, p. 105-117.
 이찬희, 이인성 (1997) 백전 금-은광상의 천연수 변질작용: 탄산염암의 광물 및 지구화학적 변화. 지질학회지, 33권, p. 87-98.
 이현구, 김상중, 이타야 테츠마누 (1994) K-Ar 연령으로 본 장군 연·아연 광화작용과 그 주변의 화성활동과의 관계. 대한자원환경지질학회 제27차 학술발표회 발표논문 요약문, p. 6-7.
 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, p. 383-403.
 Arehart, G.B., Chryssoulis, S.L. and Kesler, S.E. (1993) Gold and arsenic in iron sulfides from sedimentary rock-hosted disseminated gold deposit: implications for depositional processes. Econ. Geol., v. 88, p. 171-185.
 Bettles, K. (2002) Exploration and Geology, 1962 to 2002, at the Goldstrike Property, Carlin Trend, Nevada, In Goldfarb, R.J. and Nielsen, R.L.(ed.) Integrated Methods for Discovery: Global Exploration in the Twenty-First Century, Society of Economic Geologist, Special Publication No. 9, p. 275-298.
 Evans, J.G. (1980) Geology of the Rodeo Creek and Welche Canyon Quadrangles, Eureka Country, Nevada, U.S. Geological Survey Bulletin 1473, 81p.
 Farra, E., Clark, A.H. and Kim, O.J. (1978) Age of the Sangdong tungsten deposits, Republic of Korea, and its bearing on the metallogeny of the southern Korea Peninsula. Econ. Geol., v. 73, p. 547-552.
 Hausen, D.M. and Kerr, P.F. (1968) Fine gold occurrence at Carlin, Nevada. In Ridge, J.D.(ed.) Ore Deposits of the United States, 1933-1967, v. 1, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, p. 908-940.
 Hofstra, A.H. and Christensen, O.D. (2002) Comparison of Carlin-type Au Deposits in the United States, China, and Indonesia: Implications for genetic models and exploration. In Peters, S.G.(ed.) Geology, Geochemistry and Geophysics of Sedimentary Rock-Hosted Gold Mineralization in P.R. China, p. 61-94.
 Hofstra, A.H. and Cline, J.S. (2000) Characteristics and models for Carlin-type gold deposits. In Hagemann, S.G., Brown, P.E.(ed.) Gold in 2000: Reviews in Economic Geology, v. 13, p. 163-220.
 Hofstra, A.H., Snee, L.W., Rye, R.O., Folger, H.W., Phinisey, J.D., Loranger, R.J., Dahl, A.R., Naeser, C.W., Stein, H.J. and Lewchuk, M. (1999) Age constraints on Jerritt Canyon and other Carlin-type gold deposits in the western United States - relation to mid-Tertiary extension and magmatism. Econ. Geol., v. 94, p. 769-502.
 Holland, P.T., Beaty, D.W., and Snow, G.G. (1988) Comparative elemental and oxygen isotope geochemistry of jasperoid in the northern Great Basin: Evidence for distinctive fluid evolution in gold-producing hydro-

- thermal systems. *Econ. Geol.*, v. 83, p. 1401-1423.
- Hong, Y.K. (1986) Geochemistry and K-Ar age of Imog granite at the southwestern part of the Hambaeg Basin, Korea. *J. Korea Inst. Mining Geology*, v. 19, p. 97-107.
- Hu, R.Z., Su, W.C., Bi, X.W., Tu, G.Z. and Hofstra, A.H. (2002) Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China. *Mineralium Deposita*, v. 37, p. 378-392.
- Ilchik, R.P. (1990) Geology and geochemistry of the Vantage gold deposits, Alligator Ridge-Bald Mountain mining district, Nevada. *Econ. Geol.*, v. 85, pp. 50-75.
- 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.
- Keith, M.I. and Weber, J.N. (1964) Carbon and oxygen isotopic composition of Shynyemi mine: unpublished manuscript.
- Kim, O.J. (1971) Study on the intrusion epochs of younger granites and their bearing to orogenesis in South Korea. *Jour. Korea Inst. Mining Geol.*, v. 4, p. 1-9.
- Leonardson, R.W. and Rahn, J.E. (1996) Geology of the Betze-Post gold deposits, Eureka Country, Nevada. In Coyner, A.R.; Fahey, P.L.(ed.), *Geology and Ore Deposits of the American Cordilela*, Geological Society of Nevada, Reno, p. 61-94.
- Li, Z. and Peters, S.G. (1998) Comparative Geology and Geochemistry of Sedimentary-Rock- Hosted (Carlin-Type) Gold Deposits in the People's Republic of China and in Nevada, USA, U.S. Department of the interior U.S. Geological Survey Open-File Report 98-466, 157p.
- Liu, D., Tan, Y., Wang, J. and Wei, L. (1994) Carlin-type gold deposits in China. In Liu, D., Tan, Y., Wang, J. and Jiang, S.(ed.), *Chinese Carlin-type Gold Deposits*, University of Nanjing Press, Nanjing, p. 1-6.
- 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, p. 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.
- Yun, H.S. (1983) K-Ar ages of micas from Precambrian and Phanerozoic rocks in the northeastern part of Republic of Korea. *Scweiz Mineral Petol. Mitt.*, v. 63, p. 295-300.
- Yun, S. and Silberman, M.L. (1979) K-Ar geochronology of igneous rocks in the Yeonhwa-Ulchin zinc-lead district and southern margin of the Taebaegsan Basin, Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 15, p. 89-100.

2005년 4월 4일 원고접수, 2005년 8월 3일 게재승인.