

전북 광상의 납 동위원소 조성에 대한 고찰

정재일¹ · 박계현^{2,*}

¹전북대학교 자연과학대학 지구환경과학과, 전북 전주시 덕진구 덕진동
²부경대학교 환경·해양대학 환경지질과학과, 부산광역시 남구 대연동

Pb Isotopic Composition of the Ore Deposits Distributed in Jeonbuk Province

Jae-II Chung¹ and Kye-Hun Park^{2,*}

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Jeonju 561-756 Korea

²Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

요약: 전라북도 지방에 분포하는 번암, 동진, 적상 및 북창 광산에서 채취한 납광석광물에 대한 납 동위원소 분석을 실시하였다. 그 결과 광상별로 상당히 다른 납 동위원소 조성을 가짐을 확인하였다. 번암광산, 북창광산 및 동진광산의 납 동위원소값이 형성하는 선형변화는 그 기울기가 매우 급하기 때문에 연대로 해석하기는 곤란하며 이 광상들의 납은 주로 선크브리아 기저지각과 중생대 화강암질암의 두 종류 단성분들로부터 유래하였을 가능성을 제기하였다. 광상의 형성시 이러한 근원물질들로부터 유래한 납의 혼합비율은 광상마다 상당히 다른 것으로 추정된다. 이는 광화작용시 존재했던 유체의 순환이 매우 국지적인 범위에서 제한적으로 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. 동진 광산의 경우는 광상에 배태된 납의 근원이 상당부분 기저지각에서 용출된 것임을 시사하며, 광화작용시 화성암은 운광암으로서보다는 유체의 순환을 야기한 열원으로 중요한 역할을 담당한 것으로 판단된다.

핵심어: 납 동위원소, 광상, 방연석, 지각, 전라북도

Abstract: Pb isotopic compositions were determined from the ore deposits of Beonam, Dongjin, Jeoksang and Bukchang mines distributed within Jeolabuk-do. As a result, individual mine shows significantly different values of Pb isotopic compositions from each other. Pb isotopic values of the Beonam, Bukchang and Dongjin mines altogether form linear variation, but it is too steep to represent their formation age. Instead, such trend suggests that these ore leads were originated from binary mixing. Precambrian basement rocks and Mesozoic granitoids are suggested for such two end-members. The relative contribution of lead from each source seems to be quite different for each ore deposit, implying that the circulation of the ore-forming fluid was very localized when they were formed. In the case of Dongjin mine it seems significant portion of the ore leads were originated from the basement rocks, which suggests that related igneous rock seems to have acted as heat source to generate circulation of the fluid rather than the source of the ore-forming elements.

Key words: Pb isotope, ore deposit, galena, crust, Jeolabuk-do

서 론

광상 성인에 대한 정보는 유사한 성인을 갖는 광상의 탐사와 개발에도 매우 중요하게 활용될 수 있다. 지금까지 국내의 여러 광상들에 대하여도 성인에 관한

많은 연구가 수행되어 왔으나 대부분 광상의 생성환경에 초점이 맞추어져 있다. 하지만 광석광물들이 어디서 유래한 원소들로 만들어졌는가를 밝히는 연구는 국내에서는 그리 활발히 수행되지 못했다. 광석의 납 동위원소 조성은 근원물질의 조성을 반영한다. 따라서 근

*Corresponding author: Tel. 82-51-620-6241, Fax. 82-51-628-6432, E-mail. khpark@pknu.ac.kr

원을 추적하는데 매우 유용하며, 이를 통해 광상형성의 과정을 알아내는데 쓰일 수 있다. 특히 황화 광물, 그 중에서도 방연석과 섬아연석은 분석하기 쉽게 충분한 양의 납을 함유하고 있으며 이와 반대로 U의 함량은 매우 낮다. 즉 U/Pb 비가 거의 0에 가까우며 이는 이들 광물이 생성된 이래 U이나 Th의 방사성 붕괴에 의한 납 동위원소 생성은 거의 무시할 만 했다고 볼 수 있는 것이다. 다시 말하면 이 광물들로부터 분석된 납 동위원소 조성은 이 광물들이 생성된 광상 용액의 납 동위원소 조성을 그대로 대표한다고 볼 수 있다. 따라서 추정되는 근원암들의 납 동위원소 값과 비교하면 납의 근원을 용이하게 추적할 수 있다. 또한 납 동위원소간의 비는 근원 물질의 연령 및 지구조적 환경과 밀접한 연관성을 갖고 있기 때문에 이 또한 근원 추적에 도움을 줄 수 있다. 또한 광석광물들의 납 동위원소 조성변화로부터 광화작용시 시간에 따른 광화용액 성분변화에 대한 정보를 제공할 수도 있다.

이상과 같은 납 동위원소 연구의 강력한 활용도 때문에 광상성인의 연구와 탐사(예, Doe and Stacey, 1974; Gulson, 1986; Frei *et al.*, 1998; Rumus *et al.*, 2000; Nie *et al.*, 2002; Rubinstein *et al.*, 2004) 뿐만 아니라 지각과 맨틀의 진화 연구(예; Doe and Zartman, 1979; Tilton, 1983; Zinlder and Hart, 1986; Zartman and Haines, 1988) 등에 납 동위원소 자료가

널리 활용되고 있다. 이러한 연구 동향이나 그 잠재적인 활용가치에 비하여 국내에서의 광상에 대한 납 동위원소 연구는 미약한 실정이다.

한반도 내에 분포하는 광상에 대한 납 동위원소 연구는 일본학자들에 의해 시작되었으며(Mabuchi, 1985; Sasaki, 1987) 비교적 최근에 여러 광상들에 대한 분석 결과들이 보고되었다(So *et al.*, 1991; Chang, B.U. *et al.*, 1995; Chang, H.W. *et al.*, 1995; Chang, 1997; Yoon and Kim, 1999; 박계현과 장호완, 2005). Sasaki (1987)는 한반도 전반에 걸친 방연석의 납 동위원소 분석을 실시하였으며, Mabuchi(1985)가 청동기 유물과 관련하여 중국, 일본의 납 광석과 함께 한반도 전반에 걸쳐 방연석 30시료를 분석하였다. Sasaki(1987)의 연구 결과는 개별적인 광상별로 자료가 보고되지 않았으나 전체적으로 볼 때 Mabuchi(1985)의 결과와 유사하다. 이 일본학자들의 연구들은 한반도 전 지역을 대상으로 하였다. 광상의 생성시기 및 성인이 다른 광상들을 한꺼번에 묶어 분석하였기 때문에 전체적인 경향성을 파악하는 데는 유용하지만 개별 광상의 성인을 논의하기에는 대체적으로 분석 자료의 수가 적으며 주변의 관련 암석들에 대한 납 동위원소 자료가 없어 납의 근원을 추적하기에는 한계가 있다. 이 연구는 주로 전라북도 내에 분포하는 광상들을 대상으로 하며, 기보고된 납 동위원소자료들과 비교하여 이 광상들에 포함된 납

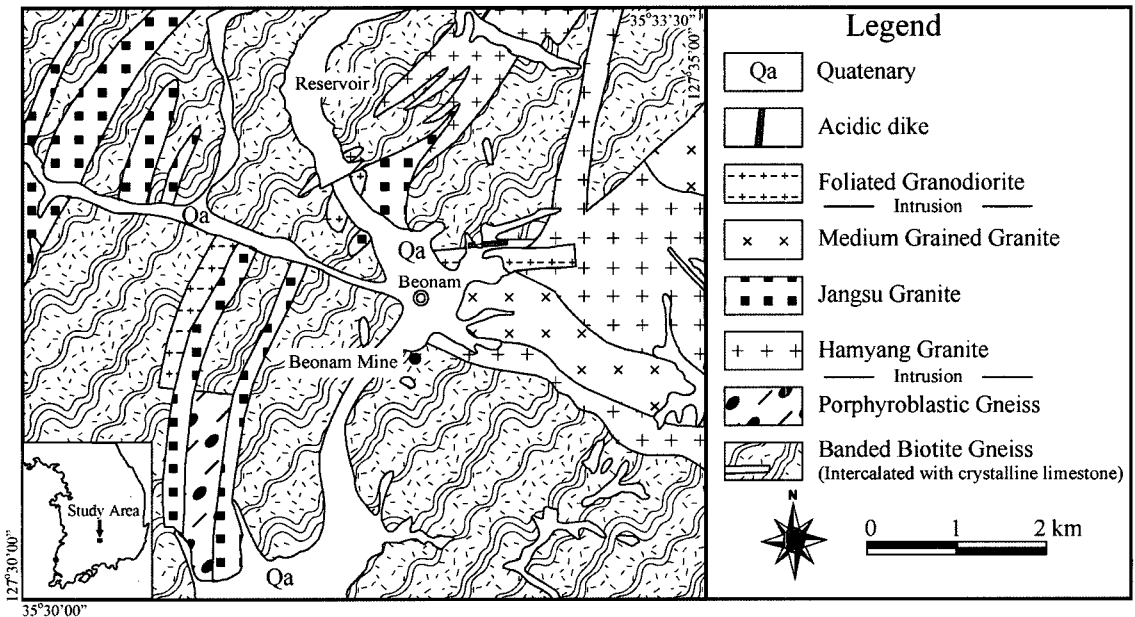


Fig. 1. Geologic map of the Beonam mine area modified after Kim and Chwae (1994).

이 어디서 유래되었는가에 대하여 토의 하고자 한다.

지질개요

함양도폭(김규봉과 최위찬, 1994)의 남서부에 위치하는 빈암광산(Fig. 1)의 주변에는 영남육괴의 선캄브리아 편마암류와 삼척기의 엽리상 화강암류가 분포한다. 빈암 금은광산은 영남육괴의 선캄브리아 편마암 복합체 내에 발달하는 열극을 충전하여 배태된 열극충전열수광산으로 수개조의 평행맥으로 구성되며, 산출되는 주요 합금은광물은 에렉트럼, 휘은석, Ag-Sb 계의 유염광물등이다(정재일 외, 1994; 이창신, 1994; Chung et al., 1995; 박천영 외, 1998).

진안분지에 위치하는 동진광산(Fig. 2)은 진안도폭(시마무라, 1925)남쪽 끝부분에 자리잡고 있다. 동진광산은 백악기 진안층군의 마이산 역암층이 현저하게 발달한 내동산의 정상부근에 위치한다. 광상의 유형을 살펴보면 마이산 역암층과 산수동층을 관입하는 각섬석-흑운모 화강암 내에 발달한 열극을 충전상하는 맥상의 금은동 광상이다(정재일과 김선영, 1996).

북창광산(Fig. 3)은 금산도폭(홍승호와 최위찬, 1978)에 포함되는 옥천변성대 내에 위치한다. 흑색 천매암

내지 흑색 점판암이 주이며 부분적으로 흑색의 변질 셰일, 담회색 결정질 석회암, 각섬암, 운모질 천매암이 협재하는 창리층을 관입하는 화성암류를 따라 열극충진상으로 금은광상이 배태하고 있다. 광상을 배태하는 화성암은 주로 조립질 입상 조직을 갖는 홍색 장석 화강암으로 불규칙하게 주변암들을 관입하고 있다. 정재일 외(1996)가 유체포유물 및 황안정동위원소 분석자료를 활용하여 북창광산의 천열수 금은광화작용에 대한 연구결과를 발표하였다.

전북 무주군 적상면에 소재하는 적상광산(Fig. 4)은 금, 은, 동, 연, 아연 등의 광종이 알려져 있다. 광산 부근 일대의 지질은 선캄브리아기의 화강편마암과 백악기의 북창리층이 넓게 분포하고 있다. 광상은 북창리층의 열극을 충전한 합금은석영맥으로서 1개조가 발달하며 황철광, 방연광, 섬아연광, 유비철광등을 수반한다.

분석법

남 동위원소 분석을 위한 시료의 전처리와 동위원소 분석은 모두 한국기초과학지원연구원에서 수행되었다. 남 동위원소 분석을 위한 시료 전처리는 대상 시료의 종류에 따라 다르게 하였다. 남 동위원소 분석을 위해

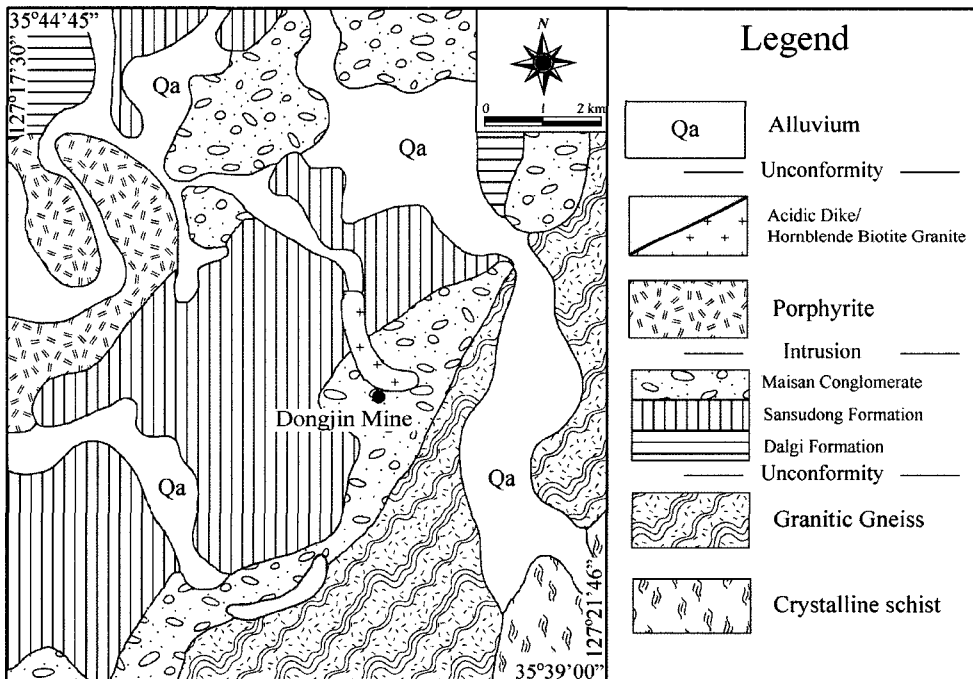


Fig. 2. Geologic map of Dongjin mine area.

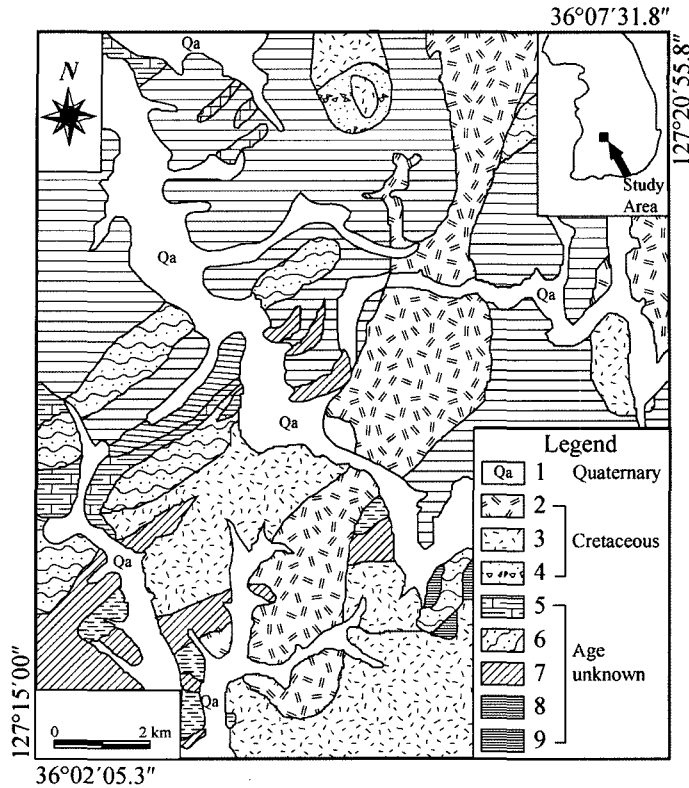


Fig. 3. Geologic map of the Bukchang mine area. 1. Alluvium, 2. Quartz porphyry, 3. Pink feldspar granite, 4. Seodaesan tuff, 5. Bibong formation, 6. Odaesan quartzite, 7. Munjuri Formation, 8. Changri Formation, 9. Majeouri Formation.

0.05-1 mg 정도의 작은 알갱이를 골라낸 방연석은 석영유리 재질의 비등점하 증류장치(subboiling distillation apparatus)에 의해 정제된 6N 염산으로 녹인 후 열판위에서 건조 시켰다. 여기에 테플론 재질의 관을 연결하여 제작한 비등점하 증류장치(Teflon two-bottle subboiling distillation system)로 정제한 진한 질산을 첨가하여 다시 건조 시킨 후 Re 필라멘트에 얹어 열이온화질량분석기(Thermal ionization mass spectrometer, VG 54-30)로 분석하였다. 섬아연석은 산으로 녹인 후 음이온교환수지를 이용하여 납을 분리한 후 방연석과 같은 방법으로 필라멘트에 얹어 분석하였다. 시료 분석 시 NIST SRM-981 납 표준물질들을 함께 분석하여 질량분석시의 동위원소 분별작용을 보정하였다. 분석 전 과정에서 배경 값은 최대 1 ng 이하로 무시해도 좋을 만큼 낮았다. 이 연구에서 분석된 납 동위원소 분석 자료는 Table 1에 종합하였다.

결과 및 토의

전북지역 광산들의 방연석 및 섬아연석에 대한 납 동위원소 분석치는 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 및 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값이 각각 18.72-19.43, 15.77-15.84, 39.20-39.34 사이의 비교적 넓은 범위에 걸친 변화를 보이지만 개별 광상의 값은 비교적 제한된 변화만을 보인다(Table 1, Fig. 5).

광상별 납 동위원소 값의 변화

광상별로 살펴보면 변암광산이 분석된 광상들 중에서는 가장 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 및 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 보인다. 이 연구에서 분석한 값들은 Yoon and Kim (1999)이 변암광산의 5개 방연석 표품에 대해 보고한 납 동위원소 조성과 잘 일치한다. 변암광산의 방연석과 섬아연석들은 Yoon and Kim(1999)의 한 시료만 제

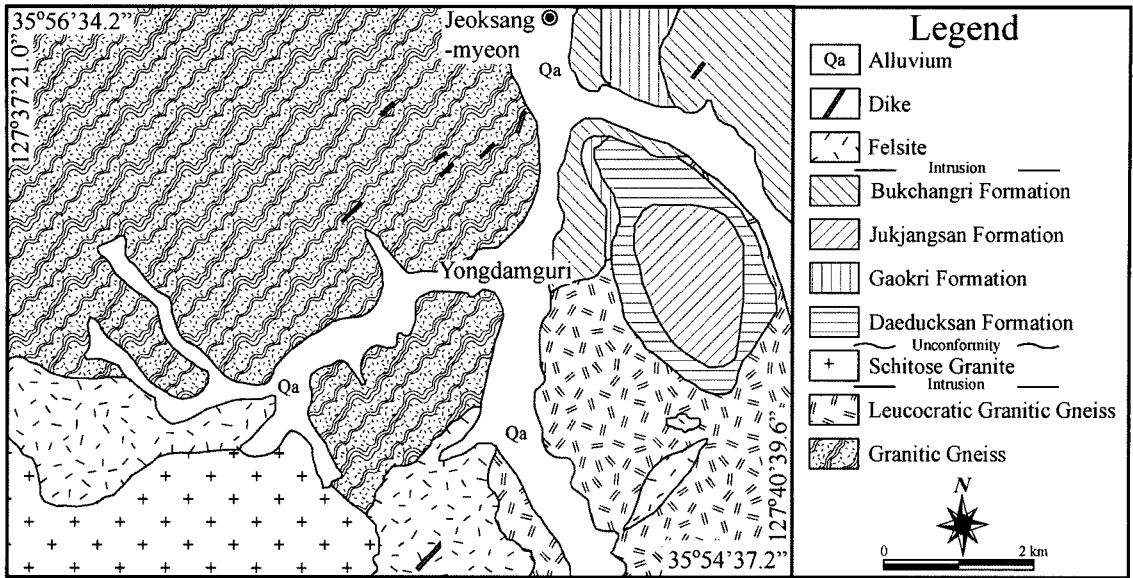


Fig. 4. Geologic map of the Jeoksang mine area.

외하면 비교적 잘 정의되는 선형변화를 보여주며 이는 두 단성분 사이의 혼합으로도 설명될 수 있을 것으로 생각된다. 그러다 실제로 이들이 이러한 혼합의 결과로 생성되었는지를 규명하기 위해서는 추가적인 지화학적 증거가 필요하다. 북창광산 역시 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 보이며, 변암광산의 범위에 중첩되거나 약간 더 높은 쪽에 놓인다. 동진광산은 변암광산 및 북창광산보다 높은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 보인다. 적상광산은 다른 광산들과는 상당한 차이를 보이는 가장 높은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 갖는다. 동진광산의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값은 적상광산보다는 낮음에도 불구하고 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 및 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값이 가장 높은 값까지 변화하는 것을 특기할만하다. 변암광산, 북창광산 및 동진광산의 남 동위원소값들을 함께 도시하면 대체로 연속적인 선형변화를 보인다. 이들이 형성하는 선형변화는 그 기울기가 매우 급하기 때문에 연대로 해석하기는 곤란하다. 이보다는 이 광산들의 납이 주로 두 단성분으로부터 유래하였을 가능성을 시사한다. 공생하는 방연석과 섬아연석들의 남 동위원소 조성을 비교하면 대체로 같거나 근소한 차이를 보이는 것이 대부분이며, 광물종에 따른 체계적인 차이를 나타내지는 않는다. 따라서 각 광산별로 남 동위원소 값이 어느 정도의 범위 내에서의 변화를 보이는 것은 다소 불균질한 광화유체의 동위원소 조성변화를 반영하는 것으로 해석된다.

국내 다른 광산들과의 비교

Fig. 5에 이 연구의 전북지역 광산들과 함께 도시되어 있는 우리나라의 대표적인 연-아연 광산인 연화광산과 장군광산의 남 동위원소 값(박계현 외, 2005)을 보면 대체로 비슷한 동위원소 조성을 보여준다. 이는 한반도에 분포하는 광산들이 대체적으로는 유사한 근원물질로부터 유래되었음을 시사한다. 복잡성을 피하기 위해 Fig. 5에 도시하지는 않았으나 기보고된 국내 광산들의 남 동위원소 조성들(Mabuchi, 1985; Sasaki, 1987; So *et al.*, 1991; Chang, B.W. *et al.*, 1995; Chang, H.W. *et al.*, 1995; Yoon and Kim, 1999; 박계현과 장호완, 2005)을 모두 도시하더라도 경상분지의 광산들(Chang, 1987)과 그 밖의 몇 광산들을 제외하고는 남 동위원소 조성의 주된 분포 범위 및 변화경향은 대체로 동일하다고 볼 수 있다. 그러나 경상분지에 분포하는 광산들은 뚜렷이 낮은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 갖는 것이 특징이다.

납의 기원

앞에서 살펴본 것과 같이 경상분지 내부와 외부의 광산별로 구분되는 크게 구분되는 남 동위원소값을 갖는 이유의 규명과 각 광산을 배태시킨 광화유체 내에 들어있는 납의 근원을 규명하기 위하여 국내의 선캠브리아 기저와 중생대 화강암질암 등으로부터 보고된 납

Table 1. Pb isotopic ratios for the selected samples.

Sample	Mineral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
Beonam Mine				
BA Gn-1	Galena	18.137	15.703	39.066
BA Gn-2	Galena	18.128	15.694	39.037
BA Sp-1	Sphalerite	18.065	15.633	38.850
BA Sp-2	Sphalerite	18.118	15.675	38.963
Jeoksang Mine				
JS Gn-1	Galena	19.430	15.821	39.309
JS Gn-2	Galena	19.566	15.837	39.316
JS Sp-1	Sphalerite	19.464	15.850	39.379
JS Sp-2	Sphalerite	19.271	15.840	39.369
Bukchang Mine				
JJ Gn-1	Galena	18.103	15.667	38.957
JJ Gn-2	Galena	18.297	15.721	39.066
JJ Sp-1	Sphalerite	18.126	15.715	39.103
JJ Sp-2	Sphalerite	18.270	15.695	38.998
Dongjin Mine				
DJ Gn-2	Galena	18.548	15.839	39.503
DJ Sp-1	Sphalerite	18.473	15.769	39.251
DJ Sp-2	Sphalerite	18.573	15.876	39.654

동위원소 값과 비교하여 보았다(Fig. 5, 6). 우선 경상 분지의 광상들을 제외한 나머지 광상들의 납 동위원소는 한반도의 선캠브리아 암석들과 함께 Fig. 6(a)의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 도형에서 대체로 20억년에 해당하는 기울기를 가지며 분포한다(Sasaki, 1987; 박계현과 장호완, 2005). 이러한 경향은 한반도의 선캠브리아 기저 암석들이 보이는 일반적인 연대(예, 권성택 외, 1995; Sagong and Kwon, 1998; 박계현 외, 2000, 2001; Sagong *et al.*, 2003; Zhai *et al.*, 2005)와 일치하는 값이며, 이들의 생성에 선캠브리아 기저의 영향이 있었을 가능성을 시사한다. 그러나 Fig. 5와 Fig. 6에서 선캠브리아 기저의 값들이 매우 넓은 범위의 변화를 보이는 반면에 광상들은 비교적 제한된 변화만을 보이며, 또한 광상들은 한반도 선캠브리아 값들의 하단부에 주로 도시되는 경향을 보인다. 이러한 전체적인 차이와 함께 개별광상들은 선캠브리아 기저의 성분범위 밖으로 벗어나는 경향을 보이기도 한다. 이러한 변화의 예는 Yoon and Kim(1999)의 삼광광산 및 박계현과 장호완(2005)의 장군광산에서 볼 수 있으며 주로 기저 지각에 비하여 낮은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 갖는 쪽으로 이탈하는 변화경향을 보인다. 예는 은 한반도의 경상분지 내에 분포하는 화성암들 역시 경상분지 내의 광상들과 비슷한 정도로 낮은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 보인다. 이러한 변화경향은 광상에 포함된 납의 기원에 대해 중요한 정

보를 제공해 줄 수 있으며, 박계현과 장호완(2005)은 오래된 기저지각에서 유래한 납과 후기의 화성활동에 수반된 납의 두 가지 종류 근원으로 설명하였다.

Fig. 6(b)에 경상분지 내의 광상들과 화성암 및 한반도의 중생대 화강암질 암체의 납동위원소 범위를 도시하였다. 앞에서 언급했던 것처럼 경상분지 내의 광상들과 화성암들은 선캠브리아 기저암체나 다른 지역의 광상들과는 구분되는 조성범위를 갖는다. 경상분지 밖에 분포하는 중생대 화강암질암들의 납동위원소 조성은 선캠브리아 암석들과 비교할 때 비교적 낮은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 갖는 쪽에 놓인다. Fig. 6에 따로 표시하지는 않았으나 백악기인 속리산 화강암(정창식과 장호완, 1996) 역시 이 범위에 속한다. 즉, 화성암의 연대보다는 지역적인 구분에 따라서 납동위원소 값이 일관되게 변화한다. 경상분지 밖에 분포하는 화강암질암들의 조성범위와 기울기는 경상분지 밖의 광상들과 대체로 비슷하다. 따라서 이들이 성인적으로 매우 밀접한 상관관계를 갖고 있는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 동진광산의 경우처럼 화강암질암의 범위를 높은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 쪽으로 벗어나 선캠브리아 암석의 영역에 걸쳐있는 광상도 있고, Yoon and Kim(1999)의 납동위원소 자료에 포함된 일부 광상의 경우처럼 중생대 화강암질암보다 훨씬 낮은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 쪽으로 벗어나는 경우도 있다. 이는 광상별로 광화유체에 포함된 납의 근원에 상

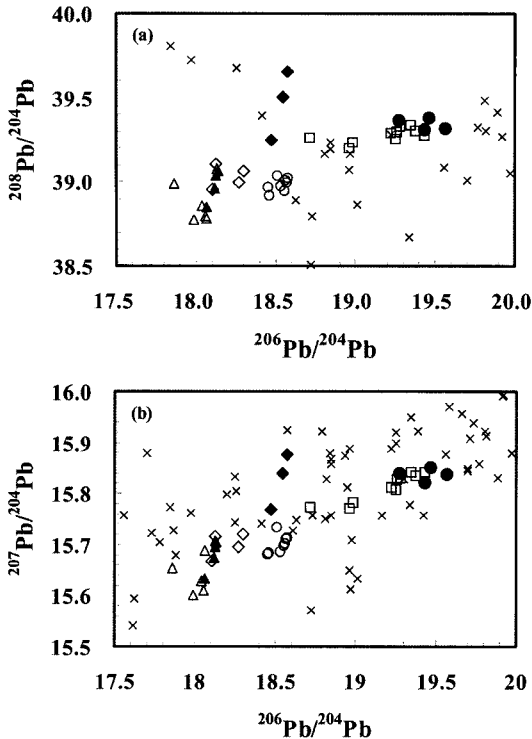


Fig. 5. (a) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and (b) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagrams for the ores from Jeonbuk area. In addition to the galenas and sphalerites from Beonam (\blacktriangle), Bukchang (\diamond), Dongjin (\blacklozenge) and Jeoksang (\bullet) mines, previously reported ores from Beonam (\triangle , Yoon and Kim, 1999) and Janggun (\circ) and Yeonhwa mines (\blacksquare , Park and Chang, 2005) and also Precambrian basement rocks of the Korean peninsula (\times , Park *et al.*, 1993; Park, 1996; Kwon *et al.*, 1995; Kim *et al.*, 1997; Sagong and Kwon, 1998; Park and Noh, 2000; Cheong *et al.*, 2000, 2004; Kim and Cho, 2003) are also plotted for comparison.

당한 차이가 존재함을 시사하며, 광상들이 형성시 선캠브리아의 기저지각으로부터 유래한 납과 후기의 화성활동에 수반되었던 납의 혼합비율이 상당한 범위로 변화하기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 각 개별 광상의 납의 근원별 유래를 보다 정량적으로 알아내기 위해서는 각 광상과 관련한 관계화성암과 모암의 분석이 추가되어야 할 것이다. 한편 광상별로 상당히 다른 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 가지며, 각 광상은 비교적 제한된 조성 범위를 갖는 원인은 이 광상들을 형성한 유체의 순환이 매우 국지적이었음을 말해준다. 즉, 선캠브리아 기저로부터 유래한 납이 포함되더라도 매우 제한된 범위 내의 지각값만을 반영하기 때문에 광상별로 뚜렷이 구분되는 값을 갖게 된 것으로 추정된다.

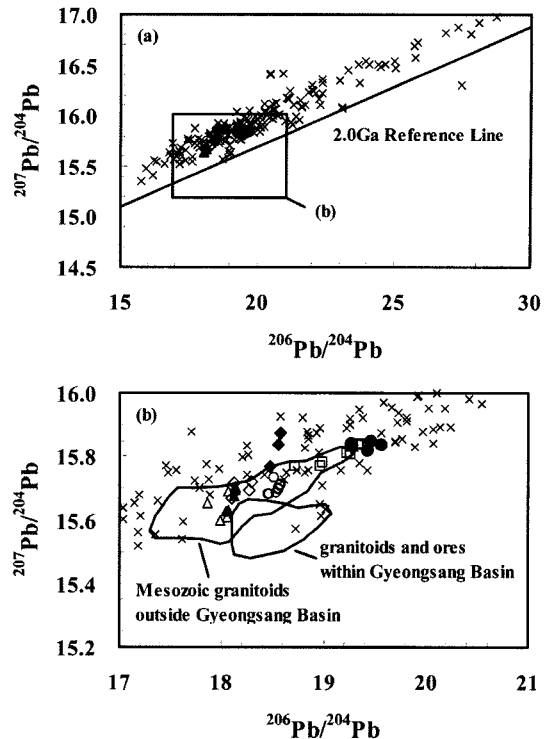


Fig. 6. (a) (b) Symbols are the same as in Fig. 5. Compositional fields for the ores and igneous rocks of the Gyeongsang Basin and for the Mesozoic granitoids outside Gyeongsang Basin are constructed from the literature (Chang, B.U. *et al.*, 1995; Chang, 1997; Cheong *et al.*, 1998, 2002; Park *et al.*, 2005, 2006).

한편 일부 광상의 납동위원소 값이 중생대 화강암질 암보다는 기저지각의 값에 훨씬 가까운 경향성을 보이는 것은 이 광상에 배태된 납의 근원이 상당부분 기저지각에서 용출된 것임을 시사한다. 즉, 이 경우 화성활동에 수반되어 마그마로부터 유래한 납의 상대적 비율이 훨씬 낮으며 광화작용시 화성암은 운광암으로서보다는 유체의 순환을 야기한 열원으로서 중요한 역할을 담당한 것으로 판단된다.

결론

전북지역에 분포하는 여러 광상들에 대한 납 동위원소 조성을 분석한 결과 광상별로 납 동위원소 조성이 상당히 다른 값을 갖는 것이 확인되었다. 분석된 납 동위원소조성을 기보고된 한반도의 기저지각 및 화성암들로부터 분석된 납 동위원소 값과 비교한 결과 선캠브리아 기저지각과 화성암의 각각으로부터 유래한 납

들이 혼합되어 광상을 형성한 것으로 추정된다. 그러나 이러한 두 가지 근원물질로부터 유래한 납의 혼합 비율은 광상마다 상당히 다른 값을 보인다. 이는 광화작용시 존재했던 유체의 순환이 매우 국지적으로 제한적이었음을 나타낸다. 일부 광상의 경우 배대된 납의 근원이 상당부분 기저지각에서 용출된 것임을 시사하며 광화작용시 화성암은 운광암보다는 유체순환을 야기한 열원으로서 중요한 역할을 담당한 것으로 판단된다.

사 사

원고의 준비 과정에서 지질도의 작성 등을 도와준 부경대학교 암석학연구실 대학원생들께 감사드린다. 논문을 읽고 미비한 점들을 지적하여주신 심사자들에게도 감사드린다.

참고문헌

- 권성택, 이진한, 박계현, 전은영, 1995, 단양 천동리 지역 옥천대/영남육괴의 접촉관계와 소위 화강암질 편마암의 Pb-Pb 연대. *암석학회지*, 4, 144-152.
- 김구봉, 최위찬, 1994, 한국지질도 (1 : 50,000) 함양도폭 및 설명서. 한국자원연구소, 16p.
- 김정환, 정창식, 손영철, 고희재, 1997, 평창지역의 지질과 선캠브리아 화강암질암의 스트론튬, 니오디미움 및 납 동위원소 조성. *지질학회지*, 33, 27-35.
- 박계현, 1996, 무주지역 대리암의 Pb-Pb 연대. *암석학회지*, 5, 84-88.
- 박계현, 노진환, 2000, 춘천 연옥의 기원에 관한 지구화학적 연구. *암석학회지*, 9, 53-69.
- 박계현, 장호완, 2005, 연화 및 장군 연-아연 광상의 Pb 동위원소 조성 및 Pb의 근원: 선캠브리아 기저 지각 및 중생대 화성암의 역할. *암석학회지*, 14, 141-148.
- 박계현, 정창식, 이광식, 장호완, 1993, 태백산지역의 고기 화강암 및 화강편마암류에 대한 납 동위원소 연구. *지질학회지*, 29, 387-395.
- 박계현, 김동연, 송용선, 2001, 지리산 지역 차노카이트와 함티탄철석 화강암질암의 SM-Nd 광물연대 및 성인적 관계. *암석학회지*, 10, 27-35.
- 박계현, 송용선, 박맹언, 이승구, 류호정, 2000, 동북아시아 지역 선캠브리아 지괴에 대한 암석학, 지구화학 및 지구연대학적 연구: 1. 지리산 지역 변성암의 변성연대. *암석학회지*, 9, 29-39.
- 박계현, 이호선, 정창식, 2005, 영남육괴 중부 김천, 성주 및 안의지역 화강섬록암의 스핀 U-Pb 연대. *암석학회지*, 14, 1-11.
- 박계현, 이호선, 송용선, 정창식, 2006, 영남육괴 함양, 거창 및 영주 화강암-화강섬록암의 스핀 U-Pb 연대. *암석학회지*, 15.
- 박천영, 박영석, 정연중, 1998, 번암-팔공광산 지역에 분포하는 화강암류의 Au 광화작용과 지구화학적 특성. *지구과학회지*, 19, 425-438.
- 시마무라, 1925, 한국지질도 (1 : 50,000) 진안도폭 및 설명서. 조선총독부.
- 이창신, 1994, 번암 금광상의 지화학 및 광화작용에 관한 연구. *한국자원공학회지*, 31, 364-373.
- 정재일, 김선영, 1996, 동진광산의 지질과 금은광화작용. *자원환경지질*, 29, 395-405.
- 정재일, 김선영, 나춘기, 이인성, E.M. Ripley, 1996, 북창광산의 유체포유물 및 황안정동위원소 연구. *자원환경지질*, 29, 677-687.
- 정재일, 이영엽, 나춘기, 이광식, 전서령, 1994, 전북 번암광산의 금은광화작용에 관한 연구. *지구과학회지*, 15, 459-469.
- 정창식, 장호완, 1996, 중부 옥천 변성대의 화성, 변성 및 광화작용과 지구조적 연관성 연구(I): 보은지역 화강암류의 암석화학과 동위원소 지구화학. *지질학회지*, 32, 91-116.
- 정창식, 권성택, 김정민, 장병욱, 1998, 경상분지 북부에 분포하는 온정리 화강암에 대한 암석화학적, 동위원소 지구화학적 연구: 경상분지 다른 지역과 서남 일본 내대에 분포하는 백악기-제3기 화강암류와의 비교 고찰. *암석학회지*, 7, 77-97.
- 정창식, 길영우, 김정민, 정연중, 임창복, 2004, 영남육괴 북동부 주변 지역 선캠브리아 기반암류의 지구화학적 특성. *지질학회지*, 40, 481-499.
- 홍승호, 최위찬, 1978, 한국지질도 (1 : 50,000) 금산도폭 및 설명서. 한국자원연구소.
- Chang, B.U., 1997, A study on the lead isotopic compositions of ore deposits and igneous rocks in the Gyeongsang Basin, Southeast Korea. PhD Thesis, Seoul National University, 100p.
- Chang, B.U., Chang, H.W. and Cheong, C.S., 1995, Lead isotope study on lead-zinc ore deposits in the eastern and southern parts of the Gyeongsang Basin. *Econ. Environ. Geol.*, 28, 19-24.
- Chang, H.W., Cheong, C.S., Park, H.I. and Chang, B.U., 1995, Lead isotopic study on the Dongnam Fe-Mo stanniferous deposit. *Econ. Environ. Geol.*, 28, 25-31.
- Cheong, C.-S., Kwon, S.-T. and Park, K.-H., 2000, Pb and Nd isotopic constraints on Paleoproterozoic crustal evolution of the northeastern Yeongnam massif, South Korea. *Precambrian Res.*, 102, 207-220.
- Cheong, C.-S., Kwon, S.-T. and Sagon, H., 2002, Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic investigation of Triassic granitoids and basement rocks in the northern Gyeongsang Basin, Korea: implications for the young basement in the East Asian continental margin. *The Island Arc*, 11, 25-44.
- Chung, J.-I., Na, C.-K., Lee, Y.-U., Jeon, S.-R. and Kim, S.-Y., 1995, Studies on the geology and geochemistry in the Beonam Mine, Korea. *Econ. Environ. Geol.*, 28, 623-633.
- Doe, B. R. and Stacey, J. S., 1974, The application of lead isotopes to the problems of ore genesis and ore prospect

- evaluation : A review. *Econ. Geol.*, 69, 757-776.
- Doe, B. R. and Zartman, Z. E., 1979, Plumbotectonics, The Phanerozoic, in Barnes, H.^oL., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. John Wiley, New York, 22-70.
- Frei, R., Nagler, Th.F., Schonberg, R. and Kramers, J.D., 1998, Re-Os, Sm-Nd, U-Pb, and stepwise lead leaching isotope systematics in shear-zone hosted gold mineralization: genetic tracing and age constraints of crustal hydrothermal activity. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62, 1925-1936.
- Gulson, B. L., 1986, *Lead isotopes in mineral exploration*. Elsevier, New York, 245p.
- Kim, J. and Cho, M., 2003, Low-pressure metamorphism and leucogranite magmatism, northeastern Yeongnam Massif, Korea: implication for Paleoproterozoic crustal evolution. *Precam. Res.*, 122, 235-251.
- Mabuchi, H., 1985, The lead isotope systematics in Asia and near East. Grant Report to the Ministry of Education, Science, and Culture, Japan, No. 58540375-59549377, 19p (in Japanese).
- Nie, F.-J., Jiang, S.-H., Su, X.-X. and Wang, X.-L., 2002, Geological features and origin of gold deposits occurring in the Baotou-Bayan Obo district, south-central Inner Mongolia, People's Republic of China. *Ore Geology Reviews*, 20, 139-169.
- Remus, M.V.D., Hartmann, L.A., McNaughton, N.J., Groves, D.I. and Fletcher, I.R., 2000, The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Cacapava Granite of the Brasiliano Cycle in southern Brazil. *Jour. South American Earth Sci.*, 13, 191-216.
- Rubinstein, N.A., Osera, H.A., Mallimacci, H. and Carpio, F., 2004, Lead isotopes from Gondwana polymetallic ore vein deposits, San Rafael Massif, Argentina. *Jour. South American Earth Sci.*, 16, 579-586.
- Sagong, H. and Kwon, S.-T., 1998, Pb-Pb age and uplift history of the Busan gneiss complexes in the Okcheon Belt, Korea: a comparison with the Bagdalryeong gneiss complexes in the Kyeonki Massif. *Geosciences Jour.*, 2, 99-106.
- Sagong, H., Cheong, C.-S. and Kwon, S.-T., 2003, Paleoproterozoic orogeny in South Korea: evidence from Sm-Nd and Pb step-leaching garnet ages of Precambrian basement rocks. *Precam. Res.*, 122, 275-295.
- Sasaki, A., 1987, Isotope systematics of ore leads from the Korean Peninsula and Japanese Islands. *Minining Geology*, 37, 223-226 (in Japanese).
- So, C.-S., S.-T. Yun, S.-G. Choi, Y.-K. Koh and S.-J. Chi, 1991, Cretaceous epithermal Au-Ag mineralization in the Muju-Yeongam District (Jeonju minefalized area), Republic of Korea: galena-lead and stable isotope studies. *J. Geol. Soc. Korea*, 27, 569-586.
- Tilton, G. R., 1983, Evolution of depleted mantle: the lead perspective. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 1191-1197.
- Yoon, C.-H. and Kim, C.-B., 1999, Lead isotope study of some gold-silver deposits, Korea. *Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineering*, 36, 419-427.
- Zartman, R. E. and Haines, S.M., 1988, The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reserial reservoirs - a case for bi-directional transport. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1327-1339.
- Zhai, M., Ni, Z., Oh, C.W., Gui, J. and Choi, S.G., 2005, SHRIMP zircon age of a Proterozoic rapakivi granite batholith in the Gyeonggi massif (South Korea) and its geological implications. *Geol. Mag.*, 142, 23-30.
- Zindler, A. and Hart, S.R., 1986, Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14, 493-571.

(2006년 4월 29일 접수; 2006년 5월 24일 채택)