

연화 및 장군 연-아연 광상의 Pb 동위원소 조성 및 Pb의 근원: 선캄브리아 기저 지각 및 중생대 화성암의 역할

박계현^{1,*} · 장호완²

¹부경대학교 환경지질학과, 부산광역시 남구 대연동 599-1

²서울대학교 지구환경과학부, 서울특별시 관악구 신림동

Pb Isotopic Composition of Yeonhwa and Janggung Pb-Zn Ore Deposits and Origin of Pb: Role of Precambrian Crustal Basement and Mesozoic Igneous Rocks

Kye-Hun Park^{1,*} and Ho Wan Chang²

¹Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University

²School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

요약: 연화, 장군 및 울진 Pb-Zn 광상에서 산출되는 납의 근원을 규명하기 위하여 방연석과 황철석 등의 황화광물과 주변의 석회암, 관입암 및 기반암 등에 대해 납 동위원소 분석을 실시하였다. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 그림에서 연화광산의 방연석들은 비교적 잘 정의되는 정(+)의 기울기를 갖는 직선 배열을 보이며, 한반도 선캄브리아 기저지각과 유사한 변화를 보인다. 울진광산의 방연석, 장군석회암 및 주변의 기저암체 역시 연화광산의 변화경향을 따른다. 그러나 연화광산에 비해 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값이 낮은 장군광산의 광석광물들은 연화광산의 변화경향으로부터 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값이 낮은 쪽으로 벗어난다. 경상분지 내에서 산출되는 중생대 화성암 및 광상들이 한반도의 기저암체들에 비해 훨씬 낮은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 가지는 것을 참조할 때, 장군광산의 광석광물들이 보이는 변화는 기저암체의 오래된 지각물질로부터 용출된 납과 중생대 화성암들이 갖고 있던 보다 맨틀 성분이 많이 포함된 납의 혼합을 반영하는 것으로 해석된다. 선캄브리아 기저지각의 변화경향을 비교적 잘 따르는 연화광산과 울진광산의 광석들에 포함된 납은 대부분 오래된 기저암체들로부터 유래한 것으로 보이나, 기저암체의 변화구역의 하단부에 위치하는 것을 고려할 때 중생대 화성암 기원의 납이 일정비율로 포함되었을 가능성을 배제할 수 없다.

핵심어: 납, 방사기원 동위원소, 근원 물질, 연화광산, 장군광산, 영남육괴

Abstract: Lead isotopic compositions are analyzed from the sulfide minerals of the Yeonhwa, Janggung and Uljin deposits and from host limestone, intrusives, and basement rocks to reveal the source of Pb in these deposits. In the $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ plot, Galenas from the Yeonhwa mine display relatively well defined positive linear array, similar to the Precambrian basement rocks of the Korean peninsula. A galena sample from the Uljin mine, Janggung limestone and the basement rocks also follow the variation of Yeonhwa mine. However, ore minerals from the Janggung mine, having relatively low $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ values, reveal offset from such trend toward lower $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ values. Considering the fact that Mesozoic igneous rocks and ores within the Gyeongsang basin display considerably lower $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ values than basement rocks of the Korean peninsula, the deviation of Janggung ore minerals can be interpreted as to reflect mixing between leads from old continental crustal materials and from Mesozoic igneous rocks with more mantle signature. The lead of the Yeonhwa and Uljin mine, following trend of Precambrian basement rather well, seems to have been originated mostly from such basement. However, regarding that they occupy low $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ side of the variation trend of the basement, the possibility of having some leads derived from the Mesozoic igneous rocks cannot be excluded.

Key words: lead, radiogenic isotope, source material, Yeonhwa mine, Janggung mine, Yeongnam massif

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

서 언

국내의 금속 광상들에 대하여 그동안 많은 연구가 수행되었다. 이러한 연구의 대부분은 광상의 생성과 관련한 광물조합의 공간적·시간적 변화, 생성의 온도-압력 조건, 변질대의 특성과 같이 광상의 생성환경과 생성시기 등에 관한 것이다. 그러나 광석광물들이 어디서 유래한 원소들로 만들어졌는가를 밝히는 연구는 국내에서는 그리 활발히 수행되지 못했다고 볼 수 있다. 광석을 형성하는 유용원소들의 근원을 밝히기 위한 여러 연구 수단들 중에서도 Pb 동위원소 비는 원소의 근원지를 비교적 용이하게 추정할 수 있도록 하여주며(예, Nie *et al.*, 2002; Gokce and Bozkaya, 2005), 광상의 탐사에도 유용하다(예, Gulson, 1986). 특히 많은 황화 광물들은 충분한 양의 Pb를 포함하기 때문에 분석하기가 용이하며, 거의 0에 가까운 U/Pb 비율을 갖고 있어 광화 용액의 Pb 동위원소 조성을 그대로 대표한다고 볼 수 있다. 따라서 추정되는 근원암들의 납 동위원소 값과 비교하여 납의 근원을 용이하게 추적할 수 있다.

외국에서는 이와 같은 이유로 광상성인의 연구와 탐사에 Pb 동위원소가 널리 활용되어왔으며(예, Doe and Stacey, 1974; Gulson, 1986; Frei *et al.*, 1998; Andersen *et al.*, 1998; Remus *et al.*, 2000; Nie *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2003; Rubinstein *et al.*, 2004; Gokce and Bozkaya, 2005), 지각과 맨틀의 진화 연구 등에도 납 동위원소 자료가 널리 활용되고 있다(예; Doe and Zartman, 1979; Tilton, 1983; Zinlder and Hart, 1986; Zartman and Haines, 1988).

그러나 한반도 내에 분포하는 광상에 대한 Pb 동위원소 연구는 그 수가 매우 적다. Sasaki(1987)가 한반도의 방연석에 대한 Pb 동위원소 분석을 실시하였으며, Mabuchi(1985)도 청동기 유물과 관련하여 중국, 일본의 납 광석과 함께 남한과 북한의 여러 광산으로부터 채집된 방연석 표본 30개를 분석하였다. Sasaki(1987)의 연구 결과는 개별적인 광상별로 자료가 보고되지 않았으나 전체적으로 볼 때 Mabuchi(1985)의 결과와 유사하다. 이 일본학자들의 연구는 한반도의 여러 광상들에 대한 분석자료를 보고하고 있기 때문에 전체적인 경향성을 파악하는 데 매우 유용하다. 그러나 광상별 분석 자료의 수가 적거나 주변의 관련 암석들에 대한 납 동위원소 자료가 없어 납의 근원을 추적하기에는 한계가 있다. 이후 무주-용암지구의 두성광산(So *et al.*, 1991), 경상분지 동부와 남부의 연·아연 광상들(Chang, B.U. *et al.*, 1995) 및 동남 Fe-Mo 스퀴어 광상(Chang, H.W. *et al.*, 1995)에 대한 납 동위

원소 자료가 보고되었으며, Chang(1997)은 경상분지 내의 광상과 화성암에 대한 납 동위원소 자료를 보고하였다.

이 연구에서는 주로 태백지역의 연화광산 및 장군광산을 대상으로 이들 광상을 구성하는 주성분의 하나인 Pb가 어디서 유래되었는지 그 근원에 대하여 토의하고자 한다. 연화 및 장군광산을 선택한 이유는 우선 이 광상들이 다른 광상들에 비하여 연구가 많이 되어있으며(예; 황인진, 1968; 한갑수, 1969; Yun, 1979; 이현구 외, 1990), 납 자체가 주 연구대상이 될 수 있는 한반도의 대표적인 납 광상이라는 점이다.

시료 채취 및 분석

연화광산과 장군광산의 Pb 유래를 추적하기 위하여 방연석, 황철석, 유비철석 등의 황화 광물들에 대한 납 동위원소 분석을 실시하였다. 울진광산의 방연석 1개 표본도 분석하였다. 또한 납 동위원소 조성을 비교하여 광상 납의 근원을 밝히기 위해서 장군광산의 모암인 변질을 받지 않은 장군석회암과 장군광산 주변의 화성암인 춘양화강암을 분석하였다. 신예미 지역의 석영반암 및 화강암, 원동의 석영반암 등 태백지역에서 관입암체로 산출되는 중생대 화성암들에 대해서도 납 동위원소를 분석하였으며, 이 지역의 기반암인 분천화강편마암, 홍제사화강암, 원남층군 편마암에 대하여도 분석하였다.

Pb 동위원소 분석을 위한 시료의 전처리와 동위원소 분석은 모두 한국기초과학지원연구원에서 수행되었다. Pb 동위원소 분석을 위한 시료 전처리는 표본의 종류에 따라 다르게 하였다. 0.05-1 mg 정도의 작은 알갱이로 골라낸 방연석은 석영유리 재질의 비등점하 증류장치(subboiling distillation apparatus)에 의해 정제된 6N 염산으로 녹인 후 열판위에서 건조시켰다. 여기에 테플론 재질의 관을 연결하여 제작한 비등점하 증류장치(Teflon two-bottle subboiling distillation system)로 정제한 진한 질산을 첨가하여 다시 건조시킨 후 Re 필라멘트에 없어 열이온화질량분석기(Thermal ionization mass spectrometer, VG 54-30)로 분석하였다.

방연석 이외의 황화광물들과 탄산염암은 산으로 녹인 후 음이온 교환수지를 이용하여 납을 분리한 후 방연석과 같은 방법으로 필라멘트에 없어 분석하였다. 규산염 광물이나 전암 시료들은 정제된 불산과 과염소산을 약 8:1 정도로 혼합한 산에 녹인 후에 건조시키고 다시 염산을 첨가하여 건조시키는 과정을 수차례 반복한 뒤 열판 위에서 표면이 약간 젖어 보일 정도까지

Table 1. Pb isotopic ratios for the selected samples.

Sample	Type	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
Yeonhwa Mine				
T1-1	Galena	19.345	15.841	39.338
T1-2	Galena	19.430	15.841	39.276
T1-3	Galena	19.261	15.829	39.299
T1-6	Galena	19.278	15.831	39.336
T2-1	Galena	19.253	15.808	39.259
T3-3	Galena	18.983	15.782	39.233
T3-5	Galena	19.373	15.836	39.304
T3-6	Galena	18.961	15.770	39.202
T3-8	Galena	19.219	15.813	39.290
Y5-2	Galena	18.715	15.772	39.267
Janggun Mine				
North Deposit				
JGB 01	Arsenopyrite	18.567	15.710	38.996
JGB 03	Galena	18.573	15.713	39.021
JGB 03	Pyrite	18.511	15.733	39.034
South Deposit				
JGN 12	Galena	18.461	15.683	38.920
JGN 12	Pyrite	18.555	15.697	38.950
J-1	Galena	18.558	15.702	39.012
J-3	Galena	18.532	15.685	38.974
J-4	Galena	18.450	15.682	38.965
Uljin Mine				
WJ 06	Uljin Deposit, Galena	19.264	15.825	39.391
Related Rocks				
JGB 05	Janggun Limestone	19.360	15.798	39.927
JGB 13	Chunyang Granite	18.176	15.681	38.420
GB 20	Wondong Qz Porphyry	18.831	15.776	39.147
K 17	Sinyemi Granite	18.167	15.606	38.880
K 25	Sinyemi Qz Porphyry	18.337	15.671	39.293
WN 01	Wonnam Gneiss	18.435	15.767	40.478
BC 28	Buncheon Granite Gneiss	30.714	17.369	48.901
HG 2	Hongjesa Granite	18.418	15.741	39.396

건조시켰다. 여기에 1 mol의 정제된 HBr을 가한 후 음이온 교환수지 컬럼에 옮겨 납을 분리하였다. 납 분리 후의 필라멘트에 없는 방법과 질량분석기에 의한 분석법은 방연석과 동일하다. 시료 분석 시 NIST SRM-981 Pb 표준물질을 함께 분석하여 질량분석기의 동위원소 분별작용을 보정하였다. 분석 전 과정에서 배경 값은 최대 1ng 이하로 무시해도 좋을 만큼 낮았다.

결과 및 토의

연화광산

연화광산의 시료들은 모두 방연석이며 이들로부터

얻은 Pb 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 보인다 (Table 1).

지구조적 환경에 따라 특징적인 값을 보이는 납 동위원소의 특성(예, Doe and Zartman, 1979; Zartman and Doe, 1981; Zindler and Hart, 1986)을 감안하면, 상대적으로 높은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값 및 높은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 갖는 연화광산의 납 동위원소 조성은 맨틀이나 하부지각과는 많이 다르며 상부지각의 영역과 중첩된다. 즉, 연화광산의 납이 오래된 지각물질의 영향을 받아 생성되었음을 시사한다. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 상관도표

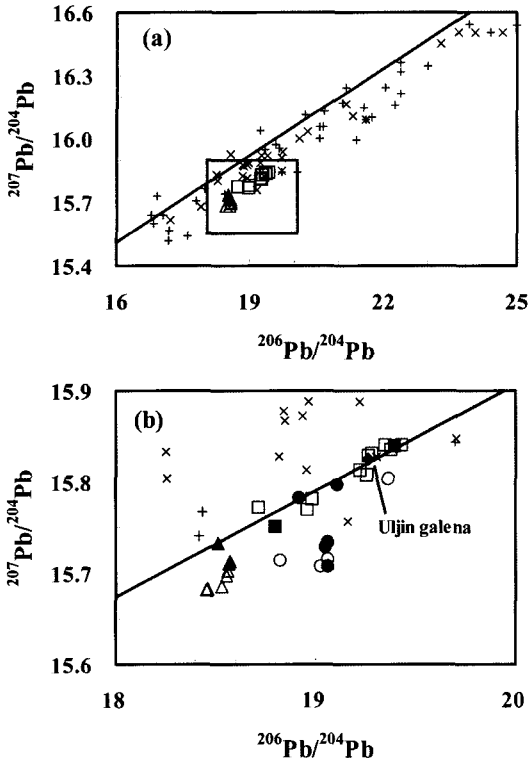


Fig. 1. a) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ variation diagram for the sulfide minerals from Yeonhwa (open squares) and Janggun (filled triangles for north and open triangle for south) mines. Pb isotope composition of the Precambrian basement rocks of Korean peninsula (X for the Yeongnam massif and + for the Gyeonggi massif) are also plotted. See the text for the Pb isotopic data sources. Reference line was constructed from Buncheon granite gneiss and corresponds to the age of ca. 1.93Ga. b) Enlarged plot of the square in a). Line in this figure indicates best fit for the Yeonhwa mine, occupying relatively low $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ side of the basement trend. Diamond indicates the composition of a galena from Uljin mine. Data from Dongnam Fe-Mo skarn deposit (Chang, H.W. *et al.*, 1995) are also plotted in this figure (solid circles are ores, open circles are related igneous rocks, and solid squares are Pungchon limestone).

에서 연화광산의 방연석들은 뚜렷한 정(+)의 상관관계를 나타낸다(Fig. 1). 이러한 선형 분포는 약 19억년의 연대에 해당하는 것으로 앞에서 언급한 것과 같이 오래된 지각물질의 영향을 시사한다. 이러한 연대는 영남육괴 내에 분포하는 선캄브리아 기저 암석들의 일반적인 연대(예, 박계현 외, 1993; 박계현, 1996; Turek and Kim, 1996; 박계현 외, 2001; Chang *et al.*, 2003; Sagong *et al.*, 2003; 정창식 외, 2004)와 일치하는 값임에 주목할 필요가 있다. 울진광산의 방연석 1

개 표본의 Pb 동위원소 분석치는 연화광산의 변화 범위 중 높은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 쪽에 놓인다(Fig. 1).

높은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 가짐으로써 전형적인 고기 상부지각의 특징을 잘 보이는 분천화강암질편마암, 홍제사화강암, 내덕리화강암, 농거리화강암 등 연구지역에 인접한 영남육괴의 북동부의 선캄브리아 기저암석들은 매우 넓은 범위에 걸친 Pb 동위원소 값의 변화를 보이며(박계현 외, 1993; Cheong *et al.*, 2000; Kim and Cho, 2003; 정창식 외, 2004), $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 상관도표 상에서 아주 잘 형성된 직선형태의 정(+)의 변화를 보인다(Fig. 1). 영남육괴 기저암석들이 만드는 변화경향은 연화광산과 마찬가지로 약 19억년에 해당하는 기울기를 갖는다. 이러한 경향은 경기육괴의 선캄브리아 기저암석들에 대한 자료(권성택 외, 1995; 박계현, 1996; 김정환 외, 1997; Sagong and Kwon, 1998)를 모두 포함하여도 크게 변하지 않는다. 다만 경기육괴의 암석들에 비하여 영남육괴의 암석들의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 및 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 조성이 훨씬 더 높은 값까지 변화를 보인다.

연화광산의 광석들이 선캄브리아 기저암석들의 특징적인 Pb 동위원소 변화를 잘 따르고 있음은 상당부분의 납이 선캄브리아 기저암석들에서 유래하였음을 시사하는 것으로 해석할 수 있다. 즉, 광화작용시 기저지각을 순환하는 열수가 지각 내에 존재하던 납성분들을 용출하여 현재의 위치에 광상을 형성한 것으로 해석할 수 있다. 이 경우 광상의 납 동위원소 조성은 열수가 순환하던 큰 부피의 기저지각 평균조성을 반영하여야 할 것이다. 그러나 연화광산의 납 동위원소 조성은 주변의 영남육괴의 선캄브리아 변성암들의 변화영역 중에서 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값이 비교적 낮은 쪽에 치우쳐 위치한다. 또한 같은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 갖는 선캄브리아 암석들과 비교시에는 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값이 상대적으로 낮은 부분에 위치하는 특징을 보인다. 이와 같이 연화광산이 선캄브리아 암석들의 변화경향 하단부에 놓이는 것은 광상의 하부에 놓인 선캄브리아 기저지각이 갖는 특성일 수도 있으나, 연화광산에 배태된 납이 모두 다 선캄브리아 지각에서 유래되지는 않았을 가능성도 내포한다. 즉 광상형성과 직접적인 관련을 갖는 화성활동에 수반된 Pb의 일부가 일정한 비율로 포함되어 연화광산 광석광물의 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값이 일반적인 선캄브리아 암석들보다는 상대적으로 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 및 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 갖게 변화하였을 가능성도 있다.

장군광산

장군 광산에서는 부광체로부터 방연석, 황철석 및 유

비철석 각 1개씩의 표품, 납광체로부터 방연석 4개 및 황철석 1개 표품을 분석하여 Pb 동위원소 값을 얻었다. 방연석 이외의 황철석과 유비철석에 대한 우라늄 및 토륨 분석결과 U/Pb 및 Th/Pb 값이 매우 낮아 방연석과 마찬가지로 이들 시료의 Pb 동위원소 분석치는 광석 생성당시의 초기치를 나타낸다고 볼 수 있다. 황화광물들 사이에는 광물의 종류에 따른 납 동위원소 값의 차이가 관찰되지 않는다.

장군광산의 광석광물 시료들은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값의 범위가 각각 18.43-18.57, 15.68-15.73, 38.97-39.03으로 연화광산의 방연석 시료들의 납 동위원소 조성과 분포범위가 겹치지 않으며, 연화광산에 비하여 낮은 방사기원 Pb 동위원소 값(즉, 더 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값)을 가지며, 전체적으로 훨씬 좁은 범위의 Pb 동위원소 조성 변화를 나타낸다(Fig. 1). 하지만 좁은 범위의 변화임에도 불구하고 장군광산의 납광체와 북광체의 광석들은 뚜렷이 구분되는 값을 보인다. 장군광산 북광체의 경우 연화광산이 형성하는 직선형 변화경향의 연장선 부근에 놓이지만 납광체는 이러한 변화경향에서 벗어난 곳에 위치한다. 장군광산 북광체와 납광체의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값은 유사하나 북광상지역의 시료가 납광상 지역보다는 높은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 및 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 비를 보인다.

연화 및 장군광산에 대한 기존 납 동위원소 연구결과와의 비교

Sasaki (1987) 및 Mabuchi(1985)의 논문 모두에 연화광산과 장군광산의 광석광물들에 대한 분석결과가 포함되어 있다. 그러나 Sasaki(1987)의 경우는 광상별로 구분하여 자료를 표시하지 않아 이번 연구의 결과와 직접적인 비교는 불가능하다. 한편 광상별로 분석 자료의 목록을 수록한 Mabuchi(1985)과 비교해 보면 Mabuchi(1985)의 연화광산, 장군광산 및 울진광산의 Pb 분석값은 이 연구와 동일한 특징을 보여주고 있다. 즉, Mabuchi(1985)의 결과에서도 연화광산과 장군광산의 납 동위원소 분석값의 분포범위는 서로 겹치지 않으며, 연화광산의 시료들이 상대적으로 높은 방사기원 Pb 동위원소를 갖고 있고, 장군광산은 비교적 균질하며 연화광산은 비교적 넓은 범위의 변화를 보이는 경향이 잘 나타나고 있다. 울진광산은 연화광산의 변화범위 중에서 비교적 높은 값을 갖는 부분에 위치한다. 이것은 이러한 특징들이 시료집단에 따른 편향된 결과를 보이는 것이 아니라, 연화, 장군 및 울진광산의 고유한 변화를 나타내고 있음을 시사한다.

태백지역의 다른 광상들 자료와의 비교

연화광산, 울진광산 및 장군광산의 자료들과 비교할 수 있는 태백지역의 다른 광상들에 대한 납 동위원소 조성자료는 많지 않다. Mabuchi(1985)가 분석한 신에미광산의 방연석 2개 표품 역시 연화광산의 분석값 범위에 포함이 되며 높은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 쪽에 놓인다. 그러나 Chang, H.W. et al.(1995)의 동남 Fe-Mo 스키른 광산의 경우는 다소 다른 경향을 보인다. 광석들의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값은 연화광산의 조성 범위에 포함되나 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 의 값이 상대적으로 낮은 쪽을 향한 변화를 보인다(Fig. 1b). 연화광산보다 낮은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 갖는 것은 장군광산의 납광체 경우와 일치하는 변화로 주목할 필요가 있다.

광석광물 이외의 주변 암석 자료

광석광물이 갖는 납의 근원은 몇 가지의 경우로 나누어 생각할 수 있다. 우선 광상을 형성시키는데 참여한 화성암으로부터 유래한 경우를 가정할 수 있으며, 반대로 광석이 배태한 모암으로부터 용출되었을 경우도 생각해 볼 수 있다. 경우에 따라서는 화성암의 관입으로 형성된 지각내 열수의 순환이 큰 부피의 지각내 성분들을 용출시켜 모암에 광상의 형태로 이동시켰을 수도 있다. 물론 관련 화성암과 지각물질 모두에서 유래하였을 가능성도 있다. 따라서 납의 근원을 살펴보기 위해서는 관련 화성암, 모암 및 광역적인 주변의 지각암석들에 대한 납 동위원소 조성을 모두 살펴볼 필요가 있다.

선캠브리아 암체의 납동위원소 자료와의 비교

연화광산과 달리 전체적으로 비교적 좁은 범위의 변화를 보이는 장군광산은 연화광산처럼 한반도의 선캠브리아 암석들을 잘 따르는 변화경향을 보이지 않으며, 납광체와 북광체가 구분되는 조성을 갖고 있다. 장군광산 납광체의 경우 연화광산의 광석시료들이 만드는 변화경향의 연장선으로부터 더 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 및 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 갖는 쪽으로의 변화를 보인다. 한편 북광체의 한 시료는 연화광산의 변화경향 연장선상에 놓이나 다른 시료들은 납광체쪽으로는 변화를 보인다. 한반도 선캠브리아 암석들의 경우 영남육괴와 경기육괴 모두를 포함해도 장군광산의 경우처럼 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 및 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 보이는 것은 드문편에 속하기 때문에 장군광산의 광석은 선캠브리아 기저지각으로부터 유래된 납이 포함되었다 하더라도 그 비율은 연화광산의 경우보다 상당히 떨어질 것으로 생각된다. 앞에서

살펴보았던 동남 스킨광상(Chang, H.W. *et al.*, 1995)의 경우 역시 선캠브리아 암석들과 비교시 상대적으로 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 및 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 갖는 쪽으로의 변화를 보인다. 특히 동일한 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값에서의 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값이 낮은 쪽으로 치우쳐 분포한다. 이러한 변화 경향은 광상의 생성 당시에 선캠브리아 지각보다 상대적으로 낮은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 갖는 또 다른 납의 근원 물질이 존재했던 것으로 유추할 수 있다.

광상 주변의 모암 및 화성암 자료와의 비교

장군광산 남광체에서 확실하게 보이는 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 및 낮은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값 쪽으로의 변화원인을 밝히기 위해 장군광산의 모암인 장군 석회암과 장군광산에 인접하여 상당한 규모로 분포하는 춘양 화강암의 납 동위원소 분석 자료를 광석광물 값과의 비교하였다. 한편 태백지역의 다금속 광산들의 생성시기는 중생대에 집중된 것으로 나타나고 있으며(박희인 외, 1988), 광상 주변에서 중생대의 화성암체가 자주 발견된다. 따라서 연화와 장군 광산들의 Pb도 중생대 화성암으로부터 유래되었을 가능성이 매우 높다. 이 연구에서는 중생대의 화성암들에 포함된 납의 동위원소 조성을 알아보기 위하여 관입시기가 백악기로 밝혀진 원동 연아연 광산의 석영반암과 신예미 연아연 광산의 석영반암과 화강암에 대하여도 납 동위원소 조성을 분석하였다.

광상 주변의 모암 및 중생대 화성암들에 대한 분석 결과를 보면 장군 석회암과 춘양 화강암이 각각 1개 시료이긴 하지만 장군광산의 황화광물들과는 상당히 다른 값을 보인다. 장군 석회암의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값은 장군광산보다 훨씬 높으며 연화광산의 범위 중에서도 높은 쪽에 위치한다(Fig. 2). 동남 스킨 광상에서 보고된 풍촌석회암의 Pb 동위원소 조성(Chang, H.W. *et al.*, 1995)도 연화광산의 변화선에 거의 일치하는 값을 보인다(Fig. 1b). 춘양화강암 시료는 장군광산의 남광체의 90-1 공의 385미터 깊이에서 채취한 시료로 약간 풍화된 중립질의 복운모 화강암이며 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 가 장군광산의 광석들보다 더 낮은 쪽에 놓인다(Fig. 2). 한편 원동광산의 석영반암은 장군광산의 황화광물들에 대한 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 보다는 높으며 연화광산의 변화 범위 중 낮은 쪽에 위치한다(Fig. 2). 이에 비해 신예미광산의 석영반암과 화강암은 장군광산보다도 낮은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 보인다(Fig. 2).

장군광산의 Pb 동위원소 값이 춘양 화강암을 비롯한 일부 중생대 화성암과 장군석회암의 사이에 놓이는 것을 단순히 해석하자면 장군광산의 Pb가 석회암질 모

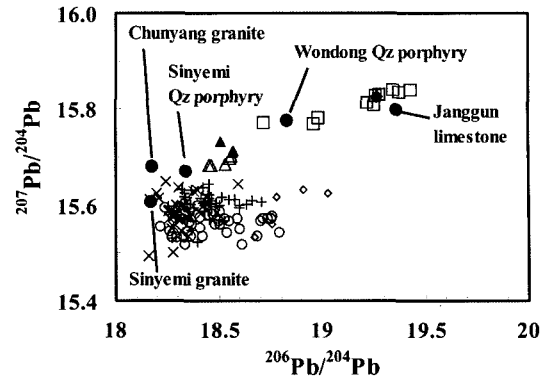


Fig. 2. Pb isotope compositions of Janggung limestone and Mesozoic igneous rocks of the Taebaek area (solid circles) are plotted with the sulfides from Yeonhwa (open squares), Janggung (triangles) and Uljin (diamond) ore deposits. Triassic granites (open circles, from Cheong *et al.*, 2002), Onjeongni granite (diamonds, from Cheong *et al.*, 1998), Cretaceous igneous rocks (+) and ores (X) from the Gyeongsang basin (from Chang, 1997) are also shown for the comparison.

암에서 유래한 납과 이를 관입하는 중생대 화성암으로부터 유래한 납 사이의 혼합으로 형성된 것으로 설명될 수도 있다. 동남 스킨 광상(Chang, H.W. *et al.*, 1995)의 경우도 광상주변의 중생대 화성암들은 상대적으로 낮은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 보이며, 전체적으로 광산의 납 동위원소 조성은 석회암과 화성암의 값들 사이에 놓인다. 그러나 석회암의 Pb 함량은 통상 1ppm이하로 매우 낮아 납광산의 Pb를 이러한 혼합에 의해 생성시키려면 엄청난 부피의 석회암이 요구된다. 또한 야외에서 매우 넓은 범위의 장군석회암이 변질 받은 증거가 보이지 않기 때문에 장군광산의 Pb가 춘양화강암 및 춘양화강암과 접촉하는 장군석회암으로부터 직접 유래되었다고는 보기는 어렵다.

중생대 화성활동과 관련된 납 동위원소 조성과의 비교

화성활동에 수반된 납동위원소 조성을 파악하기 위해서 앞에서 살펴본 광화대 주변에서 발견된 화성암체 이외에 연구지역과 인접한 영남육괴 북동부 지역의 삼척기 심성암체인 영덕화강암, 영해섬록암 및 청송화강섬록암(Chong *et al.*, 2002) 및 백악기 온정리화강암(정창식 외, 1998)에 대한 납동위원소 조성을 이 연구의 자료와 함께 Fig. 2에 도시하였다. 또한 한반도의 광화작용에 가장 큰 영향을 미친 것으로 알려진 백악기의 화성활동에 수반된 납 동위원소 조성도 살펴보기 위해서 경상분지의 광상 및 화성암 자료들(Chang,

1997)도 Fig. 2에 포함하였다.

온정리 화강암을 제외하면 경상분지 내의 백악기 화성암들과 광상들은 서로가 거의 같은 Pb 동위원소 조성을 보인다. 한편, 영남육괴 북동부의 삼첩기 심성암체들은 경상분지 내의 백악기 화성암들보다 다소 넓은 범위의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 변화를 보인다. 전체적으로 영남육괴 북동부의 삼첩기 심성암들과 경상분지 내의 화성암체 및 광상들은 장군 및 연화광산에 비하여 훨씬 좁은 범위의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 변화를 보이며 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값은 훨씬 낮다. 따라서 중생대의 화성활동이 태백지역의 광상형성에 크게 기여하였다 하더라도 궁극적인 Pb의 공급원으로는 부적합하다는 판단을 내릴 수 있다. 즉 일부의 Pb가 중생대 화성암으로부터 유래되었을 가능성을 전혀 배제할 수는 없으나 상당 부분의 Pb는 그보다 더 오래된 상부지각으로부터 유래되었을 것으로 사료된다.

선캠브리아 기저로 부터의 납과 중생대 화성활동에 수반된 납의 혼합

앞에서 살펴본 바에 의하면 연화 및 장군광산의 Pb는 선캠브리아 지각이나 중생대 화성암 어느 한 가지에 의해 전체 Pb를 공급받은 것으로 보이지 않으며 그보다는 둘 모두로부터 유래된 Pb 사이의 혼합으로 해석된다. 이 경우 선캠브리아 지각의 값에 보다 가까운 변화를 보이고 있으므로 최소한 50% 이상의 납이 선캠브리아기의 기저로부터 공급된 것으로 볼 수 있다. 그러나 아직은 자료의 부족으로 자세한 정량적인 계산을 하는 것은 별 의미가 없다고 판단된다. 또한 혼합의 과정도 관입한 화성암이 주로 열원으로부터 작용하면서 약간의 Pb를 내놓고 나머지 Pb는 선캠브리아 지각 내의 순환수에 의하여 용출된 것인지, 아니면 선캠브리아 지각을 관입한 화성암이 높은 정도의 혼합과정을 겪으면서 선캠브리아 지각의 Pb가 화성암 내에 섞이게 되고 이 Pb가 나중의 광화작용시 광상에 배태된 것인지는 더 자세한 연구가 필요하다.

결 론

1. 연화광산과 울진광산의 방연석들은 한반도의 선캠브리아 기저암체들과 동일한 연대를 나타내는 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 조성변화를 보인다. 이는 이 광상들의 형성에 지각물질이 크게 관여한 것으로 판단된다. 그러나 연화광산과 울진광산 방연석들의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 조성이 기저암체의 변화구역의 하단부에 위치하는 것을 고려하면 상대적으로 낮은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 갖는 중생대 화성암 기원의 납이 일정비율로 포함되어 있을

가능성도 배제할 수 없다.

2. 장군광산의 광석광물들은 선캠브리아 기저암체들의 변화경향을 비교적 잘 따르는 연화광산에 비해 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값이 낮으며, 연화광산의 변화경향으로부터 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값이 낮은 쪽으로 벗어난다. 이러한 차이는 경상분지 내에서 산출되는 중생대 화성암 및 광상들과 영남육괴 북동부의 중생대 심성암체들이 한반도의 기저암체들에 비해 훨씬 낮은 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값을 가지는 것과 일치하는 변화이다. 따라서 장군광산의 광석광물들은 기저암체의 오래된 지각물질이 갖고 있는 납과 중생대 화성암들이 갖고 있던 맨틀성분이 보다 많이 포함된 납의 혼합에 의해 형성된 것으로 해석된다.

사 사

이 연구는 한국과학재단의 특정기초과제(R01-2004-000-10825-0)에 의해 지원되었으며 이에 감사드린다.

참고문헌

- 권성택, 이진한, 박계현, 전은영, 1995, 단양 천동리 지역 옥천대/영남육괴의 접촉관계와 소위 화강암질 편마암의 Pb-Pb 연대. 암석학회지, 4, 144-152.
- 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, 김동연, 송용선, 2001, 지리산 지역 차노카이트와 합티탄철석 화강암질암의 Sm-Nd 광물연대 및 성인적 관계. 암석학회지, 2001.
- 박계현, 정창식, 이광식, 장호완, 1993, 태백산지역의 고기 화강암 및 화강편마암류에 대한 납 동위원소 연구. 지질학회지, 29, 387-395.
- 박희인, 장호완, 진명식, 1998, 태백산지역내 광상의 생성 연령. 광산지질, 21, 57-67.
- 이현구, 고석진, N. Imai, 1990, 장군광산의 연, 아연, 은 및 철광상의 성인과 지질구조와의 관계-광상 생성의 지질구조 규제와 모암의 변질. 광산지질, 23, 161-181.
- 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, 김영우, 김정민, 정연중, 임창복, 2004, 영남육괴 북동부 주변 지역 선캠브리아 기반암류의 지구화학적 특징. 지질학회지, 40, 481-499.
- 한갑수, 1969, 연화광산의 지질광상. 광산지질, 2, 81-90.
- 황인전, 1968, 삼한장군광산조사보문. 광산지질, 1, 934.
- Andersen, T. and Grorud, H.-F., 1998, Age and lead isotope

- systematics of uranium-enriched cobalt mineralization in the Modum complex, South Norway implications for Precambrian crustal evolution in the SW part of the Baltic Shield. *Precam. Res.*, 91, 419-432.
- 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, 100 p.
- 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., Turek, A. and Kim, C.-B., 2003, U-Pb zircon geochronology and Sm-Nd-Pb isotopic constraints for Precambrian plutonic rocks in the northeastern part of Ryeongnam massif, Korea. *Geochem. J.*, 37, 471-491.
- 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. *Precam. 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.
- 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. L., 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.
- Gokce, A. and Bozkaya, G., 2005, Lead and sulfur isotope evidence for the origin of Inler Yaylasi lead-zinc deposits, Northern Turkey. *J. Asian Earth Sci.*, in press.
- 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., Oster, H.A., Mallimacci, H. and Carpio, F., 2004, Lead isotopes from Gondwana polymetallic ore vein deposits, San Rafael Massif, Argentina. *J. South American Earth Sci.*, 16, 579-586.
- Sagong, H. and Kwon, S.-T., 1998, Pb-Pb age and uplift history of the Busan gneiss complex in the Okcheon Belt, Korea: a comparison with the Bagdalryeong gneiss complex in the Kyeonki Massif. *Geosciences J.*, 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. *Mineralogical Magazine*, 37, 223-226 (in Japanese).
- So, C.-S., S.-T. Yun, S.-G. Choi, Y.-K. Koj and S.-J. Chi, 1991, Cretaceous epithermal Au-Ag mineralization in the Muju-Yeongam District (Jeonju mineralized 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.
- Turek, A. and Kim, C.-B., 1996, U-Pb zircon ages for Precambrian rocks in southwestern Ryeongnam and southwestern Gyeonggi massifs, Korea. *Geochem. J.*, 30, 231-249.
- Yun, S., 1979, Geology and skarn ore mineralization of the Yeonwha-Ulchin zinc-lead mining district, southeastern Taebaegsan region, Korea. Ph.D. thesis, Stanford University, 306p.
- Zartman, R. E. and Haines, S.M., 1988, The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs - a case for bi-directional transport. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1327-1339.
- Zhang, L., Shen, Y. and Ji, J., 2003, Characteristics and genesis of Kanggur gold deposit in the eastern Tianshan mountains, NW China: evidence from geology, isotope distribution and chronology. *Ore Geology Reviews*, 23, 71-90.
- Zindler, A. and Hart, S.R., 1986, Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14, 493-571.

(2005년 8월 12일 접수; 2005년 9월 2일 채택)