

납동위원소비 분석을 활용한 인용사지 출토 청동기의 원료 산지 연구

이은우 | 김소진* | 한우림* | 한민수* | 황진주¹
국립중앙문화재연구소, *국립문화재연구소 보존과학연구실

Lead Isotope Analysis of Bronze Artefacts Excavated from Inyongsaji Site

Eun Woo Lee | So Jin Kim* | Woo Rim Han* | Min Su Han* | Jin Ju Hwang¹

Jungwon National Research Institute of Cultural Heritage, Chungju, 380-230, Korea

*Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea

¹Corresponding Author: kwkhjj@korea.kr, +82-42-860-9273

초록 인용사지에서 출토된 청동기 5점으로부터 채취한 시료를 대상으로 원료의 기원과 이동을 확인하기 위해 성분분석 및 납동위원소비 분석을 실시하였다. 인용사지에서 출토된 청동기는 구리 및 주석의 이원계 합금으로 제작되어 납이 인위적으로 첨가되지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 출토 청동기의 납동위원소비 분석 결과, Mabuchi(1985)의 분포도에 의해 한반도 남부 및 중국 남부 지역에 포함됨을 확인하였으며, 한반도 납동위원소 분포도에 도시하여 태백산분지인 Zone 2 및 옥천변성대에 해당하는 Zone 3에 위치함을 알 수 있었다. 대상 유물은 모두 납의 함량이 상당히 적은 주석청동으로, 이때의 납동위원소비는 구리 광석의 산지에서 기인하는 것으로 추정할 수 있다. 납동위원소비 분석은 납을 미량으로 포함한 모든 유물에 적용 가능하므로, 다양하게 해석할 수 있으며, 추가적인 데이터의 확보와 연구를 통해 산지 추정 연구의 신뢰성을 높일 수 있을 것이라 판단된다.

중심어: 인용사지, 납동위원소비, 산지, 주석청동, 열이온화질량분석기

ABSTRACT Chemical and Pb isotope analysis were performed in order to determine the origin of bronze artefacts excavated from the Inyongsaji site in South Korea. The result of ICP-MS shows that they are tin bronzes in which lead was not intentionally added during production. Pb isotope data analyzed by TIMS are plotted in the southern region of Korea and China of the distribution map drawn by Mabuchi(1985). On the other hand, the identical isotope data are plotted in the Taebaek basin and the Olcheon metamorphic belt correspondent to zone2 and zone3 respectively. It is believed that the isotope data on the tin bronzes which have very low lead content can be used to trace the origin of copper ore rather than those of either lead or tin ore. Pb isotope analysis allows diverse interpretation as it can be applied to any object containing trace amounts of lead. In addition, accumulation of isotope data as well as further studies will improve reliability of the provenance studies.

Key Words: Inyongsaji, Pb isotope, Provenance, Tin bronze, TIMS

1. 서론

청동기는 문화이동의 특성 및 교역 관계를 확인할 수 있는 중요한 문화유산으로써 유물 내부에 존재하는 납의 동위원소비를 이용한 원료의 산지 추정 연구에 다양하게 활용되고 있다. 납은 원자번호가 82이며, 204·206·207·208의 동위원소를 갖는 원소로써 이 중 ^{204}Pb 는 방사성 붕괴에 의해 생성되지 않고 그 값의 변화가 없는 안정동위원소이다. 반면 ^{206}Pb 는 ^{238}U , ^{207}Pb 는 ^{235}U , 그리고 ^{208}Pb 는 ^{232}Th 의 방사성 붕괴에 의해 생성된 것으로써 이들은 기존의 ^{204}Pb 와 혼합되어 특정한 납동위원소비를 갖는 방연석을 형성하게 된다. 이렇게 생성된 납동위원소비는 광산마다 고유의 값을 가지므로 납을 함유한 유물의 산지 정보를 제공할 수 있다(Gale *et al.*, 1999; Mabuchi, 1985). 납동위원소비 분석법은 처음 지질학 분야에서 연대측정에 사용되었으며, 문화재 분야로의 활용은 1960년대 초 Brill과 Wampler의 유리 및 동전 등 금속에 대한 연구를 통해 시작되었다. 중국의 경우 상왕조의 청동유물 12점을 분석한 Jin에 의해, 일본의 경우 1976년부터 연구결과를 발표한 야마자키 카즈오(山崎一雄)와 무로즈미 마사요(室住正世)에 의해 문화재에 대한 납동위원소비를 이용한 연구가 본격화되었다고 볼 수 있다(Cui, 2011; Hirao, 2001). 우리나라의 경우 최주(Choi *et al.*, 1986)에 의해 최초로 발표된 이후로 납동위원소비를 이용한 산지 추정 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 최근에는 납 동위원소비와 미량원소의 연구를 통한 유물과 특정 광석의 산지 연구가 활발히 진행되고 있으며(Stos-Gale *et al.*, 2009), 납동위원소비 이외에 다른 원소의 동위원소비를 이용한 산지 추정 연구도 시도되고 있다. 구리 동위원소의 분별 정출값(fractionation)을 통한 원료 공급지 연구(Mathur *et al.*, 2009)와 납 동위원소비와 구리 동위원소비의 상관관계도를 이용한 동전의 산지연구(Klein *et al.*, 2004)가 수행되었으며, 주석 동위원소를 이

용한 산지 추정 결과가 보고된 바 있다(Haustein *et al.*, 2010).

본 연구는 경상북도 경주시 인왕동에 위치한 통일신라 시대 절터인 인용사지(仁容寺址)에서 출토된 청동기 중 청동완(Bowl), 청동개(Lid), 청동완(Bowl of Bowl with Lid), 청동개(Lid of Bowl with Lid), 청동대단금구(Belt Pendant)로부터 시료를 채취하여 원료의 산지를 추정하고자 하였다.

2. 연구대상 및 방법

경주 남산의 최북단에 위치한 인용사지(仁容寺址) 유적은 삼국통일의 일익을 담당했던 김인문을 위하여 지은 사찰로 알려져 있는 유적으로 주변에 재매정지, 천관사지 등이 형성되어 있다. 삼국사기와 삼국유사를 종합해볼 때 늦어도 7세기 말엽인 삼국시대 말에 창건되어 통일신라 말경까지 경영된 것으로 추정된다. 인용사지에서는 백제와 동일한 방법으로 구축된 와적기단 유구 및 기와, 지진구, 목제품, 금속유물 등이 출토되어 당시의 생활을 확인할 수 있다(Gyeongju National Research Institute of Cultural Heritage, 2013).

그 중 연구에 활용된 청동기는 총 5점이며, 청동개 및 청동완(GIB-1 및 GIL-1)은 한 쌍으로 담장 11 노출 시 출토되었다. 또 다른 청동완(GIB-2)은 건물지 26 조사 시 발견되었으며 청동개(GIL-2)는 서연지 2차호안의 석축에서, 청동대단금구(GIP)는 담장 12 부근에서 출토되었다(Table 1). 분석을 위한 청동기 시편은 다이아몬드휠을 사용하여 표면으로부터 소량 채취한 후 분석을 위해 각각 나누어 준비하였다.

납동위원소비 분석은 열이온화질량분석기(Thermal Isotope Mass Spectrometer, Isotope-T, IsotopX, England)를 이용하여 실시하였다. 분석을 수행하기 전 질산과 염산

Table 1. Summary information on the bronze artifacts from Inyongsaji.

No.	Artifact	Bronze identification	Context	Analysis
1	Bowl	GIB-1	building	ICP-MS, TIMS
2	Lid	GIL-1	west pond	ICP-MS, TIMS
3	Bowl with lid (bowl)	GIB-2	wall	ICP-MS, TIMS
4	Bowl with lid (lid)	GIL-2	wall	TIMS
5	Belt Pendant	GIP	wall	ICP-MS, TIMS

Table 2. Average concentrations of elements in the bronze objects excavated from the Inyongsaji by ICP-MS.

wt%	Cu	Sn	Pb	Zn	Ag	Ni	Co	Sb	Fe	As	Total
Bowl	70.3	19.4	0.028	0.013	0.200	0.130	0.005	0.016	N.D.	0.024	90.1
Lid	75.5	24.3	0.220	N.D.	0.037	0.095	0.002	0.260	0.260	0.300	101.0
Bowl with Lid (bowl)	58.0	25.6	0.067	0.009	0.150	0.014	0.004	0.021	0.210	0.067	84.2
Belt Pendant	79.7	21.6	0.036	N.D.	0.066	0.270	0.013	0.016	0.130	0.040	101.9

N.D. : Not Detected

Table 3. Lead isotope data of bronze objects from Inyongsaji.

	Lead Isotope data				
	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb
Bowl	18.88	15.75	39.25	0.8345	2.078
Lid	18.06	15.71	38.88	0.8698	2.153
Bowl with lid (bowl)	18.20	15.64	37.91	0.8595	2.083
Bowl with lid (lid)	18.30	15.67	38.64	0.8565	2.112
Belt Pendant	18.84	15.74	39.05	0.8356	2.072

을 1:3으로 혼합한 용액으로 시료를 완전 용해한 후 음이온 교환수지로 고순도의 납을 추출하였다. 분석은 정적인 모드(Static mode, N-20, 4s integration)로 1,200℃에서 실시하였으며, 외부보정을 위해 NBS981도 함께 분석하였다. 2σ % 분석 표준오차는 0.3% 미만이었으며, ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb=16.891±0.004, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb=15.439±0.005, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb=36.507±0.028, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb=0.9140±0.0002, ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb=2.1612±0.0016 (N=30, 2σ SE) 였다. 납동위원소비 분석은 한국기초과학지원연구원에서 수행하였다.

성분분석은 유도결합플라즈마질량분석기(ICP-MS, Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ELAN DRC-e, PerkinElmer, America)를 사용하여 10개의 원소(Cu, Sn, Pb, Zn, Ag, Ni, Co, Sb, Fe, As)의 분석을 실시하였다. 시료 채취 후 초음파세척을 통해 표면 오염물을 제거한 후 105℃에서 24시간 건조하였다. 시료를 용해시키기 위해 질산(HNO₃)을 첨가한 후 가열하였다. 분석은 총 5회 실시한 후 최대·최소 값을 제외한 3개의 평균 값을 구하였으며, 보정은 표준샘플(UE13-1 및 UE52-2, Center Technique des Industries de la Fonderie, France)을 사용하였다. 청동개(GIL-2)의 경우 표면부식이 심하게 진행되어 분석이 어려운 이유로 성분분석 대상에서 제외하였다.

3. 결과 및 고찰

청동개(GIL-2)를 제외한 나머지 4점의 성분분석 결과를 통해 모두 납의 함량이 적은 이원계 주석청동 합금으로 확인되었다(Table 2). 부식으로 인해 성분분석을 수행할 수 없었던 청동개(GIL-2)를 비롯하여, 2점의 청동완의 경우도 부식으로 인해 성분분석의 총 합이 100%가 되지 못했다. 주성분인 Cu와 Sn 이외에 다른 원소의 함량은 모두 1wt.% 미만이었으며, 부식이 많이 진행되어 성분분석에 오차가 있을 것으로 예상되는 청동완(GIB-2)을 제외한 청동완(GIB-1) 및 2점의 청동개의 Cu : Sn의 합금비는 70.3 ~ 79.7 : 19.4~24.3wt.%로 확인되었다. 납이 첨가되지 않음을 미루어보아 형태 제작에 중점을 두는 제기용 청동제품에 비해 실용성도 고려하여 제작하였을 가능성이 있다.

인용사지 출토 청동기 5점의 납동위원소비를 TIMS로 분석한 결과는 table 3과 같다. 납동위원소비의 범위는 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb값이 18.0610~18.8848, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb값이 15.6444~15.7588로 확인되었다. 하지만 인용사지에서 출토된 청동용기는 앞서 언급한 성분 분석 결과를 통해 납의 함량이 1wt.%미만으로 나타나, 의도적인 납의 첨가가 이루어지지 않았다. 제작 당시 의도적으로 첨가되어 납의 함량이

1~2wt.% 이상인 청동기의 납동위원소비는 첨가된 납 원료 광석(방연석)의 고유한 값을 의미한다. 하지만 본 연구의 대상과 같이 납이 인위적으로 첨가되지 않은 청동기의 경우 구리 또는 주석 광석으로부터 기인하였을 가능성이 있다(Kang *et al.*, 2002). Tian(2010) 역시 미량의 납 함량을 가진 청동기의 납동위원소비는 구리 또는 주석에 존재하는 납이 혼합된 값으로 볼 수 있다고 하였으며(Tian *et al.*, 2010), 이는 구리 광석과 주석청동의 납동위원소비가 거의 동일하게 나타난 실험결과에 의해 증명되었다(Weeks *et al.*, 2009). 하지만 주석 광석(錫石, SnO₂)에 포함된 납의 함량은 거의 미량으로 구리 및 주석의 이원계합금의 동위원소비에 영향을 미치지 않는다. 이는 중국 남서부 운남성(雲南省)의 주석 광석에 포함된 납 함량(약 4ppm)과 후난성(湖南省) 푸룽구(芙蓉區)의 석석의 납 함량(약 2ppm 이하)의 연구를 통해 확인된 바 있다(Yuan *et al.*, 2011). 주석 광산은 아니지만 우리나라의 스키른 광상인 가곡 광상의 미량원소 상관관계표에서도 주석과 납의 상관관계가 -0.06으로, 매우 낮음을 알 수 있다(Choi *et al.*, 2010). 위의 내용들을 종합해보면 주석 광석에 존재하는 납은 미량으로, 주석청동의 납동위원소비에 미미한 영향을 미칠 것으로 사료되며, 구리 광석에서 납은 흔히 함께 산출되므로 이때의 납동위원소비는 구리 광석의 위치를 대변하는 것으로 볼 수 있다.

납의 원료 광석인 방연석의 산지추정이 연구의 목적이 라면 납의 함량을 고려해야 한다. 일례로 미륵사지 출토 동경의 산지 추정 연구와 같이 납 함량이 0.54wt.%인 시료가

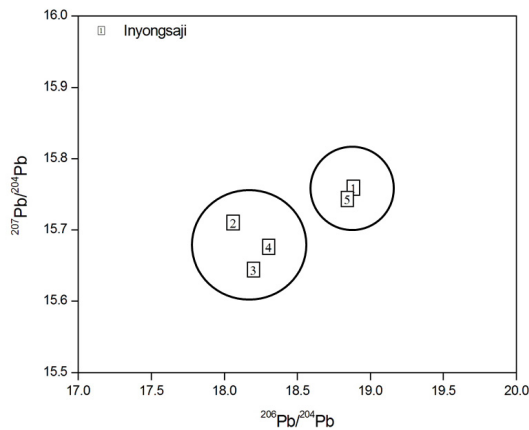


Figure 1. Lead isotope ratios for Inyongsaji bronze artefact; 1: Bowl, 2: Lid, 3: Bowl with Lid(bowl), 4: Bowl with Lid(lid), and 5: belt pendant.

분석대상에서 제외된 경우도 있다(Huh *et al.*, 2007). 이처럼 납동위원소비 분석을 통한 기존의 산지 추정 연구는 의도적으로 납을 첨가하여 함량이 1wt.% 이상인 청동기를 대상으로 실시한 경우가 많다. 하지만 1wt.% 미만의 청동기를 대상으로 한 분석 사례도 적지 않다. 북요르단 출토 황동 물병(Al-Saa'd, 2000) 및 스위스-덴마크-노르웨이 출토 청동기의 대다수가 0.5wt.% 이하의 납을 이용하여 산지 추정 연구를 수행하였으며(Ling *et al.*, 2014), 이외에 캄보디아-미얀마-필리핀-파푸아뉴기니-태국-라오스-베트남(Pryce *et al.*, 2014) 및 중국의 상왕조 왕릉에서 출토 투구(Tian *et al.*, 2010) 역시 1wt.% 미만인 납을 이용하여 납동위원소비 분석을 실시하였다. 우리나라의 경우는 경주 안동 옥동유적 출토 청동순가락의 납 함량이 약 0.04wt.%로 납이 첨가되지 않은 주석청동에 대한 납동위원소비 분석을 실시한 연구가 있다(Chung *et al.*, 2009). 이와 같이 납

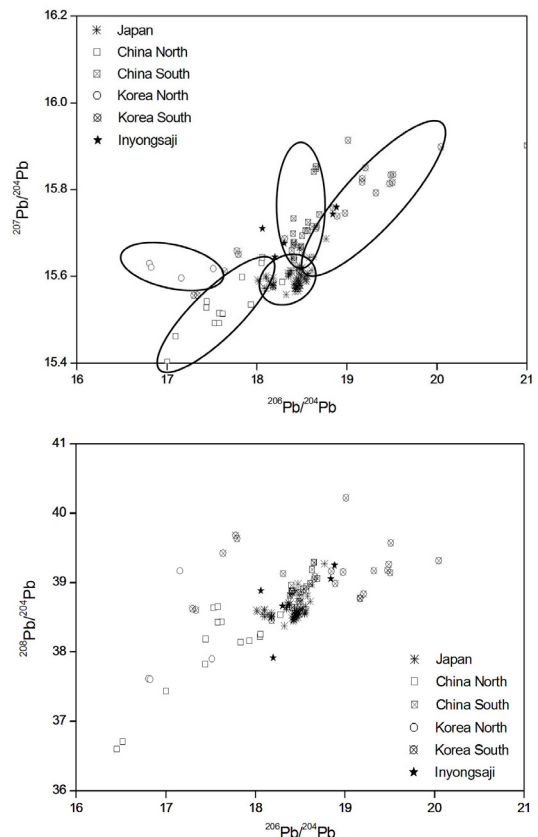


Figure 2. Lead isotope ratios of five bronzes excavated from Inyongsaji compared with lead isotope data from East Asia(Mabuchi, 1985).

동위원소비를 이용하여 납의 의도적으로 포함된 청동 및 납이 포함되지 않은 청동의 원료 광석의 산지를 추정할 수 있다.

분석 대상이 된 5점의 유물의 상관관계를 보다 자세히 살펴보기 위하여 납동위원소비를 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 17.0~20.0, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 15.5~15.9의 범위로 나타난 결과, 청동개(GIL-1)·청동개(GIL-2)·청동완(GIB-2)의 그룹과 청동완(GIB-1)·청동대단금구(GIP)의 그룹으로 나눌 수 있다(Fig. 1). 특히 청동완(GIB-1)과 청동대단금구(GIP)가 상당히 근접하게 위치하는 것으로 보아 두 유물의 산지에 특정한 관계가 있을 것으로 여겨진다. 한편 유물의 종류에 따른 납동위원소비와의 관계를 보면 다소 거리는 있으나 유사 종류의 유물인 청동개(GIL-1)·청동개(GIL-2)·청동완(GIB-2)이 하나의 군으로 모이는 반면 종류가 상이한 청동완(GIB-1)과 청동대단금구(GIP)가 근접하게 위치하고 있다.

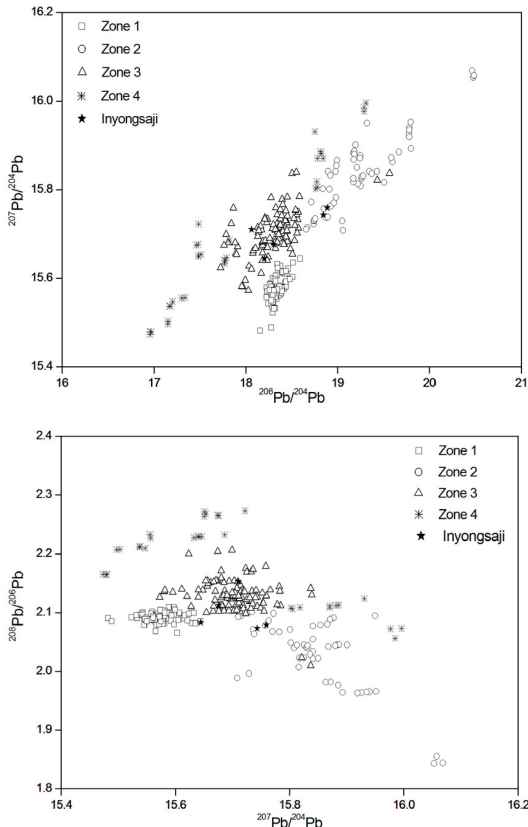


Figure 3. Lead isotope ratios of five bronzes excavated from Inyongsaji compared with lead isotope data of galeas from southern Korea(KOPLID, 2010~2012).

위 청동기의 납동위원소비와 원료 산지의 연관성을 찾기 위해 기존부터 사용되어온 동북아시아 방연석의 납동위원소비 분포도(Mabuchi, 1985)와 한반도 납동위원소 분포도(Korean Peninsula Lead Isotope Database, KOPLID, 2010~2012)에 적용하였다. 우선 한국·중국·일본의 방연석의 납동위원소비를 기본으로 한 분포도에 출토 청동기의 납동위원소비를 적용한 결과, 2점은 한반도 남부에 포함되며 1점은 중국 남부, 2점은 분류가 불가함을 확인할 수 있다(Fig. 2). 이 분포도에 의하면 동일 유적지에서 출토된 청동기가 중국 또는 한국 산지의 동광석을 원료로 사용하였다는 해석이 가능하다. 그러나 위의 분포도는 국가별 시료의 수가 많지 않으며, 특히 한반도에 대한 정보가 적어 국내 지역별 추정작업에 한계가 있다. 이러한 단점을 해결하여 세밀한 기원지 추정 연구 및 산지 추정 연구의 다양성을 도모하고자 한반도 남부 방연석 광산에 대한 조사 및 그에 따른 납동위원소비 분포도가 작성되었으며, 이를 활용하여 도시한 결과는 Fig. 3과 같다. 청동개(GIL-1)·청동개(GIL-2)·청동완(GIB-2) 3개의 시료는 전라남북도 및 충청남북도의 옥천변성대에 해당하는 Zone 3에 도시되었으며, 청동완(GIB-1)과 청동대단금구(GIP) 2개의 시료는 강원도 일부의 태백산분지인 Zone 2에 위치함을 확인할 수 있다(Fig. 3~4). 이 결과로 인해 청동기 제작에 사용된 원료 광석의 산지가 경상북도 경주시에 위치한 인용사지와 지리적으로 거리가 있음을 판단할 수 있다. 따라서 위 유물의 제작 당시 다른 지역으로부터 공급된 동광석을 사용하였을 가능성이 크나 원료 물질의 혼합 및 청동기의 재활용에 대해서도 생각해보아야 한다. 특히 분포도에서의 zone 3은 원료 물질이 혼합된 청동기의 납동위원소비가 위치하는 구역이므로 해석 시 많은 주의가 필요하다.

4. 결론

인용사지 출토 청동기 5점을 대상으로 TIMS를 활용한 납동위원소비 분석 결과를 토대로 내린 결론은 다음과 같다.

1. ICP-MS를 사용한 성분 분석 결과, 인용사지 출토 청동기는 구리와 주석의 이원계 합금이며, 납의 함량이 1wt.% 이하로 의도적으로 첨가되지 않았음이 확인된다.

2. TIMS를 이용한 납동위원소비 분석 결과, 인용사지 출토 청동기는 크게 청동완(GIB-1)과 청동대단금구(GIP)의 그룹과 청동개(GIL-1)·청동개(GIL-2)·청동완(GIB-2)의 그룹 등 2개로 분류되는 것으로 보아 제작 시 원료 광석

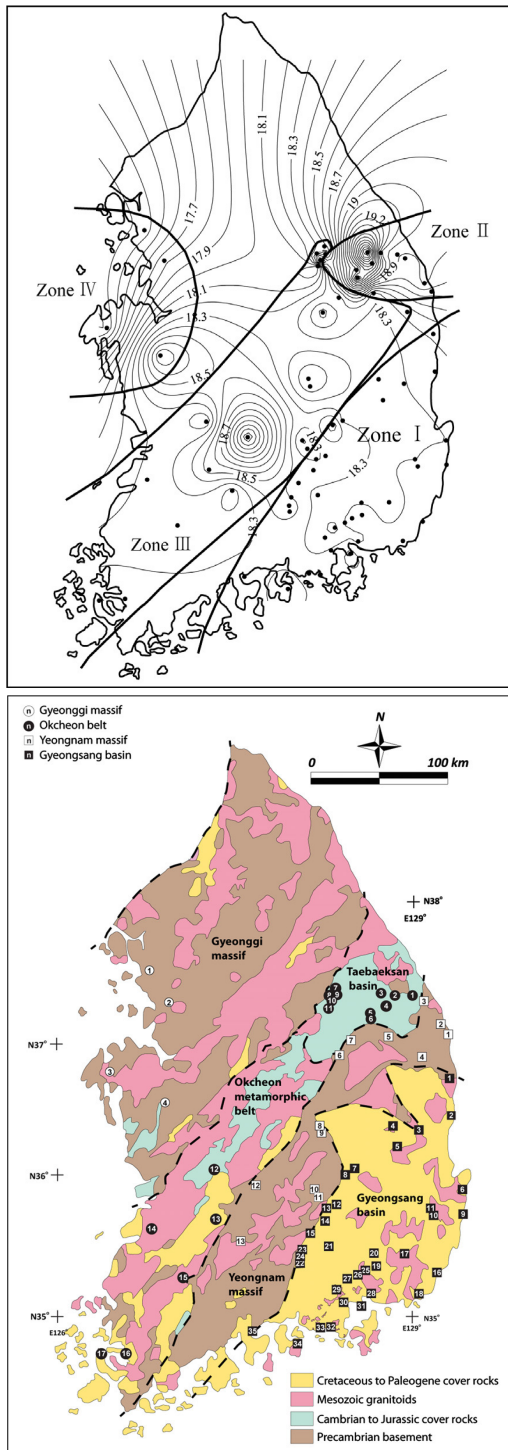


Figure 4. Geographic map showing the location of lead mine and the discriminated zones in the southern Korean peninsula(from Jeong *et al.*, 2012).

의 차이가 있었을 것으로 추정된다.

3. 인용사지 출토 청동기의 납동위원소비를 동북아시아 방연석 분포도에 도시한 결과, 3점은 한반도 남부의 범위에 위치하며, 청동완(GIB-2) 중국 북부, 청동개(GIL-2)는 중국 남부의 범위에 위치한다. 한편 한반도 납동위원소 분포도를 이용한 경우, 청동완(GIB-1)과 청동대단금구(GIP)는 태백산분지인 Zone 2에 도시되며, 청동개(GIL-1)·청동개(GIL-2)·청동완(GIB-2)은 모두 옥천변성대인 Zone 3에 위치하는 것으로 확인된다.

4. 분석된 청동유물이 출토된 인용사지는 한반도 납동위원소 분포도의 Zone 1에 포함되는 경상분지, 즉 경상북도에 위치하고 있으나, 한반도 납동위원소 분포도를 통해 인용사지 출토 청동기들은 Zone 2, 3에 포함되는 것을 확인하였다. 이는 제작에 사용되는 동광석이 출토지에서 멀리 벗어난 지역으로부터 공급되었다는 것이다. 하지만 원료의 혼합 및 재활용에 대해서도 배제하지 않을 수 없다.

본 연구에서는 납동위원소비 분석법을 이용하여 출토 청동기의 원료 산지에 대해 추정하고자 하였다. 하지만 납동위원소비 분석법은 정확한 산지를 구별해주지 않으므로, 다른 구별인자 혹은 분석법을 추가적으로 개발하여 같이 사용하면 출토 청동기의 원료 산지 및 기원에 대해 보다 정확히 확인할 수 있을 것이라 판단된다.

사 사

본 연구는 국립문화재연구소의 “문화유산 기본연구(R&D)” 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

Al-Saa'd, Z., 2000, Technology and provenance of a collection of Islamic copper-based objects as found by chemical and lead isotope analysis. *Archaeometry*, 42, 385-397.

Choi, B.K., Choi, S.G., Seo, J.E., Yoo, I.K., Kang, H.S. and Koo, M.H., 2010, Mineralogical and Geochemical Characteristics of the Wolgok-Seongok Orebodies in the Gagok Skarn Deposit: Their Genetic Implications. *Econ. Environ. Geol.*, 43, 277-290. (in Korean with English abstract)

Choi, J., et al., 1986, Study on the Korean bronzes. *Journal*

- of the Korean Institute of Metals 24, 4, 540-546. (in Korean)
- Chung, K.Y and Lee, J.H., 2009, A Study of the Microstructure and Provenance Area of Bronze Spoons Excavated from the Ok-dong Site in Andong. *Journal of the Korean Conservation Science for Cultural Properties*, 25, 411-420. (in Korean with English abstract)
- Cui, J., 2011, An experimental investigation on lead isotopic fractionation during metallurgical processes. *Archaeometry*, 53, 205-214.
- Gale, N.H., Stos-Gale, G.A., Maliotis, G. and Annetts, N., 1997, Lead isotope data from the Isotracer Laboratory, Oxford: *Archaeometry Data Base 4, Ores from Cyprus*. *Archaeometry*, 39, 237-246.
- Gyeongju National Research Institute of Cultural Heritage, 2013, Jeoninyongsaji Site I. Gyeongju National Research Institute of Cultural Heritage. (in Korean)
- Haustein, M., Gillis, C., and Pernicka, E., 2010, Tin isotopy-A new method for solving old questions. *Archaeometry*, 52, 816-832.
- Hirao Y., 2001, Scientific eyes studying on cultural heritage. Hakyeon.
- Huh, I.K., Cho, N.C. and Kang, H.T., 2007, Provenance and metallurgical study on bronze mirrors excavated from Mireuksaji temple site, Iksan. *Journal of Conservation Science*, 20, 23-30. (in Korean with English abstract)
- Jeong, Y.J., Cheong, C.S, Shin, D.B, Lee, K.S, Jo, H.J., Gaitam, M.K. and Lee, I.S., 2012, Regional variations in the lead isotopic composition of galena from southern Korea with implications for the discrimination of lead provenance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61, 116-127.
- Kang, H.T., Chung, K.Y., and Lee, G.K., 2002, Lead isotope ratios of bronze artifacts from Sudong site, youngkwang-gun. *The Honam Archaeological Society*, 15, 7-18. (in Korean with English abstract)
- Klein, S., Lahaye, Y., Brey, G.P. and Von Kaenel, H.M., 2004, The early Roman imperial aes coinage II: Tracing the copper sources by analysis of lead and copper isotopes-copper coins of Augustus and Tiberius. *Archaeometry*, 46, 469-480.
- Ling, J., Stos-Gale, J., Grandin, L., Billström, K., and Hjärthner-Holdar, E., 2014, Moving metals II: provenancing Scandinavian Bronze Age artefacts by lead isotope and elemental analyses. *Journal of Archaeological Science*, 33, 106-132.
- Mabuchi, H., 1985, The lead isotope systematics in Asia and near East. Grant Report to the Ministry of Education, Science, and Culture, 19. (in Japanese)
- Mathur, R., Titley, S., Hartc, G., Wilsong, M., Davignone, M., and Zlatosa, C., 2009, The history of the United States cent revealed through copper isotope fractionation,. *Journal of Archaeological Science*, 36, 430-433.
- Pryce, T. O., et al., 2014, More questions than answers: The Southeast Asian Lead Isotope Project 2009-2012. *Journal of Archaeological Science*, 42, 273-294.
- Stos-Gale, Z., Gale, N. H., 2009, Metal provenancing using isotopes and the Oxford archaeological lead isotope database(OXALID). *Archaeol Anthropol Sci*, 1, 195-213.
- Tian J.H., Jin, Z.Y., Li, R.L., Yan, L.F., and Cui, J.Y., 2010, An elemental and lead-isotopic study on bronze helmets from royal tomb No. 1004 in Yn Ruins. *Archaeometry*, 52, 1002-1014.
- Yuan, S., Peng, J., Hao, S., Li, H., Geng, J., and Zhang, D., 2011, In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization. *Ore Geology Reviews*, 43, 235-242.
- Weeks, L.R., Keall, E., Pashley, V., Evans, J. and Stock, S., 2009, Lead isotope analyses of Bronze Age copper-base artefacts from Al-Midamman, Yemen: towards the identification of an indigenous metal production and exchange system in the southern Red Sea region. *Archaeometry* 51(4), 576-597.