

## 선사시대 출토 청동 무기류의 납동위원소비 및 미량원소 특성

김소진<sup>1\*</sup> · 황진주<sup>1</sup> · 한우림<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국립문화재연구소 보존과학연구실

<sup>2</sup>국립가야문화재연구소

## Characteristics of Lead isotope ratios and Trace elements of Excavated Bronze weapons in Pre-historical Age

So Jin Kim<sup>1\*</sup>, Jin Ju Hwang<sup>1</sup> and Woo Rim Han<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon 34122, Korea

<sup>2</sup>Gaya National Research Institute of Cultural Heritage, Changwon 51430, Korea

**요약:** 본 연구는 청동기-초기철기 시대로 구분되는 선사시대 출토 청동 무기류 25점의 출토지와 생산지의 관계를 파악하기 위해 납동위원소비와 성분분석을 실시하였다. 청동 무기류 25점은 모두 구리-주석-납의 삼원계 합금으로 납이 인위적으로 첨가됨을 확인할 수 있다. 납동위원소비 분석을 통해 청동기-초기철기 시대 무기류는 중국 북부지역을 포함한 다양한 지역의 원료로 제작되어 그 시대의 유통과 교류가 활발했음을 알 수 있다. 또한 세형동검은 한반도 남부 영역분포도의 zone 1-3 및 중국 북부 지역에서, 동과 및 동모는 zone 1 및 zone 4를 제외한 나머지 지역에서 납 원료를 공급받았음을 확인할 수 있다. 출토 청동 무기류 25점의 미량원소 중 은은 부화되어 나타나며 아연 및 코발트는 결핍됨을 알 수 있다. 비소와 안티몬은 일부 시료에만 검출되어 산지 연구를 위한 특정인자로의 가능성을 확인하였다. 납동위원소비 분석은 원료의 산지뿐만 아니라 공반되는 유물의 제작시기를 구분할 수 있으며 유물 내에 결핍, 부화된 미량원소는 원료 산지를 추정하는데 좋은 인자가 될 것으로 생각된다.

**핵심어:** 청동, 무기, 납동위원소비, 미량원소, 산지추정

**Abstract:** We examined component analysis and lead isotope ratio analysis to find out the relationship between the excavation and the production site of 25 bronze weapons from prehistoric ages. All 25 bronze weapons are ternary alloys of copper-tin-lead and lead is artificially added. The lead isotope ratios of 25 bronze weapons show that bronze are made by raw materials in the southern regions of the Korean Peninsula, including northern China. The raw materials of narrow-shaped bronze dagger are supplied in zone 1-3 and northern China. In addition, provenance of lead for bronze halberd and spearhead are the rest of the region except for zone 1 and zone 4. Silver are enriched in most samples and zinc and cobalt are deficient. Arsenic and antimony detected only specific samples and can be used as critical parameter for provenance study. Lead isotopes and trace elements of archaeological bronzes will provide conservation scientist with useful tool to study the provenance of raw materials

**Keywords:** Bronze, Weapon, Lead isotope ratios, Trace element, Provenance

### 서론

선사시대 무기 제작에 사용된 청동은 구리와 주석 또는 구리, 주석 및 납의 합금으로 우리는 자연과학

적 분석을 통해 청동 생산에 사용된 원료 광석, 기술체계 및 원료의 산지를 파악할 수 있다. 주성분 분석과 미세조직 관찰을 통해 청동의 제작기술을 확인할 수 있으며 불순물로 포함된 미량원소는 원료의 정련 정도를, 청동 내 편석으로 존재하는 납의 납동위원소비 분석으로는 산지를 추정할 수 있다. 납동위원소비 분석을 이용한 유물의 산지추정은 1967년 미국의

\*Corresponding author  
Tel: +82-42-860-9064  
E-mail: kimsj84@korea.kr

Brill이 처음 시도(Brill, 1967)하였으며 우리나라는 Choi *et al.*(1986)에 의해 최초로 연구되어 2000년대 부터 본격적으로 청동의 산지연구가 추진되었다. 기존의 산지연구는 일본 Mabuchi(1985)의 동북아시아 방연석의 납동위원소비 데이터와 출토 청동의 납동위원소비 데이터를 비교하여 원료의 산지를 추정하였다. 하지만 일본의 방연석 시료를 제외하고 시료의 수가 적어 기원지를 왜곡시킬 가능성이 있다. 이를 보완하기 위해 한국기초과학지원연구원과 국립문화재연구소는 북한을 제외한 한반도 내 납광상의 납동위원소비로 광역분포도를 제작하였으며(Jeong *et al.*, 2012; Jeong and Cheong, 2019), 현재 보존과학자 및 고고학자들이 활용하고 있다. 하지만 광역분포도 역시 한반도 남부지역에 대한 자료만으로 제작되었기에, 한반도 영역에서 벗어난 시료는 Mabuchi 데이터와

비교하여 산지를 추정한다. 청동의 산지연구에는 청동이 제작된 시기 또한 중요하다. 기존의 연구를 통해 시대가 변화할수록 청동의 원료산지가 한반도 전역에서 특정한 지역으로 좁아지는 것을 확인할 수 있는데(Kim *et al.*, 2015), 이는 『조선왕조실록』 등의 문헌에서도 알 수 있듯이 청동의 재활용을 의미하는 것이기에 해석 시 유의해야 한다. 본 연구에서는 청동기-초기철기 시대에 제작된 유형을 알 수 없는 동검, 세형동검, 동과 및 동모 등 청동 무기류 25점의 납동위원소비를 분석하여 제작시기 및 유물의 유형에 따른 출토지와 생산지와의 관계에 대해 알아보고자 하였다. 또한 미량원소의 함량과 거동형태를 분석하여 산지연구의 신뢰도를 높일 수 있는 특징인자를 찾고자 하였다.

**Table 1.** Summary information on the excavated bronze weapons

No.	Artifact	Sample name	Excavated site
1	Bronze halberd	BW-1	Iksan-si, Jeollabuk-do
2	Narrow-shaped bronze dagger	BW-2	Gumi-si, Gyeongsangbuk-do
3	Narrow-shaped bronze dagger	BW-3	Un-known
4	Narrow-shaped bronze dagger	BW-4	Un-known
5	Narrow-shaped bronze dagger	BW-5	Un-known
6	Narrow-shaped bronze dagger	BW-6	Un-known
7	Narrow-shaped bronze dagger	BW-7	Seo-gu, Gwangju
8	Narrow-shaped bronze dagger	BW-8	Jangseong-gun, Jellanam-do
9	Bronze halberd	BW-9	Un-known
10	Narrow-shaped bronze dagger	BW-10	Naju-si, Jellanam-do
11	Bronze halberd	BW-11	Jangheung-gun, Jellanam-do
12	Narrow-shaped bronze dagger	BW-12	Un-known
13	Narrow-shaped bronze dagger	BW-13	Un-known
14	Narrow-shaped bronze dagger	BW-14	Un-known
15	Narrow-shaped bronze dagger	BW-15	Un-known
16	Narrow-shaped bronze dagger	BW-16	Jung-gu, Daejeon
17	Bronze dagger	BW-17	Un-known
18	Bronze dagger	BW-18	Un-known
19	Narrow-shaped bronze dagger	BW-19	Un-known
20	Bronze spearhead	BW-20	Buk-gu, Daegu
21	Narrow-shaped bronze dagger	BW-21	Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do
22	Narrow-shaped bronze dagger	BW-22	Changwon-si, Gyeongsangnam-do
23	Narrow-shaped bronze dagger	BW-23	Un-known
24	Bronze halberd	BW-24	Changwon-si, Gyeongsangnam-do
25	Bronze spearhead	BW-25	Changwon-si, Gyeongsangnam-do

연구대상 및 방법

연구대상

본 연구는 청동기 및 초기철기시대로 구분되는 선사시대의 청동 무기류 25점을 대상으로 하였다. 25점의 시료는 청동기시대로 추정되는 동과 및 동모 5점, 초기철기시대로 추정되는 동검 및 동과 20점으로 구분된다. 출토지 미상의 시료가 13점이며 충청지역 출토 시료 1점, 전라지역 출토 시료 5점 및 경상지역 출토 시료 6점으로 나뉜다. 본 연구에 사용된 시료는 서울대 박물관 4점, 전북대 박물관 3점, 전남대 박물관 9점, 경남대 박물관 4점, 충남대·한림대·목포대 박물관 및 영남문화재연구원에서 각 1점씩 제공받았으며 제반사항은 Table 1과 같다.

연구방법

청동 무기류 25점의 납동위원소비 분석은 한국기초과학지원연구원의 열이온화질량분석기(Thermal Isotope Mass Spectrometer, Isotope-T, IsotopeX, England)를 이용하였다. 동위원소 분석을 위해 유물시료는 질산과 염산(1:3)을 혼합한 시약으로 시료를 완전 용해한 후 음이온 교환수지를 이용한 컬럼화학으로 고순도의 납을 추출하였다. 분석은 정적인 모드(Static mode, N-20, 4s integration)로 1,200°C 이내에서 실시하였으며, 외부보정을 위해 NBS981도 함께 분석하였다. 재분석한 표준시료 NBS981의 평균값은  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.891 \pm 0.004$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.439 \pm 0.005$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.507 \pm 0.028$ (N=30, 2σ SE)이고, 2σ% 분석 표준오차는 0.3% 미만이었다. 청동 시료의 주성분

Table 2. Measured lead isotope ratios for bronze weapons in pre-historical age

No.	Lead Isotopes					Zone
	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
BW-1	19.727	15.848	39.644	0.8050	2.0140	2
BW-2	18.323	15.579	38.538	0.8520	2.1080	1
BW-3	18.159	15.582	38.611	0.8581	2.1262	3
BW-4	17.450	15.446	37.790	0.8851	2.1654	Nch(4)
BW-5	18.011	15.539	38.380	0.8628	2.1308	Nch(4)
BW-6	20.788	15.999	41.694	0.7696	2.0057	2
BW-7	16.781	15.321	37.054	0.9130	2.2079	Nch(4)
BW-8	17.549	15.494	38.131	0.8829	2.1727	Nch(4)
BW-9	18.211	15.653	38.546	0.8596	2.1167	3
BW-10	17.691	15.534	38.211	0.8780	2.1600	Nch(4)
BW-11	20.427	16.034	41.192	0.7850	2.0165	2
BW-12	16.790	15.335	37.109	0.9133	2.2101	Nch(4)
BW-13	18.993	15.746	39.610	0.8290	2.0855	2
BW-14	17.588	15.587	38.206	0.8862	2.1723	Nch(4)
BW-15	17.459	15.500	38.119	0.8878	2.1833	Nch(4)
BW-16	17.764	15.561	38.084	0.8759	2.1437	3
BW-17	17.589	15.538	37.931	0.8834	2.1565	Nch(4)
BW-18	17.669	15.559	38.338	0.8806	2.1698	Nch(4)
BW-19	17.927	15.605	38.574	0.8705	2.1516	3
BW-20	17.370	15.442	37.702	0.8910	2.1750	Nch(4)
BW-21	16.867	15.383	37.241	0.9140	2.2126	Nch(4)
BW-22	18.494	15.603	38.724	0.8460	2.0983	1
BW-23	17.524	15.476	38.918	0.8831	2.1638	3
BW-24	17.716	15.464	37.994	0.8750	2.1491	Nch(4)
BW-25	17.613	15.501	37.948	0.8820	2.1589	Nch(4)

Nch : North China

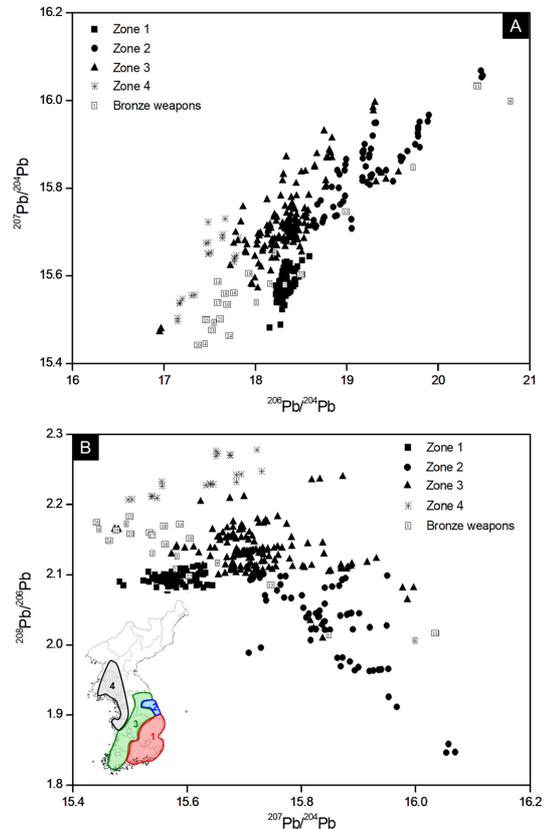
및 미량원소 분석은 유도결합플라즈마발광분석기(ICP-AES, Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer, Seiko, Japan)를 이용하였다. 시료는 채취 후 초음파세척을 통해 표면 오염물을 제거하고 105°C에서 24시간 건조한 후 왕수(HNO<sub>3</sub>) 1 ml를 첨가하여 hot plate에서 가열하였다. 총 10종의 원소(Cu, Sn, Pb, Zn, Ag, Ni, Co, As, Sb, Fe)를 분석하였으며 분석결과 중 일부는 황진주(2010)의 연구자료를 참고하였다. 총 5회 분석을 실시하여 분석값의 최대·최소를 제외한 3개의 산술 평균값을 구하였다. 보정은 표준 샘플(UE13-1 및 UE52-2, Center Technique des Industries de la Fonderie, France)을 사용하였다.

## 결과 및 고찰

### 납동위원소비 분석

출토 청동 무기류 25점에 대한 납동위원소비 분석 결과는 Table 2와 같다. 청동 무기류는 납의 함량이 2-19 wt.%로, 의도적인 납 첨가가 이뤄졌음을 알 수 있다. 이때의 납동위원소비는 청동 내 납 원료광석(방연석)의 고유한 값을 의미한다. 청동 무기류의 납동위원소비 범위는  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  값이 16.781-20.788,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 이 15.335-16.034이었으며,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  값이 37.109-41.694로 나타났다. 특히 광주 출토(BW-8), 출토지 미상(BW-13) 및 경북 경산 출토 세형동검(BW-22)의 납동위원소비는 각각  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.781-16.790$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.321-15.335$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.054-37.109$ 의 낮은 수치를 나타냈으며 출토지 미상의 세형동검(BW-7) 및 전남 장흥 출토 동과(BW-12)의 경우가 가장 radiogenic한 결과를 보이는데 납동위원소비 값이 각각  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 20.788$ ,  $20.427$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.999$ ,  $16.034$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 41.694$ ,  $41.192$ 로 나타났다.

청동기-초기철기로 구분되는 청동 무기류 25점은 제작 시 한반도 내의 금속 원료를 사용했을 것이라는



**Fig. 1.** Lead isotope data for 25 bronze weapons compared with data for galenas from southern Korea; (A)  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , (B)  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ .

가정 하에 산출된 납동위원소비를 한반도 납동위원소 광역분포도(Jeong *et al.*, 2012; Jeong and Cheong, 2019)에 적용하여 생산지를 확인하고자 하였다. 한반도 납동위원소 광역분포도는 4개의 zone으로 구분되며 각 zone에 대한 지질학적 특성과 지역적 위치 등을 Table 3에 정리하였다. 한반도 납동위원소 광역분포도에 대입한 결과 청동 무기류 25점은 충청 북부와

**Table 3.** The geotectonic characters and geographical location about 4 zones (Jeong and Cheong, 2019)

Zone	Geotectonic characters	Geographical location
Zone 1	Gyeongsang Basin	Gyeongsang-do
Zone 2	Taebaeksan Basin (internal Okcheon Belt), northeastern Yeongnam Massif	South Kangwon-do, North Gyeongsang-do
Zone 3	Okcheon Belt (exclude Taebaeksan Basin), Yeongnam Massif (excludenortheastern regions), Gyeonggi Massif (exclude western regions)	Jolla-do, Chungcheong-do, Gyeonggi-do
Zone 4	Western Gyeonggi Massif	North Choengcheong-do, West Gyeonggi-do

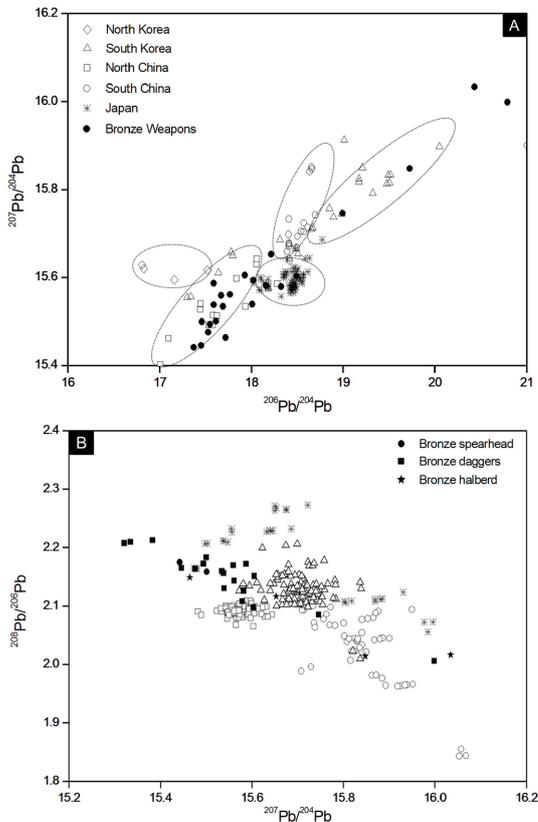


Fig. 2. Comparative results for the lead isotope ratios; (A) Lead isotope ratio data for 25 bronze weapons compared with lead ores data (Mabuchi, 1985), (B) Lead isotope ratio data by type of bronze weapons.

경기 서부로 대변되는 zone 4를 제외한 다양한 산지의 납 원료를 사용했음을 알 수 있다(Fig. 1A and 1B). 또한 한반도 영역을 벗어난 청동 무기류도 확인되어 Mabuchi(1985)의 자료를 통해 중국 북부지역(Nch)로 추정하였다(Fig. 2A). 본 연구에 사용된 청동 무기류의 유형별로 납동위원소비 특성을 살펴보면 세형동검의 원료 산지는 zone 4를 제외한 한반도와 중국 북부지역(Nch)으로 나타나며 동과 및 동모는 세형동검과는 달리 zone 1과 zone 4를 산지로 하는 시료는 없었다(Fig. 2B). 청동유물의 산지추정에 사용되고 있는 한반도 남부지역에 대한 납동위원소비 광역분포도는 한반도 북부지역에 대한 기초자료가 매우 부족하다. 따라서 이 지역에 대한 기초자료가 확보된다면 한반도 영역에서 벗어나는 청동 무기류의 원료의 공급지가 한반도 내(특히 북한)에 위치하는지 아니면 중국에서

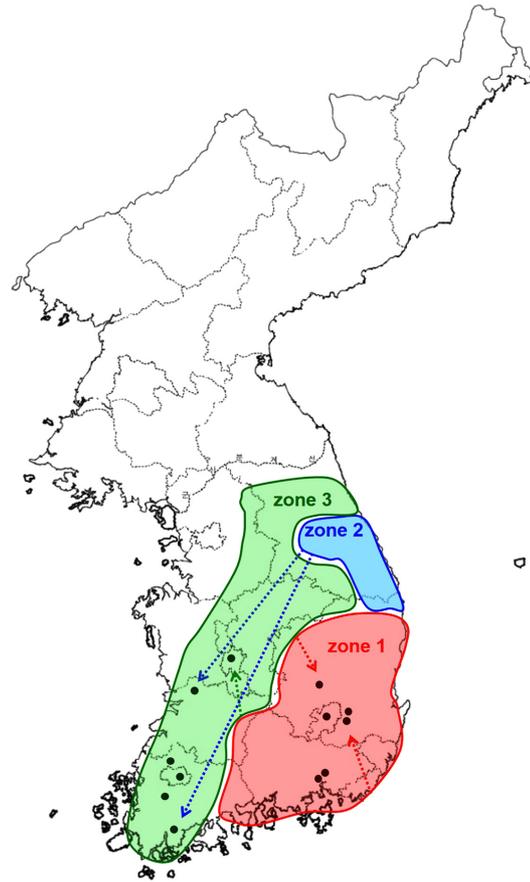


Fig. 3. The relationship between provenance of raw materials and excavated sites; expressed only bronze samples with accurate excavated sites and excluded samples located in North China (4).

유래되었는지 밝혀질 것으로 판단된다.

이번 연구에 사용된 청동 무기류 25점을 출토지별로 구분하면, 출토지 미상은 13점이며 나머지 12점은 전라남·북도, 경상남·북도에서 출토되었음을 확인하였다. 출토지가 밝혀진 시료들을 대상으로 납동위원소비에 따른 원료의 산지와 비교해보면 아래의 경향을 파악할 수 있다(Fig. 3). 먼저 출토지가 zone 1에 도시되는 세형동검 3점 중 2점의 시료(BW-2, 22)는 각각 경북 구미와 경남 창원에서 출토되었으며 원료의 산지 또한 경상도를 중심으로 한 zone 1로 나타났다. 이들 세형동검은 경상도의 납 원료광석을 이용하여 세형동검을 제작했을 것으로 판단되며 다른 지역에 비해 자급자족하는 경향이 있었을 것으로 추정된다. 출토지 미상을 제외한 세형동검 4점의 원료 산지는

모두 zone을 벗어난 지역인 중국 북부로 도시되었는데, 이는 중국과 한반도와의 활발한 교류를 의미한다. 중국 북부가 아닌 북한 지역이라 하더라도 경상도 주변지역인 충청도, 전라도 및 강원도 지역보다 북한 지역과 상호 교류가 많았음을 추정할 수 있다. 동모 및 동과의 경우, 세형동검과는 다른 특성을 보인다. 출토지가 zone 1에 분포하는 동과 1점 및 동모 2점의 원료 산지는 zone을 벗어난 지역인 중국 북부임을 확인할 수 있으며 출토지가 zone 3에 도시되는 동과 2점은 모두 zone 2의 원료를 사용한 것을 알 수 있다. 본 연구에 사용된 동과 및 동모는 세형동검과 공반되는 유물로 유형에 따른 편년은 유사하다 볼 수 있다. 경남 창원 가포동유적에서 출토된 세형동검(BW-22), 동과(BW-24) 및 동모(BW-25)들은 같은 출

토지에서 출토된 유물들로, 세형동검의 납 원료산지는 zone 1로 나타나며 동과 및 동모의 납 원료산지는 중국 북부로 확인되었다. 이 가포동 유적에서 출토된 유물들은 같은 출토지와 유사한 편년을 가졌지만 출토 유물의 유형에 따라 사용된 원료가 달라지거나 또는 유물의 제작시기 차이에 따라 다른 산지를 보이는 것으로도 판단할 수 있다.

#### 미량원소 분석

선사시대 청동 무기류 25점은 모두 구리-주석-납의 3원계 합금으로 확인되었다. 특히 납이 2-19 wt.% 검출되어 인위적인 첨가가 이루어졌음을 알 수 있으며, 시료 중 일부는 부식으로 인해 성분분석의 총 합이 100 wt.%가 되지 못하는 경우가 있었다. 구리, 주석

**Table 4.** ICP-AES data (10 elements) of bronzes; major elements (Cu, Sn, Pb) and trace elements are given in wt.% (Hwang, 2010)

	Cu	Sn	Pb	Zn	Ag	Ni	Co	As	Sb	Fe	Total
BW-1	72.40	18.00	9.40	0.05	0.22	0.07	0.01	N.D.	0.14	0.01	100.29
BW-2	75.10	16.27	9.71	0.07	0.17	0.12	0.04	0.08	tr	0.02	101.50
BW-3	76.36	14.28	8.59	0.08	0.17	0.16	0.08	N.D.	tr	0.01	99.73
BW-4	73.14	17.07	9.49	0.07	0.11	0.12	0.03	N.D.	N.D.	0.01	100.04
BW-5	78.00	17.39	5.68	0.09	0.33	0.15	0.03	N.D.	N.D.	0.05	101.71
BW-6	81.10	8.20	9.18	0.04	0.26	0.06	0.01	N.D.	0.04	0.01	98.88
BW-7	69.50	16.30	14.40	0.03	0.36	0.10	0.01	N.D.	0.26	0.07	101.02
BW-8	73.30	8.84	17.80	0.03	0.32	0.11	0.03	N.D.	0.34	0.12	100.89
BW-9	79.00	16.38	6.70	0.03	0.18	0.11	0.05	N.D.	0.08	0.04	102.57
BW-10	74.69	18.10	7.63	0.03	0.18	0.12	0.02	N.D.	0.09	0.02	100.88
BW-11	56.36	18.20	26.05	0.03	0.08	0.13	0.07	N.D.	0.06	0.01	100.98
BW-12	67.70	12.50	20.20	0.03	0.20	0.06	0.03	N.D.	0.10	0.05	100.86
BW-13	78.25	15.30	4.28	0.03	0.12	0.14	0.02	N.D.	0.06	N.D.	98.20
BW-14	75.20	16.00	7.30	0.03	0.13	0.08	0.02	N.D.	0.03	0.04	98.82
BW-15	76.80	5.55	10.41	0.05	0.20	0.10	0.02	N.D.	0.30	0.11	93.54
BW-16	73.92	11.98	9.63	0.03	0.14	0.06	tr	N.D.	0.06	N.D.	95.82
BW-17	76.30	15.60	6.60	0.01	0.11	0.06	0.01	0.12	N.D.	0.01	98.82
BW-18	72.60	19.00	6.30	0.01	0.13	0.08	0.01	tr	N.D.	0.03	98.15
BW-19	75.10	16.90	6.60	0.01	0.07	0.06	0.02	0.08	tr	0.01	98.85
BW-20	72.10	8.30	19.50	0.01	0.16	0.11	0.03	0.34	0.08	0.01	100.63
BW-21	79.60	2.90	18.00	0.01	0.22	0.13	0.02	0.23	0.09	0.02	101.21
BW-22	76.50	14.40	4.40	tr	0.07	0.17	0.09	tr	tr	0.04	95.66
BW-23	84.50	7.15	2.80	0.01	0.20	0.15	0.03	0.30	0.08	0.01	95.23
BW-24	74.20	11.50	11.30	0.01	0.16	0.14	0.07	0.30	0.07	0.03	97.78
BW-25	75.20	11.60	9.60	tr	0.15	0.15	0.03	0.29	tr	0.04	97.07

N.D.: Not Detected, tr : trace element

및 납과 같은 주성분 및 7종의 미량원소 분석 결과는 Table 4와 같다.

25점의 시료에서 모두 은이 높게 검출되는데 이는 청동의 주원료인 동광석 뿐만 아니라 방연석의 부산물로 은이 산출되기 때문이다. 이는 우리나라 방연석 광산 106곳에서 채취한 방연석 91점의 미량원소 분석 결과를 통해 알 수 있으며 평균 0.32 wt.%의 은이 함유되어 있었다(Korea Basic Science Institute, 2014). 특히 제2연화광산(경북 봉화), 은곡광산(충북 단양), 추은광산(충북 괴산), 오봉광산(강원 화천)의 방연석에서 은이 1.0 wt.% 이상 검출되어 특정 광산의 원료 특성을 대변하는 하나의 인자로 사용할 수 있을 것이라 판단된다(Korea Basic Science Institute 2014). 아연과 코발트는 대부분 0.03 wt.% 이하로 함량이 낮음을 알 수 있다. 아연은 동광석 및 방연석의 부산물로 산출되나 끓는점(906°C)이 낮아 청동의 합금 및 용해 시 쉽게 승화되기 때문에 결핍되었으며, 코발트는 황동석에서 부산물로 산출되는 경우가 있으나 그 함량이 매우 적다. 경남 창원 출토 세형동검(BW-22)은 다른 시료에 비해 코발트의 함량이 높게 나타나는데 이는 경상분지내 열수 광맥광상에 수반된 유비철석, 황동석, 자류철석 및 산화동에 함유된 코발트로 인한 것으로 추정된다(Lee Jae Yeong, 1989). 일부 시료(BW-1, 7, 8, 12)에서 안티몬의 함량이 높게 나타나며 비소 역시 특정 시료(BW-20, 21, 23, 24, 25)에만 부화됨을 알 수 있다. 자연상태에서의 비소는 원소광물, 비소화 광물, 황화물, 산화물, 비산염 또는 아비산염 등의 형태로 존재하며(Smedley and Kinniburgh, 2002) 대표적인 금속광물로는 유비철석(arsenopyrite; FeAsS)이 있다(Lee *et al.*, 2009). 비소가 부화된 유물들의 원료 산지는 한반도 납동위원소 광역분포도에 따라 모두 한반도 영역을 벗어난 중국 북부 지역에 도시되었다. 따라서 이들 유물에 포함된 비소는 유비철석 등과 같은 불순 혼합광물이 포함된 중국 북부(또는 북한)지역의 광산에서 유래된 원료물질에 의해 부화된 것으로 생각된다.

7종의 미량원소 사이의 부화·결핍 등의 상관관계를 확인하고자 회귀분석을 실시하였으나 결정계수( $R^2$ , Coefficient of Determination)가 0.1-0.4로 선형의 상관관계가 크지 못함을 알 수 있다. 따라서 미량원소 사이의 관계보다는 청동의 주성분 변화 및 제조과정 시 발생할 수 있는 미량원소의 변화거동에 대한 추가 연구가 필요하다.

## 결론

청동기-초기철기 시대 청동 무기류 25점을 대상으로 납동위원소비 및 미량원소 특성연구에 의한 결론은 다음과 같다.

1. 청동 무기류 25점의 주성분원소의 성분 분석 결과는 모두 구리-주석-납의 3원계 합금이며 납의 함량이 2.0 wt.% 이상으로 의도적으로 첨가되었다.
2. 납동위원소비 분석에 의한 청동 무기류의 원료 산지는 다양하게 나타나며 중국 북부에도 다수의 시료들이 포함되어 중국 북부지역과도 많은 교류가 있었음이 판단된다. 청동 무기류의 유형별 납동위원소비 특성에 따른 산지 추정은 세형동검이 zone 4를 제외한 한반도 전역과 중국 북부지역으로 나타나며 동과 및 동모는 세형동검과는 달리 zone 1과 zone 4를 산지로 추정된 시료는 없었다.
3. 출토지별 청동 무기류의 납동위원소비 특성은 출토지가 zone 1에 도시되는 세형동검은 경상도의 납 원료광석을 이용하였으며 출토지 미상을 제외한 세형동검의 원료 산지는 중국 북부로 확인된다. 동모와 동과의 경우, 출토지가 zone 1에 분포하는 유물의 원료 산지는 중국 북부임이 확인되며 출토지가 zone 3인 동과는 zone 2의 원료를 사용하였다. 출토지가 갈더라도 납 원료의 산지가 달리 나타나는 경우를 확인할 수 있는데 이는 청동 무기류의 유형과 관련이 있거나 유물의 제작시기 차이에 따른 결과로 판단된다.
4. 미량원소 중 은은 부화되었으며 아연, 코발트 및 철은 상대적으로 결핍됨을 알 수 있으며 비소와 안티몬은 특정 시료에서만 검출되어 산지 연구의 특정 인자로서의 가능성을 확인하였다.

본 연구에서는 세형동검 문화기의 청동 무기류 25점의 납동위원소비 및 미량원소 성분을 분석하여 출토 청동의 원료 산지에 대해 추정하고자 하였다. 청동의 제조과정 동안 부화 또는 결핍되는 미량원소를 실험으로 확인한다면 납동위원소비와 산지 연구에 활용될 수 있을 것이라 판단된다. 또한 납을 인위적으로 첨가한 삼원계 청동에 대해서는 편석된 납의 미량원소를 분석하여 기존에 연구된 한반도 내 방연석의 미량원소와 비교하는 것도 산지를 정확하고 정밀하게 추정하는데 도움이 될 것이라 본다. 이와 더불어 고고학적 내용이 바탕이 된다면 출토 청동과 관련된 다양한 논의가 진행될 수 있을 것이라 생각한다.

## 사 사

본 연구는 국립문화재연구소 문화유산 조사연구(R&D)의 사업비로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

- Robert H. Brill and J.M. Wampler, 1967, Isotope Studies of Ancient Lead. *American Journal of Archaeology*, 71, 63-77.
- Mabuchi, H., Hirao, Y. and Nishida, M., 1985, Lead Isotope Approach to the Understanding of Early Japanese Bronze Culture. *Archaeometry*, 27, 131-159.
- Choi J., Kim, S.C., Mabuchi, H. and Hirao Y., 1986, Study on the Korean bronzes. *Journal of the Korean Institute of Metals*, 24, 540-546 (In Korean).
- Lee, W.C., Cho, H.G., Kim, Y.H. and Kim S.O., 2009, A Mineralogical Study on the Arsenic Behavior in the Tailings of Nakdong Mine. *Journal of the Mineral Society of Korea*, 22, 359-370.
- Hwang J.J., 2010, Study on manufacturing technique by analysis of compositions and microtexture for Korea bronze weapons. *Conservation studies*, 31, 142-154.
- 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.
- Korea Basic Science Institute, 2014, The applicability evaluation of a lead isotope database for the provenance of bronze artifacts. *National Research Institute of Cultural Heritage, Korea*, 68-74.
- Kim S.J., Han W.R., Hwang J.J., Jeong Y.J. and Han M.S., 2015, Lead isotope ratios characteristics of Excavated bronzes from Korea peninsula. *Conservation Studies*, 36, 4-10.
- Jeong Youn-Joong and Cheong Chang-sik, 2019, Lead isotope mapping of galena from base metal deposits in the southern Korean Peninsula. *Geoscience Journal*, 23, 235-252.
- Smedley, P.L. and Kinniburgh, D.G., 2002, A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17, 517-568.
- Lee Jae Yeong, 1989, A Geochemical Study on the Chindong and Yucheon-Eonyang Granites in Relation to Mineralization. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology* 22, 21-34.

---

**Received** October 15, 2021

**Review started** October 18, 2021

**Accepted** November 22, 2021

## [ 저 자 정 보 ]

- 김소진 : 국립문화재연구소 보존과학연구실/학예연구사
- 황진주 : 국립문화재연구소 보존과학연구실/공업주사보
- 한우림 : 국립가야문화재연구소/학예연구사