강릉 굴산사에서 출토된 청동기의 제작: 제작기술 및 원료산지

Producing of Bronze Artifacts Excavated from Gulsansa Temple Site in Gangneung: Technology and Provenance

한우림¹, 김소진², 이은우³, 황진주^{4,*}

¹국립가야문화재연구소 학예연구실, ²국립문화재연구소 연구기획과, ³국립중원문화재연구소 학예연구실, ⁴국립문화재연구소 보존과학연구실

Woo Rim Han¹, So Jin Kim², Eun Woo Lee³, Jin Ju Hwang^{4,*}

¹Researching Department, Gaya National Research Institute of Cultural Heritage, Changwon 51430, Korea

²Research and Planning Department, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon 34122, Korea

³Researching Department, Jungwon National Research Institute of Cultural Heritage, Chungju 27438, Korea

⁴Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon 34122, Korea

Received October 11, 2018
Revised December 05, 2018
Accepted May 24, 2019

*Corresponding author

E-mail: kwkhjj@korea.kr
Phone: +82-42-860-9488

Journal of Conservation Science
2019;35(3):187-196

<https://doi.org/10.12654/JCS.2019.35.3.01>

pISSN: 1225-5459, eISSN: 2287-9781

© The Korean Society of
Conservation Science

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록 강릉 굴산사에서 출토된 청동기 25점은 에너지분광분석기(EDS)와 전자탐침X선분석기(EPMA)를 이용하여 성분분석해준 결과 출토된 청동기가 구리-주석의 2원계 혹은 구리-주석-납의 3원계 합금임을 알 수 있다. 합금 이후 주조 혹은 단조공정이 진행되었으며 청동고리의 경우, 금도금이 되어있음을 알 수 있다. 납 동위원소는 열이온화질량분석기(TIMS)와 레이저작막 유도 결합플라즈마질량분석기(LA-MC-ICPMS)를 이용해 주었으며, 분석결과 출토지와 근거리의 납 원료를 사용한 것을 확인하였다. 본 연구는 연구 데이터가 많지 않은 강릉지역 청동기의 제작기술 및 산지추정에 연구 목적이 있으며, 굴산사 실체의 확인 및 12~13세기 고려시대 청동기의 분석자료 구축에 기여할 것으로 생각된다.

중심어 굴산사지, 청동기, 제작, 원료, 산지

ABSTRACT Bronzes excavated from a Gulsansa temple site in Gangneung were investigated in order to study the production of technology and provenance in this area. The bronze artifacts were discovered to consist of copper-tin or copper-tin-lead alloys using chemical analysis(EDS and EPMA). The excavated bronzes were manufactured using a casting or hammering process, and a bronze belt was gilded with gold foil. The provenance of 25 bronzes was studied using lead isotope analysis(TIMS and LA-MC-ICPMS). The results reveal the use of raw materials found near the excavated site. The object of this study was to investigate the manufacturing techniques and provenance in Gangneung without the need for a lot of data. Our results will contribute to the study of Gulsansa and bronze artifacts in Goryeo(12-13th century).

Key Words Gulsansa temple site, Bronze, Producing, Raw materials, Provenance

1. 서론

강릉 굴산사(사적 제448호)는 통일신라 선종 9산 중 굴산문(岫山門)의 본산으로, 강릉 단오제의 주신인 통효대사(通曉大師) 범일(梵日)이 창건한 것으로 알려진 영동지역의 중심사찰이다. 창건기록은 삼국유사(三國遺事)와 조당집(祖堂集)에서 확인할 수 있으며, 창건시기에 차이가 있으나 적어도 851년 이전에는 굴산사가 창건되었음을 알 수 있다. 국립중앙문화재연구소의 3차례에 걸친 발굴조사 결과를 통해 굴산사는 중심공간, 생활공간, 선종공간의 3개 이상의 단위공간으로 구성되었던 것(Moon, 2015)으로 추정되며, 5번의 변화과정이 있었던 것으로 보인다(Jungwon National Research Institute of Cultural Heritage, 2015). 발굴조사를 통해 금속유물은 총 161점이 출토되었으며 청동유물은 31점이 확인되었다. 대다수의 금속유물은 건물지를 중심으로 출토되었으며, 그 외에는 담장, 배수로, 축대 등에서 확인되었다(Jungwon National Research Institute of Cultural Heritage, 2015). 출토된 청동제유물은 크게 장식부재, 의식 및 생활용구류, 기타 유물로 구분된다. 청동제유물 중 가장 많은 수량이 출토된 의식 및 생활용구류는 접시, 발과 같은 용기류가 대다수 차지하며, 정병 및 마개, 초받침, 촛대받침, 청동숟가락 및 젓가락이 소수 확인되었다.

청동은 구리(Cu), 주석(Sn), 납(Pb)의 배합비에 따라 특성이 달라지며, 동일한 성분 조성이라도 냉각 속도, 열처리, 가공 등의 제작방법에 따라 다양한 미세조직을 보인다.

불순물로 포함된 미량원소의 분석을 통해서도 원료 물질의 정련 정도를 파악할 수 있으며 이들의 함량 분포는 납동위원소를 이용한 산지추정과 더불어 청동기의 분류 및 산지를 추정하는데 도움을 준다(Kim *et al.*, 2015). 본 연구는 강릉 굴산사지의 중심공간으로 추정되는 건물지 등의 주변에서 출토된 청동기 25점의 분석을 통해 제작기술 및 납원료산지를 추정하였다. 강릉지역에서 출토된 청동기의 분석 사례가 없어 굴산사에서 출토된 청동제유물의 분석을 통해 굴산사 및 12~13세기 고려시대 청동기의 연구에 기여하고자 하였다.

2. 연구방법

강릉 굴산사지 출토 청동기 25점은 부식이 진행되어 금속심을 확인하기 어려웠으며, 대부분 파편으로 존재하였다. 분석에 활용된 청동기 시료의 외형은 Figure 1과 같으며, 출토 시료의 상세 정보는 Table 1에 정리하였다. 분석은 크게 제작기술을 확인할 수 있는 금속학적 미세조직 관찰과 성분 분석, 원료의 산지를 확인할 수 있는 납 동위원소비 분석으로 구분하여 시행하였다. 23점의 청동기에 대해 납 동위원소비를 실시하였으며, 그 중 금속심이 남아 있는 8점의 청동기에 대해 미세조직 관찰 및 성분분석을 수행하였다(arrows in Figure 1).

미세조직을 관찰하기 위해서 금속심이 남아있는 시편을 채취하여 초음파 세척기를 이용해 세척한 후, 에폭시

Figure 1. General appearance of the bronze artifacts from Gulsansa temple site in Gangneung.

Table 1. Information and analytical method used for 25 samples from Gulsansa temple site in Gangneung

No.	Code	Description	Site	Analytical method
1	919	Ring	Building site 3	SEM-EDS, TIMS
2	921	Decoration	Building site 3	TIMS
3	923	Decoration	Building site 4	TIMS
4	924	Leg	Building site 7	OM, EPMA, LA-ICP-MS
5	925	Buckle	Building site 7	OM, TIMS
6	926	Bottle	Building site 3	TIMS
7	927	Bottle's cover	Building site 8	OM, EPMA, TIMS
8	928	Bowl	Building site 3	TIMS
9	930	Candlestick	Building site 17	TIMS
10	931	Plat	Upside of building site 3	TIMS
11	932	Plat	Upside of building site 6	TIMS
12	933	Bowl's piece	Upside of building site 3	TIMS
13	934	Bowl's piece	Upside of building site 4	TIMS
14	935	Bowl's piece	Upside of building site 3	TIMS
15	936	Bowl's piece	Building site 4	OM, TIMS
16	937	Bowl's piece	Upside of building site 8	TIMS
17	938	Bowl's piece	Wall site 1	TIMS
18	941	Spoon	Building site 8	OM, EPMA, TIMS
19	942	Spoon	Building site 8	TIMS
20	944	Coin	Building site 3	TIMS
21	945	Unknown bronze	Building site 3	TIMS
22	946	Unknown bronze	Building site 3	TIMS
23	947	Unknown bronze	Building site 4	OM, EPMA, LA-ICP-MS
24	948	Unknown bronze	Building site 8	TIMS
25	949	Unknown bronze	Sidewalk 1	OM, EPMA, TIMS

수지를 이용하여 마운팅을 실시하였다. 마운팅한 시편은 연마지를 이용하여 #200, #500, #800, #1200 순으로 연마한 뒤, 3 μm , 1 μm 의 diamond suspension을 이용하여 표면을 경면과 같이 폴리싱하였다. 연마가 완료된 시편은 ethyl alcohol(99.99%)에 침적시켜 초음파 세척기로 세척 및 건조하였다. 건조가 완료된 시편은 염화철(FeCl_3)을 염산(HCl)과 증류수(H_2O)에 용해시킨 에칭액을 이용하여 에칭하였다. 미세조직은 광학현미경(Carl Zeiss, Axiotech 100HD, DEU)을 사용해 관찰하였으며, 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, JSM-IT300LV, JEOL, JPN)을 사용하여 미소 부위의 정밀한 관찰을 시행하였다.

성분분석은 전자탐침X선분석(Electron Probe X-ray Microanalyzer, JXA-8230, JEOL, JPN)을 이용하여 청동유물의 정량분석을 실시해 주었다. 20 kV, probe current는 100 nA의 조건으로 분석하였으며 시료당 5번의 면 분석을 수행하였다. 결과값은 최소값과 최대값을 뺀 평균값을 계산하여 정리하였다. 전자탐침X선분석을 이용하여 총 12종의 원소

(Cu, Sn, Pb, Zn, As, Ag, Sb, Bi, Ni, S, Co)를 분석하였으며, 결과값은 전체 함량이 $100 \pm 3 \text{ wt}\%$ 로, 신뢰성 있는 분석 값을 얻을 수 있었다.

납동위원소비 분석은 한국기초과학지원연구원에 의뢰하여 분석했으며, 열이온화질량분석기(Isoprobe-T, IsotopX, GBR)와 레이저사막 유도결합플라즈마질량분석기(NWR193UC, ESI, USA)를 이용하였다. 열이온화질량분석기의 경우 시료는 질산(HNO_3)과 염산(HCl)을 1:3 비율로 혼합한 용액으로 완전히 용해시킨 후, 건조하여 음이온 교환수지로 순도 높은 납(Pb)을 추출하였다. 분석 조건은 정적인 모드(static mode, $N=20$, 4s intergration)로 $1,200^\circ\text{C}$ 에서 분석하였으며, 외부 보정을 위해 NBS 981 시료도 같이 분석하였다. 납동위원소비의 분석데이터는 한반도 납동위원소비 광역분포도를 이용하여 해석하였다. 이는 기존에 사용되던 馬淵久夫의 분포도(Mabuchi, 1985)의 단점을 보완하고자 한반도 남부의 방연석 시료를 채취·분석하여 제작되었으며, 국내 지역별 추정작업이 가능하다는 장점이 있다.

3. 연구결과

3.1. 미세조직 관찰

시료 채취가 가능한 청동기 8점에 대하여 미세조직 관찰을 실시하였다. 청동 고리(919)는 전체적으로 부식이 진행되어 금속심이 거의 남아있지 않았다. 부식물로 인해 단순한 청동 고리로 파악된 이 유물(Jungwon National Research Institute of Cultural Heritage, 2015)은 광학현미경 관찰 및 SEM-EDS 분석을 통해 금 도금이 시행되었음을 확인할 수 있다(Figure 2). 도금층은 10 μm 내외이며 Au, Ag, Cu가 함께 검출되어 금을 절약하기 위해 은을 인위적으로 첨가한 합금 도금으로 추정할 수 있지만, 원광석인 동, 금 자체가 은을 함유했던 것을 배제할 수 없다. 도금층은 2개의 층으로 나누어졌으며 바깥층(Figure 2-1)보다 내부(Figure 2-2)에서 Ag가 더 검출되는 것이 확인된다. 이는 도금 도중 혹은 도금 후 밀착시키는 열처리 과정에서 Au와 Ag의 확산차이에 의한 현상으로 확인된다(Jeon *et al.*, 2010). 가열 과정에서 균등하게 열전달이 진행되지 않거나 온도가 과잉되어 고용된 Ag가 본래의 결정에서 밀려나와 Au와는 다른 결정을 만들었을 것이다. 이렇게 석출된 Ag는 도금층의 빈 공간으로 스며들었을 것이라 추정된다(Kim, 2014). 하지만 도금층 내 원 소지금속이 모두 부식되

Figure 2. Image of gilded ring showing Au and Ag elements distribution.

어 정확한 합금을 알 수 없으며, 남아있는 도금층 또한 부식에 의해 층이 분리되었을 가능성도 있다. Hg는 검출되지 않아 아말감도금이라 판단할 수 없지만 고온의 열처리 과정에서 수은이 증발되었을 가능성이 있다(Jeon *et al.*, 2010). 전체적인 분석 결과 청동 고리(919)의 주변 부식층에서는 Cu 부식물만 검출되는 것으로 보아 합금하지 않은 구리유물에 도금한 것으로 판단된다.

금속심이 존재하여 미세조직을 확인할 수 있는 7점의 청동기(924, 925, 927, 936, 941, 947, 949)의 미세조직은 Figure 3과 같다. 청동다리(924)는 α 상 및 $\alpha+\delta$ 상의 수지상 조직이 발달되어 있으며, 곳곳에 둥근 형태의 납 편석물이 관찰된다. 청동버클(925)은 출토 당시 청동방울로 명명되었지만 외형적인 형상으로 추정해본 결과 벨트 버클부분으로 판단된다. 전체적으로 입계부식이 진행되어 있으며, α 상만 확인된다. 정병마개(927)는 황색의 α 상이 크게 형성되어 있으며, 일부 부식이 진행되어 잘 관찰되지 않지만 회색의 $\alpha+\delta$ 상이 관찰된다. 곳곳에 납 편석물과 비금속 개재물이 존재한다. 청동 구연부 편(936)은 다각형 형태의 조밀한 α 상의 조직이 확인되며, α 상 내 쌍정조직이 관찰된다. 이는 annealing의 추가 열처리 작업을 통해 형성된 것으로

Figure 3. Optical microscope images of bronze artifacts recovered from Gulsansa temple site.

확인된다. 청동술가락(941)은 전체적으로 급랭 조직인 담금질조직과 원형의 α 상으로 구성되어 있으며, 일부 α 영역 내에는 열처리과정에서 생성된 재결정 조직인 쌍정이 확인된다. 또한 담금질조직 내에 비금속개재물이 횡 방향으로 길게 늘어진 형태를 관찰할 수 있는데, 쌍정과 비금속개재물의 형태로 판단해 볼 때 두드림 작업을 통해 청동술가락의 얇은 편을 만들어주었으며, 응력을 제거하기 위한 annealing을 반복한 것으로 추정된다. 불명청동기(947)의 경우 전체적으로 α 상이 조대하게 분포되어 있으며, 입자 내에서 slip line이 관찰된다. 이는 추가적인 열처리가 이루어졌거나 내부 잔류 응력에 의해 형성된 것으로 판단된다. 불명청동기(949)는 입계주변을 따라 부식이 진행되어 있으며, 잔존하는 금속조직으로 보아 α 상이 바탕을 이루고, 일부 회색의 $\alpha+\delta$ 조직과 납 편석물과 비금속 개재물이 부식층과 함께 관찰된다.

3.2. 화학조성

미세조직 관찰을 위해 시료 채취한 7점의 청동기 중 부식이 심한 2점(925, 936)을 제외한 5점(924, 927, 941, 947,

949)의 주성분과 미량성분을 분석하였다. 성분분석 결과, 청동기 3점(924, 927, 949)은 Cu-Sn-Pb의 3원계이며, 청동술가락과 불명청동기(941, 947)는 Cu-Sn의 2원계 합금으로 판단된다. 미량원소 분석을 통해 5점의 Fe, Zn, As, Ag, Bi, Ni, S, Co 등의 성분이 1 wt% 이하로 검출되는 것을 확인할 수 있다(Table 2). 분석된 8종의 미량원소의 분포도를 보면 (Figure 4), Fe와 Zn은 0.2 wt% 미만에서 비슷한 경향을 보이며 As는 941을 제외한 나머지 4점에서 높은 경향성을 보임을 알 수 있다. Sb, Bi, Co는 모든 시료에서 거의 검출되지 않으며 Ag는 924와 927에서 0.2 wt% 이상으로 검출됨을 확인할 수 있다. S는 927에서 1.1 wt%로 높은 경향성을 보인다.

SEM-EDS를 이용한 부식층 및 비금속개재물에 대한 포인트 분석결과 7점 청동유물에서 Cu, S, Pb, S, P, Cl, Ag, Si도 확인된다(Table 3, Figure 5).

3.3. 납동위원소비 분석을 통한 산지추정

청동기의 납동위원소비 분석을 통해 제작에 사용된 원광석의 산지를 추정할 수 있다. 25점의 청동기의 납동위원

Table 2. Chemical composition of bronze artifacts in Gulsansa temple site based on EPMA

Code	Composition (wt%)												Total
	Cu	Sn	Pb	Fe	Zn	As	Ag	Sb	Bi	Ni	S	Co	
924	80.2	19.8	1.9	0.07	0.09	0.39	0.28	-	-	0.07	0.17	-	102.97
927	72.6	9.9	12.2	0.04	0.06	0.52	0.47	-	-	0.03	1.1	0.03	96.95
941	80.1	22.2	0.02	0.04	0.09	-	0.20	-	0.02	0.04	0.38	-	103.09
947	90.6	9.6	0.18	0.11	0.10	0.41	0.14	-	0.05	0.16	0.01	-	101.36
949	83.6	10.4	2.0	0.09	0.10	0.14	0.15	-	-	0.03	0.09	-	96.60

Figure 4. Minor and trace elements composition (wt%) of bronze artifacts in Gulsansa temple site.

Figure 5. SEM images of bronze artifacts recovered from Gulsansa temple site.

Table 3. Chemical composition of bronze artifacts in Gulsansa temple site based on EDS

Code	Point	Composition (wt%)	
		Main	Element(<5%)
924	1	Cu, Ag, Sn, S	Si, Cl
925	2	Cu	Sn, Cl, Ag
927	3	Pb, S	Sn, Cu
936	4	Cu, S	-
941	5	Cu, Sn	P, S, Cl, Ag
947	6	Cu, Sn, Pb	Si, S
949	7	Cu, S	-

소비 분석 결과는 Table 4에 정리하였으며, 한반도 납동위 원소비 광역분포도[Korean Peninsula Lead Isotope Database (KOPLID), 2012]에 적용한 결과는 Figure 6과 같다. 강릉 굴산사에서 출토된 25점의 청동기의 납동위원소비는 17.910~19.033의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, 15.601~15.828의 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, 37.757~39.281의 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, 0.8277~0.9428의 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 및 2.0341~2.1474의 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 범위에서 분포한다. 분포도에 강릉 굴산사지 출토 청동기의 납동위원소비를 적용한 결과, 청동버클(925)은 Zone 1에 분포하며 청동장식(921), 청동정병(926), 청동접시(932), 동전(944), 불명청동기(948)는 Zone 2에 위치한다. 청동고리(919), 청동장식(923), 청동다리(924), 청동 초받침(930), 청동접시(931), 청동굽(933), 불명청동기(947, 949)는 Zone 3에 분포하며, 나머지 정병마개(927), 청동발(928), 청동저부(934), 청동 구연부 편(935, 936, 937, 938), 청동술가락(941), 청동술가락(942), 불명청동기(945, 946)는 Zone 2와 Zone 3의 경계면에 위치한다.

4. 고찰 및 결론

고대 청동기 제작 시 우리나라에서 사용된 원광석은 단일광종으로 산출되는 경우는 드물다. 구리광석에서는 Au, Ag, Zn, Fe, Pb 등이 함께 수반되어 산출되며(National Research Institute of Cultural Heritage, 2011), 주석 광석에서는 Cu, Pb, Sb, Bi, As, Fe 등의 불순물을 수반한다(Lee and Seo, 1995). 납 광석은 Ag를 대부분 포함하고 있으며, Zn, Fe, Cu도 함유하며, 동반금속으로는 Sn, As, Sb 등이 있다(Schumann, 1996). 불순물을 함유한 원광석은 불필요한 맥석을 제거하기 위한 선광 작업을 한다. 그리고 황을 제거하기 위한 배소 작업을 실시한 뒤 제련작업을 하는데, 완벽하게 불순물을 제거할 수 없기 때문에 황을 포함한 미량의 불순물은 청동기 내 잔존하게 된다. 강릉 굴산사지 출토 청동기 5점(924, 925, 927, 941, 947)은 As, Ag, S의 높은 경향성이 확인된다. 이 원소들은 광산을 구분하는데 기여할 것으로 추정되며, 이처럼 미량원소에 차이를 보이는 것은 광석을 생성시킨 광산의 근원 물질과 광산 주변의 기반암 그리고 광석의 결정화 단계에서 발생하는 차이에 의한 것으로 판단되므로 지역적인 분포 특성 및 구분 인자의 가능성을 파악해 볼 수 있다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2013). 특히 청동다리(924)와 불명청동기(949)의 경우, Cu-Sn-Pb의 3원계 합금이며 미량원소 부화 패턴이 유사하여(Figure 4) 제작 시 사용한 광석의 산출지 및 제작에 대해 판단할 수 있다. 납동위원소비를 분석한 결과, Zone 3에 위치하여 동일한 지역의 광석을 사용하였음을 추정할 수 있다.

청동 제작에 사용되는 납은 주조성과 유동성을 좋게 하고, 값비싼 주석 대신 구하기 쉬워 의도적으로 첨가한다. 반면에 납은 구리나 주석과 함께 합금되지 않고 응고되면

Table 4. Lead isotope abundance ratio of Gulsansa temple site samples

No.	Code	Lead isotope					Zone
		$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
1	919	18.335	15.670	38.632	0.8547	2.1071	3
2	921	18.753	15.734	38.778	0.8390	2.0678	2
3	923	18.620	15.804	39.296	0.8488	2.1105	3
4*	924	18.126	15.653	38.461	0.8637	2.1215	3
5	925	18.359	15.601	38.527	0.8498	2.0985	1
6	926	18.594	15.828	38.728	0.8512	2.0831	2
7	927	18.718	15.775	39.281	0.9428	2.0986	2-3
8	928	18.643	15.777	39.191	0.8463	2.1021	2-3
9	930	18.408	15.754	39.077	0.8558	2.1228	3
10	931	18.336	15.677	38.819	0.8550	2.1170	3
11	932	18.918	15.791	39.333	0.8348	2.0791	2
12	933	17.910	15.646	38.459	0.8737	2.1474	3
13	934	18.591	15.754	38.910	0.8474	2.0927	2-3
14	935	18.583	15.758	39.122	0.8480	2.1052	2-3
15	936	18.556	15.740	39.035	0.8483	2.1037	2-3
16	937	18.569	15.752	39.059	0.8482	2.1032	2-3
17	938	18.575	15.759	39.070	0.8483	2.1033	2-3
18	941	18.575	15.691	38.938	0.8447	2.0963	2-3
19	942	18.517	15.721	38.999	0.8490	2.1061	2-3
20	944	19.033	15.753	38.562	0.8277	2.0261	2
21	945	18.484	15.717	38.730	0.8503	2.0953	2-3
22	946	18.444	15.688	38.642	0.8506	2.0950	2-3
23*	947	18.213	15.677	38.813	0.8605	2.1303	3
24	948	18.558	15.712	37.757	0.8467	2.0347	2
25	949	18.476	15.751	39.094	0.8526	2.1159	3

*The data of 23 bronzes was analyzed using the TIMS but Bronze leg(924) and Unknown bronze(947) were analyzed using the LA-MC-ICPMS with mounting sample.

Figure 6. Comparison of lead isotope results($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) of Gulsansa temple site samples.

서 금속조직 내에 원형의 편석을 이루는데, 이러한 편석은 불규칙하게 형성되며 청동의 질을 떨어뜨릴 수 있다(Scott, 2002). 강릉 굴산사에서 출토된 청동기 5점의 납의 함량은 적게는 0~2 wt%, 많게는 12 wt%로, 특히 927번 정병마개는 납의 함량이 10 wt% 이상 검출되었다. 창원 만수리 유적에서 출토된 고려시대 동계병 3점은 납의 함유량이 6~11 wt%로 확인되며(Kim, 2008), 청주 사뇌사지 유적에서 출토된 고려시대 청동향완, 동계접시, 동계주자, 동계호 또한 납의 함량이 13~21 wt%로 높게 검출된다(Kang *et al.*, 2000). 이를 통해 정병마개가 정병의 전체를 대표할 수는 없지만 제작을 용이하게 하고자 높은 양의 납을 첨가했던 것으로 판단된다. 굴산사지 출토 청동기 5점의 주석의 함량은 9~20 wt%로 확인되며, 특히 924번 청동다리와 941번 청동술가락의 주석함량은 20 wt% 이상으로 검출된다. 구리-주석 상태를 기준으로 할 때 주석 함량이 13.5 wt%를 초과하게 되면 α 상 이외의 제 3상이 출현하게 되나 응고당시의 편석을 고려하면 10 wt% 이상의 합금에서는 특별한 처리가 없는 한 제3상이 출현하게 된다. 이는 청동소재의 취성을 증가시키기 때문에 제품의 성능을 저하시킬 수 있다(Jung and Park, 2005). 924번의 청동다리와 비슷한 유형으로 신라왕경에서 출토된 청동다리편이 확인되는데 α 상과 δ 상이 혼합되어 있는 조직으로 주석함량이 부위에 따라 차이를 보이나

16~22 wt%로 검출되었으며, 주조 외에 다른 공정이 발견되지 않았다. 이는 주석함량을 증가시키므로써 용해온도를 140℃ 정도 낮아지게 하며, 납을 함께 첨가하여 주조성을 향상시켜준 것으로 추정했다(Jung and Park, 2004). 따라서 924번 청동다리의 경우 무거운 청동을 받쳐주기 위해 강도를 높여주고자 주석함량을 높여준 것으로 판단되며, 주석을 첨가함에 따라 취성이 증가하는 것을 방지하고자 납을 함께 넣어 주조해 준 것으로 추정된다. 반면에 941번 청동술가락의 경우 주석이 높은 함량이지만 취성의 원인이 되는 δ 상의 생성을 억제하기 위해 담금질을 통하여 담금질 조직을 출현시켜 잔류하게 함으로써 청동기의 기계적 성능을 크게 향상시켰다(Jung and Park, 2004). 따라서 941번 청동술가락은 앞선 924번의 청동다리에 비해 발견된 기술 형태로 보이며 이는 고려시대에 출토된 안동 옥동 유적 출토 청동술가락 2점(Chung and Lee, 2009), 청주 사뇌사지 출토 청동술가락 1점(Kang *et al.*, 2000), 김해지역 출토 청동술가락 3점, 상주 청리 출토 청동술가락 1점, 대전 복수동 출토 청동술가락 2점, 울진 봉산리 출토 청동술가락 2점(Chung *et al.*, 2004), 태안마도 출토 청동술가락 7점(Han *et al.*, 2016), 광주 쌍촌동 출토 청동술가락 1점에서 출토된 청동술가락과 유사하다. 이를 통해 청동술가락의 제작기술은 지역에 상관없이 동일했던 것으로 추정된다.

Figure 7. Comparison of major elements(Sn/Cu vs Pb/Cu) in Gulsansa temple site samples and another samples in same age.

기존에 연구된 고려시대 출토 청동기의 주성분 분포도를 통해 불명 청동기인 947번과 949번의 유형을 분석한 결과는 Figure 7과 같다. 2점의 불명 청동기의 주변에 분포하는 유물은 성남 판교 출토 청동불상 1점(Choi *et al.*, 2013), 출토지 미상 청동불상 1점, 청주 사뇌사지 출토 동제 금고 1점(Kwon *et al.*, 2000), 미륵사지 출토 청동제 장신구 2점(Chung *et al.*, 1992), 완도 법화사지 동종 2점(Kim and Kim, 2007; Kang *et al.*, 2007), 청주 사뇌사지 출토 동제령 1점(Kwon *et al.*, 2000)으로 확인된다. 이를 통해 추정해 보면 2점의 불명 청동기는 기능에 중점을 두지 않고, 장식에 중점을 둔 청동 유물의 일부분인 것으로 판단된다.

강릉 굴산사지 출토 청동기의 납동위원소 분석을 통해 제작에 사용된 원광석의 산지를 추정할 수 있다. 납을 포함하고 있는 3원계 청동기의 납동위원소비는 납광석의 산지를, 납을 포함하지 않은 2원계 청동기의 납동위원소비는 동광석의 산지를 나타낸다. 납동위원소비는 원료 산지 외 제작장소 또는 제작시기의 동일성 판단에 사용된다. 강릉 굴산사지 출토 청동기는 Zone 1에 분포하는 1점을 제외하고 Zone 2와 Zone 3을 중심으로 분포하고 있다. Zone 1은 지질도상에서는 경상분지 지역에 속하며, 지역적으로는 경상남도와 경상북도 중남부 지역을 포함하고 있다. Zone 2는 지구조상 영남육괴와 옥천변성대의 동북부지역으로 경상북도 북부지역과 강원도 남부지역에 분포하고 있다. Zone 3는 지질적으로 영남육괴와 옥천변성대의 대부분과 경기육괴 동부지역으로 포함하고 있으며, 지역적으로는 전라도, 충청도, 경상도 북부지역이 이에 속한다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2014). 강릉 굴산사지는 Zone 2에 위치하는데 이를 통해 Zone 1에 위치한 청동버클(925)을 제외한 대부분의 청동기는 출토지 주변의 원료를 사용했음을 알 수 있다. 또한 고려시대는 청동기의 재활용과 원료의 혼합이 일반화되어있던 시대이기 때문에 원료의 혼합 가능성도 고려하여야 한다. 청동기의 원료 산지 연구는 다양한 변수(합금의 정도, 혼합의 정도, 재활용 등)로 인해 정확한 추정이 어렵다. 하지만 원료 및 청동기에 대한 분석 데이터가 축적된다면 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 국립중앙문화재연구소에서 시료를 제공받았으며, 문화재청 국립문화재연구소 문화유산조사연구(R&D) 사업의 지원을 받아 이루어졌습니다.

REFERENCES

- Choi, M.R., Cho, N.C., Kim, D.M. and Yun, S.Y., 2013, Study on manufacturing technique and lead provenance of bronze Bodhisattva from Pangyo-dong sites in Seongnam. *Journal of Conservation Science*, 29(3), 231-241. (in Korean with English abstract)
- Chung, K.Y., Kang, H.T., Chong, D.C., Yun, Y.H. and Lee, H., 2004, Study on quantitative & trace element analysis of metal objects. *The Korean Society of Conservation Science for Cultural Heritage*, Buyeo, October 1, 137-153. (in Korean with English abstract)
- Chung, K.Y., Kim, Y.C. and Maeng, S.C., 1992, Metallurgical study of bronze artifacts excavated from Miruksa temple. *Journal of Conservation Science*, 1(1), 27-39. (in Korean with English abstract)
- 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 Conservation Science*, 25(4), 411-420. (in Korean with English abstract)
- Han, W.R., Kim, S.J. and Hwang, J.J., 2016, Chemical compositions and lead isotopic ratios of bronze spoons excavated from coastal areas of Mado island, Taean county. *Korean Journal of Cultural Heritage Studies*, 49(3), 4-11. (in Korean with English abstract)
- Jeon, I.H., Lee, J.S. and Park, J.S., 2010, A study on elemental diffusion in gilded artifacts. *Journal of Conservation Science*, 26(2), 109-120. (in Korean with English abstract)
- Jung, Y.D. and Park, J.S., 2004, Transitions in bronze technology observed in bronze artifacts excavated from the Shilla Wang-Gyeong. *Korean Journal of Cultural Heritage Studies*, 37, 267-284. (in Korean with English abstract)
- Jung, Y.D. and Park, J.S., 2005, Technical transitions observed in the bronze artifacts excavated from the Boonhwang temple site in Kyongju. *Korean Journal of Metals and Materials*, 43(1), 80-86. (in Korean with English abstract)
- Jungwon National Research Institute of Cultural Heritage, 2015, The trial digging investigation report of Gulsan temple, Gangneung. 1. (in Korean)
- Kang, H.T., Chung, K.Y. and Cho, N.C., 2007, Scientific analysis and provenance study of bronze bells excavated from Buphwasat(temple) in Wando island. *The Honam Archaeological Society*, 25, 131-148. (in Korean with English abstract)
- Kang, H.T., Yu, H.S., Moon, S.Y. and Kwon, H.N., 2000, Scientific analysis of bronze materials of Sanoisa temple

- in Chongju(I). Conservation Science in Museum, 2, 57-68. (in Korean with English abstract)
- Kim, G.I., 2014, A study on component ratio and production technology according to differences in the surface color of gilt bronze artifacts from Hwangoh-dong, Gyeongju. Master's thesis, Yongin University, Yonjin. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.J. and Kim, S.K., 2007, A review on treasure no.1167, unified Silla Buddhist bell from Uncheon-Dong, Cheongju, about its form and conservational scientific features. Korean Journal of Cultural Heritage Studies, 40, 357-386. (in Korean with English abstract)
- Kim, W.H., 2008, Metallographic investigation and provenance study of copper bottles from Mansu-ri site, Cheongwon. Journal of Central Institute of Cultural Heritage, 4, 213-229. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.J., Lee, E.W., Hwang, J.J. and Han, W.R., 2015, A literature review on ancient smelting technology and sites of copper. Korean Journal of Cultural Heritage Studies, 48(4), 126-137. (in Korean with English abstract)
- Kwon, H.N., Yu, H.S. and Ahn, B.C., 2000, Metallurgical study of bronze relics excavated from Sanoesa temple, Chongju. Journal of Conservation Science, 9(1), 1-10. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.L. and Seo, C.J., 1995, Nonferrous metallurgy. Munundang, Seoul. (in Korean)
- Mabuchi, H., 1985, The lead isotope systematics in Asia and near East. Grant Report to the Ministry of Education, Science, and Culture, Japan, 19. (in Japanese)
- Moon, O.H., 2015, Articles: Space configuration and characteristics of the Gulsan temple. The Dong Gook Sa Hak, 59, 357-396. (in Korean with English abstract)
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2011, Investigation on the refining technology of extracting metal sources through the acquisition of bronze ore. (in Korean)
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2013, The distribution mapping of lead isotope in Korea Peninsula. (in Korean)
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2014, Guidebook of provenance study of the bronze artifacts using distribution map of lead isotope ratio in Korean Peninsula. (in Korean)
- Schumann, H., 1996, Metallografie. Hakmunsa, Seoul, 516. (Original work published 1993) (in Korean)
- Scott, D.A., 2002, Copper and bronze in art: corrosion, colorants, conservation. The J. Paul Getty Trust, Los Angeles.