Journal of Conservation Science
Vol. 19, pp 67-72(2006)
Printed in the Republic of Korea

경주 왕경지구 금동풍탁(金銅風鐸)의 성분조성과 납동위원소비

정영동 | 강형태* | 허일권* | 조남철**

국립경주문화재연구소 보존과학실
*국립중앙박물관 보존과학실
**공주대학교 문화재보존과학과

Chemical Composition and Lead Isotope Ratio of Poong- Tag(Wind Bell) from Wanggyeong Site, Gyeongju

Chung Young-Dong | Kang Hyung-Tae* | Huh Il-Kwon* | Cho Nam-Chul**

Conservation Science Laboratory, Gyeongju National Research Institute of Cultural Heritage
*Conservation Science Laboratory, National Museum of Korea
**Department of Cultural Heritage Conservation Science, Kongju National University

초 록 경주 왕경지역에서 출토된 금동풍탁의 성분조성과 납동위원소비를 분석하였다. 유도결합플라즈마분광분석법(ICP)으로 주성분 및 미량성분 10개 원소를 분석한 결과 풍탁의 소지는 Cu와 Sn의 합금으로서 조성비는 92 : 4 이었다. 그외 8종(Pb, Zn, Fe, Ag, Ni, As, Sb, Co)의 미량성분은 모두 0.2% 이하로서 검출되었다. 이러한 결과는 Cu와 Sn 광석을 고순도로 정련하여 풍탁을 제조하였다는 것을 의미한다. 풍탁의 납동위원소비는 열이온화질량분석기(TIMS)로 측정하였고, 기존의 한국, 중국 및 일본의 납광석의 산지별 데이터베이스를 이용하여 풍탁 제조에 사용한 원료 산지를 추정하였다. 그 결과 납동위원소비에 의한 원료광석의 산지는 일치하지 않고 있어 판단이 어려워 단정적으로 기술할 수 없었다. 향후 연구과제로 남겨 놓고자 한다. 또한 풍탁의 미세조직을 관찰한 결과 일반적인 주조조직에서 볼 수 있는 dendrite조직이 잘 발달되어 있었으며 특별한 열처리 공정은 발견되지 않았다.
풍탁에 대한 이러한 일련의 과학 분석 결과는 향후 시대적, 지역적으로 풍탁의 비교 연구를 위한 기초 자료로서 활용될 수 있다.

중심어 : 풍탁, 성분조성, 납동위원소비, 미세구조, 원료산지

ABSTRACT The chemical compositions and lead isotope ratio of *Poong-Tag*(wind bell) bell excavated from Wanggyeong site, Gyeongju have analyzed by ICP and TIMS.
The analysis result of chemical composition of *Poong-Tag* shows that it consists of 92:4 ratio of Cu:Sn. Other 8 minor elements(Pb, Zn, Fe, Ag, Ni, As, Sb and Co) show the concentration of below 0.2% respectively. This result means that *Poong-Tag* have made using highly purified Cu and Sn ore. For the study of provenance of raw material with the lead isotope ratio, the origin of the raw material of *Poong-Tag* can not be presumed owing to beyond the scope. The observation result of microstructure of *Poong-Tag* show the dendrite structure made through casting process.
The chemical composition, microstructure, and lead isotope ratio of Poong-Tag excavated from Wanggyeong site, Gyeongju can be used as fundamental data to compare with other *Poong-Tag* of different regions and periods.

key word : Poong-Tag(wind bell), Chemical composition, Lead isotope ratio, Microstructure, Provenance

접수 ' 06. 08. 09. / 심사 ' 06. 08. 28.

I. 머리말

신라 왕경지역은 행정구역상 경상북도 경주시 구황동 355-4번지 일대에 위치하며 황룡사지 동남편 외곽에 해당한다. 국립경주문화재연구소에서는 신라왕경지구 발굴조사계획의 일환으로 1987년 3월부터 2002년 10월까지 발굴조사를 실시하였으며 편의상 황룡사 금당지 중앙대좌에서 남쪽으로 23.5m 거리에 위치한 지점을 좌표의 기준으로 구역을 설정하였다[1]. 이 구역에서 남북향 및 동서향의 도로가 발견되었는데 거의 평면정방형이다. 동쪽 외곽에는 남북도로가 위치하며 도로 폭은 대략 5.5m 정도이다. 이 도로에서 토기, 토제품, 석제품 및 금속제품 등 36점이 발견되었다[1].

본 연구에서는 금속제품 중 풍탁에 관심을 가지고 과학 분석을 실시코자 하였다. 풍탁은 백제, 통일신라, 고려 및 조선조의 각 시대를 통하여 석탑의 4개 모서리에 작은 구멍을 뚫고 매달은 종(鐘) 형태의 장식으로 잘 알려져 있지만 실물은 그리 많지 않다[2]. 석탑의 크기, 구조 및 형태는 시대와 지역적 특성에 따라 크게 다르며 이에 매달은 풍탁 역시 다양한 모습을 나타내고 있다. 또한 풍탁은 작지만 종의 기능과 구조를 갖추고 있어 대형 청동종의 축소판으로도 볼 수 있다는 견해도 있다[2]. 따라서 본 왕경지구에서 발굴된 금동풍탁의 과학적 연구는 향후 시대별 풍탁의 제작방법 및 원료의 성분조성을 연구할 수 있는 기초 자료가 되며 또한 통일신라시대 청동종의 기원과 구조를 이해하는데 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

금동풍탁은 청동을 종의 형태로 제작한 다음 표면에 금박을 입힌 것이다. 청동을 대상으로 과학적 조사를 수행할 경우에는 합금성분의 배합비, 미세구조 및 원료의 산지추정 연구가 중요시 되고 있으며 금도금의 두께 및 불순물의 성분조성은 도금기법 연구에 필수적이다[3~5].

본 연구는 경주 왕경지구 유적에서 출토된 금동풍탁의 소지금속을 대상으로 과학 분석한 결과를 정리한 것이다. 풍탁 표면의 도금층은 시료 채취가 어려워 분석할 수 없었다. 청동 소지금속의 성분조성은 유도결합플라즈마분광분석법(ICP)[6]을 사용하여 주성분 및 미량성분 등 10종의 성분함량을 결정하였고 납동위원소비(Lead Isotope Ratio)는 열이온화질량분석법(TIMS)[7~9]을 채용하여 분석하였다. 이들 결과를 바탕으로 풍탁의 제조방법 및 원료의 산지[10~12]를 검토하였다. 이와 같이 풍탁에 대한 일련의 과학적 연구는 향후 삼국시대, 고려 및 조선시대의 풍탁을 비교할 수 있는 기초 데이터로 활용될 것이다.

II. 금동풍탁

금동풍탁이 발견된 지점은 왕경지구 동편 남북도로(S130E280-1지점)의 지표하 30cm 암갈색점질토층이다[1](Photo 1). 상단에 방울을 끼웠던 것으로 보이는 구멍이 보이며 동제품에 금박을 얇게 입혔다[1](Photo 2 ; 길이 5.1cm, 너비 3.5cm, 두께 0.25cm, 중량 56.9g)

III. 분석방법

1. 유도결합플라즈마분광분석법(ICP)[6,13]

국립경주문화재연구소에서는 풍탁의 형태를 그대로

Photo 1. Shape of *Poong-Tag* at Wanggyeong site

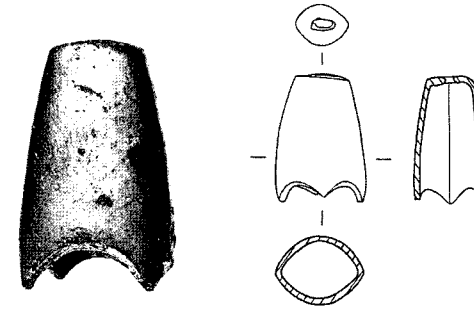

Photo 2. Shape and structure of *Poong-Tag* after conservation[1]

유지하면서 시료를 얻기 위하여 몸체 내부의 아래 부분에서 금속소지 부분을 소량 채취하였다. 표면의 도금층은 외형의 변화를 줄 우려가 있어 그대로 보존하였다. 시료의 무게는 약 15mg 이었다. 시료를 테프론 가압용기(Teflon Digestion vessel)에 넣고 왕수(염산:질산 = 3:1) 3ml와 HF(불산) 1ml를 넣고 뚜껑을 닫고 밤새 가열하였다. 상온에서 서서히 식힌 후 뚜껑을 열고 시료가 완전히 용해되었는지를 확인하였다. 다시 가열하여 건고상태로 만든 다음 1% 질산용액을 넣어 10g을 만들었다. 표준용액은 원자흡광용 표준원액(1000 ppm, BDH spectrosol)을 사용하여 묽혔는데 분석시료의 매트릭스를 맞추기 위하여 왕수를 1ml 씩 첨가하였다. 시료분석은 유도결합플라즈마발광분석기(ICPS-1000III, Shimadzu, Japan)를 사용하여 10 종의 성분원소(Cu, Sn, Pb, Zn, Fe, Ag, Ni, As, Sb, Co)를 분석하였다. 각 시료에 대하여 3회 분석하여 나타난 값을 평균하여 정량하였다.

2. 열이온화질량분석법(TIMS)[14,15]

시료를 약 2mg 정도 테프론 바이알에 넣고 정제된 왕수를 2~3 ml 첨가한 다음 150 ℃의 가열판에서 밤새도록 가열하였다. 다음 바이알 뚜껑을 열고 가열하여 건조시켰고 6N 염산 2 ml 정도를 사용하여 다시 건조시킨 후 1N HBr 1ml 정도에 녹였다. 원심분리 시킨 녹인 시료를 음이온교환수지(AG1-X8, chloride form, 100-200#)와 1N HBr을 사용하여 납을 분리하였다. 분리한 납은 Re single filament에 얹어 기초과학지원연구소의 열이온화질량분석기(Thermal ionization mass spectrometer:TIMS, Model : VG Sector 54-30)를 사용하여 동위원소비를 측정하였다. 분석결과는 표준물질(NBS SRM 981)의 측정치를 사용하여 보정한 것이다. 분석과정의 총 바닥값(total blank)은 1ng 내외이었다.

3. 금속현미경 조사

위에서 채취한 풍탁의 내부 소지금속 시료를 에폭시 수지로 마운팅 한 후 사포의 입도 순서에 따라 #300, 500, 1000, 1200, 2400, 4000의 순서대로 연마한 후 물로 세척하였다. 그리고 끝마무리 연마는 연마포(MD-MOL, MD-NAP, Struers)에 연마제(DP-Spray,P, 3 ㎛, 1㎛, OP-U, Struers)를 뿌리면서 시료에 스크레치가 없을 때까지 연마하였다.

연마가 끝난 시편은 암모늄을 이용한 부식액(NH_4OH + H_2O_2 + Distilled water)을 사용하였다. 부식된 시편은 금속현미경(Metallurgical Microscope, OLYMPUS PMG3, JAPAN)를 사용하여 조직을 관찰하였다.

4. 다변수분석법(Multivariate analysis)[16]

대부분 납동위원소비 데이터는 주로 $^{207}Pb/^{206}Pb$과 $^{208}Pb/^{206}Pb$을 두축으로 한 방연광(方鉛鑛)분포도(Figure 1 및 Figure 2 참조)에 시료를 표시하여 그 산지를 추정하고 있다[17]. 이 경우 $^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$의 데이터는 무시되고 있다는 점과 시료의 분포가 직선상에 나타나면 동일지역의 시료로 간주한다는 점 또 산지별, 시대별로 시료를 판별할 수 없는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하는 방법으로서 모든 데이터를 동시에 사용하여 선형판별식분석(SLDA)으로 방연광의 분포도를 나타낸 것이 Figure 3이다. 이 그림은 한국 · 중국 · 일본의 방연광의 납동위원소비 데이터[18]를 사용하여 도시한 것이다.

IV. 결과 및 고찰

1. 성분조성

유도결합플라즈마분광분석법(ICP)을 사용하여 10 종의 성분함량을 결정하였으며 그 분석 결과를 Table 1에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 풍탁의 소지는 Cu와 Sn의 2원 합금으로서 그 비율은 92 : 4 정도임을 알 수 있으며 불순물로서 As와 Ni이 존재하며 나머지 성분(Pb, Zn, Fe, As, Sb, Co)은 모두 무시할 만한 농

Table 1. *Chemical composition of Poong-Tag* from Wanggyeong site(%)

Item	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Ag	Ni	As	Sb	Co	Total
Poong-Tag	91.8	4.3	tr	tr	tr	0.18	0.06	tr	tr	tr	96.7

도 값을 나타내었다. 이러한 결과는 고순도로 정련된 구리 및 주석광석을 사용하여 풍탁을 제조하였다는 것을 의미한다.

2. 미세조직

금속의 미세조직을 관찰하면 제작 당시의 제작기법 즉 주조로 만들었는지 아니면 단조로 만들었는지를 알 수 있으며 또한 특별한 열처리 공정 등이 이용되었는지를 알 수 있다. 본 풍탁의 미세조직을 관찰한 결과 주조조직에서 일반적으로 관찰되는 수지상(dendrite, α상)조직이 잘 발달하고 있음을 알 수 있다. 또한 조직 내부에는 풍탁이 부식되어져 있는 부분을 관찰 할 수 있다. 그러나 주조공정 이외에 특별한 열처리 공정은 발견되지 않으며 주조 시 비교적 서서히 냉각되어 제작된 것으로 추정된다.

3. 원료의 추정산지

보통 청동기에서 납의 함량이 2% 이상이면 의도적으로 납을 첨가한 것으로 보고 있는데[17] 풍탁은 납 함량이 미량(trace)으로 존재하므로 풍탁의 납 성분은 원료 광석(구리 또는 주석)에서 불순물로 함유된 것으로 판단된다. 따라서 이 풍탁의 납동위원소비 결과는 광석의 산지와 관련 있다는 것을 의미한다. 지구과학적으로 구리, 주석, 납은 닮은 성질이 있어 비슷한 장소에서 산출되며 동광석을 산출하는 장소가 있으면 당연히 가까운 곳에 납광산이 존재할 가능성이 큰 것으로 보고되어 있다[14]. 풍탁의 납동위원소비 분석 결과를 Table 2에 나타내었다.

Photo. 3 Microstructure of Poong-Tag(200 X)

(1) 도식 A와 B : 청동기의 산지추정을 위해 $^{207}Pb/^{206}Pb$와 $^{208}Pb/^{206}Pb$을 축으로 한 Figure 1(도식 A) 및 $^{206}Pb/^{204}Pb$와 $^{207}Pb/^{204}Pb$를 축으로 한 Figure 2(도식 B)를 사용하였다. 여기에서 보는 바와 같이 한국(▲,△)중국(■, □) 일본(×)의 방연석의 영역이 잘 나타나 있어 청동기의 산지 분류에 유용하게 사용되고 있다. Table 2의 납동위원소비 데이터를 Figure 1과 Figure 2에 각각 나타내었다. 그 결과 Figure 1에서 보는 바와 같이 풍탁(①)은 한국남부 영역에 포함되어 있으나 Figure 2에서는 한국남부 영역에서 다소 떨어져 있어 있다. 따라서 두 결과가 서로 일치하지 않으므로 한국남부일 가능성만을 제시하고자 한다. 본 건에 대하여는 앞으로 방연석의 납동위원소비 데이터의 축적이 이루어지면 데이터를 다시 비교해서 그 결과를 발표하고자 한다.

(2) 선형판별식분석 : 다변수분석법중 선형판별식분석법(SLDA)으로 방연광의 분류를 위한 판별함수를 구하였다. 한국, 일본, 중국 방연광 시료 134종의 전체 납동위원소비 데이터를 사용하여 선형판별식분석을 수행한 결과이다.

풍탁의 납동위원소비를 사용하여 선형판별식분석에 의한 시료의 판별점수(DS_1 및 DS_2)를 Table 2에 함께 나타내었고 Figure 3에서 그 위치를 볼 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 풍탁(①)은 위치로 보아 한국남부 지역의 범위를 벗어나 있다. 따라서 위 풍탁 1점에 대한 납동위원소비를 사용하여 나타낸 Figure 1, 2 및 3을 서로 비교해 보면 이들 산지추정 결과는 모두 일치하지 않아 향후의 연구과제로 남겨두고자 한다.

Table 2. Lead isotope ratio data and discriminant score of Poong-Tag

Poong-Tag	Lead isotope ratio					Discriminant score	
	206/204	207/204	208/204	207/206	208/206	DS1	DS2
①	19.416	16.040	39.783	0.8260	2.0490	-1.077	1.469

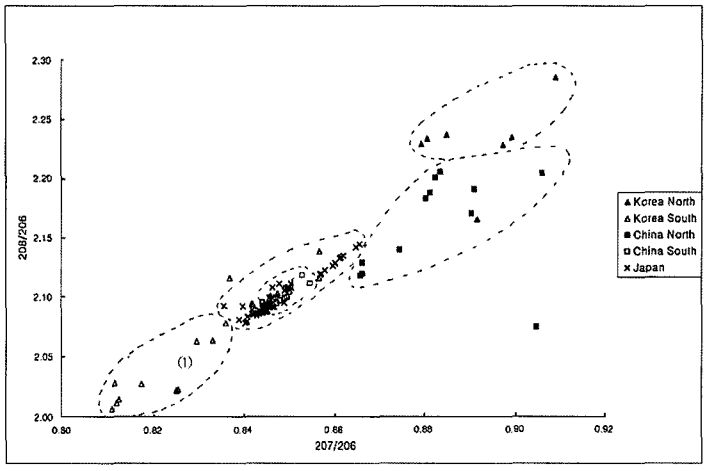

Figure 1. Plot of lead isotope ratio of galena of Korea, China and Japan(type-A) and location of Poong-Tag(①)

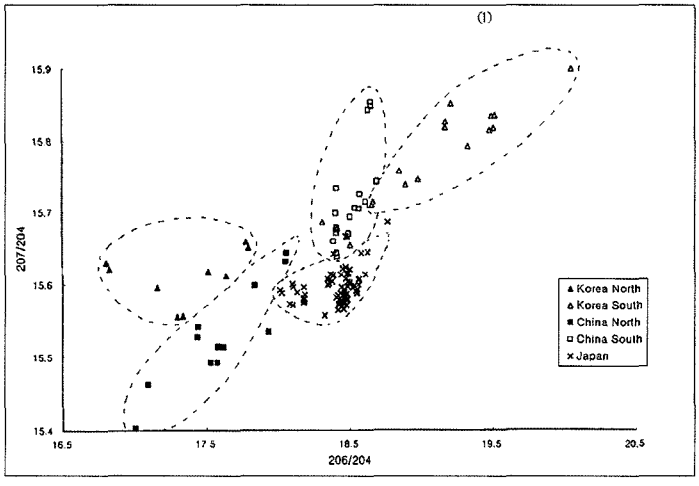

Figure 2. Plot of lead isotope ratio of galena of Korea, China and Japan(type-B) and location of Poong-Tag(①)

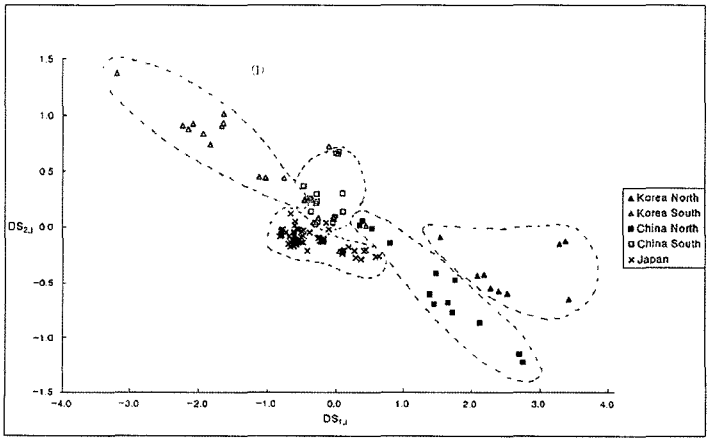

Figure 3. Plot of lead isotope ratio of galena of Korea, China and Japan(SLDA) and location of Poong-Tag(①)

V. 맺음말

경주 왕경지구는 통일신라시대의 유적으로서 여기에서 출토된 유물 가운데 풍탁 1점을 입수하여 성분조성을 분석하였고, 납동위원소비를 사용하여 원료의 산지를 추정하였다.

1. 풍탁의 소지금속 성분분석 결과 이원계합금(구리+주석)으로서 그 비율이 대략 92:4 이었다. 통일신라기의 청동기 분석결과를 살펴보면 대부분 구리와 주석으로 합금한 이원계 합금임을 알 수 있으나 이 성분이 풍탁의 용도나 제작 상에 필요한 의도적인 성분조성인지는 더 많은 풍탁의 성분분석이 선행되어야 할 것이다.
2. 풍탁의 납동위원소비를 분석하고 산지를 추정한 결과는 다음과 같이 설명할 수 있다. 납동위원소비에 의한 원료광석의 산지는 Figure 1, Figure 2 및 Figure3의 결과에서 보듯이 일치하지 않고 있어 단정적으로 기술할 수 없으므로 향후의 연구과제로 남겨 놓고자 한다.
3. 풍탁의 미세조직은 일반적으로 관찰되는 수지상(dendrite, α상)조직으로서 주조 후 비교적 서서히 냉각되어 제작된 것으로 판단된다.

참고문헌

1. *신라왕경 발굴조사보고서 I(본문)*, 학술연구총서 32, 국립경주문화재연구소, (2002).
2. 廉永夏, *韓國鐘 硏究(증보판)*, 한국정신문화연구원, (1988).
3. 강형태, 정영동, *금동유물의 과학적 분석*, 황남대총 보존처리보고서, 국립경주문화재연구소, (1995).
4. 姜炯台, *고대 청동기 분석법, 考古學 硏究 方法論-자연과학의 응용-*, 서울대학교 출판부, 131~158, (1998).
5. 유재은, 강형태, *나원리 금동유물의 형광X-선분석*, 나원리 5층석탑, 국립문화재연구소, p.94~100, (1998).
6. 강형태 외, *중요문화재의 과학분석(I)*, 총통 및 불상, 국립문화재연구소, (1997).
7. Brill, R. H and J. M. Wampler, *American Journal of Archaeology*, p.71, (1967).
8. Brill, R. H et al., *Recent Advance in Science and Technology of Materials*, p.3, (1974).
9. Barnes I. L. et al, "The Technical Examination, Lead Isotope Determination and Elements Analysis of Some Shang and Zhou Dynasty Bronze Vessels", *2nd International Conference of BUMA*, Ed. Maddin R, p.21-26, (1986).
10. H.T. Kang et al., "Chemical Compositions and Lead Isotope Ratios of Joseon Coins in Korea", p.295~302, *Proceeding of BUMA V*, (2002).
11. 崔炷 外, "大田廣域市 比來洞 出土 琵琶形銅劍의 組成 및 납同位元素比", *전통과학기술학회지*, 제4·5권 합본, 제1호, p.16, (1998).
12. 平尾良光, *考古學でのアイントーづの利用*, RADIOISOTOPES, (1992).
13. 姜炯台, "文善英, 黃振周, 景福宮 慶會樓연못 出土 龍彫刻物의 科學的 分析", *文化財*, 第三十一號, 文化財管理局, p.275~284, (1998).
14. 馬淵久夫, 平尾良光, *考古學雜誌*, 73(2), p.199~245, (1987).
15. 平尾良光, *古代日本の青銅器の原産地を訪ねて*, 計測と制御, p.28~48, (1989).
16. Coomans, D and Massart, D.L, *Multivariate Analysis*,Anal. Chi. Am. Acta, 112. p. 97, (1979).
17. 馬淵久夫, 平尾良光, *鉛同位體比法による漢式鏡の硏究(二)*, MUSEUM, No. 382, pp. 16~26. (1983).
18. 馬淵久夫, 平尾良光, "東アジア鉛鑛石の鉛同位體比", *考古學雜誌* 73卷, 2號, p. 199~245. (1987).