고주석 청동정문경(靑銅精文鏡)의 재현실험을 통한 합금재료의 특성 연구

A Study on Characteristics of Alloy Materials through Reproduction Experiment of High-tin Bronze Mirror with Geometric Designs

이인경, 조영훈, 조남철*

공주대학교 문화재보존과학과

In Kyeong Lee, Young Hoon Jo, Nam Chul Cho*

Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Gongju 32588, Korea

Received September 30, 2019

Revised October 12, 2019

Accepted October 15, 2019

*Corresponding author

E-mail: nam1611@kongju.ac.kr

Phone: +82-41-850-8541

Journal of Conservation Science

2019;35(5):508-517

<https://doi.org/10.12654/JCS.2019.35.5.11>

pISSN: 1225-5459, eISSN: 2287-9781

© The Korean Society of Conservation Science for Cultural Heritage

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 본 연구는 청동 정문경 제작과정 재현과정에서 생산된 합금 및 부산물을 대상으로 자연과학적 분석을 실시하였다. 재현실험의 합금비율은 국보 제141호 정문경에 대한 분석결과(Cu 61.7%, Sn 32.3%, Pb 5.5%)를 바탕으로 하였다. 사용된 원료에 대한 X-선 형광분석 결과, 구리는 Cu 98.9 wt%, 주석은 Sn 99.0 wt%, 납은 Pb 70.2 wt%, Sn 21.8 wt%로 확인되었다. 합금 용융 시 주석과 납의 기화량을 감안하여 Sn, Pb은 5 wt%씩 더 첨가하였다. 1차 재현실험 결과는 Cu 58.8 wt%, Sn 36.9 wt%, Pb 4.4 wt%, 2차 재현실험 결과는 Cu 58.7 wt%, Sn 35.9 wt%, Pb 5.5 wt%로 확인되었다. 성분조성은 Cu와 Sn에서 약 3 wt%씩 차이를 보였으며, 미세조직은 주로 δ 상이 관찰되어 선행연구와 유사한 양상을 나타내었다. 본 연구를 통해 향후 고대 청동거울의 재료학적 특성 규명에 있어 기초자료로 활용되었으면 한다.

중심어 초기철기시대, 정문경, 재현실험, 미세조직, 성분분석

ABSTRACT This study analyzed on alloys and by-product samples produced through the reproduction experiment of bronze mirror with geometric designs. The alloy ratio used in the first and second reproduction experiments was based on the analysis results of bronze mirror with geometric designs(Cu 61.68%, Sn 32.25%, Pb 5.46%) which is the national treasure No. 141. As a result of portable X-ray fluorescence analysis on the raw materials used in the reproduction experiment, the contents of copper raw materials were 98.85 wt% for Cu, tin raw materials were 99.03 wt% for Sn, and lead raw materials were 70.19 wt% for Pb, and 21.81 wt% for Sn. Sn and Pb were added 5 wt% more considering the evaporation amount of tin and lead during alloy melting. The result produced by the first reproduction experiment were 58.75 wt% for Cu, 36.87 wt% for Sn, 4.39 wt% for Pb, and the other result produced by the second reproduction experiment were 58.66 wt% for Cu, 35.89 wt% for Sn, and 5.50 wt% for Pb. The composition of the components was about 3.00 wt% in Cu and Sn respectively, and the microstructure was similar to the previous studies because the δ phase was observed mainly. The results of this study will be used as basic data for the materialistic characteristics of ancient bronze mirror in the future.

Key Words Early iron age, Bronze mirror with geometric designs, Reproduction experiment, Microstructure, Chemical composition

1. 서론

우리 고유 청동 주조(鑄造)기술이란 만들고자 하는 기물, 활자 등에 알맞은 배합비율로 합금한 쇳물을 미리 만든 거푸집(鎔范, 鑄型)에 붓고 완전히 식힌 다음, 거푸집에서 주물(鑄物)을 꺼내어 겉면을 다듬어 마감하는 기법을 말한다. 주조기법은 단조기법과는 달리 녹여서 붓는 쇳물의 성분이나 배합비율에 따라 여러 가지 합금이 가능하고, 같은 모양과 크기의 제품을 대량으로 생산할 수 있다는 장점을 지니고 있다(Yun and Cho, 2012).

‘다뉴정문경(多鈕精文鏡)’은 우리나라 선사시대 청동기를 대표하는 유물이다. 우리나라의 거울은 뒷면에 기하학적 무늬가 있고, 평면 장방형의 꼭지가 한쪽에 치우쳐 있는 것이 중국의 거울과 기본적으로 다르게 나타나는 특징이다. 청동기문화 초기에는 요령지방에서 요령식 동검과 함께 반출되는 동경에서 기하학적 무늬가 나타나지만, 후기에는 정밀한 원과 삼각집선문으로 채워진 정교한 무늬가 나타나기 시작한다. 특히, 숭실대학교 한국기독교박물관에서 소장하고 있는 국보 제141호 정문경은 1.0 cm 간격에 20여 개의 직선이 지나갈 만큼 정교한 무늬가 시문되어 있어 청동기 주조의 전성기를 이루고 있었음을 반증한다(Lee, 2012).

현재까지 청동기에 대한 연구는 유형분류학적 연구와 자연과학적 분석 연구로 분류되어 진행되어왔다. 자연과학적 연구는 청동기 시료의 종류와 수량이 미비한 편이어서 우리나라의 청동기를 설명하기에는 부족한 점이 많다.

따라서 다소 어려운 점이 있더라도 몇 점씩이나마 출토지의 근거가 명확한 청동기의 과학적 분석을 통하여 연구해 나간다면 시대적, 문화적 배경을 근거로 객관성 있는 요소들을 축적해 나갈 수 있을 것이다(Choi *et al.*, 1998; Huh *et al.*, 2007).

본 연구에서는 복원한 정문경의 과학적 분석을 통해 정문경을 주조할 당시 합금비율, 주조방법과 미세조직 등에 대해 조사하였으며, 또한 본 연구를 통해 얻어진 결과를 국보 제141호 정문경 및 고문헌과 성분조성, 미세조직 등을 비교하여 동경 재현실험 연구에 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 정문경 복원 재현실험

2.1. 거푸집 제작

2.1.1. 석제(石製)주조법

석제주조법이란 광택이 있고 만지면 양조처럼 매끈매끈한 암석인 활석, 경도가 무른 이암 등을 소재로 활용하여, 그 석판에 만들고자 하는 물건의 모양에 맞게 문양과 무늬를 새기어 거푸집을 만들고 청동 쇳물을 부어 주조하는 방법을 말한다(Yun, 2013). 본 연구에서는 ‘경주 불석’이라 일컫는 제올라이트(Zeolite)를 사용하여 실험을 하였다. 제작과정에 대해 다음과 같이 정리하였는데, 모암(母巖)을 다듬어 암수 거푸집을 제작한 후, 문양을 새겨 넣어 거푸집을 완성하였다(Figure 1).

Figure 1. First reproduction experiment process. (A) The gemstone of mold of bronze mirror, (B) Trimming the gemstone to make a mold, (C) Polishing the surface of the mold frame, (D) Sculpting horizontal and circular in order to engrave geometric designs, (E) Sculpting the flow hole, (F) Engraving geometric designs on the surface.

1차 실험은 거푸집의 건조가 제대로 이루어지지 않고 가열이 충분하지 않아 고온의 청동 쇳물을 부었을 때 거푸집과 복원한 정문경이 깨지는 현상이 발생하였다.

2.1.2. 도토(陶土)주조법

2차 재현실험은 도토주조법으로 실험을 진행하였다. 도토주조법이란 토기와 도자기 등에 사용하는 도토와 황토, 석비레 등을 섞은 주형토[주물토] 등을 이용하여 만든 흙판에 만들고자 하는 기물에 맞게 모양과 문양을 새겨 압·수거푸집을 만들고, 청동 쇳물을 부어 주조하는 방법이다. 본 연구의 진행과정은 다음과 같다(Figure 2).

도토주조법의 경우, 거푸집 제조과정에서 불에 달궈 수분을 제거하고, 거푸집이 용탕의 온도를 견딜 수 있도록

맞추었기 때문에 깨지지 않고 쇳물을 부을 수 있었다. 그 결과, Figure 3과 같이 동경 복원품을 제작하였다. 생산된 복원품의 제원(諸元)은 지름 130.00 mm의 정원(正圓)으로, 주연부 두께는 9.5 mm, 중심부 두께는 6.0 mm, 무게는 762.89 g으로 확인되었다. 경면에 육안으로 확인 가능한 주조결함 등 고르지 못한 상태이기 때문에 추후 연마 등의 처리가 필요할 것으로 판단된다.

2.2. 청동합금 및 주조

본 연구에서는 논산 출토 청동 정문경(국보 제141호, 숭실대학교 소장)에 대한 선행연구 결과를 바탕으로 재현실험에 대한 성분비를 설정하였다. The Korean Christian Museum at Soongsil University(2009)의 연구에서 국보 제

Figure 2. Second reproduction experiment process. (A) Cover Avi mirror with a caster, (B) Making sand mold, (C) Burning mold, (D) Flow hole of mold, (E) Smelting the alloy in sand mold, (F) The completed reproduced bronze mirror with geometric designs.

Figure 3. Restoration bronze mirror with geometric design. (A) The rear of a mirror, (B) The surface of a mirror.

Table 1. The alloy ratio of bronze reported in 《Zhouli Kaogongji》(Hwang, 2011)

Use	Alloy ratio		Conversion ratio (%)
	Cu	Sn	
When hit, there is a clear sound, and the impact requires high hardness and strength.	6	1	Sn 14.3
It is the purpose of chopping and cutting an object.	5	1	Sn 16.7
It is the purpose of stabbing or cutting.	4	1	Sn 20.0
	3	1	Sn 25.0
It uses as the arrow for killing.	5	2	Sn 28.6
It illuminates things well with mirrors.	1	1	Mirror : Sn 33.3
The ancient mirrors includes tin more than 30% and the flint has 50% tin.			Flint : Sn 50

Table 2. The charging weight of the raw materials used in reproduction experiment

Raw material	Copper	Tin	Lead
Charging weight (kg)	6.17	3.73	1.05

141호 정문경 성분조성에 대한 과학적 분석 결과, 중국 주 시대의 고문헌인 《주례고공기(周禮考工記)》에 「금유육제(金有六齊)」로 보고된 청동의 합금비율과 1%정도밖에 차이가 나지 않기 때문에 이를 바탕으로 하였다. 구리의 용융점은 1,084.6℃로 주석과 납은 이보다 용융점이 낮기 때문에 기화하여 사라지므로, 줄어드는 합금량을 감안하여 주석과 납의 성분비를 각 5%씩 증량해 합금비를 설정하였다(Yun *et al.*, 2009).

본 연구에서 참고한 《주례고공기》에 보고된 금유육제(金有六齊)의 내용은 다음과 같다(Table 1). 세부내용을 보면, 종정지제(鍾鼎之齊)는 범종 등의 합금비율을 말하며, 때렸을 때 청명한 소리가 나며, 충격에 강한 경도와 강도가 필요하다. 그 합금비율은 동과 주석을 6:1로 하고 있는데 주석이 약 14.3%에 해당한다. 부근지제(斧斤之齊)는 도끼 등의 합금비율을 말하고, 물체를 찍어 자르므로 충격에 강한 경도와 강도가 필요하다. 범종보다는 Sn 함량이 다소 높은 반복적인 충격에 견딜 수 있어야 한다. 과금지제(戈戟之齊)는 창을 말하는 것으로 찌르는 것이 목적이므로 높은 경도가 필요하다. 대인지제(大刀之齊)는 칼로서 자라는 것이 목적으로 높은 경도가 필요하였다. 삭살시지제(削殺矢之齊)는 주로 화살을 말하고 갑옷과 같은 단단한 물체를 뚫기 위해 아주 높은 경도를 필요로 하였다. 감수지제(鑑燭之齊)는 거울로써 사물을 잘 비춰주고 표면이 고르고 색상과 광택이 밝아야 한다. 따라서 거울의 흰 빛이 나도록 아주 많은 량의 주석을 첨가하여 만든다(Hwang, 2011).

1, 2차 재현실험에 사용한 원료의 장입량(Charging weight)은 다음과 같다(Table 2).

3. 재료 및 방법

3.1. 분석대상 시료

고문헌과 선행연구 결과를 바탕으로 설정한 중량으로 1, 2차 주조실험을 실시하였다. 실험에 사용한 원료는 불순물이 섞이지 않고 정제된 동사(銅絲)와 판 형태의 주석, 주석과 합금된 것으로 추정되는 납사(鉛絲)를 사용하였다.

본 연구의 분석대상으로는 주조실험에 사용한 구리, 주석, 납 원료와 1차 실험 복원품의 깨진 주연부편, 2차 실험 거푸집 탕구(湯口)에서 채취한 시료 및 슬래그를 선정하였다(Figure 4). 1, 2차 실험을 통해 생산된 합금의 성분을 비교하고자 분석대상으로 선정하였다. 또한 1차 실험의 경우 청동 쇳물을 붓는 과정에서 거푸집이 깨져 탕구에서 시료를 채취하는 것이 불가능하여 비교적 형태가 뚜렷하고 위치가 파악 가능한 주연부의 시료를 대상으로 하였고, 2차 시험의 경우 완형의 정문경을 주조하였기 때문에 정문경이 아닌 탕구에서 시료를 채취하여 분석을 진행하였다.

3.2. 분석방법

3.2.1. 이동형 엑스선형광분석(Portable X-ray fluorescence analysis)

정문경 재현실험에 사용된 원료인 구리, 주석, 납 및 재현실험을 통해 생성된 1, 2차 합금의 성분 분석을 실시하였다. 원료는 Ethyl alcohol에 침적하여 초음파 세척기를 이용하여 표면에 남아있는 불순물을 제거한 후 분석을 실시하였다. Gun type 이동형 엑스선형광분석기(portable X-ray fluorescence spectrometer, P-XRF)(X-MET7500, Oxford, GBR)를 사용하였으며, 비파괴 분석조건은 다음과 같이 설정하여 분석을 진행하였다(Table 3). 동일한 위치에서 3회 측정하여 얻은 값의 평균을 구하여 활용하였다.

Figure 4. Analysis samples. (A) Copper raw material, (B) Tin raw material, (C) Lead raw material, (D) First reproduction experiment alloy, (E) Second reproduction experiment alloy, (F) Second reproduction experiment slag.

Table 3. P-XRF Analysis Condition

Detector target	Accelerate voltage	Emission current	Collimator	Measuring time
Rh	45 kV	50 μ A	9 mm	30 sec

3.2.2. 미세조직 관찰

1, 2차 재현실험 결과 생산된 합금 및 부산물의 미세조직 및 성분조성을 확인하기 위해 파편 및 탕구에서 소량의 시료를 채취하였으며, 단면 관찰이 용이하도록 에폭시 수지로 마운팅(mounting)하였다. SiC 연마지의 조밀도에 따라 시료를 연마하고, 후에 연마제와 연마포를 이용하여 미세연마를 하였다. 관찰은 금속현미경(DM 2500M, Leica, DEU)과 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)(MIRA LMH/MIRA3, Tescan, CZE)을 이용하였으며, 시료는 염화철 부식액($\text{FeCl}_3 + \text{HCl} + \text{Ethyle alcohol}$) 3%을 사용하여 에칭한 후 관찰을 실시하였다. 또한 주사전자현미경 관찰 시 1차 재현실험 시료와 2차 재현실험 부산물은 백금(Pt) 도금을 실시하였고, 2차 재현실험 시료는 금(Ag)과 팔라듐(Pd) 도금을 실시하여 전도도를 높이는 한편 조성비에 미치

Table 4. The results of P-XRF analysis of raw materials used in reproduction experiment

Raw material	Main components (wt%)				
	Si	Fe	Cu	Sn	Pb
Copper	0.47	0.06	98.85	0.30	-
Tin	0.57	0.05	0.28	99.03	0.08
Lead	7.41	0.58	-	21.81	70.19

는 영향을 최소화시켜 에너지분산형분광계(energy dispersive spectroscopy, EDS)(X-flash4010/ QUANTA300, Bruker, DEU) 분석을 동반하였다.

4. 연구결과

4.1. 원료 분석

재현실험의 원료로 사용된 구리, 주석, 납에 대한 이동형 엑스선형광분석 결과는 다음과 같다(Table 4). 구리원료와 주석원료는 순수한 원료 성분만 검출되었으나, 납원료는 주석과 합금된 것으로 확인되었다. 따라서 기존 선행연구를 바탕으로 판단한 장입량에서 오차가 발생되었으며, 환산된 장입량은 다음과 같다(Table 5).

Table 5. The converted weight of the raw materials used in reproduction experiment

Raw material	Copper	Tin	Lead
Conversion weight (kg)	6.17	3.96	0.74

Table 6. The results of P-XRF analysis of alloys produced by reproduction experiment

Alloy	Main components (wt%)		
	Cu	Sn	Pb
Sample (D)	60.20	34.83	4.97
Sample (E)	62.43	33.10	4.27

Figure 5. Microstructure of alloy produced by the first reproduction experiment. (D-01, 02) Metallurgical microscope observation image($\times 100$).

재현실험을 통해 생산된 합금의 이동형 엑스선형광분석 결과는 다음과 같다(Table 6). 분석시료(E)는 분석시료(D)보다 Cu가 2.23 wt% 증가하였고, Sn 1.73 wt%, Pb 0.70 wt% 감소하였다. 이를 통해 2차 주조 시, 주석과 납이 용융됨에 따라 함량의 차이가 발생된 것으로 판단된다.

4.2. 미세조직 관찰 및 성분분석

4.2.1. 1차 재현실험

Figure 5는 분석시료(D)의 미세조직을 금속현미경($\times 100$)으로 관찰한 사진이다. Figure 5의 D-01은 미세한 크기의 핀홀(pin hole)과 조대한 크기의 δ 상이 주로 관찰되고, 결정에 따라 약간의 슬립(slip)이 나타난다. D-02는 δ 상 바탕기에 조대한 크기의 납 편석물로 추정되는 구상의 입자가 관찰된다.

Figure 5는 분석시료(D)의 미세조직 관찰을 바탕으로 SEM 관찰 및 EDS 분석위치를 나타내어 결과를 정리하였다(Table 7, Figure 6). 분석지점 D-01-1은 시료의 전체적인 면분석을 실시하였고, Cu가 59.50 wt%, Sn이 36.46 wt%, Pb이 4.04 wt%로 확인되어 δ 상으로 판단된다. 분석지점

Table 7. EDS results of D produced by the first reproduction experiment

Analysis position	Components (wt%)		
	Cu	Sn	Pb
D-01-1	59.50	36.46	4.04
D-02-1	58.00	37.27	4.73
D-02-2	-	3.54	96.46
D-02-3	61.82	38.13	-

Figure 6. SEM images and EDS analysis points of alloy produced by the first reproduction experiment. (D-01) SEM observation image of δ phase, (D-02) SEM observation image of δ phase and segregated lead particles.

Figure 7. Microstructure of alloy produced by the second reproduction experiment. (E-01, 02) Metallurgical microscope observation image($\times 100$).

D-02-1은 크게 관찰되는 하얀색 구상의 입자를 제외한 부분에 한해 면분석을 실시하였고, Cu가 58.00 wt%, Sn이 37.27 wt%, Pb이 4.73 wt%로 확인되어 δ 상으로 판단된다. 분석지점 D-02-2는 크게 관찰되는 구상의 입자에 대한 EDS 분석을 실시하였는데, Pb이 96.46 wt%, Sn이 3.54 wt%로 확인되어 납 편석물로 판단된다. 분석지점 D-02-3은 금속현미경 관찰 시에 청백색 빛을 띠는 바탕기지로, Cu가 61.82 wt%, Sn이 38.13 wt%로 확인되어 δ 상으로 판단된다.

4.2.2. 2차 재현실험

Figure 7은 분석시료(E)의 미세조직을 금속현미경($\times 100$)으로 관찰한 사진이다. Figure 7의 E-01은 전체적으로 미세한 크기의 납 편석물로 추정되는 검은 입자와 조대한 크기의 δ 상이 관찰되며, E-02는 미세한 크기의 납 편석물로 추정되는 검은 입자와 슬립이 형성된 것이 관찰된다.

Figure 7은 분석시료(E)의 미세조직 관찰을 바탕으로 SEM 관찰 및 EDS 분석위치를 나타내어 결과를 정리하였다(Table 8, Figure 8). 분석지점 E-01-1은 크게 조성된 하얀 구상의 입자를 제외한 부분에 대하여 시료의 전체적인 면 분석을 실시하였고, Cu가 56.72 wt%, Sn이 37.20 wt%, Pb이 6.17 wt%로 확인되어 δ 상으로 판단된다. 분석지점 E-01-2

Table 8. EDS results of E produced by the second reproduction experiment

Analysis position	Components (wt%)		
	Cu	Sn	Pb
E-01-1	56.72	37.20	6.17
E-01-2	4.42	-	95.74
E-01-3	59.50	40.50	-
E-02-1	60.59	34.58	4.83

Figure 8. SEM images and EDS analysis points of alloy produced by the second reproduction experiment. (E-01) SEM observation image of δ phase, (E-02) SEM observation image of δ phase and slip.

Figure 9. Microstructure of slag produced by the second reproduction experiment. (F-01, 02) Metallurgical microscope observation image($\times 100$).

는 하얀색 구상의 입자로 Pb이 95.74 wt%, Cu가 4.42 wt%로 확인되어 납 편석물로 판단된다. 분석지점 E-01-3은 금속현미경 관찰 시 청백색의 바탕기지로 확인되는 부분으로, Cu가 59.50 wt%, Sn이 40.50 wt%로 확인되어 δ 상으로 판단된다. 분석지점 E-02-1은 금속현미경 관찰 시 슬립이 있던 부분으로, 다수의 미세한 핀홀이 관찰되어 이를 제외한 부분에서 EDS로 면분석을 실시하였다. 그 결과 Cu가 60.59 wt%, Sn이 34.58 wt%, Pb이 4.83 wt%로 확인되어 δ 상으로 판단된다.

4.2.3. 2차 재현실험 부산물

재현실험 부산물은 향후 고대 청동 제작과정에서 출토되는 슬래그의 성격 규명을 위한 자료로 활용하고자 분석을 실시하였다.

Figure 9는 2차 분석시료(F)의 미세조직을 금속현미경($\times 100$)으로 관찰한 사진이다. Figure 9의 F-01은 ($\alpha + \delta$) 공석상 바탕 위에 수지상의 α 상이 관찰되며, F-02는 유리 질화된 바탕조직 위에 침상과 구상의 주석산화물과 다수의 크고 작은 핀홀이 관찰된다.

Figure 9의 F-01에 대한 SEM image 및 EDS 분석위치를 나타내어 결과를 정리하였다(Table 9, Figure 10). 분석지점

Table 9. EDS results of F-01 produced by the second reproduction experiment

Analysis position	Components (wt%)		
	Cu	Sn	Pb
F-01-1	-	-	100.00
F-01-2	80.50	19.50	-
F-01-3	93.52	6.48	-

Figure 10. SEM images and EDS analysis points of slag produced by the second reproduction experiment. (F-01) SEM observation image of $\alpha + \delta$ eutectoid phase, (F-02) SEM observation image of glass matrix.

Table 10. EDS results of F-02 produced by the second reproduction experiment

Analysis position	Components (wt%)					
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	CuO	SnO ₂	PbO
F-02-1	-	-	-	-	100.00	-
F-02-2	12.67	48.15	4.61	28.05	-	6.52
F-02-3	14.07	49.35	12.43	11.46	-	12.68
F-02-4	-	5.60	-	89.95	3.23	0.87

F-01-1은 하얀색 구상의 조직으로, 100 wt%의 Pb 조성이 나타나 납 편석물로 판단된다. 분석지점 F-01-2는 금속현미경 관찰에서 수지상 결정으로, Cu가 80.50 wt%, Sn이 19.50 wt%로 확인되어 수지상의 ($\alpha + \delta$) 공석조직으로 판단된다. 분석지점 E-01-3은 금속현미경 상에서 α 상의 결정립으로 Cu가 93.52 wt%로 확인된다.

Figure 9의 F-02에 대한 SEM image 및 EDS 분석위치를 나타내어 결과를 정리하였다(Table 10, Figure 10). 분석지점 F-02-1은 밝은 회색의 바탕 조직으로, 100 wt% SnO₂의 조성이 나타나 주석산화물로 판단된다. 분석지점 F-02-2와 3은 유리질화된 바탕조직으로, F-02-2는 48.15 wt% SiO₂, 28.05 wt% CuO, 12.67 wt% Al₂O₃, 12.43 wt% MnO, 6.52 wt% PbO이 확인된다. F-02-3은 49.35 wt% SiO₂, 14.07 wt% Al₂O₃, 12.68 wt% PbO, 12.43 wt% MnO, 11.46 wt% CuO가 확인된다. 분석지점 F-02-4는 구상의 구리 입자로서, 89.95 wt% CuO, 5.60 wt% SiO₂, 3.23 wt% SnO₂, 0.87 wt% PbO이 확인된다.

5. 결 론

국보 제141호 정문경(이하 ‘국보경’)을 모델로 하여 국보경에 대해 선행 연구된 성분조성을 바탕으로 하여 재현 실험을 진행하였다. 선행연구뿐만 아니라 고문헌을 참고하여 실험의 성분조성을 결정하였고, 실험결과로 생산된 합금 및 부산물에 대해 과학적 분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 국보경 선행연구에서 분석한 성분 조성(Cu: 61.68%, Sn: 32.25%, Pb: 5.46%)를 기준으로 하여 구리와 주석, 납의 합금 비율을 구리 61.7%, 주석 37.3%, 납 10.5%로 정하였다. 주석과 납의 경우 용융상태에서 기화하여 감소하는 양을 감안하여 평균 조성보다 5%정도 추가하여 주조하였다. 1차 재현실험의 성분 조성 분석결과, Cu는 58.00~59.50 wt%, Sn은 36.46~37.27 wt%, Pb는 4.04~4.73 wt%의 범위로 확인되었다. 또한 2차 재현실험의 성분 조성 분석결과, Cu는

56.72~60.59 wt%, Sn은 34.58~37.20 wt%, Pb는 4.83~6.17 wt%의 범위를 보여주고 있다. 이 결과는 국보 제141호 정문경과 Cu는 1~5 wt%정도 적게 확인되고, Sn은 2~5 wt%정도 많으며, Pb는 ± 0.7 wt%의 수치를 보이고 있는 것으로 확인된다.

둘째, 선행연구를 통해 국보경 또한 대부분 δ 상이 관찰되었고, 주조 후 별도의 열처리를 하지 않았음을 알 수 있다(The Korean Christian Museum at Soongsil University, 2009). 본 연구의 복원실험으로 생산된 합금의 미세조직 관찰을 실시한 결과 또한 전체적으로 δ 상 바탕기지에 납 편석물들이 산재하고 있으며, 추가적인 열처리가 없어 국보경과 비슷한 양상이 나타남을 확인할 수 있다. δ 상은 단단하고 안정한 상으로, 많을수록 청백색을 띠게 된다. 내부에 존재하는 핀홀은 용탕 중 함유된 가스가 거품집 밖으로 방출되지 못하고 주물에 잔류한 것으로 판단된다.

셋째, 1차 재현실험의 경우 주물을 붓는 과정에서 거품집과 내부의 기물에 균열이 발생하였다. 2차 재현실험 합금의 미세조직 슬립이 관찰되었는데, 이는 급격한 냉각속도로 인해 주조응력이 높아지는 경우에 파생되는 현상이다(Go *et al.*, 2007). 따라서 Cu와 Sn의 조성비에 따라 주조응력에 의해 균열이나 슬립이 발생된 것으로 판단된다.

정문경의 자연과학적 연구가 증가하고 있지만, 미세조직 관찰 및 산지추정에 대한 부분으로 국한되어 있는 경우가 많다. 본 연구에서는 선행연구의 결과를 바탕으로 하여 실험고고학적 방법으로 접근하여 고문헌자료에 대한 고증을 실시하였으며, 이를 통해 정문경의 제작방법 및 성분 조성 등 재료학적 연구의 기초 자료로 활용되며, 또한 합금과 부산물 분석을 통해 고대 청동 제작과정을 규명하는 데 활용될 수 있을 것으로 본다.

사 사

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 과학문화전시서비스역량강화지원사업의 연구임(NRF-2018X1A3A1070017).

REFERENCES

- Choi, M.R., Choi, S.R. and Shin, S.C., 1998, Archeological research methodology. SNUpress, Seoul, 131-158. (in Korean)
- Go, H.S., Cho, N.C., Kim, U.C., Choi, B.H., Kim, S.J., Kwon, Y.S. and Jeong, H.Y., 2007, A study on the sliplines formed in Korean Buddhist bell and bronze ware. 2007 Fall Conference of the Korean Institute of

- Metals and Materials, Jeju, November 4-5, 93-93. (in Korean)
- 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)
- Hwang, J.J., 2011, Comparative study on components and microstructure of Korean bronze mirror. Conservation Studies, 32, 155-170. (in Korean with English abstract)
- Lee, N.Y., 2012, Korean ancient metal craft. SNUpress, Seoul, 6-38. (in Korean)
- The Korean Christian Museum at Soongsil University, 2009, National treasure No.141-bronze mirror with geometric designs comprehensive research. 1, 90-101, 102-123. (in Korean)
- Yun, Y.H., 2013, A study on the casting technology and restoration of bronze artifacts. Ph.D. dissertation, Korea University, Seoul, 34-39. (in Korean with English abstract)
- Yun, Y.H. and Cho, N.C., 2012, The restoration technology and scientific analysis of bronze mirror with fine linear designs. Journal of Conservation Science, 28(4), 417-425. (in Korean with English abstract)
- Yun, Y.H., Cho, N.C. and Lee, S.C., 2009, Restoration and scientific analysis of casting bronze type in Joseon dynasty. Journal of Conservation Science, 25(2), 207-217. (in Korean with English abstract)