전남지역 출토 삼국시대 청동거울의 합금 특성과 제작 방법 고찰

A Study on Manufacturing Technique and Alloy Characteristics of Bronze Mirrors from Jeollanam-do Region in the Three Kingdoms Period

이은지*

국립나주문화재연구소

Eun Ji Lee*

Naju National Research Institute of Cultural Heritage, Naju 58264, Korea

Received September 17, 2021

Revised October 12, 2021

Accepted November 29, 2021

*Corresponding author

E-mail: eunji28@korea.kr

Phone: +82-61-339-1121

Journal of Conservation Science
2021;37(6):767-777

<https://doi.org/10.12654/JCS.2021.37.6.14>

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 전라남도 고흥과 담양지역에서 출토된 청동거울의 금속학적 분석으로 제작 방법을 확인하고자 하였다. 연구한 대상 유물은 담양 제월리 고분에서 출토된 청동거울 2점, 고흥 봉룡리에서 발견된 청동거울 1점으로 총 3점이다. 분석 결과 X선을 이용한 조사에서 육안으로 관찰되지 않던 균열과 부식으로 인해 발생된 결실부와 주조제작으로 인해 형성된 기공을 확인할 수 있었다. 청동거울의 주성분은 Cu-Sn-Pb이며 Cu 73~79 wt%, Sn 17~21 wt%, Pb 3~4 wt%로 2 wt% 이상의 Pb이 포함되어 있어 청동거울에 필요한 주조성 및 기계적 성질을 조절하기 위한 것으로 확인된다. 또한 미세조직 관찰 결과 주조한 상태에서 추가적인 열처리가 이루어지지 않은 α 상과 $\alpha+\delta$ 공석상의 조직으로 비교적 이른 시기에 제작된 삼국시대 청동거울로 추정할 수 있다.

중심어 청동거울, 전라남도, 미세조직, 제작기술, 고흥 봉룡리, 담양 제월리 고분

ABSTRACT This study analyzed the microstructures and chemical composition of three samples of bronze mirrors excavated in the Jeollanam-do region, particularly Goheung and Damyang. Under x-ray irradiation, the analysis results confirmed the broken parts and pores caused by cracks, casting, and corrosion. Major and minor elemental analysis were performed on three mirrors by Scanning electron microscopy (SEM) with Energy dispersive x-ray spectrometry (EDS) and Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The result shows that the bronze mirrors contained Cu-Sn-Pb alloys. Alpha phase and eutectic phase were observed in the microstructure, confirming that the casting was performed without additional heat treatment. Notably, Three bronze mirrors were made early Three Kingdoms period in Korea.

Key Words Bronze mirror, Jeollanam-do, Microstructure, Manufacturing technique, Goheung Bongryong-ri, Damyang Jewol-ri Tomb

1. 서 론

우리로 만든 현대의 거울과 달리 조선시대까지 거울은 주로 금속인 철(Fe)이나 구리(Cu)로 제작하였다. Cu와 Sn의 합금인 청동으로 제작되어 보급된 거울을 청동거울(銅鏡)이라 칭한다. 청동거울을 사용할 때에는 표면이 부식되지 않도록 경면을 닦아서 사용하였으나, 현재 박물관에서 전시되는 청동거울은 주로 매장환경에 의해 출토 당시의 상태 그대로 표면 전체가 부식되어 있다. 청동기물은 제작대상과 그 방법에 따라 Cu, Sn, Pb 합금비율이 달라지는데, 주나라 관례를 기록한 『周禮』 「考工記」의 「金之六

齊」에 청동거울 제작을 위한 합금비율이 작성되어 있으며, 이를 감수지제(監鑄之齊)라 한다. 감수지제에 Cu와 Sn의 합금비율이 작성되어 있으나 해석에 따라 조성비가 달라진다(금을 순동으로 해석할 때 Cu 66.7 wt%, Sn 33.3 wt%, 금을 Cu-Sn 합금으로 해석한 경우 Cu 50 wt%, Sn 50 wt% (Rho, 2000)).

우리나라 청동거울은 모양, 제작방법, 문양에 따라 다양한 형식으로 나누어 존재하며, 시대에 따라 특징이 뚜렷하다. 청동거울은 사물을 비추어 보는 경면을 앞, 고리가 위치하는 배면을 뒤라고 하여 구분한다. 경면은 광택을 가진 면으로 문양이나 장식은 없으며, 단면 형태를 평

면으로 제작하였다. 배면은 거울의 장식성을 나타내는 부분으로, 뉴(鈕)가 위치한다. 뉴는 배면에 위치하며 대부분 하나인데, 여러 개의 뉴가 존재하기도 한다. 뉴의 바깥으로 추상적인 문양이나 문자와 같은 도안들이 있는 장식성을 가지는 뉴좌, 문양대(내구, 외구)가 있다. 문양대에 새겨진 문양에 따라 거울의 명칭이 정해지며, 이를 통한 형식분류로 제작시기를 구분하는 기준이 되기도 한다.

현재까지 청동거울에 대한 연구는 편년, 문양, 종류별 형식, 유입경로, 변천과정, 제작기법 등 고고학과 미술사적인 연구가 주로 이루어졌다. 또한 이를 바탕으로 지역별, 국가별 청동거울에 대한 계통을 정리하여 종합적인 의견을 제시(Lee, 2004; Yi, 2010)하거나, 한반도 출토 청동거울에 대한 전체적인 연구사를 검토하는 연구(Nam, 2014)가 이루어지고 있다. 자연과학 분야에서 한국 출토 청동거울에 대한 성분 분석과 미세조직에 대한 연구(Hwang, 2011), 원산지 추정 연구(Kang *et al.*, 2003; Huh *et al.*, 2007; Yu, 2009; Choi, 2014; Han *et al.*, 2018)가 진행된 바 있으며, 제작기술과 보존처리에 대한 연구(Park and Yu, 2009; Yun and Cho, 2012), 매장환경에서 청동거울의 부식 특성을 연구(Jang, 2020)한 바 있다. 그러나 대부분 청동기시대나 초기 철기시대에 제작된 청동거울을 대상으로 연구가 집중되어 있어 삼국시대 청동거울의 출토사례와 이에 대한 자연과학적 연구 사례가 미비한 실정이다.

본 연구에서 삼국시대 고분인 담양 제월리 고분에서 출토된 청동거울과 고흥 봉룡리에서 발견된 청동거울을 대상으로 금속학적 분석을 실시하였다. 담양 제월리 고분에서 출토된 2점의 청동거울은 형식상 외래경(外來鏡)으로 구분되며, 고흥 봉룡리 발견 신고 청동거울 1점 또한 유사한 형태이다. 따라서 제작시기와 출토시기가 명확하고 형태적으로 유사한 청동거울 3점을 대상으로 분석을 실시하여 각각의 제작기술과 특성을 알아보고, 이를 바탕으로 고대 청동거울의 선행연구 자료와 비교해보고자 하였다.

2. 분석대상 및 방법

2.1. 유적 및 분석대상

본 연구에서 담양 제월리 고분에서 출토된 주문경(珠文鏡) 1점, 변형옥수경(變形六獸鏡) 1점, 고흥 봉룡리에서 발견된 변형옥수경(變形五獸鏡) 1점을 대상으로 분석을 하였다(Table 1).

담양 제월리 고분은 전남 담양군 봉산면 제월리 뒤편에 위치한 석실묘로 1959년 전남대학교 박물관에서 유물

들을 수습하였다. 석실묘에서 청동거울, 금동제 이식, 호박제 곡옥, 유리구슬, 대도, 제갈, 등자, 철모 등이 공반되었다. 청동거울은 피장자의 머리부분 좌우에 위치하였는데, 좌측에는 변형옥수경, 우측에는 주문경이 있었다. 유적의 연대는 5세기 후반에서 6세기 후반으로 보고 있다(Choi, 1976; Bokcheon Museum, 2009). 피장자 좌측에서 확인된 변형옥수경은 S자 형태의 수상(獸像)이 6개가 불규칙한 간격으로 연결되어 있으며 수상의 크기는 일정하지 않다. 수상 주위에 운문(雲文)이 관찰된다. 외구에 직선의 즐치문이 있고, 내구외주에 복선파문이 있다. 이러한 형태는 마한·백제권 지역인 담양 제월리 고분과 해남 만의총 1호분에서 출토되었다. 담양 제월리 고분의 것이 해남 만의총 1호분보다 정밀성이 떨어져서 상대적으로 늦은 시기에 제작된 것으로 보고 있다. 또 다른 청동거울은 피장자 우측에 배치된 주문경으로 내구에 2줄의 주문이 있으며, 외구에는 거치문(鋸齒文)과 복선파문이 둘러져 있으며, 변형옥수경보다 크기가 작다(Kim, 2020).

발견매장문화재로 신고된 고흥 봉룡리 출토 청동거울은 굴착기로 지면 평탄화 작업 중 발견되었다. 청동거울과 함께 유공광구호, 대도 등 고분에서 출토되는 유물들이 함께 발견·신고되었다. 유물이 발견된 위치의 현지 조사를 진행하였지만, 유물과 관련된 유구는 이미 훼손되어 확인하지 못하였다. 그러나 함께 신고된 유물을 통해 삼국시대 유물임을 확인할 수 있었다. 청동거울은 2개 편으로 파손되었고, 내구 일부는 결손되었으나 수상(獸像) 3개가 확인된다. 결손된 부분에 수상이 일정한 간격을 두고 위치하였을 것을 추정할 때 수상의 개수가 5개인 변형옥수경으로 볼 수 있다. 외구에 이중거치문과 복선파문이 연결되어 있다.

분석 대상 청동거울 3점 중 담양 제월리 고분 청동거울 2점은 재보존처리 과정 중 주연부에서 금속심이 확인되었으며, 고흥 봉룡리 청동거울 1점은 파손된 상태로 발견되어 단면에서 금속심을 확인했다. 이들 청동거울은 X선 투과 분석을 진행하였으며, 유물의 손상을 최소화하는 범위 내에서 시편 일부를 채취하였다. 이를 통해 청동거울의 미세조직 및 성분 분석을 실시하여 제작기술을 해석하고자 하였으며, 적합한 분석과 시료를 채취한 위치를 표에 정리하였다(Table 1).

2.2. 분석 방법

대표적인 비파괴 분석법으로 시료의 전처리 없이 다양한 재질의 성분분석에 사용되는 방사선 비파괴 조사로 청동거울의 내부구조와 상태를 관찰하였다. 먼저 X선 발생

Table 1. The list of bronze mirrors position for analysis

Sample No.	Site	Pattern	Analysis				Analysis position	
			X-RAY	Micro structure	SEM-EDS	ICP-MS	Back of mirror	Mirror surface
1	Damyang Jewol-ri	Roundel	○	○	○	○
2	Damyang Jewol-ri	Rounded six beasts	○	○	○	○
3	Goheung Bongnyong-ri	Rounded five beasts	○	○	○	○

장치(M-150, Softex, JPN)로 대상물을 투과하고 감쇄된 X선 에너지 정보를 디지털 데이터로 획득하는 CR방법(CRx Vision, GE, DEU)으로 청동거울의 내부구조를 관찰하였다. 관전압은 100~130 kV, 관전류 2~3 mA, 조사시간 50초의 조건으로 조사하였다.

시료 내 함유된 성분을 확인하기 위해 유도결합플라즈마 질량분석(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), Elan 5100, Perkin Elmer, USA)으로 청동거울의 주성분을 분석하였다. 시료는 전처리 후 수 시간 내에 분석하고, 각 시료를 5회 분석하여 최대·최소값을 제외한 3개의 값을 평균하였다.

미세조직 관찰과 소지 성분에 대한 분석을 진행하기 위해 유물에서 시료를 채취하여 에폭시 수지로 마운팅하여 조밀 순서대로 연마한 뒤, 3 μm , 1 μm 의 diamond suspension을 이용하여 표면을 미세 연마하였다. 연마가 완료된 시편은 에칭액($\text{FeCl}_3 + \text{HCl} + \text{Ethyl Alcohol}$)을 이용하여 에칭하였다. 미세조직은 금속현미경(DM-2500M, Leica, DEU)을 이용하여 관찰하였다. 마운팅한 시편을 탄소(C) 코팅하여 주사전자현미경(FE-SEM, JSM-7100F, JEOL, JPN)으로 좀 더 정밀하게 미세조직을 관찰하였고, 에너지분산형 분석기(EDS, X-MaxN150, OXFORD, GBR)로 조직에 포함된 개재물 및 기지 조직을 분석하였다.

3. 분석 결과

3.1. 방사선 비파괴 조사

X선 투과 조사로 청동거울의 내부구조를 확인하였다(Table 1). 담양 제월리 고분 출토 주문경(sample 1, Table 2A~C)은 100 kV, 2 mA, 50 sec로 조사하였으며, 필터 효과를 주었을 때 문양이 명확하게 확인되었다. X선 투과 이미지에서 확인되는 검은색 원형 점들은 유물 내부에 주물과정에서 형성된 것으로 보이며, 넓은 영역에 열게 보이는 부분은 부식에 의한 것으로 유물 표면에서도 부식물이 확인되었다. 변형옥수경(sample 2)은 130 kV, 3 mA, 50 sec로 조사하였으며, 필터 효과를 통해 S자의 서수(瑞獸) 문양이 보다 명확하게 확인되며, 문양이 동일하지 않음을 확인하였다. 검은색 둥근 점들은 유물 표면에서 확인되지 않는 내부에 존재하는 기공으로 주물기공으로 보이며, 유물 표면에 부식물로 등글게 패어 있는 부분들은 X선 이미지에서 전체적으로 밀도가 낮게 확인되었다(Table 2D~F). 변형옥수경(sample 3)은 130 kV, 3 mA, 50 sec로 조사하여 서수 문양을 확인하였고 문양 머리와 꼬리 부분 형태가 다름이 관찰되었다. 또한 주변부에 유물 표면에서 확인되지 않고 주조기포로 추정되는 미세한 검은색 원형 점들이 확인되었다(Table 2G~I).

Table 2. Non destructive analysis of bronze mirrors

Sample No.	Width (cm)	Depth (cm)	Weight (g)	X-ray image		
				Non-filter	Filter	Magnification
1	9.00	0.08~0.70	51.5	A	B	C
				D	E	F
2	11.40	0.13~1.00	118.7	G	H	I
3	14.00	0.13~1.02	173.3			

3.2. 성분 분석

청동거울 3점(sample 1~3)을 대상으로 시료 내 포함된 주성분의 보다 정밀한 정량값을 확인하기 위해 ICP-MS 분석을 진행하였으며, 결과는 Table 3과 같다. 전체 함량의 평균값이 담양 제월리 고분 출토 청동거울인 주문경(sample 1)은 Cu 79.0 wt%, Sn 16.9 wt%, Pb 2.9 wt%, 변형옥수경(sample 2)은 Cu 73.9 wt%, Sn 17.5 wt%, Pb 4.2 wt%가 검출되었다. 고흥 봉룡리 발견 변형옥수경(sample 3)의 합금비는 Cu 72.9 wt%, Sn 21.3 wt%, Pb 3.3 wt%임을 확인하였다. 3점의 청동거울에서 모두 주요성분인 Cu-Sn-Pb가 73~79 : 17~21 : 3~4 비율로 확인되었고, 극히 미량으로 포함되어 있는 As, Fe, Ni, Ag 등의 성분이 검출되었다.

3.3. 미세조직 분석

청동거울 제작에 사용된 합금의 종류와 제작방법을 확

인하기 위해 미세조직을 관찰하고, 조직 내 포함된 개재물 및 기지조직에 대한 성분분석을 하였다(Table 4~6).

3.3.1. 주문경(sample 1)

주문경(sample 1)은 금속현미경으로 미세조직을 관찰하였을 때 밝은 색의 α 상이 수지상으로 분포하며, 좌측 하단 α 상 사이에 밝은 회색의 $\alpha + \delta$ 공석상이 확인된다. 조직 내에 붉은색 입자는 이차생성구리로 추정되는 물질로 $\alpha + \delta$ 공석상 조직이 부식된 곳에서 관찰된다. 수지상정은 주조공정으로 형성된 조직으로, 두드림이나 담금질과 같은 열처리 공정은 확인되지 않았다(Table 4A).

고배율의 주사전자현미경으로 미세조직 및 개재물을 관찰하고 EDS로 성분을 확인하였다(Table 4B). 분석지점 1은 분석영역 전체를 면분석한 것으로 Cu 79.05 wt%, Sn 13.97 wt%, Pb 3.81 wt%가 검출되었다. 금속현미경에서 관찰되는 등근 형태의 입자는 SEM image에서 흰색으로 관찰되며, EDS로 포인트 분석한 결과 67.70 wt%의 Pb가

Table 3. Chemical composition range of bronze mirrors (ICP-MS)

Sample No.	Element (wt%)										
	Cu	Sn	Pb	Fe	Co	Ni	Zn	As	Ag	Sb	P
1	79.0	16.9	2.9	0.009	0.001	0.007	0.001	0.019	0.016	0.034	0.002
2	73.9	17.5	4.2	0.007	0.001	0.007	0.001	0.023	0.014	0.036	0.001
3	72.9	21.3	3.3	0.033	0.001	0.008	0.001	0.020	0.149	0.342	0.002

Table 4. Microstructure and SEM-EDS results of sample 1

Microstructure			SEM images and chemical composition points

Analysis position	Element (wt%)						
	Cu	Sn	Pb	As	O	S	Cl
1	79.05	15.97	3.81	0.60	-	0.27	0.30
2	1.73	-	67.70	-	21.70	8.86	-
3	100.00	-	-	-	-	-	-
4	15.71	43.55	13.75	-	2.97	-	1.01
5	73.02	26.98	-	-	-	-	-
6	87.64	9.78	-	-	2.58	-	-

Table 5. Microstructure and SEM-EDS results of sample 2

Microstructure	SEM image and chemical composition points

Analysis position	Element (wt%)				
	Cu	Sn	Pb	As	O
1	81.92	14.74	2.70	0.64	-
2	2.47	-	87.34	-	10.20
3	92.94	7.06	-	-	-
4	70.13	26.04	3.83	-	-
5	67.16	30.57	2.28	-	-

검출되었다(Table 4A, 5B). 또한 주원소인 Pb 이외에 O, S가 일부 검출되었지만, 이는 Pb의 원재료나 산화 과정에서 포함된 원소들로 판단된다. 짙은 회색의 분석지점 3은 Cu가 100 wt% 검출되었으며, 다른 금속성분은 확인되지 않아 순수한 Cu로 구성된 이차생성구리임을 확인할 수

있었다. 분석지점 4는 $\alpha + \delta$ 공석상에서 밝은 회색의 부분은 δ 상으로 $\text{Cu}_{32}\text{Sn}_8$ (32.5%Sn)의 조성에 해당한다. 하지만 Sn이 43.55 wt%로 높게 검출되었는데, 이는 분석한 위치의 주변에 생성되어 있는 납과 부식물의 영향으로 판단된다. Table 4C에서 조직 내 바탕이 되는 밝은 회색 영역

Table 6. Microstructure and SEM-EDS results of sample 3

Microstructure		SEM images and chemical composition points
<div><div> </div><div> </div></div>							
Analysis position	Element (wt%)								
	Cu	Sn	Pb	O	Si	S	Cl	Fe	Au
1	76.63	14.42	1.44	5.15	0.25	0.32	0.17	0.25	1.37
2	72.88	27.12	-	-	-	-	-	-	-
3	55.33	-	-	6.3	1.86	23.14	-	13.37	-
4	51.79	8.44	19.96	12.53	7.28	-	-	-	-
5	87.24	9.29	-	3.47	-	-	-	-	-
6	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-

(분석지점 5)과 어두운 영역(분석지점 6)을 분석하였다. Sn의 함량을 비교하였을 때 밝은 회색 영역에서는 Sn 함량이 높게 검출된 δ 상과 $\alpha + \delta$ 공석상이 혼재된 공석상이며, 어두운 영역은 α 상임을 알 수 있다.

3.3.2. 변형육수경(sample 2)

변형육수경(sample 2)은 수지상의 α 상과 $\alpha + \delta$ 공석상이 형성된 전형적인 청동 주조 합금의 미세조직으로 등근 형태의 hole을 전체적으로 관찰할 수 있으며, 열처리나 인위적인 가공의 흔적이 확인되지 않았다(Table 5A).

주사전자현미경으로 미세조직을 관찰하고 분석영역 전체를 EDS로 면분석한 결과 Cu 81 wt%, Sn 14.7 wt%, Pb 2.7 wt%가 검출되었다(Table 5B, 분석지점 1). SEM image상에서 흰색 개재물로 관찰되는 등근 형태의 입자는 EDS로 분석한 결과에서 Pb가 87.34 wt% 검출되었다(Table 5B, 분석지점 2). 분석지점 3은 미세조직의 바탕 영역에 해당하며 α 상으로 Cu 92.94 wt%, Sn 7.06 wt%가 검출되었다. 밝은 회색 영역(분석지점 4)은 Cu 70.13 wt%, Sn 26.04 wt%로 분석된 $\alpha + \delta$ 공석상이며, Sn 함량이 30.57 wt% 검출된 분석지점 5는 금속간 화합물인 δ 상이다.

3.3.3. 변형오수경(sample 3)

변형오수경(sample 3)은 밝은 노란색의 α 상과 밝은 회색

의 $\alpha + \delta$ 공석상, 좌측에 부식된 공석상이 확인된다. 부식된 공석상 조직에서 이차생성구리로 추정되는 붉은색 입자와 원형의 검은색 입자를 관찰된다. 또한 미세조직에서 인위적인 공정인 두드림이나 담금질이 확인되지 않으므로 주조 공정으로 제작된 것을 확인할 수 있다(Table 6A).

전자현미경으로 관찰하고 EDS로 분석한 결과 미세조직에서 최대한 부식되지 않은 부분(Table 6B, 분석지점 1)을 분석한 결과 Cu 76.63 wt%, Sn 14.42 wt%, Pb 1.44 wt%와 Fe, S이 미량으로 포함되었다. 밝은 회색 부분인 분석지점 2에서는 Cu 72.88 wt%, Sn 27.12 wt%가 확인되어 δ 상으로 확인되었다. 바탕인 α 상보다 짙은 색을 나타내는 분석지점 3은 S, Fe가 함께 검출되어 황화물 계열의 개재물이 존재함을 확인할 수 있었다. 흰색 개재물(분석지점 4)은 Pb를 포함하는 입자로 확인되었다. Table 6C에 분석지점 5로 표시한 α 상에서는 Cu 87.24 wt%, Sn 9.29 wt%가 검출되었다. 부식된 공석상의 공극 내에서 이차생성구리가 확인되었으며, 다른 금속성분이 나타나지 않아 순수한 구리임을 확인하였다(분석지점 6).

4. 고 찰

담양 제월리 고분 출토 청동거울과 고흥 봉룡리 발견 청동거울 총 3점에 대한 금속학적 분석으로 청동거울의

제작기법을 확인하였다.

담양 제월리 고분에서 출토된 주문경(sample 1)의 X선을 이용한 조사 결과 육안으로 관찰되지 않던 문양과 형태를 명확하게 확인할 수 있었으며, 내부에 육안으로 관찰되지 않는 미세한 기공이 관찰되었다. 이는 금속을 용해하여 주형에 흘려 넣고 굳히는 과정에서 발생한 것으로, 용탕 중에 함유된 가스가 방출되지 못한 상태로 잔류하여 형성된 주물공임을 알 수 있다(Park and Yu, 2009; Choi, 2014). 또한 미세조직에서도 밝은 색의 α 상 바탕에 δ 상이 발달되어 있어 주조 공정으로 제작된 것으로 확인된다. 부분적으로 $\alpha + \delta$ 공석상이 부식된 곳에서 이차생성구리와 둥근 형태의 Pb가 분포하고 있다. 제련과정에서 제거되지 않은 것으로 추정되는 S이 확인되어 황이 포함된 구리광석을 구리재료로 사용한 것으로 추정된다.

같은 유적에서 출토된 변형옥수경(sample 2)에서도 내부에 작고 고르게 분포하는 다수의 주물공이 확인되며, 특히 서수문양이 명확히 드러남을 X선 투과 분석으로 확인하였다. 시료 내 미세조직은 전형적인 청동 주조 합금의 조성으로 수지상의 α 상과 $\alpha + \delta$ 공석상으로 구성되어 있다. 부분적으로 관찰되는 둥근 형태의 입자는 Cu에 용융되지 않고 편석된 납 편석물로 보인다.

고흥 봉릉리에서 발견된 변형옥수경(sample 3)도 X선 투과 분석으로 육안으로 선명하게 관찰되지 않던 배면의 서수문양을 확인하였으며, 내부에 포함된 주물기공이 확인되었다. 미세조직에서 열처리가 행해지지 않은 전형적인 주조조직인 α 상과 $\alpha + \delta$ 공석상이 확인되며, 둥근 형태의 납 편석물이 분포하고 있다. 부식된 $\alpha + \delta$ 공석상에 형성된 붉은색의 이차생성구리는 오랜 기간 매장환경에서 반복된 Cu의 부식 과정에서 형성된 것으로 판단된다(Bosi *et al.*, 2002). 또한 비금속재물에서는 S, Fe가 검출되어 황동석(CuFeS_2)이나 반동석(Cu_5FeS_4) 등 황이 포함된 구리광석을 제련하여 생산된 구리 재료가 청동거울 제작에 사용되었을 가능성이 크다.

출토지는 상이하나 형태적으로 유사한 청동거울 3점에서 공통적으로 관찰되는 주물공과 수지상으로 발달된 미세조직을 통해 모두 주조 공정으로 제작된 것으로 확인되었다. 구성된 미세조직은 α 상의 기지에 $\alpha + \delta$ 상이 분포하고 있으며, 1차 가공 후 열처리 등 인위적인 공정을 하지 않은 것으로 보인다. 청동거울 제작에 사용된 재료의 정밀한 성분 조성을 분석한 결과 Cu-Sn-Pb으로 구성된 3원계 합금으로 Cu 73~79 wt%, Sn 17~21 wt%, Pb 3~4 wt%가 포함되어 있다. Cu-Sn 합금은 내식성, 주조성이 좋은 특성을 가지고 있으나, 주석 함량이 15 wt% 이상일 경

우 경도가 급격히 증가하는데, 이때 δ 상 화합물이 형성되면서 재료의 취성도 증가한다. 이와 더불어 주석의 함량에 따른 합금 색상도 변하여 0~3 wt%는 적색, 4~10 wt% 적황색, 11~15 wt%는 백황색, 16~20 wt%는 담황색, 21~24 wt%는 회백색, 25~32 wt% 은백색(Yum, 1995)이 된다. 이와 같이 분석 대상 청동거울들은 거울로써 목적을 수행하여야 하므로 붉은색의 구리색상이 백색으로 변화할 정도의 주석을 합금한 것으로 보인다. 또한 Pb의 함량이 3~4 wt%로 확인되는데, 앞서 언급하였듯이 Sn 함량이 증가함에 따라 나타나는 기계적 성질을 보완하기 위하여 Pb를 첨가하여 용융온도를 낮추고 주조성과 유동성을 좋게 하기 위한 의도적인 공정으로 보인다(Hermann and Heinrich, 2005; Park and Joo, 2017; Han *et al.*, 2019).

출토지와 시대가 분명한 한강 이남에서 출토된 고대 청동거울의 기존 성분분석 결과 26점을 정리하여 비교하였다(Table 7). 선행된 연구 결과 중 초기철기시대에 해당하는 14점의 성분분석 결과는 평균 Cu 64.54 wt%, Sn 27.63 wt%, Pb 4.05 wt%이다. 한편 삼국시대부터 통일신라시대에 해당하는 12점의 청동거울은 평균 Cu 71.55 wt%, Sn 23.77 wt%, Pb 2.93 wt%로 확인되었다. 본 연구 대상인 청동거울 3점은 초기철기시대의 평균 조성보다 Cu 함량은 높고, Sn 함량은 낮게 측정되었다. 삼국-통일신라시대 평균 조성과 비교하였을 때 변형옥수경(sample 3)은 유사하였으나, 주문경(sample 1)의 Cu 함량은 높게 측정되었고, Sn 함량은 비교적 낮게 측정되었으나, 광주 쌍암동 고분 출토 주문경과 유사한 성분조성을 나타내는 것으로 확인되었다.

먼저 기술한 것처럼 미세조직을 관찰한 3점의 청동거울 모두 인위적인 열처리 공정이 확인되지 않은 전형적인 주조의 미세조직이며, 대체로 크기와 모양이 유사한 미세조직들이 형성된 청동 재질의 특성을 확인할 수 있다. 초기철기시대의 청동거울은 다량으로 합금된 Sn 함량에 따라 δ 상, $\alpha + \delta$ 상이 주요 미세조직으로 형성되어 있지만(Park, 2004; Park and Yu, 2009; Choi, 2014; Han *et al.*, 2018; Jang, 2020), 대체로 삼국시대 이후에 제작된 청동거울들은 본 연구 결과와 유사한 미세조직을 보이고 있다. 그러나 일부 연구에서 γ 상, 마르텐사이트가 확인된 청동거울에 대하여 비교적 늦은 시기에 제작된 것으로 보고 있다(Park, 2004; Huh *et al.*, 2007). 분석 대상 유물은 주조과정 이외에 다른 인위적인 처리가 확인되지 않으므로 기술적인 측면에서 삼국시대에 제작된 청동거울들 가운데 상대적으로 이른 시기에 제작된 청동거울로 분류할 수 있다. 그러나 통일신라 말기에 해당하는 청해진 출토 청동

거울과 고려시대 유적지인 단양 현곡리에서 출토된 청동 거울은 열처리 등으로 변화한 흔적이 관찰되지 않았다 (Hwang, 2011; Hwang *et al.*, 2014). 이와 같이 늦은 시기에

도 열처리 공정을 하지 않는 주조 기술이 함께 적용되었으므로 다양한 상황을 고려하여야 할 것이다.

Table 7. Main composition of excavated bronze mirrors in the south region of the Han River

Age	Site	Element (wt%)												Methods
		Cu	Sn	Pb	Zn	Ag	Ni	Co	As	Sb	Fe	C	O	
Early iron age	Buyeo Chongsong-ri	63.30	28.90	6.00	0.10	00.14	0.15	-	0.23	-	-	-	-	Han <i>et al.</i> , 2018 (EPMA)
Early iron age	Chungju Hoam-dong	68.20	28.80	5.80	0.07	0.21	0.06	0.01	0.32	-	0.05	-	-	Han <i>et al.</i> , 2018 (EPMA)
Early iron age	Nonsan Wonbuk-ni	71.40	22.60	5.90	≤0.02	0.05	0.02	-	0.27	0.86	0.41	-	-	Kang, 2003 (ICP)
Early iron age	National treasure 141	61.68	32.62	5.46	0.16	0.23	0.16	-	-	-	0.07	-	-	Yu, 2009 (ICP, XRF)
Early iron age	Hwasun Baekam-ri	65.06	28.40	6.33	0.05	0.04	0.16	-	-	-	0.01	-	-	Yu, 2009 (XRF)
Early iron age	Hwasun Daegok-ri	65.76	28.57	5.43	0.05	0.23	0.16	-	-	-	0.03	-	-	Yu, 2009 (XRF)
Early iron age	Hwasun Daegok-ri	65.30	28.80	5.70	0.04	0.16	0.14	-	-	-	0.03	-	-	Yu, 2009 (XRF)
Early iron age	Wanju Sinpung (no. 1)	64.30	28.20	0.85	tr	0.02	0.16	0.12	0.17	0.07	0.02	-	-	Jang, 2020 (ICP-AES)
Early iron age	Wanju Sinpung (no. 2)	62.50	29.60	2.42	tr	0.03	0.16	0.01	0.13	0.08	0.04	-	-	Jang, 2020 (ICP-AES)
Early iron age	Wanju Sinpung (no. 3)	65.30	29.10	2.81	tr	0.02	0.16	0.13	0.13	0.07	0.20	-	-	Jang, 2020 (ICP-AES)
Early iron age	Wanju Sinpung (no. 4)	60.80	25.60	1.21	tr	0.02	0.08	0.04	0.36	0.18	0.08	-	-	Jang, 2020 (ICP-AES)
Early iron age	Wanju Sinpung (no. 5)	61.60	26.40	0.85	tr	0.02	0.09	0.05	0.25	0.11	0.03	-	-	Jang, 2020 (ICP-AES)
Early iron age	Wanju Sinpung (no. 6)	63.09	28.30	1.10	tr	0.03	0.16	0.15	0.19	0.09	0.07	-	-	Jang, 2020 (ICP-AES)
Early iron age	Gyeongsan Yimdang	65.30	20.90	6.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Lee, 2013 (ICP-AES)
	Average	64.54	27.63	4.05	0.08	0.09	0.13	0.07	0.23	0.21	0.09	-	-	
	S.D.	2.71	2.85	2.26	0.04	0.08	0.05	0.05	0.08	0.27	0.11	-	-	
3 kingdoms period	Mireuksaji	67.40	25.8	4.88	tr	-	0.05	-	0.02	0.14	0.25	-	-	Chung <i>et al.</i> , 1992 (ICP, AAS)
3 kingdoms period	Ssang amdong	74.70	20.70	2.60	0.01	0.10	0.06	tr	-	0.23	0.37	-	-	Hwang, 2011 (ICP-AES)

Age	Site	Element (wt%)												Methods
		Cu	Sn	Pb	Zn	Ag	Ni	Co	As	Sb	Fe	C	O	
United silla period	Mireuksaji	66.80	22.90	6.31	0.01	0.31	0.15	0.08	-	0.63	0.55	-	-	Huh, 2006 (ICP)
United silla period	Mireuksaji	69.10	24.90	5.48	0.01	0.06	0.13	0.05	0.29	0.13	0.18	-	-	Huh, 2006 (ICP)
Baekje~ united silla period	Mireuksaji	75.30	21.60	0.54	0.02	0.58	0.15	0.05	-	0.50	0.41	-	-	Huh, 2006 (ICP)
3 kingdoms period or united silla period	Icheon Seolbong Fortress	76.20	23.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Park, 2004 (SEM-EDS)
United silla period	Cheonbuk, Gyeongju	72.12	25.55	2.24	-	-	-	-	-	-	0.10	-	-	Gyeongju national museum, 2007 (XRF, surface)
United silla period	Cheonbuk, Gyeongju	65.00	28.22	6.55	-	-	-	-	-	-	0.23	-	-	Gyeongju national museum, 2007 (XRF, surface)
United silla period	Boonhwang Temple	73.0	27.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Jung and Park, 2005 (EDS)
United silla period	Boonhwang Temple	74.0	24.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Jung and Park, 2005 (EDS)
United silla period	Boonhwang Temple	73.0	19.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Jung and Park, 2005 (EDS)
Late united silla period	Cheonghaejin	72.00	21.80	6.50	0.01	0.17	0.10	0.47	0.11	0.48	0.04	-	-	Hwang <i>et al.</i> , 2014 (ICP-AES)
Average		71.55	23.77	2.93	0.01	0.26	0.11	0.06	0.15	0.33	0.30	-	-	
S.D.		3.48	2.59	2.71	0.01	0.21	0.04	0.01	0.14	0.20	0.14	-	-	

5. 결 론

본 연구는 삼국시대 출토유물로 추정되는 청동거울 3점의 제작방법을 파악하고자 하였으며, 다음과 같이 정리할 수 있다.

연구 대상인 청동거울 3점은 Cu, Sn, Pb 3원계 합금으로 구성되었으며, 초기 철기시대보다 Sn 함량이 비교적 낮은 삼국시대에 제작되었다. 변형오수경의 경우 황동석이나 반동석, 담양 제월리 주문경은 황화물이 포함된 원료를 사용한 것으로 추정된다. 또한 Sn의 함량을 조정하여 경면 색상을 조정하였을 것으로 보이며, 분석된 Sn 함량을 고려하였을 때 담황색과 은백색의 경면을 가지고 있

음을 알 수 있다. 미세조직에서 α 상이 바탕을 이루고 $\alpha + \delta$ 공석상을 가지고 있으며, 주조공정으로 제작되었고, 청동거울 배면의 문양을 선명하게 나타내기 위하여 의도적으로 납을 첨가한 것으로 추정할 수 있다. 또한 재석출구리의 존재로 오랜 세월 매장환경에서 존재한 것을 짐작할 수 있다.

삼국시대 청동거울은 다른 시대와 비교하였을 때 유물의 수량이 많지 않아 자료의 부족으로 연구가 많이 이루어지지 않았으며, 특히 완형의 유물일 경우 시료 채취에 어려움으로 분석 연구가 제한적으로 이루어졌다. 이러한 이유로 제작시기의 기술의 보편성이나 특징을 밝히는 것은 쉽지 않았으나, 이른 시기에 제작된 유물 대부분 주조

공정만을 거치고 후대로 갈수록 주조공정과 두드림 공정이 진행되므로 기술적인 변화가 이루어진 것으로 보인다. 그러나 본 연구에서 분석한 청동거울 3점의 경우 미세조직에서 주조공정 외에 그 어떤 다른 공정을 확인할 수 없었기 때문에 비교적 이른 시기에 제작된 삼국시대 청동거울이라고 판단할 수 있을 것이다. 이번 연구와 같이 고고학적 형태학적 분류로 제작연대 추정이 가능한 청동거울에 자연과학 연구가 이루어진다면 청동거울의 시기별 제작정보와 제작기술의 발전과정을 세세히 열거할 수 있을 것이며, 더불어 지역 및 문화권역별 상관관계를 밝힐 수 있는 자료로 활용될 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 전남대학교 박물관에서 시료를 제공받았으며, 문화재청 국립나주문화재연구소 문화유산 조사연구(R&D) 사업의 지원을 받아 이루어졌습니다.

REFERENCES

- Bokcheon Museum, 2009, 2009 special exhibition, sacred bronze mirror.
- Bosi, C., Garagnani, G.L., Imbeni, V., Martini, C., Mazzeo, R. and Poli, G., 2002, Unalloyed copper inclusions in ancient bronze artifacts. *Journal of Materials Science*, 37(20).
- Choi, M.R., 1976, Damyang Jewol-ri artifacts from ancient tomb of Baekje. *Munhwajae*, 10.
- Choi, M.R., 2014, Study on manufacturing technique and provenance of bronze artifacts in early Iron Age - focus on the Jeonbuk area -, Korea. Master's dissertation, Kongju National University, Gongju.
- Chung, K.R., Kim, Y.C. and Maeng, S.C., 1992, Metallurgical study of bronze artifacts excavated from miruksa temple. *Journal of the Korean Conservation Science for Cultural Properties*, 1(1), 27-39.
- Gyeongju National Museum, 2007, Mirrors from the collection of Gyeongju National Museum. 250-255.
- Han, W.R., Kim, S.J., Lee, E.W. and Hwang, J.J., 2019, Producing of bronze artifacts excavated from Gulsansa temple site in Gangneung: Technology and provenance. *Journal of Conservation Science*, 35(3), 187-196.
- Han, W.R., Hwang, J.J. and Kim, S.J., 2018, Bronze Production Technology in the Early Iron Age: A comparative study of bronze artifacts recovered from the Hoam-dong site in Chungju and Chongsong-ri in Buyeo. *Munhwajae*, 51(4), 224-233.
- Hermann S. and Heinrich O., 2005, *Metallografie*, Wiley-vch. Germany.
- Huh, I.K., 2006, Metallurgical study of bronze mirrors and bells excavated from the Miruksa temple site. Master's dissertation, Hanseo University, Seosan.
- 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.
- Hwang, J.J., 2011, Comparative study on components and microstructure of Korean bronze mirror. *Conservation Studies*, 32, 155-170.
- Hwang, J.J., Kim, S.J., Han, W.R. and Han, M.S., 2014, Provenance study on lead isotope of the bronze using a Korea peninsula lead isotope data - focused on bronze relics excavated from Cheonghaejin. *J. Miner. Soc. Korea*, 27(4), 263-270.
- Jang, M.K., 2020, Study on manufacturing technique and corrosion characteristics of bronze mirrors in early iron age excavated the Sinpung site in Wanju, Korea. Master's dissertation, Kongju National University, Gongju.
- Jung, Y.D. and Park, J.S., 2005, Technical transitions observed in the bronze artifacts excavated from the Boonhwang temple site in Kyongju, Korea. *Journal of Metals and Materials*, 43(1), 80-86.
- Kang, H.T., Chung, G.Y., Cho, S.K. and Lee, M.H., 2003, Scientific analysis of bronze artifacts from Wonbuk-ni site, Nonsan. *Hanguk Sanggosa Hakbo*, 39, 19-30.
- Kim, J.E., 2020, The background of exotic mirror burial in the Mahan and Baekje area. Master's dissertation, Chonnam National University, Gwangju.
- Lee, J.H., 2004, The design and its significance of imitated bronze mirror of the Samhan period in Yeongnam province. *Journal of the Korean Archaeological Society*, 2004, 53, 33-58.
- Nam, Y.U., 2014, History of research on bronze mirrors excavated in the Korean peninsula. *Ulsan Sahak*, 18, 119-152.
- Park, H.S. and Yu, H.S., 2009, The micro-structure and raw materials of national treasure no.141-bronze mirror with geometric designs. *The Korean Christian Museum at Soongsil University*, 91-101.
- Park, J.S., 2004, Bronze technology of ancient Korea. *Journal of the Korean society for heat treatment*, 17(3), 189-198.
- Park, J.S. and Joo, J.O., 2017, The social implications of technological variability as observed in high tin bronze objects of the Unified Silla. *Korean J. Met. Mater*, 55(10), 745-751.

- Rho, T.C., 2000, A Historical study on the ancient metallurgical technology in Korea, Hakyoung, Republic of Korea.
- Yi, Y.S., 2010, An archaeological study to the bronze mirror of Three Hans Period to Three Kingdoms Period. Ph.D. Dissertation, Pusan National University, Busan.
- Yu, H.S., 2009, Studies on the composition of the component materials of national treasure No. 141 - Bronze mirror with geometric designs. The Korean Christian Museum at Soongsil University, 102-123.
- Yum, Y.H., 1995, A study on the internationalization of traditional technology in Korea-bronze ware. Korean Science Foundation, 306-366.
- 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.