

익산 미륵사지 출토 동경의 금속학적 연구 및 산지 추정

허일권 | 조남철* | 강형태

국립중앙박물관 보존과학실
*국립공주대학교 문화재보존과학과

Provenance and Metallurgical Study on Bronze Mirrors Excavated from Mireuksaji Temple Site, Iksan

Huh Il-kwon | Cho Nam-chul* | Kang Hyung-tae

Conservation Science Laboratory, The National Museum of Korea

*Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University

초 록 미륵사지에서 출토된 동경의 성분을 분석하여 어떠한 배합비로 주조하였는지 또한 금속조직 관찰을 통하여 동경의 제작기법을 그리고 납동위원소비를 분석하여 동경에 쓰인 납이 어느 지역의 방연석을 사용한 것인지를 검토하였다. 동경의 성분분석 결과, Cu의 농도는 68.8-73.3wt%, Sn의 농도는 21.6-24.9wt%로 나타났으며, Pb의 함량은 시료번호 미륵 2와 3이 미륵 4에 비해 높게 나타났다. 미세조직은 미륵 2와 3의 경우는 주조조직으로서 α 상과 $\alpha+\delta$ 상으로 이루어져 있었으며, 미륵 4의 경우는 마르텐사이트 조직이 관찰되는 것으로 보아 인위적인 열처리가 있었음을 알 수 있다. 납동위원소비를 통한 산지분석결과에서는 동경의 주조시 사용된 납의 경우 일본지역에서 쓰인 방연석과 깊은 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 이 연구 결과는 익산 미륵사지에서 출토된 동경의 제작기법 및 교류관계 등을 알아볼 수 있을 귀중한 자료로 활용될 것이다.

중심어: 미륵사지, 동경, 성분분석, 미세조직, 납동위원소비

ABSTRACT By analyzing the chemical compositions of bronze mirror presumably excavated from Mireuksaji temple site, Iksan, we have surveyed what alloy composition was used in casting the mirror, and also tried to estimate the manufacturing technique of the bronze mirror, through the observation of microstructure, as well as which region's galena the lead used in the mirror belonged to, by analyzing the ratio of the lead isotope. The content analysis result of bronze mirrors shows that it consists of 68.8 to 73.3wt% of Cu, 21.6 to 24.9wt% of Sn. In particular, the content of Pb of Mireuk 2 and 3 Samples are higher than those of Mireuk 4. The observation result of microstructure demonstrates that Mireuk 2 and 3 consist of α and $\alpha+\delta$ eutectoid phase made through casting process. But Mireuk 4 show other process employed, such as quenching though martensite structure. In the analysis result of provenance though the lead isotope ratio, the origin of the used in bronze mirrors excavated from Mireuksaji temple site is presumed to be from galenas of Japan. like this those, the chemical composition, microstructure, and lead isotope ratio of bronze mirrors excavated from Mireuksaji can be utilized as fundamental data to compare mutually with other remains.

key word : Mireuksaji temple site, bronze mirror, chemical compositions, microstructure, lead isotope ratio

1. 머리말

인류가 최초로 청동기를 이용한 것은 B.C.3700년경 이집트에서부터라고 알려져 있다. 동양에서는 이보다 늦은 B.C.2000년경부터 시작되었으며, 商王朝 말기시대부터 주왕조시대(B.C.1027-B.C.256)에는 청동의 주조 기술이 고도로 발달하여 예술적인 제품이 많이 만들어졌다. 우리나라에서의 청동문화는 만주식 동검문화의 유입으로부터 시작된다. 그러나 만주식 동검 유입시기(B.C.10-4세기 이전)에는 우리나라에서 청동기의 제작이 이루어졌다고 보기에는 어렵고, 그 이후 B.C. 4세기 경부터 B.C. 2세기 중엽까지에 걸치는 이른바 세형동검 시기에 이르러 비로써 청동기의 주조가 본격적으로 이루어졌다고 보고 있다.¹

현재까지 청동기에 대한 연구는 유형분류학적 연구와 자연과학적 분석 연구로 분류되어 진행 되어왔다. 자연과학적 연구는 청동기 시료의 수집이 어렵고 또 일부 연구자들에 대해서 분석된 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.²

또한 청동합금의 화학조성과 제작 과정 간에는 기술적으로 불가분의 관계가 존재하며, 이를 인식하여 종합함으로써 하나의 독특한 청동기 기술체계를 이루어가는 과정에는 시기적으로 그리고 지역적으로 차이가 발생할 수 있다. 이러한 차이는 물론 고대 사회가 처해 있던 정치, 문화, 사회 및 지역적 특성을 반영하는 것이므로 청동기를 매개로 전개되었던 청동기 기술체계의 보편성과 특수성을 밝히려는 연구가 필연적으로 실시되어야 한다. 여기에는 무엇보다도 시대와 지역에 따라 형성되어 있던 개별적 기술체계에 대한 충분한 자료를 축적하는 작업이 선행되어야 한다.³

특히 본 연구대상인 동경은 동판의 표면을 잘 다듬고 문질러서 얼굴이 비치게 하는 것으로서 4천년 전부터 이집트의 왕조에서 사용한 것으로 알려져 왔으며 중국에서는 기원전 2천년경 甘肅省 廣河齊家坪의 고분에서 지름 6cm 가량의 동경이 출토되었다. 우리나라에서 출토된 선사시대 동경의 경우는 꼭지가 두 개 이상 지나다하여

다뉴경으로 불리는데, 무늬가 거칠고 세밀한 정도에 따라 조문경과 세문경으로 구분된다.¹

본 연구는 미륵사에서 출토된 동경의 성분을 분석하여 어떠한 배합비로 주조하였는지 알아보았다. 또한 금속조직 관찰을 통하여 동경의 제작기법을 그리고 납동위원소비를 분석하여 동경에 쓰인 납이 어느 지역의 방연석을 사용한 것인지를 추정하고자 하였다.

2. 익산 미륵사지

백제 최대의 가람 미륵사가 있던 곳으로 알려진 미륵사지는 전북 익산시 금마면 기양리 노상마을에 자리하고 있다. 사지가 있는 지역은 익산지방 특유의 야산이 있는 들판으로, 들판 가운데 우뚝한 미륵산의 남쪽 사면에 사지가 있다.⁴

미륵사지는 백제 사찰 중에 가장 잘 남아있을 뿐만 아니라 역사적으로도 삼국유사의 연기설과 실제로 부합한 유적으로 발굴조사를 통하여 부분적으로 사실임이 밝혀졌다.

미륵사지에 대한 발굴조사는 1980년부터 1996년까지 문화재연구소 미륵사지발굴조사단에 의하여 실시되었다. 미륵사지에서 출토된 유물은 주로 기와와 토기, 자기들이며 시기적으로는 백제시대부터 조선시대에 이르는 것 이어서 미륵사지가 입지한 지역의 문화와 역사를 파악할 수 있는 자료가 된다.

유물은 지역에 따라 또 건물의 성격에 따라서 시기와 출토양상이 다른데 대체로 가람 중심팍에서는 고려 말 이후의 유물은 출토되지 않는다. 이와 달리 사역의 외곽 특히 북편 승방지의 북쪽, 한단 높은 지역을 중심으로 조선시대의 유물이 집중적으로 출토되었다.

미륵사 창건 연대를 밝혀주는 자료로는 막새와 토기가 있는데 막새 중 백제 사비시대 이전으로 편년되는 것은 출토되지 않았다. 따라서 유물에 의하면 미륵사 창건은 부여천도 이후에 이루어진 것으로 추정할 수 있다. 이와 달리 중심팍에서는 고려 말 이후의 유물이 출토되지 않으며 외곽지역에서 조선시대의 유물이 주로 출토되는 점에서 미륵사의 중심팍 지역은 폐허로 되고 외곽지역을 중심으로 규모가 축소된 상태로 미륵사가 유지되었음을 알 수 있다.⁴

3. 분석시료 및 방법

3.1. 분석시료

미륵사지 출토 유물 중 출토위치와 유물명이 확실한 동경편 3점에 대하여 조성, 금속조직 관찰 및 납동위 원소비를 분석하였으며 Table 1에는 이번에 분석한 동경편들의 특징을 기술하였다.

3.2. 방법

1) 성분분석

유도결합플라즈마발광분석기(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission spectrometry : ICP, Seiko, Japan)를 사용하여 10개(Cu, Sn, Pb, Zn, Ag, Ni, Co, As, Sb, Fe)의 성분원소를 분석하였다. 각 원소에 대하여 4회 측정하였으며, 편차가 가장 큰 값은 제외하고 나머지 3회 평균값을 사용하여 정량하였다.

2) 미세조직

시료가 작아 에폭시 수지로 마운팅(mounting) 하고, 사포의 조밀 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-suspension 3 μ m, 1 μ m, OP-U, Struers)를 뿌리면서 시료에 스크래치가 없을 때까지 연마하였다.

연마가 끝난 시편은 에칭액(FeCl₃+HCl+Ethyl Alcohol)을 이용하여 에칭시켰으며 금속현미경(Metallurgical Microscope, OLYMPUS PMG3, JAPAN)을 사용하여 조직을 관찰하였다.

3) 납 동위원소비 분석

약 3mg 정도 시료를 채취하여 테프론 바이알에 넣은 후, 정제된 왕수를 2~3ml 첨가하고 150℃의 가열판에서 밤새도록 가열하였다. 다음 바이알 뚜껑을 열고 가열하여 건조시켰고 6N 염산 2ml 정도를 사용하여 다시 건조시킨 후 1N HBr 1ml로 녹였다. 원심분리 시켜 녹인 시료를 음이온교환수지(AGI-X8, chloride form, 100-200#)와 1N HBr을 사용하여 납을 분리시켰다. 분리한 납은 single filament에 얹어 열이온화질량분석기(Thermal Ionization Mass Spectrometer:TIMS, VG Sector 54-30)를 사용하여 동위원소비를 측정하였다. 분석결과는 표준물질(NBS SRM 981)의 측정치를 사용하여 보정한 것이다. 분석과정의 총 바닥값은 1ng 내외였다.

4. 분석 결과

4.1. 동경의 화학조성

Table 2은 지금까지 기 발표^{3,6,7,9~12}된 동경의 조성이며, Table 3은 이번에 분석한 익산 미륵사지 출토 동경의 조성을 나타낸 것이다. 동경의 경우 Sn의 양을 높혀 약 22-26%의 범위로 함금 시켰음을 알 수 있다. 동경들의 특징으로는 빛을 반사하는 역할을 해야 하므로 한번 연마하면 부식이 잘되지 않아서 오래동안 광택을 유지해야 하는 재질이라야 한다. 이러한 의미에서 재질은 필연적으로 주석이 많이 들어간 청동이라야 하며, 특히 좋은 거울은 주석 성분을 많이 넣어 색상이 백색이며 결정입자가 미세하고 조직이 균일해야 하는 동시에 깨질 우려가 없고 마모가 잘 되지 않는 것이어야 한다.⁵ 미륵사지 동경의 조성 중 Sn의 농도가 21.6 -24.9%로서 지금까지

Table 1. Parts of bronze mirrors excavated from Mireuksaji temple site

NO.	Sample	Artifact name	Excavation sites	Excavation Date	Age
1	Mireuk 2	bronze mirror(F-97)	Lotus pond	84.7.24	Unified Shilla
2	Mireuk 3	bronze mirror(7503)	West side of building site	84.9.6	Unified Shilla
3	Mireuk 4	bronze mirror (pasu,6273)	North side of monk building site	83.11. 29	Backje~ Unified Shilla

Table 2. Chemical compositions of bronze mirrors

No.	Sample	Site	Composition(wt%)											
			Cu	Sn	Pb	Zn	Ag	Ni	Co	Sb	Fe	As	Bi	Total
1	Bronze mirror with fine linear design ⁶	Bongsan-gun Shongsan-ri(North Korea)	42.19	26.70	5.56	7.36					1.05			
2	Bronze mirror with fine linear design ⁶	Asan-gun Namsung-ri	39.5	27.3	11.4	0.05					0.7			
3	Bronze mirror with fine linear design ⁶	Shinchun-gun Youngsan-ri(North Korea)	79.7	16.0	4.0			0.04		0.15	0.043		0.08	
4	Fragment of bronze mirror ⁹	Nonsangun Wonbuk-ri	71.4	22.6	5.90	≤0.02	0.05	0.02		0.86	0.41	0.27		101.5
5	Fragment of bronze mirror ¹⁰	Iksan Mireuksaji	67.4	25.8	4.88	0.0039		0.047		0.14	0.25	0.018		
6	Bronze mirror ¹¹	Iksan Mireuksaji		20										
7	Bronze mirror ³	Icheon si Sulbongsansung		23.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	Bronze mirror with fine linear design ¹²	Jeon-ju si Hyo-ja dong	64.0	30.4	4.68	0.022	0.40	0.063		0.228	0.062			
9	Bronze mirror ¹¹	Chung-nam over	30	Tr										
10	Bronze mirror ⁷	Gyeong-ju Bunhwangsaji		some 24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	Bronze mirror ⁷	Gyeong-ju Bunhwangsaji		19									8	
12	Bronze mirror ⁷	Gyeong-ju Bunhwangsaji		27	-									

Table 3 Chemical compositions of bronze mirrors excavated from Mireuksaji temple site

NO.	Sample	Cu	Sn	Pb	Zn	Ag	Ni	Co	Sb	Fe	As	Total
1.	Mireuk 2	66.80	22.90	6.31	0.01	0.31	0.15	0.08	0.63	0.55	-	97.74
2.	Mireuk 3	69.10	24.90	5.48	0.01	0.06	0.13	0.05	0.13	0.18	0.29	100.32
3.	Mireuk 4	75.30	21.60	0.54	0.02	0.58	0.15	0.05	0.50	0.41	-	99.15

발표된 동경들의 조성비율과 유사함을 볼 수 있다.

또한 미륵 2, 미륵 3시료의 경우는 Pb의 함량이 약 4%이상인 것으로 보아 주조시 유동성을 좋게 하여 뒷면의 무늬가 잘 나타나도록 하고 또한 주조성을 높이기 위해 의도적으로 첨가한 것으로 보인다.⁶ 미륵 4의 경우는 의도적으로 첨가한 것이 아닌 원 동광석 내에 들어 있던 것으로 추정된다. 정영동의 연구에 의하면 동제 유물의 경우 납(Pb)의 첨가 유무에 관련하여 이른시기에 제작된 청동족에 비하여 고려와 조선의 수저에서는 납이 전혀 검출되지 않고 있다고 발표한바 있다.⁷ 본 연구에서도 미륵 2, 3에 비하여 미륵 4의 경우 납의 함량이 적은 것으로 보아 미륵 2, 3에 비하여 미륵 4 동경이 더 후대에 제작되었거나 또는 청동기 제작시 후대에는 납을 특별한 경우에만 첨가하고 점차 사라지게 된 것으로 추정된다. 중국 청동주물의 고문헌인 춘추 시대의 {주례(周禮), 고공기(考工記)}에 “금유육제(金有六齊)”가 있다. 금(金)

은 순동 또는 청동으로 해석할 수 있으며, 제(齊)는 합금을 말한다. 따라서 이것은 6종의 합금 성분비를 가르키는 것으로서, 그 중 “금석반위지갑수지제(金錫半謂之鑿燧之劑)”가 있다. 여기서 갑(鑿)은 평면경이며, 수(燧)는 햇빛을 모아 불을 얻는 오목거울을 말한다. 여기서 금을 구리로 해석하면 구리 50%, 주석 50%가 되나, 금을 청동으로 해석하면 구리 67%, 주석 33%가 되므로, 현재 청동거울의 분석 예를 보게 되면 금을 청동으로 해석하는 것이 옳은 것이다.⁸ 즉, 고대 동경을 제작할 때에는 주석을 다량 첨가하여 거울면의 반사성능을 높인 것에 대해 문헌을 통하여도 알 수 있다.

4.2. 동경의 미세조직

Figure 1은 미륵 2 동경의 미세조직이다. 동색으로 보이는 입자들은 α 상들이며, α 상 사이에 흰 부분은 $\alpha+\delta$

공석상들로 이루어져 있다. 검은 입자들은 Pb 편석물이거나 기공(hole)들로 추정된다. 금속조직 관찰 결과, 주조공정 이외에 두드림이나 열처리 등의 공정이 실행된 흔적은 관찰되지 않는다.

미륵 3 동경의 미세조직은 Figure 2-1로서, 미륵 2의 동경과 유사한 조직을 보여주고 있다. 밝은 노란색으로 보이는 입자들은 α 상들이며 α 상 사이에 흰부분은 공석상인 $\alpha+\delta$ 상으로 이루어져 있다. 또한 검은 입자들은 Pb 편석물이거나 기공(hole)들로 추정된다. 그러나 이 동경의 경우 표면에 가까운 부분에는 Widmanstätten 조직을 보여준다(Figure 2-2). 이는 동경 표면이 내부보다 냉각속도가 빨라 나타난 조직으로 보인다. Widmanstätten 조직이외에 가공하거나 열처리 등의 공정이 실행된 흔적은 관찰되지 않는다.¹³

미륵 4의 동경의 미세조직은 Figure 3에서 보는바와 같이 노란색 입자들은 α 상들로 이루어져 있으며 기지부

분은 마르텐사이트 조직(어두운 부분은 γ 상이며 밝은 침상 부분은 β 상임)이 관찰된다. 기지부에서 마르텐사이트 조직이 관찰 된다는 것은 담금질에 앞서 실시된 가열과정에서 시편의 온도가 β 영역에 이르렀음을 의미한다. 그러므로 이 동경의 경우 제작시 인위적인 열처리인 담금질 처리가 추가된 것이 앞의 동경과는 다른 점이다.

주석함량이 높을 경우 취성이 급격히 증가하여 두드림 작업이 불가능 하며 사용도중 충격에 노출될 경우 파손될 가능성이 높아진다. 특히 납이 첨가되는 경우 하중을 견딜 능력이 전혀 없는 납부위가 존재함으로써 충격 저항은 더욱 낮아질 것이다. 후대의 유물에서 납이 점차 사라지고 담금질 처리가 도입된 배경에는 취성을 감소시켜 사용도중 받을 수 있는 충격에 대한 저항력을 높임과 동시에 두드림 가공을 가능하게 하려는 의도가 있었던 것으로 판단된다.

담금질 처리를 시행하지 않을 경우 δ 상의 출현을 막을

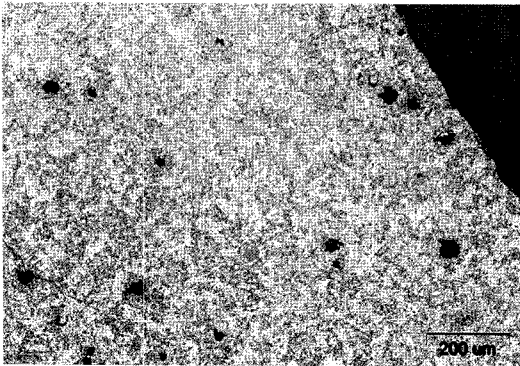


Figure 1. Microstructure of bronze mirror (Mireuk 2).

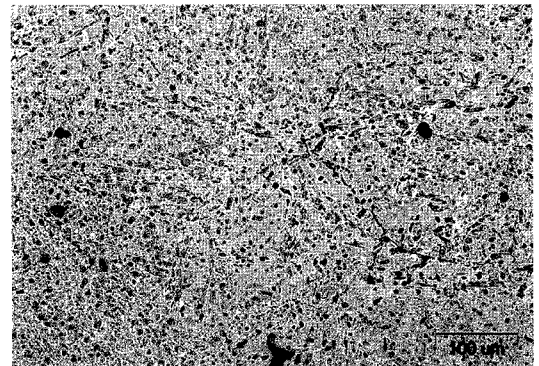


Figure 2-1. Microstructure of bronze mirror (Mireuk 3-1).

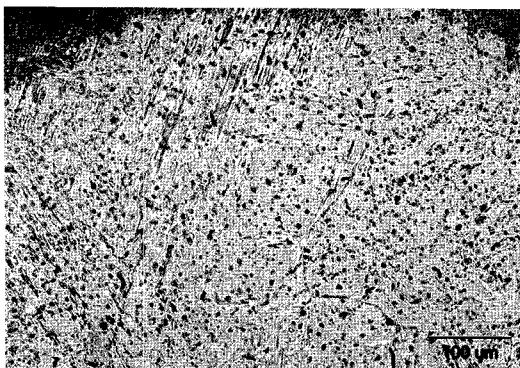


Figure 2-2. Microstructure of bronze mirror (Mireuk 3-2).

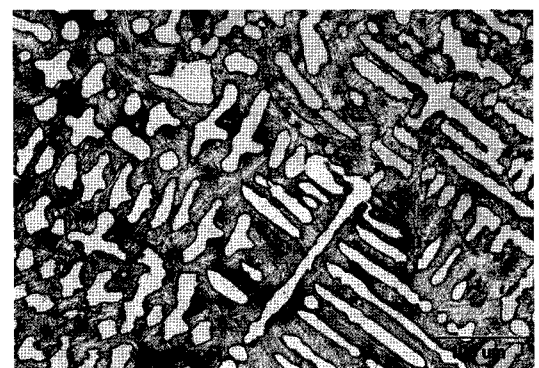


Figure 3. Microstructure of bronze mirror (Mireuk 4).

수 없으며 이는 일종의 금속간 화합물로서 청동소재의 취성을 증가시키는 주된 원인으로 작용한다. 그러나 담금질 시 출현하는 마르텐사이트나 γ 상은 δ 에 비하여 연성이 높을 뿐 아니라 δ 의 출현을 방지함으로써 소재의 인성을 높이게 된다.⁷

미륵 2, 3에서 기지의 미세조직 관찰결과, δ 상인 공석상이 존재하며 미륵 4의 경우는 기지에 마르텐사이트상이 존재하고 있다. 즉 미륵 4 동경의 경우는 취성을 감소시켜 사용도중 받을 수 있는 충격에 대한 저항력을 높이기 위하여 담금질 처리와 납의 함량을 줄인 것으로 추정된다. 그러므로 미륵 2,3 동경에 비하여 미륵 4 동경이 Pb의 함량이나 열처리 등을 고려해 볼 때 후대에 제작되었음을 의미하는 것이다.

3. 납동위원소비 분석

청동기 성분 중 납의 함량이 2% 이상이 되면 의도적으로 첨가한 것으로 보고 있다¹⁴. 납은 원자번호가 82이며 질량수가 204,206,207,208,인 4가지의 동위원소를 가지고 있다. 질량수가 204인 ²⁰⁴Pb는 가장 안정한 납동위원소로서 지구 생성시 존재하던 것이며, ²⁰⁶Pb는 ²³⁸U로부터, ²⁰⁷Pb는 ²³⁵U로부터, ²⁰⁸Pb는 ²³²Th의 방사성 붕괴에 의해 생성된 것이다. 방사성 붕괴에 의해 생성된 납(²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb, ²⁰⁸Pb)은 처음부터 존재하던 납(²⁰⁴Pb)과 혼합하여 어느 시기에 방연석을 형성하는데 이때 방연석은 일정한 납동위원소비(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb, ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb)값을 나타내게 된다. 즉 각 지역의 방연석은 고유한 납동위원소비 값을 가지고 있다. 따라서 고대에 청동기 제조를 위해 어느지역의 방연석을 사용하였다면 방연석의 납동위원소비는 청동기에 그대로 유지되므로 납동위원소비를 분석하면 그 산지를 추정할 수 있게 된다.^{15,16}

Table 4는 미륵 2와 3의 납동위원소비를 보여주고 있

다. 미륵 4의 경우는 납의 함량이 적고 의도적 첨가가 아닌 동광석 내에 있는 미량의 납성분이 포함된 것이므로 납동위원소비를 측정하지 않았다.

납의 산지 추정을 위해 Figure 4는 207/206 vs 208/206을 그리고 Figure 5은 206/204 vs 207/204를 축으로 하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는데와 같이 한국, 중국 및 일본의 방연석 영역(한국북부▲, 한국남부△, 중국북부■, 중국남부□, 일본×)이 각각 잘 나타나 있어 납동위원소비를 이용한 산지분류 연구에 유용하게 이용되고 있다.^{17,18} 미륵산지 출토 동경인 미륵 2와 미륵 3의 납동위 원소비 데이터를 각각 대입하여 나타낸 결과 일본 지역에 속함을 볼 수 있다.

또한 미륵산지 출토 동경의 납동위원소비 데이터를 해석하기 위하여 시료들의 분포도를 나타내는 통계적 방법으로서 다변수분석법 중 선형판별분석법을 사용하였다. 특히 한국, 중국, 일본 방연석의 납동위원소비는 산지별로 몇 개의 군으로 분류되며 각 방연석의 납동위원소비 데이터를 사용하여 선형판별분석법으로 계산한 판별식은 다음과 같다.¹⁷⁻¹⁹

따라서 Figure 6은 이 판별식에 미륵산지 출토 동경의 납동위원소비 데이터를 대입하여 여러 방연석 군들 가운데 어느 군에 속하는지 알아본 결과이다. 대입한 결과 일본 지역의 방연석 영역에 속함을 알 수 있었다. 이 결과는 207/206 vs 208/206 그리고 206/204 vs 207/204를 축으로 하여 나타낸 결과와도 일치한다. 즉 미륵산지 출토 동경에 쓰인 방연석과 일본 지역에서 쓰인 방연석과는 깊은 상관관계가 있는 것으로 보인다.

$$DS_{1j} = -0.571X_{A_j} + 1.916X_{B_j} - 0.091X_{C_j} + 8.292X_{D_j} + 14.24X_{E_j} - 53.13$$

$$DS_{2j} = 1.025X_{A_j} + 3.231X_{B_j} - 0.487X_{C_j} + 7.280X_{D_j} + 3.140X_{E_j} - 63.33$$

$$(X_{A_j} = {}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}, X_{B_j} = {}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}, X_{C_j} = {}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb},$$

$$X_{D_j} = {}^{207}\text{Pb}/{}^{206}\text{Pb}, X_{E_j} = {}^{208}\text{Pb}/{}^{206}\text{Pb})$$

Table 4. Pb isotope ratios of bronze mirrors

Bronze Mirror	Pb isotope ratio					Discriminant score	
	206/204	207/204	208/204	207/206	208/206	DS ₁	DS ₂
Mireuk 2	18.124	15.613	38.506	0.8615	2.1246	0.330	-0.117
Mireuk 3	18.194	15.622	38.556	0.8586	2.1191	0.200	-0.079

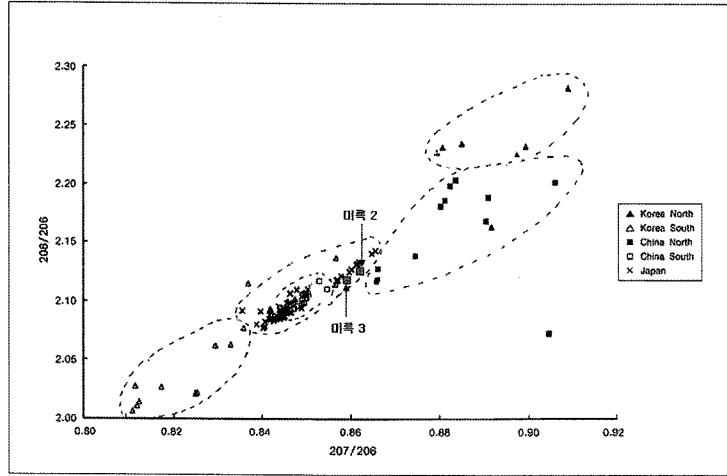


Figure 4. Distribution map of $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$.

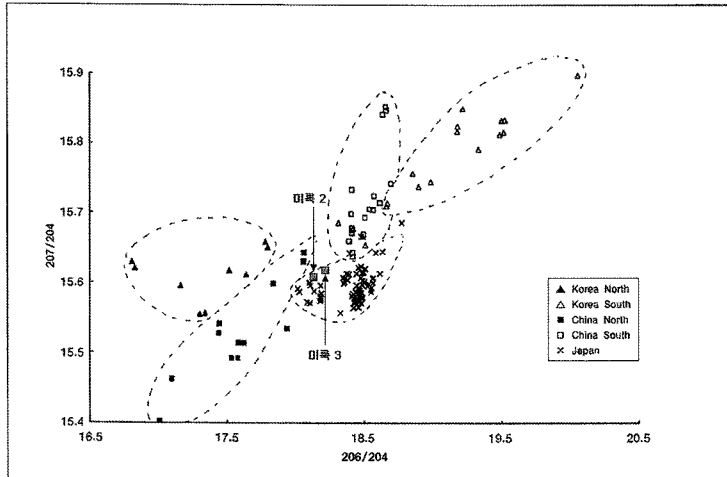


Figure 5. Distribution map of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$.

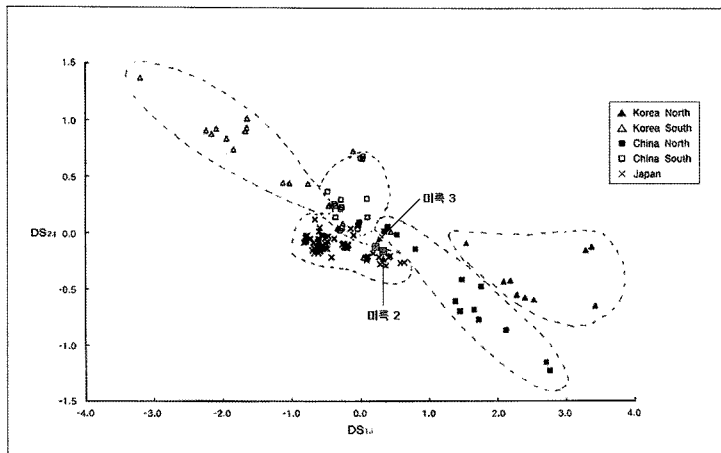


Figure 6. Distribution map of Pb isotopes using linear discriminant analysis.

5. 맺음말

1. 동경의 성분분석 결과, Cu의 농도는 68.8-73.3%, Sn의 농도가 21.6-24.9%로 나타났으며, 미륵 2와 미륵 3의 경우 Pb의 함량이 높아 의도적으로 Pb를 첨가한 것으로 보이거나 미륵 4의 경우는 동광석 내에 들어 있던 미량의 Pb성분이 포함된 것으로 보인다.
2. 동경의 미세조직 관찰결과, 미륵 2와 미륵 3의 경우 α 상과 $\alpha+\delta$ 공석상들로 이루어져 있다. 특히 미륵 3의 경우는 표면 부분에 Widmanstätten 조직을 관찰할 수 있었다. 또한 미륵 4의 경우 노란색 입자들은 α 상들로 이루어져 있으며 기지 부분은 마르텐사이트 조직이 관찰되었다. 이는 동경 제작시 인위적 열처리인 담금질이 추가되었음을 의미한다.
3. 납동위원소비를 통한 산지 분석결과, 동경의 주조시 사용된 납의 경우 일본 지역에서 쓰인 방연석과 깊은 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

사의

본 시료를 제공해주시고 평소 많은 연구가 이루어질 수 있도록 조언해 주신 당시 부여문화재연구소장 최맹식 선생님께 사의를 표합니다.

참고문헌

1. 이난영, 한국 고대의 금속공예, 서울대학교 출판부, p3-35, (2002).
2. 최몽룡, 최성락, 신숙정, 고대 청동기 분석법, 고고학연구방법론 -자연과학의 응용- 서울대학교 출판부, p.131-158, (1998).
3. 박장식, "이천 설봉산성 출토 청동유물에 나타난 청동기 제작 기술체계", *문화사학*, 21, p321-343, (2004).
4. 국립부여문화재연구소, *미륵사*, 유적조사발굴보고서 II, p29, (1996).
5. 염영하 외, 한국전통기술의 국제화에 관한 연구-청동기분야-, 한국과학재단, p335-336, (1995).
6. 최주, "한국야금사(3)", *대한금속재료학회 재료마당*, 13, 4, p56-66 (2000).
7. 정영동, 박장식, "경주 분황사지 출토 청동기에 나타난 기술변천에 관한 연구", *대한금속·재료학회지*, 43, 1, p80-86, (2005)
8. 송응성, 최주(역), *천공개물*, 전통문화사, (1997).
9. 강형태 외, "논산 원북리 토광묘 유적 출토 청동기의 과학적 분석", *한국상고사학보*, 39, p24, (2003).
10. 정광용, 미륵사지 출토 청동유물의 금속학적 연구, 한양대학교 석사학위논문, p32, (1992).
11. 박장식, "고대한국의 청동기 기술체계, 열처리공학회지", p189-190, (1998).
12. 위광철 외, "전주시 효자동 출토 다뉴세문경의 과학적 조사", *문화재과학기술*, 5, 1, p67, 국립공주대학교, (2006).
13. David A. Scott 외, *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals*, The Getty Conservation Institute, The J. Paul Getty Museum, p25-29, (1991).
14. Barnes I. L. et al. "The Technical Examination, Lead Isotope Determination and Elemental Analysis of Some Shang and Zhou Dynasty Bronze Vessels", *2nd International Conference of BUMA*, Ed. Maddin R, p21-26, (1986).
15. 강형태, 김중오, 권혁남, 유혜선, "성덕대왕신 중(국보 제29호)의 성분조성과 납동위원소비", *박물관보존과학*, 5, p49-57, (2004).
16. 강형태, 정광용, 허우영, 김성배, 조남철, "익산 왕궁리유적 납유리의 성분조성과 납동위원소비", *한국상고사학보*, 45, p31-48, (2004).
17. 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, 2, p199-245, (1987).
18. 馬淵久夫, 平尾良光 "鉛同位體比法による漢式鏡の研究(II)", *MUSEUM*, 382, p16-26 (1983).
19. 강형태, 김성배, 허우영, 김규호, "고고자료의 자연과학 응용(II)-익산 미륵사지 납 유리의 제조 및 유통", *문화재*, 36, 국립문화재연구소, p241-266, (2003).