한국광물학회지 제 28 권 제 2 호 (2015년 6월)
J. Miner. Soc. Korea, 28(2), 187-193 (June, 2015) http://dx.doi.org/10.9727/jmsk.2015.28.2.187

납동위원소비를 이용한 고대 납유리 유물의 산지추정

Provenance Study on Ancient Lead Glass Relics Using a Lead Isotope Ratio

한 민 수(Min Su Han)[1,*] · 김 소 진(So Jin Kim)

[1]국립문화재연구소 보존과학연구실
(Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea)

요약 : 익산 미륵사지 석탑의 사리공 내에서 출토된 납유리 9점의 납동위원소비를 분석하여 납 원료의 산지를 추정하고, 이를 왕궁리 출토 납유리의 연구결과와 비교하여 상관관계를 알아보고자 하였다. 납유리는 주화학성분 분석결과, PbO가 약 70 wt.%, SiO_2가 약 30 wt.% 함유된 전형적인 PbO-SiO_2계의 유리였다. 납동위원소비를 이용한 납유리의 원료산지 추정결과, 기존 동북아시아 납동위원소비 분포도로는 대부분이 한국북부의 방연석 광산에 속하는 것으로 나타났다. 반면, 한반도 납동위원소비 분포도로는 한국남부의 방연석 광산이 납유리의 주요 원료 산지로 추정할 수 있어 두 분포도의 결과가 상이하게 나타났다. 또한 동일지역, 동시대에 조성된 것으로 알려진 왕궁리 출토 납유리의 기존 연구데이터와 비교한 결과, 납 원료의 산지가 서로 유사한 것으로 판단된다.

주요어 : 미륵사지, 고대유리, 납유리, 납동위원소비, 산지

ABSTRACT : The purpose of the present study is to trace the provenance of lead raw materials using the lead isotope ratio of 9 lead glasses excavated from the Sarira hole of Mireuksaji stone pagoda and to determine correlation between them and other lead glasses excavated from the Wanggungri site. The results of chemical analysis of the 9 lead glasses show that they are common lead glass system(PbO-SiO_2) with respect to the contents of PbO (70 wt.%) and SiO_2 (30 wt.%). The lead isotope ratios of them plot to northern Korean peninsula when applied to the distribution map of lead isotopes of East Asia. On the other hand, southern Korean peninsula is verified as the main deposits of the lead ore in the distribution map of lead isotopes of South Korea. With respect to the results, it is notable that the provenance of the 9 lead glasses can be very different depending on the distribution map. In addition, a comparative study between them and the lead glasses excavated from the Wanggungri which was built in the same region and period shows that their lead isotopes are highly correlated.

Key words : Mireuksa temple site, ancient glass, lead glass, lead isotope, provenance

*Corresponding author: +82-42-860-9251, E-mail: dormer@korea.kr

서 론

유리란 고대에는 보석의 일종으로 사용되었으며, 장신구로써의 역할이 대부분이었기 때문에 매우 귀중하게 취급되어져왔다. 또한 고대의 유리는 현대적 의미의 유리가 아니라 천연광물에 가까운 옥(玉)과 유사한 것으로 간주하였다(Park, 2005). 물론, 인류가 최초로 이용한 유리는 천연유리로서 흑요석이 있으며, 석기시대부터 사용되어 왔다(Lee, 1990). 이후 기원전 3000년경에 메소포타미아에서 유리구슬과 유리형상을 생산한 것으로 고고학적 발굴에서 확인되었고(Park, 2005), 본격적으로 원료를 배합하여 인공적으로 유리를 제작한 시기는 청동기시대로 알려져 있었으며, 이러한 유리의 제작기술이나 재료는 현재까지 큰 변화없이 지속적이고 광범위하게 사용되고 있다(Kim, 2001).

인공유리는 주요성분인 실리카(Silica, SiO_2), 실리카의 용융온도를 낮추기 위해 사용되는 융제(flux), 이렇게 만들어진 유리의 화학적 불안정을 보완하고 내구성을 갖게 하기 위한 안정제(stabilizer), 그리고 유리에 색을 내기 위한 착색제(colorant)로 구성된다(Kim, 2000). 주화학성분 및 미량화학성분 분석을 통해 유리의 특성은 소다유리와 칼리유리, 납유리, 납-바륨유리 등의 계열로 분리되며(Koezuka and Yamadsaki, 1995), 납이 함유된 경우에는 납동위원소비(lead isotope ratio)를 분석하여 원료의 산지를 추정하여 지역별 분류도 가능하다는 다수의 연구결과들이 있다(Kang *et al*., 2003; 2005; Brill and Wampler, 1967).

본래 납유리는 중국과 한국, 일본의 문화교류 등을 밝히는데 많이 논의되었던 부분이다. 서구와는 다르게 중국에서는 바륨(barium, BaO)을 포함하고 있는 납유리가 제작되었고(Brill, 1999), 일본은 수입원료를 재가공하여 사용한 것으로 보이는 납유리(PbO-BaO-SiO_2)가 기원전 2C에서 기원후 3C 말까지 출토되는 것으로 보고(Koizuka, 1994)되고 있다. 우리나라에서는 부여 합송리에서 출토된 8점의 관옥이 기원전 2C 전반의 유물로 바륨이 함유된 납-바륨유리로 분석되었고(Lee, 1989), 기원전 5C로 편년되는 보령군 평라리 석관묘에서 출토된 유리구슬의 성분이 PbO-K_2O-SiO_2의 조성을 보여 같은 시기의 중국 한대 유리와 다른 차이를 보인다(Choi *et al*., 1996). 하지만 바륨이 함유된 유리는 지금까지 우리나라에서 모두 12건이 보고되고 있으며(Kim, 2001), 미륵사지의 유리 유물은 시기적으로 볼 때 바륨이 함유되지 않아서 납-바륨유리 이후에 제작된 것으로 판단하고 있는 것이 일반적이다. 이와 같이, 유적지에서 출토되는 고대 유리는 각 계열별로 유리의 성분조성과 발생시기, 지역과 원료의 산지 등에서 차이가 있을 수 있기 때문에 고대문화 이동경로를 추적하는데 중요한 단서로 이용되고 있다. 특히 납동위원소비를 이용한 납원료의 산지추정 연구는 1960년대에 금속에 이용되기 시작하여 미국의 브릴에 의해 중국과 일본 유리에 대한 납동위원소비 분석 결과가 1979년에 발표되면서 동아시아의 고대 유리에 대한 과학적 분석 연구에 활발하게 적용되기 시작하였으며(Brill, 1979), 동위원소비 분석법의 특성상 상대적인 신뢰도가 높아 최근까지 납유리의 연구에 매우 중요한 부분을 차지하고 있다.

본 연구에서는 국보 제11호인 익산 미륵사지 석탑을 2009년 해체조사 당시 심주석 상면중앙 사리공 내부에서 수습된 납유리 유물을 대상으로 납동위원소비를 분석하고, 동아시아 방연석의 납동위원소비 분포도와 한반도 납동위원소비 분포도를 이용하여 출토 납유리의 납 원료의 산지를 추정하고자 하였으며, 동시대로 알려진 익산 왕궁리 유적지 출토 납유리의 연구결과(Kang *et al*., 2004)와 비교하여 원료 산지에 대한 상호 관계성을 밝히고자 하였다.

연구대상 및 방법

연구대상

연구대상 유리시료는 미륵사지 심주석의 상면중앙 사리공 내에서 발견된 유리 유물들로 보존처리가 불가능한 파편들을 대상으로 총 9점을 선정하였다. 먼저 정방형의 사리공 크기에 맞게 제작되어 바닥에 깔린 녹색의 파손된 유리판과 그 주변의 유리구슬, 금동제사리외호 내부에 보관되어 있던 황색과 연녹색을 중심으로 선별하였고, 추가적으로 청동합 내부에 보관된 녹색의 유리구슬 1점을 같이 분석하여 사리공과 외호, 청동합 등 서로 다른 위치에서 출토된 유물의 납동위원소비 차이를 살펴보고자 하였으며, 이들 분석시편의 특성은 Table 1에 나타내었다.

연구방법

납(Pb)은 질량수가 다른 4가지의 동위원소를 가지고 있다. 이 중에서 지구 생성 시부터 존재하였던

Table 1. Information of the lead glass samples analyzed in this study

Sample No.	Artifacts Type	Excavation Spot	Color
1	Lead glass bead	Inside of bronze Sarira box	Green
2	Lead glass bead	Inside of gilt-bronze Sarira outer box	Yellow
3	Lead glass bead	Inside of gilt-bronze Sarira outer box	Bright Green
4	Lead glass plate	Bottom of Sarira hole	Bright Green
5	Lead glass plate	Bottom of Sarira hole	Bright Green
6	Lead glass plate	Bottom of Sarira hole	Bright Green
7	Lead glass bead	Bottom of Sarira hole	Green
8	Lead glass fragment	Bottom of Sarira hole	Bright Green
9	Lead glass fragment	Bottom of Sarira hole	Green

204와 달리 우라늄(U)과 토륨(Th)의 방사성붕괴에 의해 생성된 206과 207, 208은 어느 시기에 204와 혼합되어 방연석을 형성하는데 이때 방연석은 고유한 납동위원소비(206/204, 207/204, 208/204, 207/206, 208/206)를 갖게 되며, 고대에 납유리 제조를 위해 특정 지역의 방연석을 사용하였다면 방연석의 납동위원소비는 납유리에 그대로 유지되므로 납유리의 납동위원소비를 분석하면 그 산지를 추정할 수 있게 된다(Mabuchi and Hirao, 1983; 1987). 이와 같은 원리에 근거하여 사리공 내에서 출토된 납유리들의 동위원소비를 측정하면 유리의 제조에 사용된 납 원료의 산지를 추정할 수 있으며, 동시대에 주변지역에 조성된 익산 왕궁리 출토 납유리와도 그 상관성을 파악할 수 있다.

납동위원소비 분석을 위하여 납유리의 파편에서 약 0.05 mg 정도를 채취하여 테프론 바이알에 넣은 후 정제된 왕수를 2-3 mL 가하고 150 ℃의 가열판에서 24시간 가열하였다. 그 다음 바이알 뚜껑을 열고 가열하여 건조시켰고, 6N 염산을 약 2 mL 가하여 다시 건조시킨 후 1N HBr 1 mL에 녹였다. 시료를 원심분리한 다음 음이온교환수지(AG1-X8, chloride form, 100-200#)와 1N HBr을 사용하여 납을 분리하였다. 분리한 납을 Re single filament에 얹은 후 한국기초과학지원연구원 오창캠퍼스의 열이온화질량분석기(TIMS, Thermal Ionization Mass Spectrometer, VG Sector 54-30)를 사용하여 동위원소비를 측정하였다. 분석결과는 표준물질(NBS SRM 981)의 측정치를 사용하여 보정한 것이며, 분석과정의 총 바탕 값(total blank)은 1 ng 내외이다.

결과 및 고찰

납동위원소비 분석에 사용된 시편에 대한 주화학성분의 함량범위를 확인하기 위해서 먼저, 동일한 위치에서 출토된 유리판과 유리구슬, 그 파편으로 추정되는 미상시료를 분석한 결과, 대부분 PbO의 함량이 약 70 wt.%, SiO_2의 함량이 약 30 wt.%였다. 또한 다른 성분을 함유하지 않아 거의 순수한 PbO-SiO_2계의 전형적인 납유리(lead glass)임을 알 수 있다. 이러한 결과는 7C 중엽 백제 무왕 때 건립된 미륵사지에서 출토된 유리편이 SiO_2가 약 30 wt.%, PbO가 68 wt.% 이상 함유된 납유리임을 보고한 기존 연구(Brill, *et al*., 1979)와도 일치한다.

현재 문화재에 있어서 동북아 지역의 납동위원소비를 이용한 비교연구는 주로 1980년대에 일본 Mabuchi (1985)가 조사한 동북아지역의 방연석 광산에 대한 분석 자료를 기반으로 하여 한국과 중국, 일본지역으로 구분하는 방법을 사용하고 있으나, 일본을 제외하고는 시료의 수가 많지 않아 국가별 기원지를 추적하는데 다소 무리가 있다(Hwang *et al*., 2014). 그러므로 추가적으로 2012년도에 국립문화재연구소에서 발표된 한반도 남부지역 방연석 광산의 납동위원소비 분포도(Korea Peninsula Lead Isotope Database; KOPLID)를 활용하여 두 분포도를

Table 2. Lead isotope ratio of lead glasses excavated from Mireuksa temple site

Sample No.	Lead Isotope Ratio				
	206/204	207/204	208/204	207/206	208/206
1	18.771	15.806	39.530	0.8421	2.1039
2	18.230	15.720	38.463	0.8624	2.1079
3	19.243	15.849	38.911	0.8236	2.0203
4	17.368	15.584	38.820	0.8973	2.2331
5	17.416	15.650	39.041	0.8986	2.2395
6	17.437	15.678	39.136	0.8991	2.2423
7	25.572	16.691	41.119	0.6527	1.6064
8	17.439	15.609	38.901	0.8950	2.2286
9	17.445	15.619	38.951	0.8953	2.2308

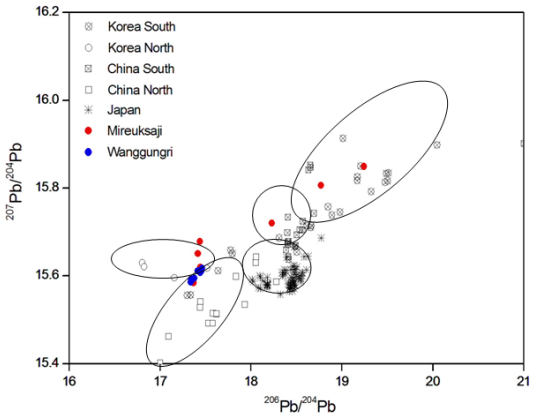

Fig. 1. The lead isotope ratio($^{206}Pb/^{204}Pb$ vs $^{207}Pb/^{204}Pb$) distribution diagram of lead glasses by map of Mabuchi.

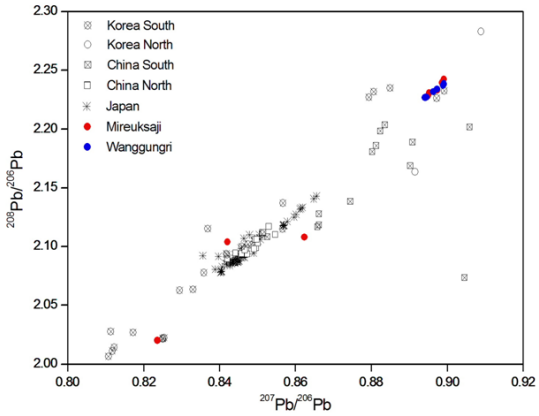

Fig. 2. The lead isotope ratio($^{207}Pb/^{206}Pb$ vs $^{208}Pb/^{206}Pb$) distribution diagram of lead glasses by map of Mabuchi.

이용하여 추정된 산지의 차이를 비교분석하였다.

미륵사지 출토 납유리의 동위원소비 분석결과를 Table 2에 나타내었으며, 익산 왕궁리 출토 납유리의 동위원소비는 2004년에 발표된 논문(Kang *et al*., 2004)의 데이터를 이용하였다. 두 곳의 분석데이터를 우선 Mabuchi의 분포도(1985)에 삽입하여 납의 산지를 추정하였다. Fig. 1은 X축에 $^{206}Pb/^{204}Pb$, Y축에 $^{207}Pb/^{204}Pb$의 비율을 나타낸 그래프이다. Mabuchi의 분포도는 그림에서 보는 것과 같이 한국과 중국, 일본의 방연석 광산 영역이 각각 잘 나타나 있어 납의 산지 분류에 유용하게 사용되고 있다. Fig. 1에서 적색으로 도시된 미륵사지 납유리의 대부분은 한국북부에 위치하고 있으며, 1번 시료는 중국남부, 2번 시료는 중국남부의 경계선, 3번 시료는 한국남부에 속한다. 또한 동위원소 종류를 달리해 X축에 $^{207}Pb/^{206}Pb$, Y축에 $^{208}Pb/^{206}Pb$의 비율을 이용해 도시한 Fig. 2에서도 그 결과는 Fig. 1과 유사하였다. 특이한 점은 7번 시료인데 $^{206}Pb/^{204}Pb$의 납동위원소비가 25.572로 높은 수치를 나타내고 있으며, 이로 인해 분포도의 어디에도 도시되지 않는다. 다만, 영역을 확장한다고 가정하면 한국남부의 연장선상에 해당될 것으로 추정된다.

앞서 이용한 Mabuchi의 분포도(1985)는 한반도 지역에 대한 기원지 추정이 어렵다. 본 연구에서는 국내의 지역별 산지 추정, 특히 남부지역을 집중적으로 살펴보기 위해 한반도 납동위원소비 분포도

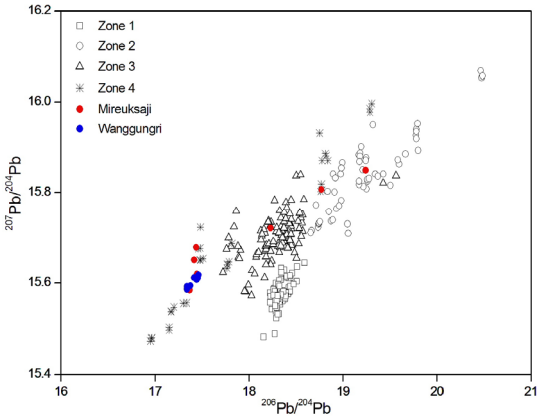

Fig. 3. The lead isotope ratio($^{206}Pb/^{204}Pb$ vs $^{207}Pb/^{204}Pb$) distribution diagram of glasses by map of KOPLID.

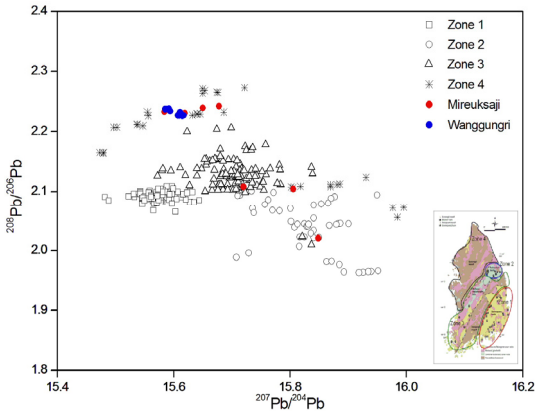

Fig. 4. The lead isotope ratio($^{207}Pb/^{204}Pb$ vs $^{208}Pb/^{206}Pb$) distribution diagram of glasses by map of KOPLID.

(NRICH, 2012; Jeong *et al*., 2012)를 이용하여 추가 해석하여 비교하였으며, 분별력이 가장 좋은 ($^{206}Pb/^{204}Pb$) vs ($^{207}Pb/^{204}Pb$)과 ($^{207}Pb/^{204}Pb$) vs ($^{208}Pb/^{206}Pb$) 그래프를 사용하였다.

Fig. 3에서 확인한 바와 같이 미륵사지 출토 납유리 중 4-6번과 8번, 9번 시료의 납동위원소비는 경기육괴(Zone 4)의 방연석 광산지역에 위치하며, 2번 시료는 옥천대 및 영남육괴(Zone 3)에 포함됨을 알 수 있다. 1번 시료는 Zone 4와 구분하기 어렵지만 경기육괴(Zone 4)에 더 가깝게 위치하는 것으로 확인되며, 3번 시료는 태백산 광화대(강원도 동남부 및 경북 북동부, Zone 2)의 방연석 광산지역에 포함된다. 반면, 7번 시료는 분포도의 어디에도 도시되지 않으며, 앞에서 해석한 것과 같이 영역을 확장한다면 3번 시료가 포함되어 있는 Zone 2의 방연석 광산과 같은 그룹으로 추정된다. 이와 같은 분포양상은 Fig. 4에서도 확인할 수 있다. 특징적인 것은 경상분지(Zone 1)의 방연석 광산에 도시되는 시료가 없다는 것이다. 이러한 결과는 앞선 Mabuchi의 분포도에서 3번 시료가 한국남부에 속한다고 하지만 실제로는 경상분지 위쪽에 해당하여 일본과의 상관성이 매우 적을 수 있음을 암시한다. 즉, 고대 유리에 사용된 납은 대부분이 경기육괴의 납 원료를 사용하였으며, 일부 태백산 분지나 영남육괴, 옥천대에서도 원료를 수급하여 사용하였을 것으로 추정된다. 또한 7번 시료는 납동위원소비가 기존에 보고된 유물에 비해 상이한 값을 가지고 있으며, 이로 인해 Mabuchi의 분포도에서도 영역안에 도시되지 않았던 것과 같이 한반도 납동위원소비 분포도에도 같은 양상을 보인다는 것이다. 하지만 중요한 점은 7번 시료와 같이 전혀 다른 납동위원소비를 갖는 유물의 경우, 납 원료가 혼합사용되었을 가능성이나 동아시아 등 근거리에서 채취된 원료를 사용하였을 것이라는 가정 등을 보다 면밀히 검토해야 한다.

다음으로 미륵사지와 거의 같은 시기(백제 무왕, 600~641년)에 조성된 것으로 알려진 왕궁리 유적에서 출토된 납유리와의 비교를 통해 상관성을 분석해 본 결과, Mabuchi의 분포도에서는 Fig. 1-2에서와 같이 대부분 미륵사지 납유리와 동일한 위치인 한국북부 지역에 분포되는 것을 알 수 있으며, 미륵사지 유물에 비해 밀집도가 좋아 납 원료가 한 곳에서 수급되었을 가능성이 높다. 또한 한반도 남부지역 방연석 광산의 납동위원소비 분포도를 이용하여 분석한 결과, 모두 경기육괴(Zone 4)에 도시되며, 대부분의 미륵사지 납유리와 거의 동일한 지점에 분포한다. 결과적으로 미륵사지 출토 납유리와 왕궁리 출토 납유리는 주로 한반도 북부인 경기육괴(Zone 4)에서 원료를 수급했을 가능성이 있으며, 동위원소비의 밀집도를 보더라도 원료의 산지가 동일 권역이거나 근거리에 위치한 광산이었을 것으로 추정된다. 다만, 기존 연구(Kang *et al*., 2003; 2004)에서 왕궁리와 미륵사지는 납유리 제조에 필요한 원료의 입수장소 및 제조공정 기술을 함께 공유하였을 것으로 보고 있으나 이번 분석에서는 청동합이나 금제사리함 외호에서 출토된 일부 시료(1-3번)가 서로 다른 지역에 도시되었고, 7번 시료의 경우, 앞에서 언급했듯이 동위원소비가

다른 시료와 상이한 것으로 보아 원료의 수급처나 사용(제작방법) 뿐만 아니라 문화교류 등까지 고려하여 향후 유물의 형태와 종류 등 미술사적 관점에서 보다 깊이 종합적으로 고찰해 보아야 할 것이다.

결 론

익산 미륵사지 석탑의 해체 조사시 사리공 내에서 출토된 납유리 유물의 납동위원소비를 분석하여 납 원료의 산지를 추정하고, 인근 왕궁리 출토 납유리와의 상관성을 판단한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

분석된 납유리는 PbO의 함량이 약 70 wt.%, SiO_2가 약 30 wt.%이며, 다른 주화학성분이 검출되지 않아 전형적인 PbO-SiO_2계 납유리(lead glass)임을 알 수 있다. 납동위원소비 분석을 통해 납 원료의 산지를 추정한 결과, Mabuchi의 분포도에서는 미륵사지 납유리의 대부분이 한국북부 지역에 도시되었고, 일부 중국남부와 한국남부에도 분포되었다. 한반도 납동위원소비 분포도를 이용하여 추정한 결과, 경기육괴(Zone 4)에 대부분 도시되는 특징을 보였다.

미륵사지와 동일지역, 동시대에 조성된 것으로 알려진 왕궁리 유적에서 출토된 납유리와의 비교를 통해 상관성을 분석한 결과, Mabuchi의 분포도에서는 왕궁리 유적 출토 납유리가 미륵사지 납유리의 대부분이 분포하는 한국북부 지역에 도시되었고, 한반도 납동위원소비 분포도에서는 경기육괴(Zone 4)의 방연석 광산 지역에 도시되었다. 특히 왕궁리 유적 출토 납유리는 분포양상이 미륵사지 출토 납유리에 비해 매우 밀집하여 도시되는 것으로 보아 납 원료가 동일지역 또는 좁은 권역에 위치한 광산에서 수급되었을 것으로 판단되며, 이는 미륵사지 출토 납유리와도 동일 또는 근거리 광산에서 수급하였을 가능성이 있다. 하지만 일부 유리시료는 상이한 분포양상을 보이므로 이에 대한 심층적 연구가 추가적으로 필요하다.

결과적으로 납동위원소비를 이용한 납원료의 산지분류에서 미륵사지 사리공 내에서 발견된 대부분의 납유리 유물의 주요 납 원료 산지는 한국북부와 그 경계 지역인 경기육괴(Zone 4)에 위치한 방연석 광산으로 추정되며, 왕궁리 출토 납유리와 원료의 상관성이 매우 높은 것으로 보인다.

사 사

이 연구는 국립문화재연구소 2010년도 문화유산융복합연구(R&D)사업의 지원을 받아 이루어졌으며, 2014년도 『익산 미륵사지 석탑 사리장엄』 내 수록된 저자의 원고(「유리제 유물의 과학적 분석」) 일부를 바탕으로 연구 내용을 추가・심층 해석하여 작성된 논문임을 밝힙니다.

REFERENCES

Brill, R.H. (1999) Chemical analyses of early glasses. The corning museum of glass, New York, 303-322.

Brill, R.H. (1979) Lead isotope in some japanese and chinese glasses. Galley of Art, Washington D.C., 11, 87-110.

Brill, R.H., Yamasaki, K., Barnes, I.L., Rosman, K.J.R., and Diaz, M. (1979) Lead isotopes in some japanese and chinese glasses. Ars Orientalis, 11, 87-109.

Brill, R.H. and Wampler, J.M. (1967) Isotope studies in ancient lead. American Journal of Archaeology, 1, 77p.

Choi, J., Lee, Y.J., Chong, T.C., Hong, H.S., Yun, Y.H., Kim, S.C., Song, C.H., and Pyun, C.H. (1996) Investigation on a potash-glass bead unearthed from Pyoungra-ri of around 5th century B.C.. Journal of Korea Traditional Science and Technology. 3(1), 15-32 (in Korean with English abstract).

Jeong, Y.J., Cheong, C.S., Shin, D.B., Lee, K.S., Jo, H.J., Gautam, M.K., and Lee, I.S. (2012) Regional variations in the lead isotopic composition of galena from southern Korea with implications for the discrimination of lead provenance. Journal of Asian Earth Sciences, 61, 116-127.

Hwang, J.J., Kim, S.J., Han, W.R., and Han, M.S. (2014) Provenance study on lead isotope of bronze relics excavated from Cheonghaejin. Journal of Mineralogical Society of Korea, 27(4), 263-270 (in Korean with English abstract).

Han, M.S. (2014) Scientific Analysis of Glass Beads Relics. Sarira Reliquary of Stone Pagoda of Mireuksa Temple Site in Iksan, National Research Institute of Cultural Heritage & Jeollabuk-do, 238-247 (in Korean).

Kang, H.T., Kim, S.B., Huh, W.Y., and Kim, G.H. (2003) Application of science for interpreting archaeological materials(II): Production and flow of lead glass from Mireuksa temple. Korean Journal of Cultural Heritage Study, 36, 241-266 (in Korean with English abstract).

Kang, H.T., Chung, G.R., Huh, W.Y., Kim, S.B., and Cho, N.C. (2004) Chemical composition and lead isotope ratios of the lead glass from Wanggung-ni, Iksan, Chollabuk-do. Journal of Korean Ancient Historical Society, 45, 31-41 (in Korean with English abstract).

Kang, H.T., Chung, Y.D., Cho, J.Y., and Kim, H.S. (2005) Analysis of glaze on brick, green-glazed earthenware in Unified Silla Period. Journal of Prehistoric and Ancient, 22, 211-222 (in Korean with English abstract).

Kim, G.H. (2000) Scientific analysis and interpretation for ancient glass bead in Korea. Journal of Leeum, 5, 73p (in Korean with English abstract).

Kim, G.H. (2001) A study of archaeological chemistry on ancient glasses found in Korea, P.D. Thesis, University of Chungang, Seoul, 1-42 (in Korean with English abstract).

Koizuka, R.T. (1994) Studies of ancient silicate glass by chemical methods. Proceeding of the Korea and Japan Joint Research, 136-137 (in Japanese and Korean).

Koezuka, T. and Yamadsaki, K. (1995) Chemical compositions of ancient glasses found in Japan: A historical survey, Proceedings of XVII International Congress on Glass. Chinese Ceramic Society, 469-474.

Lee I.S. (1989) Analytical study of ancient glass in Korea (I). Korean Antiquity, 34, 79-93 (in Korean with English abstract).

Lee, I.S. (1990) Archaeological study of ancient glass in Korea, Ph.D. Thesis, University of Hanyang, Seoul, 1p (in Korean with English abstract).

Mabuchi, H. and Hirao, Y. (1983) The study of Han-type mirror by lead isotope ratio method(2), Museum, 382, 16-26 (in Japanese).

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).

Mabuchi, H. and Hirao, Y. (1987) Lead isotope ratios of lead ores in East Asia: In relation to bronze artifacts. Journal of the Archaeological Society of Nippon, 73(2), 199-245 (in Japanese).

NRICH (2012) Lead isotope analysis and field survey of galena deposits in south Korea. National Research Institute of Cultural Heritage, 68-100 (in Korean with English abstract).

Park, S.O. (2005) East Asia spread of western culture: Focused on the ancient glass to move the forces to gradually East Asia. China and Sinology, 3, 2-3 (in Korean).

Received June 12, 2015, Revised June 22, 2015, Accepted June 26, 2015, Responsibility Editor: Yun Deuk Jang