

분석자료를 기초한 고대 납유리와 녹유의 특성 연구

Characteristic Study of Ancient
Northeast Asian Lead Glass and
Green Glaze Based on Analysis
Results

이지희^{1,*}, 김현정²

¹충북대학교 고고미술사학과,

²국립중앙박물관 보존과학부

Lee Jihee^{1,*}, Kim Hyunjeong²

¹Dept. of History of Art,

Chungbuk National University

²Conservation Science Division,
National Museum of Korea

요약

본 연구에서는 동북아시아에서 고대에 제작되었던 납유리와 녹유의 납동위원소비와 화학조성의 분석자료를 기초하여 산지를 추정하고 그 특성을 고찰해 보고자 한다.

백제의 익산 왕궁리유적과 미륵사지에서 출토된 납유리와 녹유의 납동위원소비를 비교한 결과, 추정산지는 한국 남부 경기육과 서부(zone4)로 같은 지역에서 납을 채취하여 제작한 것으로 보인다. 통일신라 사찰에서 출토된 녹유와전은 일부를 제외하고 대부분이 동북아시아에서 그 산지를 짐작하기 어려웠다.

7세기경 백제와 신라, 중국, 일본에서 출토된 납유리의 주성분은 PbO, SiO₂, Al₂O₃, CuO, Fe₂O₃이며, 비율은 PbO 70wt.%, SiO₂ 30wt.%으로 확인된다. 통일신라 사찰에서 출토된 녹유와전은 PbO 64~90wt.%로 납의 함유량이 높게 나타났다. 특히, 경주 사천왕사지 출토 〈녹유능형전〉은 주성분이 PbO, SiO₂, Al₂O₃, CuO이며 납유리와 조성성분이 유사하다. 일본의 『조불소장물장(造佛所作物帳, AD733년)』에 대한 유약 재현실험 결과, 중국과 일본 가마터 출토품의 PbO 값이 일정하게 확인되었다. 이는 당시 동북아시아에서 제작기술의 공유가 있었음을 시사해 준다.

주제어 : 납유리, 녹유, 데이터베이스, 납동위원소비, 화학조성

Abstract

This study examines the results of analyses of the lead isotope ratio and chemical composition of lead glass and green glaze from ancient Northeast Asia in order to suggest their production sites and reveal further characteristics. The comparison of the lead isotope ratio of lead glass and green glaze from two Baekje remains in Iksan—the Wanggung-ri Site and Mireuksa Temple Site—suggests that they were produced to the west of the South Gyeonggi Massif (Zone 4) using lead extracted from the same area. With a few exceptions, it has proved difficult to identify the production sites of most of the green-glazed roof tiles from Unified Silla-period Buddhist temples across Northeast Asia. The major component of the lead glass from Baekje, Silla, China, and Japan during the seventh century is PbO, SiO₂, Al₂O₃, CuO, and Fe₂O₃, with a ratio of PbO and SiO₂ of 70 and 30 wt.%, respectively. The green-glazed roof tiles excavated from a temple from the Unified Silla period have a high proportion of lead, ranging from 64 to 90 wt.%. Green-glazed lozenge tiles excavated from the Sacheonwangsa Temple site in Gyeongju were shown to contain PbO, SiO₂, Al₂O₃, and CuO, a similar composition with lead glass. An experiment was conducted to reproduce a glaze according to the production method mentioned in the *Zō hotoke-sho sakumotsu-chō* (Buddhist statue workshop crop book) in the Shosoin Repository. In this experiment, an identical ratio of PbO was observed for Japanese green-glazed ceramics from the eighth to eleventh century as that found in Chinese lead-glazed ceramics excavated from kilns operated from the seventh to tenth century in Henan. This indicates that production methods for lead glass and glaze were shared across Northeast Asia.

Keywords : Lead Glass, Green Glaze, Database, Lead Isotope Ratio, Chemical Component

* Corresponding Author:
Lee Jihee

1. 서론

‘유리(琉璃)’는 표준국어대사전에 따르면 석영, 탄산소다, 석회암을 섞어 높은 온도에서 녹인 다음 급히 냉각하여 만든 물질로 투명하고 단단하며 잘 깨지는 것으로 정의된다^[1]. 즉, 유리는 일반적으로 건축, 그릇, 기구 등에 사용되는 소다석회유리(soda lime glass)를 가르킨다. 이것은 서아시아와 로마 등에 기반을 둔 유리로 동북아시아에서 제작되었던 납유리와 주요성분의 구성요소가 서로 다르다.

고대의 중국과 한국 그리고 일본의 문헌에서는 소다석회유리를 ‘과리(玻璃)’와 ‘초자(硝子)’로 부르고, 납유리로 제작된 기물을 일컬어 유리(琉璃), 유리(瑠璃)로 명명하여 이들을 서로 구분하고 있었음이 확인된다. 특히, 문헌사료에서는 납을 주요성분으로 포함된 유리와 유약을 바른 기물, 즉 연유(鉛釉)를 동일한 의미로 인식하고 있었고, 근대와 현대에 이르기까지 사용되는 용어의 유사성이 유지되고 있다^[2].

연유는 납을 기본 용융제로 만든 저화도의 산화염으로 번조하는 일종의 저온유(低溫釉)로, 삼채·오채 등의 다채유와 갈유, 녹유, 남유 등을 포괄하는 용어이다. 국내에서 갈유와 녹유를 제작하였지만, 본 연구대상이 국내의 녹유를 중심으로 활용되었기 때문에 녹유라는 용어를 사용하겠다.

납유리와 녹유는 고대 한국과 중국, 그리고 일본의 교류 양상과 제작방법 등을 밝힐 수 있는 중요한 자료로 간주되어, 보존과학에서 납동위원소비를 통한 산지추정과 화학조성 등의 많은 연구들이 진행되어 왔다. 현재까지의 연구들은 대부분 단위유적을 중심으로 단편적으로 비교적 많이 수행되었으나, 이를 기초로 종합적으로 고찰하는 연구가 부족하였다. 그리고 객관적인 자연과학분석 자료들을 활용하여 미술사와 고고학적 관점의 연구방식과 접목하여, 당시의 모습을 복원하는 연구가 필요한 상태이다. 따라서 본 연구는 고대 동북아시아에서 제작되었던 납유리와 녹유의 납동위원소비와 화학조성의 분석자료를 기초한 추정산지와 특성을 살펴보기 위해서 작성되었다.

2. 연구방법

본 연구에서는 고대 동북아시아에서 제작된 납유리와 유약의 특성을 살펴보고자 납동위원소비와 화학조성의 분석자료로 기초하여 연구하고자 하였다. 연구대상은 고대 국내와 중국, 일본에서 제작된 납유리와 녹유와 삼채 등 연유에서 분석된 납동위원소비와 화학조성 데이터베이스를 활용하였다.

납동위원소비는 두 가지 방법으로 분석하여 세분화함으로서 신뢰도를 높이도록 하였다. 하나는 1980년대 馬淵久夫가 조사한 한국-중국-일본의 방연석 광산에 대한 동북아시아 납동위원소비이다^[3-5]. 이는 현재까지도 보편적으로 사용되고 있으나

분석 자료가 다양하지 않아 지역구분에 다소 어려움이 있었다. 다른 하나는 한국기초과학지원연구원과 국립문화재연구소에서 공동 연구한 한반도 남부지역 납동위원소비 분포도(Korea Peninsula Lead Isotope Database; 이하 KOPLID로 표기)이다^[6-7]. 이는 한반도 남부지역 납동위원소비를 바탕으로 지질학적, 지역적 4개의 그룹(zone)으로 세분화하여 국내 자료에 대한 납동위원소비의 판별력을 한층 높여 주었다^[8]. 화학조성은 그동안 유약보다는 납유리의 성분분석에 집중되어 있었다. 성분분석은 기존 연구자료를 활용하였다.

마지막으로 지금까지 살펴보았던 분석자료를 기초로 하여, 8세기에 유약제조 방법이 담겨있는 문헌기록을 통해 납유리와 녹유의 특성을 종합적으로 고찰해 보도록 하겠다.

3. 납동위원소비를 기초한 납재료 산지추정

이번 연구에서는 두 가지 분포도를 복합적으로 활용하였다. 한반도 출토품은 한반도 남부지역 납동위원소비 분포도로 국내에서 납산지를 추정한 후 범주에서 벗어나는 시료에 대해서는 馬淵久夫의 동북아시아 납동위원소비에 대입하였다. 반면, 중국과 일본 출토품에 대해서는 馬淵久夫의 동북아 자료에서 먼저 추정한 후 한반도 남부지역으로 판단되는 시료에 대하여 KOPLID에 대입하였다. KOPLID는 앞서 서술한 바와 같이 4개의 그룹으로 구분할 수 있다^{(표1)[9]}.

표 1. 한반도 남부지역 납동위원소비 판별그룹

그룹	지구조적	해당지역
zone 1	경상분지	경상도
zone 2	옥천변성대 내 태백산분지 / 영남육괴 북동부	강원도 남부 / 경북 북부
zone 3	옥천대 / 경기육괴 동부지역	전라도 / 충청도 / 강원도 북부
zone 4	경기육괴 서부지역	충청도 북부 / 경기도 서부

3.1. 삼국시대

백제의 납 산지추정은 사비기의 익산과 부여를 중심으로 한 납동위원소비 분석 연구가 이루어졌다. 다음 <표2>는 2007년에 국립부여문화재연구소에서 익산 왕궁리와 미륵사지 출토 납유리 유물의 납동위원소비를 정리한 것이다^[10]. 본 연구에서는 이를 기반으로 최근 연구성과인 한국 남부지역 방연석 광산의 납동위원소비 분포도(KOPLID)를 활용하여 납의 산지와 국내에서의 위치를 살펴보았다.

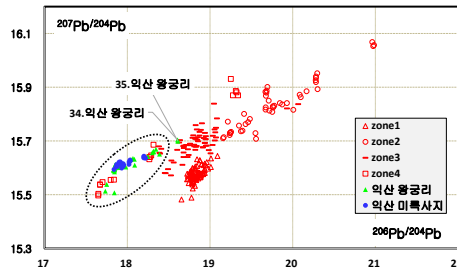
표2. 익산 왕궁리와 미륵사지 납유리 및 녹유의 납동위원소비와 KOPLID를 이용한 산지추정

유적	연번	유물명	시료 번호	납동위원소비			김규호 외 ^[10]	KOPLID
				$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$		
익산 왕궁리	1	유리	YG 1	17.569	15.635	38.984	한국남부	zone4
	2	유리	YG 2	17.815	15.662	39.070	한국남부	zone4
	3	유리	YG 3	17.802	15.656	39.051	한국남부	zone4
	4	유리	YG 4	17.482	15.603	38.874	한국남부	zone4
	5	유리	YG 5	17.544	15.631	38.968	한국남부	zone4
	6	유리	YG 6	17.397	15.601	38.867	한국남부	zone4
	7	유리	YG 7	17.341	15.595	38.848	한국남부	zone4
	8	유리	YG 8	17.345	15.585	38.815	한국남부	zone4
	9	유리	YG 9	17.820	15.659	39.056	한국남부	zone4
	10	유리	YG 10	17.339	15.593	38.843	한국남부	zone4
	11	유리	YG 11	17.346	15.604	38.879	한국남부	zone4
	12	유리	YG11-1	17.340	15.594	38.874	한국남부	zone4
	13	유리	YG 12	17.344	15.507	38.856	한국남부	zone4
	14	유리	YG 13	17.590	15.610	38.736	한국남부	zone4
	15	유리	YG 14	17.344	15.601	38.870	한국남부	zone4
	16	유리	YG15-1	17.353	15.608	38.894	한국남부	zone4
	17	유리	YG15-2	17.346	15.597	38.858	한국남부	zone4
	18	유리	YG 16	17.338	15.593	38.843	한국남부	zone4
	19	유리	YG 17	17.340	15.594	38.848	한국남부	zone4
	20	유리	YG 18	17.444	15.612	38.906	한국남부	zone4
	21	유리	YG 19	17.747	15.642	39.072	한국남부	zone4
	22	유리	YG 35-1	17.424	15.609	38.892	한국남부	zone4
	23	유리	YG 35-2	17.421	15.609	38.897	한국남부	zone4
	24	유리	YG 35-3	17.417	15.605	38.880	한국남부	zone4
	25	유리	YG 36-1	17.344	15.596	38.847	한국남부	zone4
	26	유리	YG 36-2	17.355	15.613	38.909	한국남부	zone4
	27	유리	YG 37	17.847	15.669	39.092	한국남부	zone4
	28	유리	YG 38-1	17.339	15.594	38.847	한국남부	zone4
	29	유리	YG 38-2	17.336	15.590	38.834	한국남부	zone4
	30	유리	YG 38-3	17.338	15.589	38.825	한국남부	zone4
	31	유리	YG 39	17.586	15.632	34.595	한국남부	zone4
	32	유리	YG 40-1	17.340	15.593	34.897	한국남부	zone4
	33	유리	YG 40-2	17.340	15.595	34.904	한국남부	zone4
	34	유리	YG 41	18.108	15.704	33.969	한국남부	zone3
	35	유리	YG 42	18.111	15.699	33.935	한국남부	zone3
	36	유리	YG 43	17.353	15.600	34.906	한국남부	zone4
	37	유리	YG 44	17.345	15.601	34.925	한국남부	zone4
	38	유리	YG 45	17.343	15.590	34.873	한국남부	zone4
	39	녹유호	YG 2889	17.890	15.651	38.954	한국남부	zone4
	40	녹유뚜껑	YG 2890-1	17.234	15.513	37.935	한국남부	zone4
	41	녹유뚜껑	YG 2890-2	17.251	15.538	38.014	한국남부	zone4

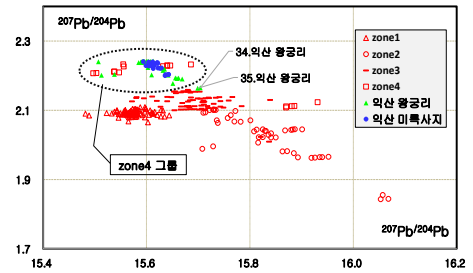
유적	연번	유물명	시료 번호	납동위원소비			김규호 외 ^[10]	KOPLID
				$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$		
익산 미륵사지	42	판유리	MR 1	17.720	15.636	34.368	한국남부	zone4
	43	판유리	MR 2	17.538	15.626	34.674	한국남부	zone4
	44	판유리	MR 3	17.456	15.610	34.752	한국남부	zone4
	45	판유리	MR 4	17.450	15.615	34.784	한국남부	zone4
	46	판유리	MR 5	17.340	15.594	34.905	한국남부	zone4
	47	판유리	MR 6	17.521	15.613	34.637	한국남부	zone4
	48	판유리	MR 7	17.450	15.605	34.735	한국남부	zone4
	49	유리 도가니	MR 8-1	17.699	15.637	34.413	한국남부	zone4
	50	유리 도가니	MR 8-2	17.700	15.643	34.441	한국남부	zone4
	51	유리 도가니	MR 8-3	17.703	15.642	34.432	한국남부	zone4
	52	유리 도가니	MR 10	17.433	15.599	34.739	한국남부	zone4
	53	유리 도가니	MR 11	17.441	15.614	34.803	한국남부	zone4
	54	녹유연목와	MR 2109	17.415	15.622	34.889	한국남부	zone4
	55	녹유연목와	MR 2337	17.522	15.622	34.681	한국남부	zone4
	56	녹유연목와	MR 4102	17.532	15.629	34.698	한국남부	zone4
	57	녹유연목와	MR 9021-1	17.371	15.612	34.933	한국남부	zone4
	58	녹유연목와	MR 9021-2	17.365	15.604	34.901	한국남부	zone4
	59	녹유연목와	MR 9553	17.409	15.620	34.893	한국남부	zone4
	60	녹유연목와	MR 9566	17.377	15.605	34.879	한국남부	zone4
	61	녹유연목와	MR 9840	17.400	15.621	34.921	한국남부	zone4
	62	녹유연목와	MR 10097	17.408	15.614	34.867	한국남부	zone4

2007년 분석된 익산 왕궁리와 미륵사지 출토 납유리의 납동위원소비는 당시 동북아시아 자료만을 활용하여 한국 남부로 산지를 추정하였다^{(도4)^[10]}. 이번 연구에서는 KOPLID를 이용하여 한반도 남부지역 방연석 광산의 납동위원소비에 추정된 결과, 대부분이 경기육괴 서부지역으로 나타났다^(도1~3). 이는 <표1>에서 제시한 판별그룹에서 zone4에 해당되며 충청도 북부와 경기도 서부지역에 위치한다.

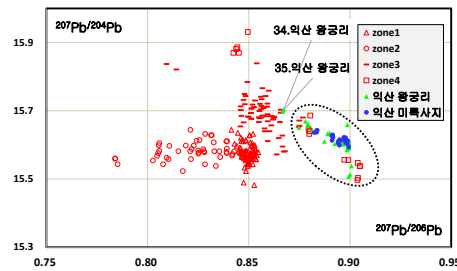
익산 왕궁리와 미륵사지 출토품은 납동위원소비의 대부분이 중첩되는 것으로 보아 당시 동일한 산지, 혹은 같은 재료를 이용하여 납유리와 유약이 제작되었을 것으로 생각된다. 특히, <표2>의 녹색()으로 표시된 시료는 왕궁리와 미륵사지가 서로 중첩되는 것으로, 각 유적의 층위와 제작시기를 정확히 파악할 수 있다면 밀접한 연관성을 찾을 수 있을 것이다. 익산 왕궁리의 34번, 35번은() <도1~3>에서 zone3(경기육괴 동부지역)지역으로 위치함을 확인할 수 있었다.



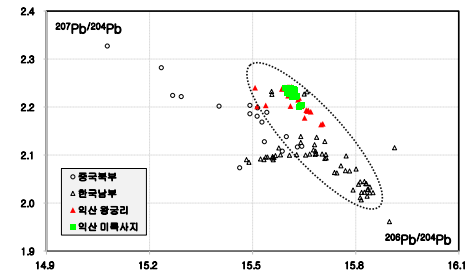
도1. KOPLID에 의한 산지추정 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)



도2. KOPLID에 의한 산지추정 ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$)



도3. KOPLID에 의한 산지추정 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)



도4. 동북아시아에서의 산지추정 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)

이는 2007년에 익산 왕궁리에서 출토된 도가니와 유리, 그리고 녹유도기에 대한 납동위원소비 분석에서 유리와 유약의 사용재료에 있어서 밀접한 관련이 있는 것으로 본 연구와 일치하는 결과이다. 또한, 미륵사지 출토품의 납동위원소비 분석결과는 이 두 유적에서 재료의 공유가 있었음이 본 연구에서도 확인되었다^[11].

3.2. 통일신라시대

통일신라 출토품은 영주 부석사, 경주 천룡사지, 포항 법광사지에서 출토된 녹유 와전은 2005년의 연구를 기초로 하여 작성하였고^[12], 경주 영묘사지^[13], 사천왕사지의 납동위원소비를 추가하였다^{(표3)[14]}. 중국과 일본에서 출토된 유물은 나라문화재연구소(奈良文化財研究所)와 하남성문물고고연구소(河南省文物考古研究所)에서 2011년에 공동 연구한 납동위원소비 데이터 값으로 동북아시아에서 납유리와 연유의 비교 연구를 위해 활용하였다^[15].

영주 부석사를 비롯한 경주 천룡사지, 영묘사지, 사천왕사지, 포항 법광사지에서 출토된 녹유와전 10점은 ‘한반도 남부지역 납동위원소비 분포도’를 이용해 산지추정한 결과, 부석사 2점과 사천왕사지 2점을 제외하고, 한국 남부지역 방연석에서 매우 벗어나 있어 이곳 산지는 아닌 것으로 추정되었다^(도5.6). 또한 동북아시아에서도 한국-중국-

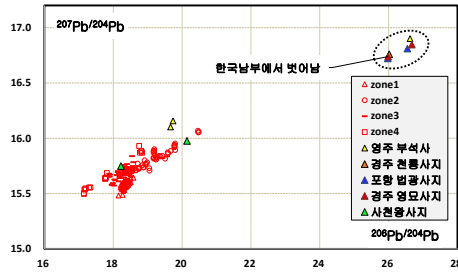
일본 중 어느 지역에도 위치하지 않았다^(57,8). 이는 동북아시아 외의 납동위원소비 분석 자료를 비교연구한다면 주변국과의 교류여부를 확인할 수 있는 중요한 자료로 판단된다. 최근 일본에서는 납동위원소비 연구로 태국 중부 깐파나부리주 송토(Song Toh)광산에서 수입한 연괴(Lead ingot)로 제작된 것을 밝힌바 있다^[16]. 국내에서는 통일신라 청주 윤천동 동종이 이와 유사한 사례로 다른 나라와의 교류를 제사하기도 하였다^[17].

한반도 남부로 추정되는 영주 부석사와 사천왕사지의 녹유와전은 zone2(옥천변성대 내 태백산분지, 영남육괴 북동부), zone3(경기육괴 동부)에 분포되어 있음을 확인되었다. 영주 부석사 출토 <녹유전> 2점은 zone2와 근접한 것으로 나타났다⁽⁵⁹⁾.

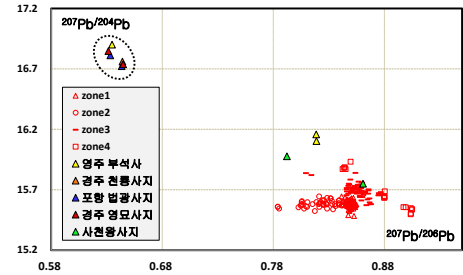
경주 사천왕사지 출토 <녹유신장벽전>과 <녹유능형전>은 KOPLID에서 zone2그룹과 zone3그룹으로 확실히 구분되어 위치하는 것으로 보아 동시기에 같은 가마에서 제작되었다고 보기는 어렵다⁽⁵¹⁰⁾. 이것은 후술하는 유약의 성분과 조성비율에서도 차이를 확인할 수 있는데⁽⁵⁵⁾, 서로 다른 시기와 지역에서 채취된 납으로 제작되었음을 반증하여 준다.

표3. 한·중·일 납유리 및 연유의 납동위원소비와 산치추정

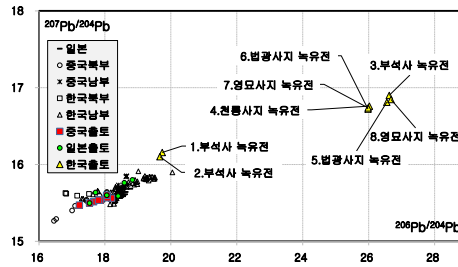
유적		시료 번호	유물명	납동위원소비			추정산지	KOPLID 영역
				²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb		
한국	영주 부석사	1	녹유전	19.738	16.157	40.258	한국남부	zone2 근접
		2	녹유전	19.667	16.102	40.082	한국남부	
		3	녹유전	26.625	16.900	41.601		
	경주 천룡사지	4	녹유전	26.021	16.760	41.318	동북아시아 에서 크게 벗어남	-
		포항 법광사지	5	녹유전	26.548	16.811		
	6		녹유전	25.980	16.722	41.199		
	경주 영묘사지	7	녹유전	25.985	16.738	41.251		
	경주 사천왕사지	8	녹유전	26.677	16.847	41.519		
		9	녹유신장벽전	20.146	15.976	39.156	한국남부	zone2
		10	녹유능형전	18.225	15.749	39.290	한국남부	zone3
중국 ^[15]	黃冶窯	11	삼채발	17.837	15.539	38.946	중국북부	-
		12	삼채반	17.855	15.537	39.235		
		13	삼채향로	18.049	15.596	38.420		
		14	삼채발	18.199	15.563	39.411		
		15	삼채호	18.069	15.567	39.211		
		16	황유집호	17.656	15.515	38.937		
		17	녹유호	17.223	15.472	38.126		
		18	삼채발	17.805	15.536	38.879		
일본 ^[16]	大安寺	19	삼채도침	17.534	15.498	38.030	중국북부	-
		20	삼채도침	18.054	15.601	39.436	한국남부	zone3
	飛鳥池	21	삼채호	18.399	15.596	38.502	일본	-
		22	삼채우	18.832	15.800	39.465	한국남부	zone2
		23	유리 도가니	18.407	15.596	38.494	일본	-
		24	유리 도가니	18.394	15.591	38.479	일본	-
		25	유리 도가니	18.402	15.591	38.483	일본	-
		26	녹유호	17.713	15.637	39.971	한국남부	zone4
	藤原京	27	녹유벼루	18.588	15.763	39.401	한국남부	zone3



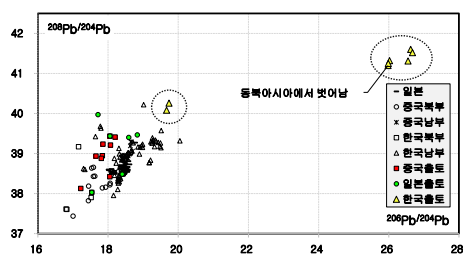
도5. KOPLID에 의한 통일신라 녹유와전의 산지추정
($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)



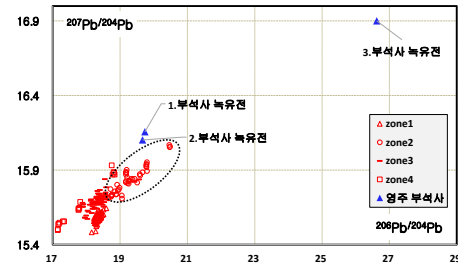
도6. KOPLID에 의한 통일신라 녹유와전의 산지추정
($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)



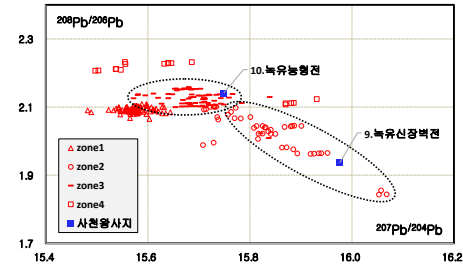
도7. 동북아시아에서 납산지추정
($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)



도8. 동북아시아에서 납산지추정
($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)



도9. KOPLID에 의한 영주 부석사 납산지추정
($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)



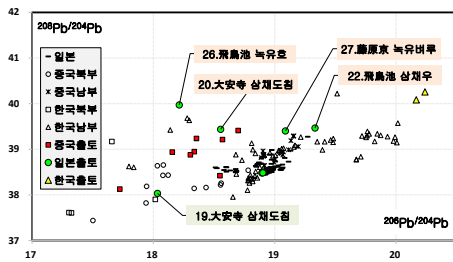
도10. KOPLID에 의한 경주 사천왕사지 납산지추정
($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$)

한편, 신라 녹유의 추정산지와 비교연구를 위해 당시 동북아시아에서 제작된 납유리와 연유도기를 馬淵久夫의 동북아시아 납동위원소비에 대입하였다. 중국 황야요출토 삼채도기의 유약은 중국북부로 추정되고, 일본의 유리, 녹유 및 삼채도기는 일본을 비롯한 중국북부와 한국남부 등 3곳의 산지가 골고루 산출되었다(표3, (도7~8)).

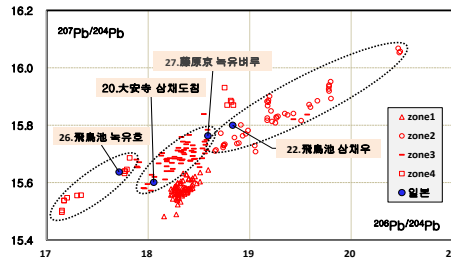
일본 출토품 가운데 한국남부 산지로 추정되는 시료에 대하여 KOPLID 분포도를 이용하였다(도12). 그 결과 한국 남부로 판단되는 출토품은 다이안지(大安寺) 출토 NO.20 <삼채도침>, 아스카이케(飛鳥池) 출토 NO.22 <삼채우>, NO.26 <녹유호>와

후지와라쿄(藤原京) 출토 NO.27 <녹유벼루>로 나타났다^(도11). 이를 KOPLID의 zone 영역으로 구분하면 다이안지 출토 <삼채도침>은 zone3, 아스카이케 출토 <삼채우>는 zone2, <녹유호>는 zone4로 확인되었다^(도12). 그리고 후지와라쿄에서 출토된 <녹유벼루>는 zone3으로 확인되었다. 이 지역은 경상도 남부지역을 제외한 태백산광화대에 속하는 옥천변성대, 영남육괴로 주로 강원 남부~경북 북부에서 충청도와 전라도로 이어져 경기도 서부까지 펼쳐진 넓은 광맥에 속한다. 여기서 한 가지 흥미로운 사실은 아스카이케 출토 <삼채우>와 다이안지 출토 <삼채도침>이 중국에서 만들어져서 일본으로 수입된 것으로 현재까지 연구되었다^[15]. 이번 조사를 통해 한국 남부 산 납을 사용한 중국 제작용이 일본으로 건너간 것을 확인할 수 있으나, 이는 앞으로 중국 가마터 출토품과의 비교연구가 필요하다.

특히 백제에 비하여 통일신라 출토품은 납동위원소비 자료가 빈약하여 비교연구에는 한계가 있었으나, 한-중-일의 고고학적·미술사적 양식에 의한 기술교류나 제작양상을 기초적 연구에 있어 과학적 근거를 제시할 수 있었다는 것에 큰 의미를 갖는다.



도11. 일본 출토품의 [도8] 확대도
($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)



도12. KOPLID에 의한 일본 출토품의 납산지 추정
($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)

4. 납유리와 녹유의 화학조성

4.1. 삼국시대

백제는 납유리와 녹유가 시유된 와전과 도기를 제작하였다. 현재까지 성분분석에 대한 연구성과는 납유리에 집중되었기 때문에 유약의 화학분석이 미비한 상태이다. 본 연구에서는 백제의 납유리의 성분분석으로 당시에 제작양상을 검토하고자 하였다.

백제의 납유리는 익산 왕궁리와 미륵사지, 부여 쌍북리·관북리·부소산 등의 유적에서 유리 도가니와 함께 유리구슬, 판유리 등이 발견되었다. 본 연구의 대상은 익산 왕궁리와 미륵사지에서 출토된 유리의 화학조성을 분석한 결과이다^{(표4)[11,18]}.

표4. 익산 왕궁리 및 미륵사지 석탑 출토 납유리의 화학조성

유적명	유물명· 시료번호	분석 방법	화학조성(wt.%)									
			PbO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Fe ₂ O ₃	CuO	Na ₂ O	K ₂ O
익산 왕궁리 ^[11]	유리	SEM-EDS	72.8	27.2	-	0.24	-	-	0.24	0.20	-	-
	유리	SEM-EDS	71.2	28.1	-	0.31	-	-	0.26	0.34	-	-
	유리	SEM-EDS	72.1	27.3	-	0.21	-	-	0.12	0.18	-	-
	유리	SEM-EDS	72.6	26.9	-	0.23	-	-	0.37	0.36	-	-
	유리	SEM-EDS	73.6	26.2	-	0.29	-	-	0.12	0.26	-	-
	유리	SEM-EDS	72.0	26.8	-	0.31	-	-	0.19	0.24	-	-
	유리	SEM-EDS	72.8	27.6	-	0.28	-	-	0.09	0.22	-	-
	유리	SEM-EDS	72.0	28.5	-	0.21	-	-	0.13	0.20	-	-
	유리	SEM-EDS	71.8	27.0	-	0.34	-	-	0.16	0.22	-	-
익산 미륵사지 석탑 ^[18]	MR-23	SEM-EDS	70.71	28.8	-	0.16	-	-	0.06	0.23	0.03	0.01
	MR-24	SEM-EDS	70.56	28.8	0.07	0.07	-	0.02	0.16	0.24	-	0.07
	MR-25	SEM-EDS	70.75	28.9	0.03	0.04	0.06	-	0.10	0.17	-	0.01
	MR-26	SEM-EDS	69.31	29.7	0.17	0.18	0.06	-	0.21	0.25	0.10	0.02
	MR-27	SEM-EDS	69.34	29.9	0.03	0.15	-	0.04	0.13	0.27	0.08	0.06
	MR-28	SEM-EDS	69.66	29.8	-	0.17	-	-	0.14	0.12	0.07	0.05

익산 왕궁리유적에서 출토된 유리 9점의 주요원소 성분분석결과는 PbO 71~72wt.%, SiO₂ 26~28wt.%를 비롯한 Al₂O₃, Fe₂O₃, CuO가 미량으로 확인되었다. 여기에 포함된 Al₂O₃과 Fe₂O₃은 불순물로서 연구되고 있다^{(표4, 도13)[11]}.

익산 미륵사지석탑 사리공 출토 납유리 6점의 주요성분은 PbO 69~70wt.%, SiO₂ 28~29wt.%로 확인되었다. 이전에 조사된 미륵사지 출토 유리의 분석결과(2004년)는 PbO 70~77wt.%, SiO₂ 19~28wt.%로 PbO, SiO₂, Al₂O₃, CuO, Fe₂O₃의 성분만 확인되었으나^[19,20], 심초석 출토 납유리의 경우 CaO, MgO, MnO, Na₂O 등의 미량원소가 포함되었다^(표4, 도14).



도13. 익산 왕궁리유적 출토 유리 도가니 일괄



도14. 익산 미륵사지 출토 유리 도가니 및 유리알괄

백제와 같은 PbO 70wt.% 이상의 납유리는 7세기에 신라와 중국, 그리고 일본에서 공통적으로 확인된다. 경주 황남동 376번지 출토 유리 도가니 3점의 PbO 비율은 70wt.% 이상의 납유리로 알려져 있다^[19,20]. 그리고 중국 영하(寧夏) 고원사도락

(固原史道洛, 658년)묘와 고원사가담(固原史訶耽, 669년)묘 출토 〈유리육곡배〉는 71.49wt.%의 납이 검출되었다. 일본 후쿠오카현(福岡県) 무타카다시(宗像市) 미야지다케진자(宮地嶽神社) 출토 〈유리판〉의 성분 역시 PbO 74wt.%이다^[21].

이상을 통해 7세기에 동북아시아에서 제작된 유리는 납이 70wt.% 대의 고연유리(高鉛琉璃)였음을 알 수 있다. 현재까지 이러한 고연유리는 한나라와 수~당나라 초기에 존재하는 것으로 알려져 왔다^[21]. 그러나 최근 중국 안양(安陽) 북조(北朝)묘에서 출토된 연유도기의 화학조성은 PbO 71.99~73.23wt.%, SiO₂ 15.1~17.25wt.%의 높은 함량의 납이 검출되었기 때문에 그 시기를 좀 더 올려볼 수 있을 것이다^[22].

4.2. 통일신라시대

신라는 7세기부터 갈색과 녹색의 유약이 시유된 도기와 와전, 그리고 납유리를 제작하였다. 본 연구의 분석대상은 통일된 이후 경주 사천왕사지, 영묘사지, 천룡사지, 포항 법광사지, 영주 부석사에서 출토된 녹유와전으로, 다음 〈표5〉와 같은 분석결과가 확인되었다.

표5. 통일신라 녹유와전의 유약 화학조성

유적명	시료 번호	유물명	분석 방법	화학조성(wt.%)									
				PbO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Fe ₂ O ₃	CuO	Na ₂ O	K ₂ O
경주 사천왕사지 ^[23]	SC001	녹유신장벽전	S	78.93	15.22	0.45	3.40	-	-	1.00	0.82	-	0.18
	SC313	녹유신장벽전	S	75.37	17.69	0.50	4.08	-	-	0.92	0.91	-	0.53
	SC003	녹유귀면와	S	64.12	26.60	-	5.59	-	-	2.19	0.68	-	0.71
	SC004	녹유귀면와	S	67.89	21.23	1.5	3.91	0.50	-	1.68	1.95	-	0.46
	SC002	녹유능형전	S	87.77	12.23	-	-	-	-	-	-	-	-
경주 사천왕사지 ^[14]	SC-A-3	녹유신장벽전	S	64.88	25.00	0.75	5.42	0.44	-	1.36	1.23	0.38	0.54
	SC-B-1	녹유능형전	S	74.10	24.84	-	-	-	-	-	1.07	-	-
	SC-B-2	녹유능형전	S	74.98	23.89	-	-	-	-	-	1.13	-	-
	SC-B-3	녹유능형전	S	75.79	21.90	-	0.33	-	-	-	1.98	-	-
경주 영묘사지 ^[13]	전1	녹유전	S	90.30	12.00	0.06	0.05	0.18	0.03	0.08	0.14	0.05	0.04
	전2	녹유전	S	90.10	12.20	0.04	0.01	-	0.04	0.11	0.11	0.05	-
경주 천룡사지 ^[12]	전	녹유전	S	74.20	25.60	-	0.09	0.12	0.01	0.14	0.10	-	-
포항 법광사지 ^[24]	전	녹유전	X	70.20	28.50	0.47	0.10	0.08	-	0.02	-	-	-
영주 부석사 ^[12]	1038	녹유전	S	73.90	25.50	-	0.06	0.06	-	0.04	0.09	0.02	0.04
	1039	녹유전	S	72.50	27.20	0.05	-	0.08	0.11	0.20	0.59	-	-
	1040	녹유전	S	80.00	19.20	0.01	-	0.08	-	0.13	0.13	0.33	-

*분석방법 S:SEM-EDS, X:XRF

통일신라의 경주 사천왕사지, 영묘사지, 천룡사지, 포항 법광사지, 영주 부석사 출

토 녹유와전의 주요성분의 화학조성은 PbO 64~90wt.%이며, SiO_2 12~27wt.%으로 확인된다.

이 가운데 사천왕사지에서 출토된 <녹유능형전(SC002, SC-B-1~3)>은 주요성분이 PbO , SiO_2 와 착색성분인 CuO 의 성분만 검출되어, 백제 왕궁리와 미륵사지에서 출토된 납유리와 성분조성이 유사한 순수한 납유리로 추정된다^(도15).

이를 분석한 국립문화재연구소와 국립경주문화재연구소에서는 이러한 현상을 매우 고순도의 원료를 사용하였음을 의미하며, 철이나 알루미늄이 포함된 모래가 아닌 고순도의 규사를 사용하였을 가능성을 제기하였다. 또한 경주 영묘사지 출토 <녹유전(도16)>과 같은 표면 백색의 유약풍화산물을 포함하고 있고, 두께가 1~20mm의 유약층의 내부에 녹색으로 확인되어 양자 간의 유사성을 지적한 바 있다^[23].



도15. <녹유능형전>, 통일신라, 너비 14.1cm
경주 사천왕사지 출토, 국립경주박물관소장



도16. <녹유전>, 통일신라, 너비 14.1cm
경주 영묘사지 출토, 국립경주박물관소장

그렇지만, <녹유능형전>은 동일유적에서 출토된 <녹유신장벽전(SC001, SC313, SCA-3)>과 <녹유귀면와(SC003, SC004)>의 주요원소와 성분의 비율이 다르게 확인되는 것이 주목된다. 국립경주문화재연구소에서 <녹유신장벽전(도17)>과 <녹유능형전>에 대한 제게르식의 분석결과(2018년), 양자 간에 나타난 유약의 성분이 확연히 구분되는 것으로 밝혀졌다. 이들은 전체적으로 PbO 의 성분이 높아 제게르식이 낮은 값이 확인되었다. <녹유능형전>은 유약의 용제로 작용하는 염기성산화물($RO+R_2O$)에 속하는 PbO 의 함량이 매우 높고, 중성산화물인 R_2O_3 의 함량에 영향을 미치는 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 성분이 검출되지 않은 특징을 지녔음이 조사된 바 있다^[14].



도17. <녹유신장벽전>, 통일신라
경주 사천왕사지 출토
국립경주박물관소장

5. 고찰 및 결론

본 장에서는 문헌기록과 자연과학 분석자료를 활용하여 한·중·일의 유약 제조방법을 유추해 볼 것이며, 지금까지의 연구를 종합적으로 검토하여 고대 납유리와 녹유의 특성을 고찰하겠다.

5.1. 문헌기록과 화학조성을 기초한 유약의 제조방법

현존하는 국내의 문헌자료에서는 녹유의 제조방법에 대한 기록이 확인되지 않는다. 다만, 8세기 전반 일본의 나라삼체에 대하여 제작과 유약에 관련된 기록이 남아 있어 녹유의 제조방법을 유추할 수 있을 것이다.

『造佛所作物帳』, 「統修 34卷」

用黑鉛	179斤,	熬得丹小 234斤
綠靑小	17斤8兩,	丹和合料
赤土小	1斤4兩1升,	丹和合料
白石	60斤,	丹和合料
猪脂	1升,	鉛熬調度
鹽	2升7合,	鉛錯料
膠	2斤4兩,	鉛并綠靑等和合料
紗	4尺,	丹篩料
紬	3尺,	石篩料
葛布	6尺,	土篩料

위의 문서는 『조불소장물장(造佛所作物帳: 이하 정창원문서)』으로天平 5년(AD733)부터 1년에 걸쳐서 고후쿠지(興福寺) 서금당의 축조에 관련된 기록으로 알려져 있다. 이 문서에는 삼채도기의 제작방법이 명시되었는데, 점토의 채취와 유약 제조법 등이 확인된다. 흑연은 금속인 납을 용해시켜서 산화한 것으로 연단(鉛丹: PbO)을 만든다. 이 연단과 화합하여 유리질을 만드는 재료로서 백석, 녹청, 적토, 소금, 아교가 사용되었는데, 백석은 규석으로 추정되고, 이들이 융합되어 납유리가 된다. 그리고 녹청(CuO)이 녹색, 적토(Fe_2O_3)가 갈색을 띠는 색조절제를 사용하여 투명유, 녹유, 갈유를 만들었을 것으로 연구되었다^[25].

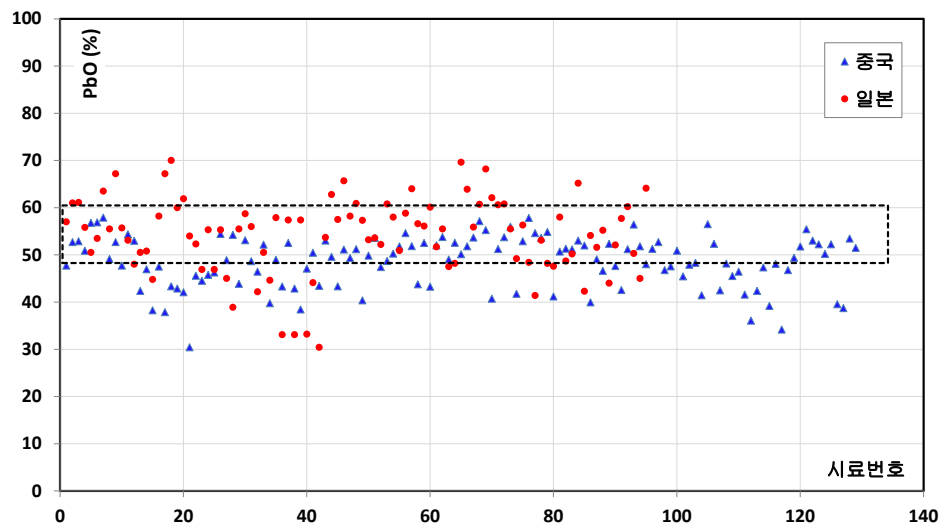
표 6. 造佛所作物帳에 기록된 삼채유약의 화학조성(wt. %)

구분 \ 화학조성	PbO	SiO ₂	CuO	Fe ₂ O ₃
투명유	56.0	44.0	-	-
녹 유	54.0	43.0	3.0	-
갈 유	55.8	43.9	-	0.3

일본의 아마자키 카즈오(山崎一雄)는 정창원문서를 이용한 유약의 재현실험하여, 다음 <표6>을 제시하였다. 문서에 기록된 연단, 백석, 녹청, 적토는 각각 PbO, SiO₂, CuO, Fe₂O₃로 가정하였다^[26]. 이 실험에서 삼채도기 유약의 성분분석 결과는 PbO 54~55.8wt.%로 확인되었다.

다음 <도18>은 중국과 일본에서 출토된 삼채와 녹유도기 유약의 성분분석 결과를 토대로 PbO의 함유량 분포도를 작성한 것이다. 중국 하남성(河南省) 공의요(鞏義窯)출토 7~10세기로 추정되는 129점의 연유도기의 유약에서 확인되는 PbO의 함유량은 30.43~57.13wt.%로 분포하였고, 평균값 48.56wt.%이다. PbO는 50wt.% 대 48%, 40wt.% 대 44%, 30wt.% 대 8%로 확인된다^[27]. 일본의 8~11세기에 만들어진 96점의 녹유도기 유약의 PbO는 30.4~70wt.%로, 평균값 52wt.%이다. PbO는 50wt.% 대 52%, 60% 대 22%, 40wt.% 대 18% 등으로 확인되었다^[26].

한편, 정창원문서에는 삼채를 제작하기 위해 흙과 나무를 채취하는 규모와 장소, 옮겨오는데 사용되는 수레의 규모와 인력의 임금 등을 명시하였지만, 유약에 주원료로 사용되는 납의 채취 장소에 대한 언급은 확인되지 않는다. 이번에 조사한 납의 방연석 산지분석은 중국의 하남성 공현요=중국 북부, 일본=일본, 백제=경기육괴 서부(zone4)로 확인되어, 대부분 유리와 유약을 제작하던 장소와 비교적 가까운 곳에서 납을 가져온 것으로 짐작된다.



도18 중국 · 일본 가마터 출토 연유도기의 PbO 함유량 분포도

하지만, 신라는 경주 사천왕사지와 영주 부석사를 제외하고, 동북아시아에서 벗어난 지역에서 납을 수입하였을 가능성이 높다. 또한 사천왕사지의 <녹유신장벽전>과 <녹유능형전>은 각각 다른 장소에서 납을 채취한 것으로 보이며, 동일시기에 같은 장소에서 만들어졌을 가능성이 낮은 것이다. 정창원문서에서는 삼채에 사용된 태토 채취 장소를 肩野로 기록하였는데, 이 지역은 현재 오사카부(大阪府) 가타시(郊野市)로 추정하고 있다. 이는 나라(奈良)에서 비교적 먼 지역에서 흙을 채취하였다는 점을 근거로 점토를 엄선하여 가져온 것이라는 연구되었다^[25]. 이러한 상황과 대조해 보았을 때, 통일신라의 녹유와전에 사용된 납이 한·중·일이 아닌 다른 나라에서 가져왔다는 결과는 당시의 수급상황 및 국제관계 등과 연결해 보아야 할 것이다.

이상의 결과를 통해 『조불소장물장』이 만들어진 시기에 유약의 납 함유량은 50wt.%대의 비율이 관찰된다. 이는 당시 기록으로 남기면서까지 유지하기 위해 노력하였던 것으로 짐작된다. 하지만 이 정창원문서는 일본의 나라삼채, 즉 도기의 성분과 품질을 유지하기 위해 작성된 것이지 와전의 화학조성까지 고려한 것은 아니다. 중국과 일본에서는 삼채와 녹유 등 도기에 성분분석이 활발하게 진행되었지만, 와전의 연구가 활성화되지 못하였다. 그리고 통일신라시대 녹유와전은 64~90wt.%의 납의 함유량이 높게 보였지만, 녹유 및 갈유도기에 대한 분석이 이루어지지 못한 한계가 있다.

5.2. 고대 납유리와 녹유의 특성

고대 동북아시아에서 제작된 납유리와 녹유의 특성은 다음 두 가지로 정리된다.

첫째, 백제와 신라, 그리고 중국과 일본에서 만들어진 납유리는 조성성분과 배합 비율 등의 제조 기술의 공유가 이루어졌을 것으로 판단된다. 이들 나라에서 출토되는 납유리의 주요원소 비율은 PbO 70wt.%, SiO₂ 30wt.%의 고연유리가 공통적으로 확인되었다. 그리고 중국의 당삼채를 모방하여 만들어진 일본의 나라삼채의 제작은 『조불소장물장』에 기록되어, 당시 일본의 당의 문물에 대한 인식을 엿볼 수 있다. 이 문서에는 유약에 사용되는 재료를 비롯하여, 근(斤), 량(兩), 승(升)의 도량형의 무게 단위까지 작성하여, 보다 정확하고 엄격하게 관리되고 있었음을 보여준다. 또한 중국과 일본의 가마터에서 출토된 삼채와 녹유 등 PbO 함유량의 분포도는 정창원 문서에 의거하여 나라삼채가 당삼채의 영향으로 제작되었음이 보여주는 자료이다.

둘째, 납유리는 유약의 제작과 관련이 있다. 현재까지 화학조성에 대한 데이터베이스는 매우 제한적으로 연구되어 납유리와 유약의 관계를 명확하게 밝히기는 어렵다. 그렇지만, 백제 익산 미륵사지와 왕궁리유적 출토 납유리, 유리 도가니, 유약에서 조사된 납동위원소비를 통한 산지분석을 하였을 때, 대부분 익산지역에서 멀리

떨어진 경기육괴 서부지역(zone4)과 일부 경기육괴 동부지역(zone3)에서 채취한 납을 가지고 와서 사용되었다는 점에서 당시 유리와 유약을 만들던 장인 간의 일정한 교류관계가 있었음을 유추할 수 있다.

그리고 납이나 유약을 녹이는 도구의 사용은 동북아시아에서 유약과 유리 제작기술의 교류가 이루어졌음을 뒷받침해 준다. 야마자키 카즈오는 정창원문서의 말미에 결여되어 없어진 부분을 연단이나 유약을 녹이는 도가니의 흙을 기재하였다고 주장하였는데, 그 근거로 포탄형의 도가니가 헤이제이쿠(平城宮)와 헤이안(平安)시대 녹유가마인 교토시(京都市) 미도리쿠마(緑区熊) 코시오가마(小塩窯), 나고야시(名古屋) 전길요(前吉窯) 등에서 출토되고 있음을 제시하였다^{(도19)[25]}. 이러한 도가니는 중국의 대표적인 삼채가마인 섬서성(陝西省) 장안 예천방요(長安醴泉防窯)에서 발견되었다. 국내에서는 녹유를 제작하였던 가마터의 발굴사례가 부족한 관계로 확인되지 않았지만, 백제의 익산 왕궁리와 미륵사지, 부여 관북리유적 등에서 출토된 유리 도가니 <도20>과 그 형태와 용례가 유사하다.



도19. <도가니>, 일본, 9C 高 10.7cm
石作窯 출토, 京都文化博物館 소장



도20. <유리 도가니>, 백제 高 15.8cm
익산 왕궁리유적 출토, 국립부여문화재연구소 소장

이상을 통해 동북아시아에서의 납유리와 녹유는 재료의 배합비율 즉, 납과 석영(SiO_2) 비율과 납의 산지, 그리고 유리를 제조하는데 사용되는 도가니의 유사성이 확인되어, 기술 공유와 함께 국제교류 관계의 영향에 대해 살펴볼 수 있는 중요한 자료이다.

본 연구는 직접적으로 실험이나 분석을 시행한 것이 아닌, 현재까지 개별적으로 진행된 분석자료를 토대로 한국을 비롯한 중국과 일본에서 출토된 유물에 이르기까지 비교 연구함으로써 종합적으로 검토하였다는 차원에서 의미가 있다. 다만, 본 연구의 논지가 전반적으로 인문학적 시각에서 보존과학의 분석자료를 활용하였기 때

문에 많은 한계가 있었을 것으로 짐작된다. 앞으로 분석자료의 축적과 활용과 함께 다른 학문과의 연계가 활발하게 이루진다면, 납유리와 녹유의 관계가 보다 입체적으로 드러날 것으로 기대한다.

참고문헌

1. 표준국어대사전, 유리, <https://ko.dict.naver.com/#/entry/koko/ba9fd7e74f814545b132697232898f60> (2020년).
2. 이지희, *통일신라시대 연유도기 연구*, 충북대학교 고고미술사학과 석사학위논문, (2013).
3. 馬淵久夫, 平尾良光, 鉛同位體比法による漢式鏡の研究(2), *MUSEUM* **382**, p16~30, (1983).
4. Mabuchi, H., *The lead isotope systematics in Asia and near East*, p19, Grant Report to the Ministry of Education Science and Culture, Japan(No.58540374-59540377), (1985).
5. 馬淵久夫, 平尾良光, “東アジア鉛鑛石の鉛同位體比法”, *考古學雜誌* **73(2)**, p199-210,245, (1987).
6. 정연중 외, *한반도 방연석 광석 조사 및 납동위원소 기초연구*, p68-100, 국립문화재연구소, (2012).
7. Youn-Joong Jeong, Chang-sik Cheong, Dongbok Shin, Kwang-Sik Lee, Hui Je Jo, Mukesh Kumar Gautam, Insung Lee, 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**, p116-127, (2012).
8. 정연중, 정창식, 최정윤, 안유미, 한민수, 황진주, 김소진, 한반도 남부지역 금속광상의 납동위원소비 광역 분포도 작성, p319-366, *대한지질학회 학술대회*, (2015).
9. 金炫廷, 古代东亚细亚青铜器材料的使用与原产地问题, p175-193, 二届中韩考古研究生论坛 東北亞古代文化交流, 赤峰学院博物馆报告厅, (2019).
10. 김규호, 平尾良光, 한송이, 노제현, 김나영, 임덕수, *익산 왕궁리유적 관련 유리 및 坩堝의 납동위원소비*, p73-118, 왕궁의 공방Ⅱ-유리편, 국립부여문화재연구소, (2007).
11. 강형태, 정광용, 허우영, 김성배, 조남철, 익산 왕궁리유적 납유리의 성분조성과 납동위원소비, *한국상고사학보* **45**, p31-48, (2004).
12. 강형태, 정영동, 조재영, 김호상, 통일신라시대 녹유전돌(綠釉埴)의 녹유 특성- 분석사, 천룡사지 및 법광사지 녹유 전돌, *先史와 古代* **25**, p211-222, (2005).

13. 조남철, 허우영, 김호상, 강형태, 경주 靈廟寺址 녹유전의 녹유 특성, *호남고고학보* **27**, 호남고고학회, p129-142, (2007).
14. 국립경주문화재연구소, *사천왕사녹유신장벽전 복원 보고서*, 국립경주문화재연구소, (2018).
15. 奈良文化財研究所, 河南省文物考古研究所, 关于古代日本·中国铅釉陶器釉药的铅同位素比值测定, p148-152, 华夏考古, (2011).
16. 平尾良光 외, *大航海時代の日本と金屬交易*, p80-101, 思文閣出版, (2014).
17. 김현정, 김수기, 보물 제1167호 청주 윤천동 출토 통일신라 범종의 형태와 보존과학적 특성 고찰, *문화재* **40**, p357-386, (2007).
18. 한민수, 김소진, 익산 미륵사지 석탑 사리공 내 출토 고대 납유리 유물의 성분특성 분석, *한국광물학회지* **28**, p187-193, (2017).
19. 동국대학교 경주캠퍼스 박물관, *경주 황남동 376번지 통일신라시대 유적*, 동국대학교 경주캠퍼스 박물관, (2002).
20. 국립부여문화재연구소, *왕궁의 유리공방*, p10-71, 왕궁의 공방 II -유리편, 국립부여문화재연구소, (2007).
21. 谷一尚, *고대 유리의 제작과 전래*, p194-203, 백제 불교문화의 寶庫 미륵사-학술심포지엄 논문집, (2010).
22. 王洪敏, 潘伟斌, 朱铁权, *安阳北朝墓出土铅釉陶的分析研究*, 中国国家博物馆, (2011).
23. 이한형, 정민호, 문은정, 박지연, 김수경, 최장미, 한민수, 경주 사천왕사지 녹유전의 녹유 특성 연구, *문화재* **44-3호**, p112-131, (2011).
24. 문환석, 한민수, 황진주, 김호상, 浦項 法廣寺址 出土 綠釉瓦의 自然 科學的 調査, *古文化* **60**, p101-120, (2002).
25. 巽淳一郎, *日本の美術 12*, 至文堂, (1985).
26. 山崎一雄, *綠釉と三彩の材料と技法*, p12-19, 日本の三彩と綠釉, 五島美術館, (1998).
27. 河南省文物研究員·中國文化遺產研究員·日本奈良文化財研究所, *鞏義黃冶窑*, 科學出版社, (2016).