

익산 미륵사지 출토 녹색 유리의 분석

강형태 · 김성배* · 허우영**

국립중앙박물관 보존과학실, *국립부여문화재연구소 학예연구실

**호암미술관 문화재보존연구소

Analysis of Greenish Glass Pieces from Miruksa Temple, Iksan, Chunbuk

Hyungtae Kang, Seongbae Kim* and Wooyoung Huh**

Department of Conservation Science, National Museum of Korea

Puyo National Research Institute of Cultural Properties*

HO-AM Conservation Institute of Cultural Properties**

1. 머리말

백제 최대의 가람 미륵사지는 전북 익산시 금마면 기양리에 위치하고 있다. 1980년부터 1994년까지 15년 간 국립문화재연구소 미륵사지발굴조사단 및 국립부여문화재연구소에 의하여 발굴조사가 실시되었다. 유구로서는 중문지, 탑지, 금당지, 강당지, 회랑지, 승방지, 및 연못지 등이 조사되었고 유물로서는 기와와 토기, 자기들이 주류를 이루는 가운데 청동제품, 녹색 유리제품, 석제 및 목제품등 18,710점의 방대하고 다양한 유물이 출토되었다. 시기적으로는 백제시대뿐 아니라 조선시대에까지 이르고 있다¹.

미륵사지에서 출토된 유물 중 관심을 끄는 것으로 녹색의 관상 유리²가 있다. 이 유리는 사역의 거의 전지역에서 출토되었는데 특히 동원(東院)의 금당지(金堂址)와 탑지(塔址) 주변에서 다량으로 출토되었다. 그러나 최근까지 어느 유적에서도 이와 같은 유리편이 발견된 바 없고 또 모양이 단순하여 형태학적으로도 검토가 어렵다. 따라서 우선 유리편의 과학적 조사 및 분석을 토대로 유리편의 특성을 밝히는 연구가 수행되어야 한다.

고대 유리를 대상으로 과학적 연구를 수행할 경우에는 몇 가지 관점에서 분석이 이루어져야 한다. 즉, 이 관유리를 어떤 원료를 사용하여 어떻게 제작했는지, 그 배합비는 어떠한지 그리고 유리의 색깔을 내기 위해 어떤 성분을 의도적으로 첨가했는지를 조사하면 당시 유리 제작에 대한 유익한 정보를 얻을 수 있다³. 또한 유리에 납이 함유된 경우에는 납동위원소비(lead isotope ratio)를 분석하여 원료의 산지를 추정할 수 있다⁴. 이러한 일련의 과학 분

석 결과는 당시 지역 문화권의 유리제조 기술 및 사용 원료의 특성을 밝히는데 중요하다^{4,5}.

본 연구는 국립부여문화재연구소에서 소장하고 있는 녹색 유리 편 35점에 대한 몇 가지 과학 분석을 수행하고 그 결과를 정리한 것이다. 각 유리 편 시료의 분석을 위해 전자현미경에 부착된 에너지분산형 X-선분석기(EDS)를 사용하여 주성분 및 미량성분의 함량을 결정하였다^{6,7}. 데이터의 해석 방법으로는 다변수분석법⁸ 중 주성분분석(principal component analysis : PCA)을 채용하여 시료를 분류하고자 시도하였다. 이 방법을 사용하면 시료의 유사성에 따라 시료의 군(group)이 어떻게 형성되는지를 알 수 있다. 그리고 고온촬영현미경(high temperature microscope)을 사용하여 온도증가에 따른 유리의 상태 변화를 관찰하였다. 일부 납유리는 열이온화질량분석기(TIMMS)⁹를 사용하여 납동위원소비를 분석하였고 이로부터 납 원료를 어디에서 입수하였는지 그 산지를 추정하였다.

2. 분석 결과 및 고찰

미륵사지 유적에서 출토된 유리 편 35점 각각의 비중을 측정하고 5종의 산화물을 분석한 결과를 표 1에 나타내었다. 표에서 보듯 유리편 35점은 모두 주성분이 납과 실리카로 구성된 납유리(PbO-SiO₂)계통으로서 납은 70~79%, 실리카는 20~28%의 범위이다. 비중은 대

표 1. 미륵사지 유리편의 출토 유구 위치와 색깔, 비중 및 성분조성(%)

부호 번호	유구 위치	색깔	두께 (mm)	비중 (g/cc)	성분조성(%)					
					Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CuO	PbO	Total
1		녹색	3.5~4.3	4.872	0.33	26.2	0.21	0.50	73.6	100.8
2		황록색	1.7~2.3	4.848	0.39	24.7	0.13	0.39	74.4	100.0
3		녹색	4.9~5.8	4.996	0.32	26.6	0.18	0.34	73.0	100.5
4		녹색	3.8~4.4	4.560	0.34	28.4	0.24	0.41	71.7	101.1
5		녹색	4.2~4.7	4.766	0.25	26.7	0.15	0.37	73.4	100.8
6		녹색	2.3~2.7	5.029	0.25	24.4	0.16	0.27	74.9	99.9
7	강당지북편	녹색	3.3~4.1	4.729	0.32	27.3	0.23	0.21	71.5	99.5
□ 8	배수로상층	초록색	5.3~5.8	4.720	0.34	27.5	0.11	0.79	70.4	99.1
9	(N13)	녹색	4.0~4.8	4.906	0.27	24.7	0.22	0.35	74.3	99.9
10		황록색	4.0~9.5	4.678	0.23	28.3	0.21	0.27	70.6	99.6
11		녹색	2.4~3.0	4.836	0.23	26.1	0.23	0.31	74.3	101.2
12		녹색	3.0~4.3	4.793	0.13	24.6	0.06	0.93	74.4	100.1
13		녹색	1.2~2.1	4.953	0.26	23.9	0.17	0.31	74.9	99.5
14		녹색	12.5	4.763	0.14	27.4	0.04	0.09	73.6	101.3
15		녹색	4.2~4.7	4.766	0.31	26.8	0.23	0.27	73.1	100.7

표 1. 계속

부호 번호	유구 위치	색깔	두께 (mm)	비중 (g/cc)	성분조성(%)					
					Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CuO	PbO	Total
16	▲ 동금당지 및 강당지	녹색	15~22	4.852	0.14	24.2	0.19	0.09	76.4	101.0
17		녹색	4.3~13.6	5.175	0.07	22.9	0.08	0.46	77.7	101.2
18		녹색	8.2~15.5	4.743	0.09	26.3	0.12	0.23	74.4	101.1
19		녹색	5.5~8.1	5.367	0.15	19.6	0.17	0.31	79.3	99.5
20		녹색	2.5~9.2	5.011	0.12	24.1	0.13	0.24	76.3	101.0
21		녹색	9.2~9.8	4.945	0.04	24.9	0.10	0.21	74.6	99.9
22		초록색	12.2~14.2	4.846	0.13	26.3	0.21	0.28	73.8	100.7
23	* N14W13	녹색	7.5~8.2	4.843	0.17	27.1	0.19	0.14	73.5	101.0
24		황록색	2.8~6.8	4.695	0.06	27.2	0.13	0.20	71.3	98.9
25		황록색	4.0~7.3	4.880	0.14	26.9	0.15	0.13	73.6	100.9
26		녹색	8.1~12.0	4.803	0.13	26.3	0.09	0.23	73.3	100.0
27		녹색	8.1~8.9	4.797	0.10	26.0	0.12	0.23	73.1	99.6
28		초록색	9.0~15.5	4.571	0.15	27.8	0.26	0.34	72.4	100.9
29		녹색	12.5~13.0	4.860	0.11	27.6	0.13	0.23	73.0	101.0
30		황록색	7.8~10.8	4.754	0.34	27.0	0.12	0.24	73.0	100.7
31		녹색	6.6~7.4	5.087	0.27	25.2	0.15	0.09	73.8	99.5
32		녹색	12.5~12.7	4.806	0.05	27.1	0.08	0.11	73.1	100.4
33		녹색	12.8~12.9	4.393	0.08	27.9	0.09	0.21	71.8	100.1
34		녹색	20.9~21.2	4.921	0.22	25.8	0.10	0.03	73.6	99.7
35		녹색	13.8~14.8	4.776	0.03	28.0	0.04	0.30	72.4	100.7
35 [†]		황록색	13.8~14.8	4.776	0.10	26.8	0.04	0.34	72.8	100.0

[†] 35번과 동일한 시료로서 색깔이 다른 부분을 분석한 결과임

략 4.4~5.4 범위에 있음을 알 수 있다. 그리고 알루미늄, 철 및 구리 산화물은 주성분에 포함된 불순물로 미량 들어있는 것으로 판단된다. 알루미늄은 0.4% 이하, 철은 0.3% 이하, 구리는 0.9% 이하의 농도 값을 나타내고 있다. 또한 유리편의 두께는 작게는 1.2mm부터 크게는 21 mm까지의 범위를 나타내었다.

2.1. 주성분분석(PCA)에 의한 유리의 분류

유리가 출토된 유구 위치 별로 그 농도 값을 표 1에 나타내었는데 이 값들이 많아서 상호 비교하기가 무척 어렵다. 따라서 이들 농도 값을 모두 사용하는 통계분석을 수행하여 시료의 분포도를 작성코자 하였다. 그 한 방법으로서 주성분분석(PCA)⁸을 사용하였는데 이 방법은 각 시료의 성분 농도 분포에 따라 유사한 시료는 한데 모여 군(群)을 형성하므로 시

표 2. 주성분에 따른 고유값과 기여도 및 누적율(%)

주성분	1	2	3	4	5
고유값	1.99	1.51	1.04	0.40	0.06
기여도(%)	39.8	30.2	20.8	8.00	1.20
누적율(%)	39.8	70.0	90.8	98.8	100

표 상호간의 비교가 용이하다.

주성분분석에서 데이터의 가장 큰 가변도를 나타내는 주성분에 해당하는 고유값을 구하고 각 고유값이 전가변도에 기여하는 기여도 및 누적율을 계산하여 표 2에 나타내었다. 이 표에서 보는 바와 같이 주성분 1과 주성분 2의 기여율이 크다는 것을 알 수 있으며 두 주성분의 누적율은 전가변도의 70%에 해당되는 것이다.

주성분 1과 주성분 2로부터 각 시료의 주성분 값을 구하고 그 분포도를 나타낸 것이 그림 1이다. 주성분분석 결과로 나타난 그림에서 유구 위치별로 시료들의 분포를 살펴보면 크게 세 군(□, ▲, *)으로 분류된다는 것을 알 수 있다.

또한 주성분 1과 2에 대한 각 구성성분의 기여도를 공통성(communalities)으로 나타낼 수 있는데 각 주성분에 대하여 각 구성성분이 기여하는 정도를 표 3에 나타내었다. 즉, 주성분 1에 대한 기여도가 50% 이상으로 높은 성분은 SiO₂, PbO로서 각각 81.9%, 89.5%이며, 주성분 2에서는 Al₂O₃, Fe₂O₃로서 63.1%, 53.4%이었다. 따라서 그림 1에서 세 군으로 분류되는 것은 유구에 따른 주성분 및 미량성분의 조성 차이에 기인한다는 것을 알 수 있다.

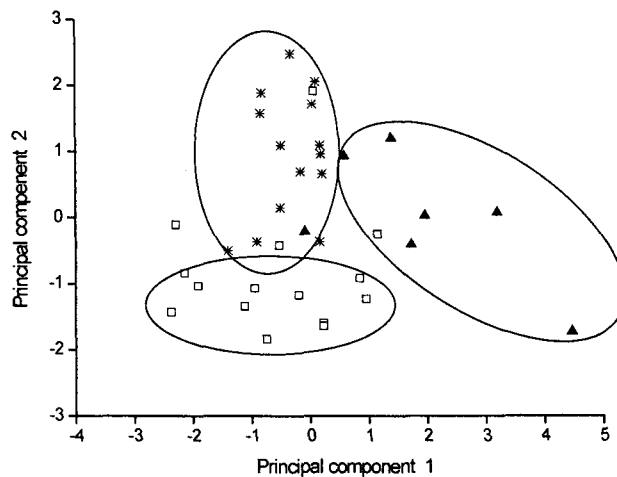


그림 1. 주성분분석(PCA)에 의한 미륵사지 납유리의 분포도(□; 강당지북편 배수로 상층, ▲; 동금당지 및 강당지, *; N14W13).

표 3. 고유벡터계수와 공통성

구성성분	고유벡터계수		공통성(Communalities)	
	주성분1	주성분2	주성분1	주성분2
Al ₂ O ₃	-0.300	-0.645	17.9	63.1
SiO ₂	-0.641	0.311	81.9	14.6
Fe ₂ O ₃	-0.220	-0.594	9.51	53.4
CuO	-0.037	-0.306	0.20	14.1
PbO	0.670	-0.202	89.5	6.11

즉, 주성분 1에서 볼 때 강당지 북편 배수로 유리(□)와 N14W13지역 유리(*)의 주성분 평균함량은 PbO 73%, SiO₂ 26.5% 정도인데 비하여 동금당지 및 강당지 유리(▲)의 평균 함량은 각각 76%, 24%로서 2~3% 정도의 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 주성분 2에서 볼 때 강당지 북편 배수로 유리(□)는 미량성분 Al₂O₃, Fe₂O₃의 평균함량이 각각 0.27%, 0.17%로서 동금당지 및 강당지 유리(▲)와 N14W13지역 유리(*)보다 다소 높았다.

또한 분석한 시료들의 구성성분간의 상관관계를 알아보기 위하여 상관계수를 구한 결과를 표 4에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 상관계수가 0.40 이상으로 높은 성분들의 조합을 살펴보면 (Al₂O₃, Fe₂O₃)가 0.526이고, 반대로 음의 값을 나타내는 원소의 조합은 (SiO₂, PbO)로서 -0.914이었다. 여기서 알루미늄과 철은 상관계수가 높고 미량으로 존재하므로 불순물로서 주원료 속에 함께 포함된 것으로 볼 수 있다. 실리콘과 납은 주성분으로서 상관계수가 큰 음의 값을 나타내고 있는데 이는 고 순도의 실리콘과 납을 별도로 준비하여 혼합하였다는 것을 의미한다.

유리에 녹색을 띠는 성분은 전이원소로서 철과 구리가 이에 해당된다. 분석데이터로 볼 때 이들 성분은 유리에 의도적으로 첨가한 것은 아니고 불순물로서 미량 섞여있었기 때문이다. 미륵사지 유리의 색깔은 대부분 녹색이지만 표 1에서 보듯이 경우에 따라 황록색을 띠는 것도 발견되는데 이것은 철 성분에 의한 것으로 산화제이철과 산화제일철의 비[Fe(III)/

표 4. 구성성분간의 상관메트릭스 표 4. 구성성분간의 상관메트릭스

구성성분	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CuO	PbO
Al ₂ O ₃	1.000				
SiO ₂	0.055	1.000			
Fe ₂ O ₃	0.526	0.033	1.000		
CuO	0.249	-0.100	-0.042	1.000	
PbO	-0.202	-0.914	-0.059	-0.053	1.000

Fe(II)]가 증가할 때 나타나는 것으로 보고10된 바 있다.

2.2. 납유리의 용융온도

미륵사지의 녹색 유리는 용융제로서 납을 사용한 것으로 확인되었다. 용해온도는 유리의 구성 성분의 종류와 함량에 따라 용해온도도 다를 것이다. 미륵사지의 납유리 35점은 표 1에서 보는바와 같이 납 및 실리카 산화물의 평균함량이 각각 73.6%, 26.1%이었다. 따라서 미륵사지 납유리의 용해온도를 추정하기 위하여 고온촬영현미경을 사용하여 온도변화에 따른 색깔 및 형태 변화를 관찰하였다. 먼저 50°C에서의 유리 상태와 590°C, 670°C 및 700°C에서 유리가 변화하는 과정을 관찰하였다. 590°C에서 색깔이 변하였으며 670°C에서는 유리가 둥글게 변하였다. 700°C에서는 유리가 완전히 구형으로 변한 모습을 볼 수 있었다. 이 결과로부터 납유리는 670°C 부근에서 용해되기 시작한다고 추정할 수 있다.

2.3. 납 원료의 산지

납은 원자번호가 82이며 질량수가 204, 206, 207, 208인 4가지의 동위원소를 가지고 있다. 질량수가 204인 ^{204}Pb 는 가장 안정한 납동위원소로서 지구 생성 시 존재하였던 것이며, ^{206}Pb 은 ^{238}U 로 부터, ^{207}Pb 은 ^{235}U 로 부터, ^{208}Pb 은 ^{232}Th 의 방사성붕괴에 의해 생성된 것이다. 방사성붕괴에 의해 생성된 납(^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb)은 처음부터 존재하던 납(^{204}Pb)과 혼합하여 어느 시기에 방연광을 형성하는데 이때 방연광은 일정한 납동위원소비($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) 값을 나타내게 된다. 즉, 각 지역의 방연광은 생성과정을 반영하는 고유한 납동위원소비 값을 나타낸다. 따라서 고대에 납유리 제조를 위해 어느 지역의 방연광을 사용하였다면 방연광의 납동위원소비는 납유리에 그대로 유지되므로 납동위원소비를 분석하면 그 산지를 추정할 수 있게 된다.

미륵사지 녹색 유리는 35점 모두는 납의 함량이 70% 이상이어서 의도적으로 납을 첨가한 것이다. 동일 유적의 납유리 14점에 대한 납동위원소비 분석결과를 표 5에 나타내었다.

1) 도식 A와 B : 납유리에서 납 원료의 산지추정을 위해 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 와 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 을 축으로 한 그림 2(도식 A) 및 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 와 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 를 축으로 한 그림 3(도식 B)를 사용하였다. 여기에서 보는 바와 같이 한국, 중국, 일본의 방연광의 영역이 잘 나타나 있어 납의 산지 분류에 유용하게 사용되고 있다. 표 5의 납동위원소비 데이터를 그림 2과 그림 3에 각각 나타내었다. 그 결과 동원 금당지에서 출토된 유리 편은 모두 한국북부 지역의 방연광에 소속된다는 것을 알 수 있다. 여기서 한국북부는 경기도 부평 이북 지역을 의미한다.

2) 선형판별식분석 : 다변수분석법중 선형판별식분석법(SLDA)으로 방연광의 분류를 위한 판별함수를 구한 바 있다. 한국, 일본, 중국 방연광 시료 134종의 전체 납동위원소비 데이

표 5. 미륵사지 출토 납유리의 납동위원소비 및 판별점수

번호	명칭	출토 위치	납동위원소비					판별점수	
			206/204	207/204	208/204	207/206	208/206	DS1	DS2
1 ^a	납유리(no.1)		17.455	15.610	38.817	0.8943	2.2238	2.362	-0.413
2 ^a	납유리(no.2)	미륵사지 동원 금당지	17.376	15.591	38.800	0.8973	2.2330	2.528	-0.497
3 ^a	납유리(no.3)		17.546	15.716	39.030	0.8957	2.2244	2.514	-0.069
4 ^a	납유리(no.4)		17.580	15.694	38.992	0.8927	2.2180	2.340	-0.129
5 ^a	납유리(no.5)		17.872	15.743	39.572	0.8809	2.2141	2.061	-0.052
6 ^b	납유리(6162)	미륵사지	17.594	15.641	39.001	0.8890	2.2167	2.180	-0.321
7 ^c	납유리(mr1)		17.436	15.612	38.886	0.8954	2.2302	2.471	-0.432
8 ^c	납유리(mr2)		17.745	15.655	39.027	0.8822	2.1993	1.814	-0.238
9 ^c	납유리(mr3)		17.349	15.598	38.841	0.8991	2.2388	2.651	-0.490
10 ^c	납유리(mr4)	미륵사지	17.454	15.616	38.903	0.8947	2.2289	2.442	-0.418
11 ^c	납유리(mr5)	동원 금당지	17.350	15.606	38.873	0.8995	2.2405	2.690	-0.471
12 ^c	납유리(mr6)		17.528	15.619	38.910	0.8911	2.2199	2.247	-0.390
13 ^c	납유리(mr7)		17.443	15.611	39.891	0.8950	2.2296	2.452	-0.435
14 ^c	납유리(mr8)		17.438	15.614	38.894	0.8954	2.2304	2.476	-0.427

a, b, c는 문헌에서 결과를 발췌한 것임.

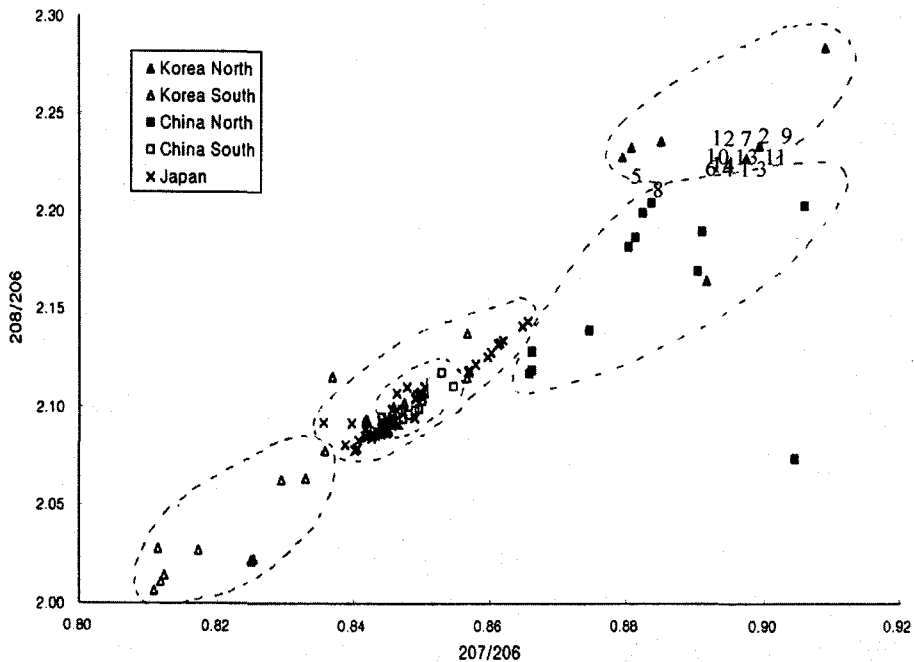


그림 2. 미륵사지 납유리 14점의 납동위원소비 분포(도식 A).

터9를 사용하여 선형판별식분석을 수행한 결과이다.

$$DS_{1,j} = -0.571X_{A,j} + 1.916X_{B,j} - 0.091X_{C,j} + 8.292X_{D,j} + 14.24X_{E,j} - 53.13$$

$$DS_{2,j} = 1.025X_{A,j} + 3.231X_{B,j} - 0.487X_{C,j} + 7.280X_{D,j} + 3.140X_{E,j} - 63.33$$

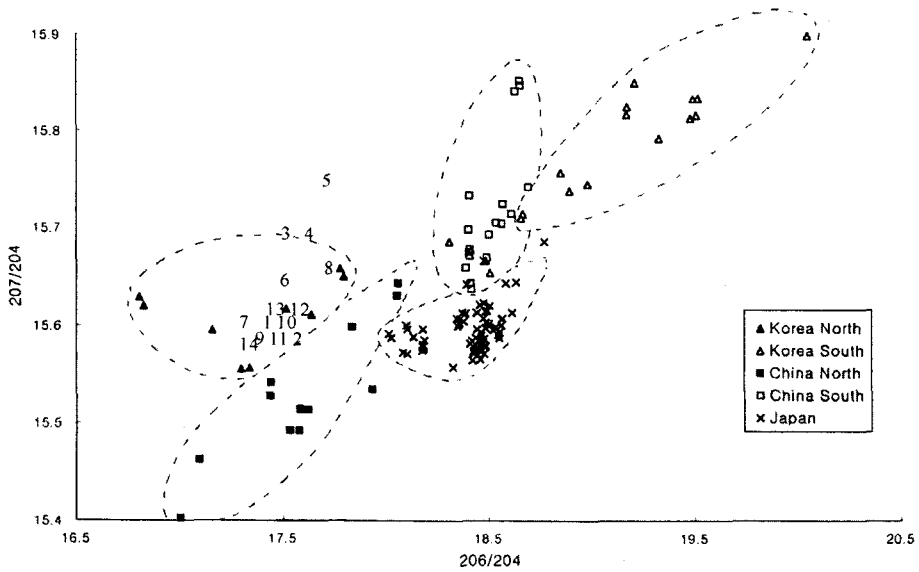


그림 3. 미륵사지 납유리 14점의 납동위원소비 분포(도식 B).

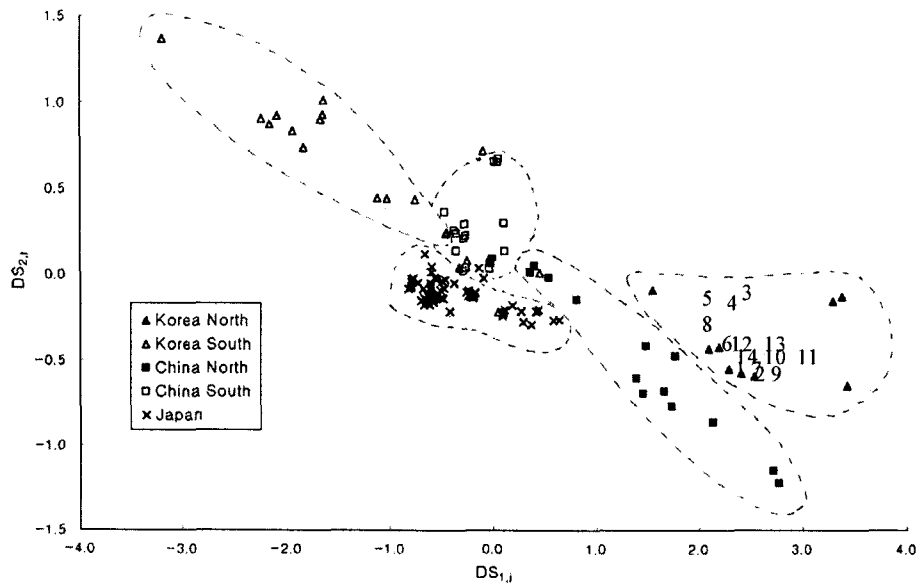


그림 4. 선형판별식분석(SLDA)에 의한 미륵사지 납유리 14점의 분포.

여기서, $X_{A,j}$, $X_{B,j}$, $X_{C,j}$, $X_{D,j}$, $X_{E,j}$ 는 시료의 각 납동위원소비 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 의 값이다.

미륵사 동원 금당지 유적 납유리 14점의 납동위원소비를 위의 판별식을 사용하여 각 시료의 판별점수를 구하고 표 5에 함께 나타내었다. 판별점수(DS_1 , DS_2)를 사용하여 그림 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 미륵사지 납유리는 모두 한국북부 지역권에 포함되었다. 위의 녹색유리 14점에 대한 납동위원소비를 사용하여 나타낸 그림 2, 3 및 4의 결과를 서로 비교해 보면 이들 산지추정 결과는 모두 일치하고 있음을 알 수 있다.

3. 맺음말

유리의 성분조성과 색깔 : 익산 미륵사지 유적의 세 지점에서 출토된 녹색 납유리 35점의 각 시료에서 각 5종의 산화물을 분석하였다. 그 결과 녹색 유리는 모두 납유리(PbO-SiO_2) 계통임을 알 수 있었다. 납의 함량은 70~79% 범위에, 실리카는 20~28% 범위에 걸쳐 있으며 평균 함량은 PbO 73.6%, SiO_2 26.1%이었다. 미량성분으로서 알루미늄, 철, 및 구리산화물은 각각 0.4% 이하, 0.3%이하 및 0.9% 이하의 값을 나타내었다. 비중은 4.4~5.4 범위에 걸쳐있었다. 유리가 녹색을 띠는 것은 불순물로 들어있는 철과 구리 산화물에 의한 것이다. 일부 유리에서는 황록색을 띠는 것도 보이는데 이는 유리에 포함된 철산화물의 비[$\text{Fe(III)}/\text{Fe(II)}$]가 증가하면서 나타나는 현상으로 알려져 있다.

유리의 특성 : 이들 시료 35점에서 얻은 각 5종의 산화물 함량데이터를 사용하여 통계분석법으로서 주성분분석(PCA)을 수행하였다. 그 결과 그림에서 세 지역으로 분류되었는데 주 성분과 미량성분의 조성 차이에 기인한다는 것을 알 수 있었다. 즉, 동금당지 및 금당지 유리(▲)는 다른 곳 유리(□, *)보다 납의 농도가 3%정도 더 높았고 실리카의 농도는 2% 낮았다. 그리고 강당지 복편 유리(□)는 다른 곳 유리(▲, *)보다 알루미늄과 철 산화물의 농도가 다소 높았는데 이는 실리카 원료로 사용한 모래에 포함된 불순물의 함량 차이인 것으로 판단된다. 또한 납유리는 실리카의 원료로서 잘 세척한 모래와 잘 정제된 산화납을 사용한 것으로 판단된다.

유리의 용해온도 : 미륵사지 납유리의 용해온도를 추정하기 위하여 고온촬영현미경을 사용하여 온도변화에 따른 색깔 및 형태 변화를 관찰하였다. 590°C에서 색깔이 검게 변하더니 670°C에서는 형태가 변하였고 700°C에서는 완전히 반구형으로 되었다. 이 결과로부터 납유리의 용해온도는 670°C 부근으로 추정된다.

납 원료의 산지 : 납유리 14점의 납동위원소비에 의한 산지추정 결과는 모두 한국 북부 산으로 추정되었다. 한국 북부는 경기도 부평지역 이북을 의미한다.

참고문헌

1. _____, 1982, 『彌勒寺址 發掘調査中間略報告』, 文化財管理局 文化財研究所.
2. _____, 1996, 『彌勒寺, 遺蹟發掘調査報告書 II』, 국립부여문화재연구소.
3. Zvigoffer, 1980, *Archaeological Chemistry*, John Wiley & Sons, pp.136-166.
4. 김규호, 2001. 12, 「한국에서 출토된 고대유리의 고고화학적 연구」, 중앙대학교대학원 화학과, 박사학위논문.
5. Brill, R. H and J. M. Wampler, 1967, *American Journal of Archaeology*, pp.71.
6. 조경미, 유혜선, 강형태, 1999. 9, 「황남대총 98호분 출토 유리의 과학적 분석」, 『박물관 보존과학』 창간호, 국립중앙박물관, pp.61-74.
7. 김규호, 허우영, 김동원, 1998, 「SEM-EDS를 이용한 경남 김해 양동리 출토 유리구슬의 분석 고찰」, 『보존과학회지』, 한국문화재보존과학회, vol. 1, No. 1, pp.23-30.
8. Coomans, D and Massart, D.L. 1979, *Multivariate Analysis*, Anal. Chi. Am. Acta, vol. 112, pp.97.
9. 馬淵久夫, 平尾良光, 1987, 「東アジア鉛鑛石の鉛同位體比」, 『考古學雜誌』 73卷, 2號, pp. 199-245.
10. Mirti, P., David, P., Gulmini, M. and Sagui L, 2001. 'Glass fragments from the Crypta Balbi in Rome: The composition of eighth-century fragments', *Archaeometry*, 43, 4, pp. 491-502.