考古資料의 自然科學 應用(II)

- 益山 彌勒寺址 납琉璃의 製造 및 流通 -

Application of Science for Interpreting Archaeological Materials(II)

- Production and Flow of Lead Glass from Mireuksa Temple -

강 형 태 국립중앙박물관보존과학실
김 성 배 문화재청매장문화재과
허 우 영 호암미술관문화재보존연구소
김 규 호 공주대학교문화재보존과학과

Ⅰ. 머리말

백제 최대의 가람 미륵사지(사진 1)는 전북 익산시 금마면 기양리에 위치하고 있으며 백제 무왕(AD 600 641)때 창건되어 17세기 전후까지 사용된 사찰로 알려져 있다. 1980년부터 1994년까지 15년 간 국립문화재연구소 미륵사지발굴조사단 및 국립부여문화재연구소에 의하여 발굴조사가 실시되었으며 이후 1996년도까지 보고서 발간작업 및 보완조사가 이루어 졌다[1,2,3]. 현재는 사역의 대부분이 정비되었고, 동탑은 복원되었으며 서탑은 해체조사중이다. 발굴조사 결과 백제시대 미륵사의 가람은 1탑과 1금당을 기본단위로 하는 하나의 원(院)이 나란히 세 곳에 배치된 삼원병치식(三院竝置式) 가람배치로서 각 구역은 회랑으로 서로 이어지며 강당을 공유하고 있음을 알게 되었다(그림 1). 유구로서는 중문지, 탑지, 금당지, 강당지, 회랑지, 승방지, 및 연못지 등이 조사되었고 유물로서는 기와와 토기, 자기들이 주류를 이루는 가운데 청동제품, 녹색 유리제품, 석제 및 목제품들도 출토되었다. 시기적으로 백제시대뿐 아니라 조선시대에까지 이르는 18,710점의 방대하고 다양한 유물이 출토되어 백제시대 이래로 익산지역의 역사와 문화를 이해하는데 많은 도움이 되고 있다[2,3,4].

그런데 미륵사지에서 출토된 유물 중 관심을 끄는 것으로 녹색의 판상 유리가 있다[3]. 사역의 거의 전지역에서 판상(板狀)의 녹색 유리 편이 출토되었는데 특히 동원(東院)의 금당지(金堂址)와 탑지(塔址) 주변에서 다량으로 출토되었다. 최근까지 국내의 발굴 유적 중에는 이와 같은 유형의 판유리가 나온 예가 없고 그 양도 상당하여 어떠한 용도로 사용됐는지 등에 관한 여러 의견이 제기된 바 있다. 일부 연구자들은 금당의 벽체를 장식하기 위하여 유리판으로 사용하였을 것이라고 언급한 바 있으나 타당성을 입증하지 못하였고[3], 한편에서는 탑과 금당이라는 중요한 건물에서 전혀 전(塼)이 사용되지 않고 있다는 점과 관련해 탑과 금당사이의 흙바닥에 이 판유리를 깔지 않았을까 하는 가능성을 제시하였다[3].

이렇듯 미륵사지에서 출토된 다량의 녹색 유리는 특수한 용도로 사용되었을 가능성이 높아 고고학적인 성격 규명에 중요한 자료로 판단되고 있다[3,4]. 그러나 최근까지 어느 유적에서도 이와 같은 유리가 발견된 바 없고 또 모양이 단순하여 형태학적으로도 검토가 어렵다. 따라서 우선 유리의 과학적 조사와 분석을 토대로 그 특성을 밝히는 연구가 수행되어야 한다.

고대 유리를 대상으로 과학적 연구를 수행할 경우에는 몇 가지 관점에서 분석이 이루어진다. 즉, 이 판유리를 어떠한 원료를 사용하여 어떻게 제조 되었는지, 그 배합비는 어떠한지 그리고 유리의 색깔을 내기 위해 어떤 성분을 의도적으로 첨가했는지를 조사하면

당시 유리 제작에 대한 유익한 정보를 얻을 수 있다[5 16]. 고대 유리는 주성분이 실리카로서 모래 또는 자갈을 분쇄하여 주제(former)로 사용하는데 여기에 용융제(modifier)를 섞어 녹여서 제조하는 것이 보통이다. 물론 실리카를 녹여 순수한 실리카 유리를 만들 수 있지만 용해온도는 1,700 ℃ 이상으로서 고대의 기술로는 이루기 어려운 온도이다. 그래서 보통 실리카에 용융제로서 천연소다, 나무 재 또는 초재류를 사용하는데 어떤 경우에는 납을 첨가하기도 한다. 그러면 유리의 용해온도를 700 900 ℃까지 낮출 수 있어 작업하기가 용이하다[5]. 그러나 물에 녹기 쉽고 내구성이 약해서 불안정하므로 안정제(stabilizer)를 첨가하는데 이 안정제는 대부분 나무 재의 부산물에 함유되어 있다. 또한 유리에 색깔을 넣기 위해서 철, 구리, 코발트, 망간 등 착색제를 첨가하지만 불순물로 섞여 있는 성분들에 의해서도 여러 가지 색깔을 나타내기도 한다[5,6,10,11].

따라서 고대 유리의 과학적 연구는 유리를 제조하기 위해 사용한 용융제와 안정제의 성분조성을 분석하여 유리의 특성을 분류하고 색깔을 내는 착색제 분류 연구에 집중이 된다. 즉, 성분조성에 따라 소다유리, 칼리유리, 납유리 및 납-바륨유리 중 어느 계열에 속하면서 어떠한 배합 비를 갖는 지 또 유리의 색깔을 나타내는데 어떠한 성분이 착색제로서 주요한 역할을 하는지를 밝혀내는 것이다[10,11]. 그리고 유리에 납이 함유된 경우에는 납동위원소비(lead isotope ratio)를 분석하여 원료의 산지를 추정할 수 있는 방법이 개발되어 있다[5,11,12]. 이러한 일련의 과학 분석 결과는 당시 지역 문화권의 유리제조 기술, 사용 원료의 특성 뿐 아니라 유리제품의 유통(유출 또는 전달) 관계를 밝힐 수 있는 과학적 근거가 마련된다[17 21].

본 연구를 위하여 국립부여문화재연구소에서 소장하고 있는 미륵사지 출토 녹색 유리편 35점에 대한 몇 가지 분석을 수행하고 그 결과를 정리하였다. 유리 편 시료들은 미륵사지내 강당지 북편 배수로 상층(N13), 동금당지 및 강당지, N14W13 등지에서 수습된 것이다. N14W13지점은 사역 중심 곽에서 서북쪽 바깥으로 약간 벗어난 곳이다. 시료들 중에는 층위 상으로 백제시대 층 뿐 아니라 통일신라나 고려시대에 형성된 층위에서 수습된 것도 있다. 그러나 백제시대 이후에 형성된 층에서 출토된 것이라 하더라도 백제시대 층에서 출토되는 유리 편과 색상이나 형상이 유사하고, 일부 백제유물(와편・토기편)들도 함께 출토되어 백제 때 제작되었지만 후대에 폐기된 것으로 추정되는 것들이다. 각 유리 편 시료의 분석을 위해 전자현미경에 부착된 에너지분산형 X-선분석기(EDS)를 사용하여 주성분 및 미량성분의 함량을 결정하였다. 고대유리의 분석을 위해서는 주로 전자현미경에 부착된 에너지분산형 X-선분석기를 사용하는데 이 방법은 유리의 구조 및 결정물질을 확인할 수 있고 미세 결정을 분석할 수 있다는 장점이 있다[11 16]. 이들 분석 데이

터의 해석 방법으로서는 다변수분석법[22] 중 주성분분석(principal component analysis : PCA)을 채용하여 시료를 특성별로 분류하고자 시도하였다. 이 방법을 사용하면 시료의 유사성에 따라 시료의 군(group)이 어떻게 형성되는지를 알 수 있다. 그리고 고온촬영현미경(high temperature microscope)을 사용하여 온도 증가에 따른 유리의 상태 변화를 관찰하여 유리의 용융온도를 추정하였다. 일부 납유리는 열이온화질량분석기(TIMS)[17,20,21]를 사용하여 납동위원소비를 분석하였고 이로부터 납 원료를 어디에서 입수하였는지 그 산지를 추정하였다. 따라서 이러한 일련의 분석결과를 종합하고 규격화하면 미륵사지의 납유리와 타유적에서 출토된 납유리를 비교 검토할 수 있는 과학적 근거가 제시된다.

II. 분석방법

1. 시료 준비

미륵사지 유적에서 출토된 유리 시료(사진 2 참조) 35점을 광학현미경으로 관찰하여 시료의 상태, 색상 등을 기록하였다. 에틸알콜을 사용하여 분석 면의 오염물질을 제거한 다음 전처리 없이 표면에 대한 성분을 SEM에 부착된 EDS로 정성분석 하였다. 다음 정량분석을 위해 선택한 시료의 표면을 탈염수와 에틸알콜의 혼합용액(1:1)으로 표면의 오염물질을 제거하였다. 건조기로 건조시킨 유리 편을 SEM-EDS 분석시 보정원소로 사용할 Cu 표준물질(99.99%)과 함께 에폭시 수지로 정착시킨 후 1200, 2400, 4000번의 사포와 1 ㎛의 알루미나 페이스트(paste)로 연마하였다. 연마과정에서 오염된 이물질을 제거하기 위하여 초음파세척기에서 탈 이온수로 10분간 3회 세척한 후 24시간 건조시켰다.

2. 전자현미분석

유리를 정량분석하기 위하여 표준시료를 사용하였으며 표준시료는 순수물질 또는 조성을 알고있는 고순도의 물질을 사용하였다. 1차 표준물질로 사용하여 얻은 스펙트럼으로 검량파일(calibration file)을 작성하였다. 2차 표준물질(EPMA용 유리시료)의 각기 다른 부위를 분석한 다음 측정값의 평균과 표준편차를 구하여 이를 실제 조성과 비교함으로써 EDS의 정량 값에 대한 재현성을 확인하였다. 본 분석을 위하여 에너지분산형 X-

선분석기(EDS, Kevex Super, USA)가 부착된 주사전자현미경(JEOL JSM - 5910LV, Japan)를 활용하였다. 각 시료에 대하여 3개소를 분석하였고 평균과 표준편차를 구하였으며[12,13] 미륵사지 유리의 분석조건은 다음 표 1과 같다.

Beam Energy	20 KeV	**Beam Current**	1.0 nA
Distance	15 mm	**Beam Area**	60x60 μm^2
Calibration	Cu(99.99%)	**Live Time**	200 sec

<표1> 유리편 분석을위한 EDS 조건

3. 고온촬영현미경

납유리의 열적 변화를 관찰하기 위하여 고온촬영현미경(Leica, Leitz max 1500, Germany)을 사용하였다. 온도를 올려가면서 변화되는 색깔과 용융되어 변화되는 모양을 검토하였다. 50 ℃에서의 유리의 모습을 관찰하고 590 ℃, 670 ℃, 700 ℃ 에서 유리 색깔과 변화되는 과정을 관찰하여 사진으로 촬영하였다.

4. 열이온화질량분석(TIMS)

납유리 몇 점을 선택하여 납동위원소비를 측정하였다. 약 0.05mg 정도의 작은 시료를 채취하여 테프론 바이알에 넣었다. 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 1ml 정도에 녹였다. 시료를 원심분리한 다음 음이온교환수지(AG1-X8, chloride form, 100-200#)와 1N HBr을 사용하여 납을 분리하였다. 분리한 납은 Re single filament에 얹어 기초과학지원연구소의 열이온화질량분석기(Thermal ionization mass spectrometer: TIMS, Model : VG Sector 54-30)를 사용하여 동위원소비를 측정하였다. 분석결과는 표준물질(NBS SRM 981)의 측정치를 사용하여 보정한 것이다. 분석과정의 총 바닥값(total blank)은 1ng 내외이었다.

III. 데이터 해석법

고대 유리시료에서 얻은 많은 성분분석 데이터를 해석하기 위해서는 시료들의 분포도

를 한 눈에 볼 수 있도록 2차원 공간에 나타내는 통계적 방법이 중요하다. 그러한 방법으로 다변수분석법(Multivariate analysis)을 들 수 있는데 이 다변수분석법은 시료들간에 유사한 성질을 갖는 시료들끼리는 서로 모아져 같은 군(群)을 형성하게 하는 방법이다. 따라서 이 방법을 사용하면 시료들이 몇 개의 군으로 형성되는지를 알 수 있으며, 각 군에 포함된 유사한 시료들을 확인할 수 있다.

N 개의 유리 시료에서 분석된 M 개의 성분은 한 셋트의 데이터 메트릭스(N×M)를 구성하는데 이는 M 차원의 공간에 N 개의 시료점을 나타낸 것과 같다. M 차원에 나타나 있는 시료의 분포형태를 육안으로 인지할 수 있도록 2~3차원으로 나타내는 것이 필요하다. 만약 시료에 대한 사전 정보가 없는 경우에 이를 unsupervised learning 이라 하는데 여기에는 주성분분석법(PCA : principal component analysis)[22]이 있다. 주성분분석 결과로부터 시료가 몇 개의 군으로 분류되는지를 알 수 있으므로 각 군에 포함되어 있는 시료들간의 관계를 알 수 있다. 또한 각 군의 분류 규칙을 만들어 놓으면 미지시료가 여러 군들 가운데 어느 군에 속하는지 알아낼 수가 있다. 이러한 접근법은 supervised learning 이라 하며 선형판별식분석법(SLDA : statistical linear discriminant analysis)[22] 등이 사용되고 있다.

N 개의 시료에서 M 개의 변수를 분석한 시료 데이타의 메트릭스 X_{ij}(N x M)는 다음과 같이 표시된다.

$$X_{ij} = \begin{pmatrix} , & x_{12}, & \ldots\ldots & x_{1} \\ , & x_{22}, & \ldots\ldots & x_{2} \\ \cdot & & \ldots\ldots & \cdot \\ \cdot & & \ldots\ldots & \cdot \\ , & x_{N2}, & \ldots\ldots & x_{N} \end{pmatrix}$$

모든 변수가 동등한 중요성을 가지도록 원변수 x_{ij} 을 새로운 변수 z_{ij} 로 변환하는 것이 필요하다. 이런 과정을 Autoscaling 이라 하며 식 (1)과 같은 과정을 거친다.

$$z_{ij} = (x_{ij} - x_{.j})/\sigma_j \quad - (1)$$

여기서i 는1, 2, 3, ...,N 이며시료의수를나타내고, j 는1, 2, 3,.....,M 으로변수의수를나타낸다. 메트릭스기술법으로표시하면Z = $(z_{ij})_{NxM}$ 이된다. 여기서 x_{ij} 는각시료i 에서측정

한 변수 j 의 성분 벡터를 나타내며, $\bar{x}_j$ 와 σ_j 는 변수 j 의 전체 평균과 표준편차를 나타낸다. n 개의시료는m 개의변수를식(2)와같이선형결합시켜주성분값을구할수있다.

$$y_{ij} = k_1 z_{i1} + k_2 z_{i2} + \cdot \cdot \cdot \cdot + k_j z_{ij} + \cdot \cdot \cdot \cdot + k_m z_{im} \text{ - - - - - - } (2)$$

이를 메트릭스 기술법으로 표시하면 [Y]=[K][Z] 가 되며 [K] 는 새로운 변수의 고유벡터의 계수 메트릭스이다. [Z] 는 바뀌어진 새로운 변수 z_{ij} 의 데이타 메트릭스이고 [Y] 는 주성분값을 나타내는 메트릭스이다.

식(2)의 고유벡터의 계수 메트릭스는 다음과 같이 구할 수 있다. 새로운 변수 z_{ij} 의 데이터 메트릭스 [Z] 와 이를 전환시킨 전환 메트릭스 $[Z]^T$ 로 부터 분산 - 공분산 메트릭스 [R]을 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$[R] = [Z]^T[Z] \text{ - } (3)$$

메트릭스 [R] 로 부터 식(4)의 조건을 만족시키면 메트릭스 [R] 를 대각선화 할 수 있다.

$$[K]^{-1}[R][K] = \lambda_j \delta_{jk} \text{ - } (4)$$

$$\lambda_j: \text{eigenvalue}, \ \lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_m$$

$$\delta_{jk}: \text{Kronecker delta} = \begin{cases} 0 & \text{if } j \neq k \\ 1 & \text{if } j = k \end{cases}$$

식 (4)를 다시 쓰면 식 (5)와 같이 된다.

$$[R][K] = \lambda_j[K] \text{ - } (5)$$

고유값 λ_j에 대응하는 계수벡터 k_j 는 서로 직교하며 λ_j의 크기에 따라 순차적으로 구할 수 있다.

IV. 결과 및 고찰

1. 미륵사지 납유리의 성분조성 및 원료

미륵사지 유적에서 출토된 유리 편 35점 각각의 비중을 측정하고 5종의 산화물을 분석한 결과를 표 2에 나타내었다. 표에서 보듯이 미륵사지 유리 35점은 모두 주성분이 납과 실리카로 구성된 납유리(PbO-SiO_2)계통으로서 납은 70 79%, 실리카는 20 28%의

범위이다. 그리고 알루미늄, 철 및 구리 산화물은 주성분에 포함된 불순물로 미량 들어있는데 알루미늄은 0.4% 이하, 철은 0.3%이하, 구리는 0.9% 이하의 농도 값을 나타내고 있다. 납유리의 비중은 대략 4.4 5.4 범위에 있음을 알 수 있다. 유리 편의 색깔은 주로 녹색이지만 초록색과 황록색을 나타내는 것도 있으며 유리 편의 두께는 작게는 1.2mm에서 크게는 21mm 정도의 다양한 두께를 나타내었다.

부호	번호	유구위치	색깔	두께 (mm)	비중	성분조성(%)					
						Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CuO	PbO	Total
	1	강당지북편배수로상층(N13)	녹색	3.5 4.3	4.87	0.33	26.2	0.21	0.50	73.6	100.8
	2	〃	황록색	1.7 2.3	4.85	0.39	24.7	0.13	0.39	74.4	100.0
	3	〃	녹색	4.9 5.8	5.00	0.32	26.6	0.18	0.34	73.0	100.5
	4	〃	녹색	3.8 4.4	4.56	0.34	28.4	0.24	0.41	71.7	101.1
	5	〃	녹색	4.2 4.7	4.77	0.25	26.7	0.15	0.37	73.4	100.8
	6	〃	녹색	2.3 2.7	5.03	0.25	24.4	0.16	0.27	74.9	99.9
□	7	〃	녹색	3.3 4.1	4.73	0.32	27.3	0.23	0.21	71.5	99.5
	8	〃	초록색	5.3 5.8	4.72	0.34	27.5	0.11	0.79	70.4	99.1
	9	〃	녹색	4.0 4.8	4.91	0.27	24.7	0.22	0.35	74.3	99.9
	10	〃	황록색	4.0 9.5	4.68	0.23	28.3	0.21	0.27	70.6	99.6
	11	〃	녹색	2.4 3.0	4.84	0.23	26.1	0.23	0.31	74.3	101.2
	12	〃	녹색	3.0 4.3	4.79	0.13	24.6	0.06	0.93	74.4	100.1
	13	〃	녹색	1.2 2.1	4.95	0.26	23.9	0.17	0.31	74.9	99.5
	14	〃	녹색	12.5	4.76	0.14	27.4	0.04	0.09	73.6	101.3
	15	〃	녹색	4.2 4.7	4.77	0.31	26.8	0.23	0.27	73.1	100.7
	16	동금당지및강당지	녹색	15 22	4.85	0.14	24.2	0.19	0.09	76.4	101.0
	17	〃	녹색	4.3 13.6	5.18	0.07	22.9	0.08	0.46	77.7	101.2
	18	〃	녹색	8.2 15.5	4.74	0.09	26.3	0.12	0.23	74.4	101.1
▲	19	〃	녹색	5.5 8.1	5.37	0.15	19.6	0.17	0.31	79.3	99.5
	20	〃	녹색	2.5 9.2	5.01	0.12	24.1	0.13	0.24	76.3	101.0
	21	〃	녹색	9.2 9.8	4.95	0.04	24.9	0.10	0.21	74.6	99.9
	22	〃	초록색	12.2 14.2	4.85	0.13	26.3	0.21	0.28	73.8	100.7
	23	N14W13	녹색	7.5 8.2	4.84	0.17	27.1	019	0.14	73.5	101.0
	24	〃	황록색	2.8 6.8	4.70	0.06	27.2	0.13	0.20	71.3	98.9
	25	〃	황록색	4.0 7.3	4.88	0.14	26.9	015	0.13	73.6	100.9
	26	〃	녹색	8.1 12.0	4.80	0.13	26.3	0.09	0.23	73.3	100.0
	27	〃	녹색	8.1 8.9	4.80	0.10	26.0	0.12	0.23	73.1	99.6
	28	〃	초록색	9.0 15.5	4.57	0.15	27.8	0.26	0.34	72.4	100.9
鑛	29	〃	녹색	12.5 13.0	4.86	0.11	27.6	0.13	0.23	73.0	101.0
	30	〃	황록색	7.8 10.8	4.75	0.34	27.0	0.12	0.24	73.0	100.7
	31	〃	녹색	6.6 7.4	5.09	0.27	25.2	0.15	0.09	73.8	99.5
	32	〃	녹색	12.5 12.7	4.81	0.05	27.1	0.08	0.11	73.1	100.4
	33	〃	녹색	12.8 12.9	4.39	0.08	27.9	0.09	0.21	71.8	100.1
	34	〃	녹색	20.9 21.2	4.92	0.22	25.8	0.10	0.03	73.6	99.7
	35	〃	녹색	13.8 14.8	4.78	0.03	28.0	0.04	0.30	72.4	100.7
	35†	〃	황록색	13.8 14.8	4.78	0.10	26.8	0.04	0.34	72.8	100.0

<표2> 미륵사지 유리편의출토 유구 위치와색깔, 두께, 비중및성분조성(%)

† : 35번과 동일한시료에서색깔이 다른부분을 분석한결과임

(1) 주성분분석(PCA)에 의한 유리의 분류

유리가 출토된 유구 위치 별로 35점 시료의 농도 값을 표 2에 나타내었는데 이 값들이 많아서 상호 비교하기가 무척 어렵다. 따라서 이들 시료의 분포도를 작성하기 위하여 농도 값을 모두 동시에 사용하는 통계분석을 수행하였다. 그 한 방법으로서 주성분분석(PCA)을 사용하면 각 시료의 성분 농도 분포에 따라 유사한 시료는 한데 모여 군(群)을 형성하므로 시료 상호간의 비교가 용이하다[22].

앞의 글(III. 데이터해석법)에서 설명한 바 주성분분석에서 데이터의 가장 큰 가변도를 나타내는 주성분에 해당하는 고유값을 구하고 각 고유값이 전가변도에 기여하는 기여도 및 누적율을 계산하여 표 3에 나타내었다. 이 표에서 보는바와 같이 주성분 1과 주성분 2의 기여율이 크다는 것을 알 수 있는데 두 주성분의 누적율은 전가변도의 70%에 해당되는 것이다.

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

또한 주성분 1과 2에 대한 각 구성성분의 기여도를 공통성(communalities[23])으로 나타낼 수 있는데 각 주성분에 대하여 각 구성성분이 기여하는 정도를 표 4에 나타내었다. 즉, 주성분 1에 대한 기여도가 40% 이상으로 높은 성분은 SiO_2, PbO 로서 각각 81.9%, 89.5%이며, 주성분2 에서는 Al_2O_3, Fe_2O_3 이며 63.1%, 53.4% 임을 알 수 있다. 그림 2에서 세 군으로 유리가 분류가 되었는데 주성분 및 미량성분의 조성 차이에 기인한다는 것을 알 수 있다. 즉, 주성분 1에서 볼 때 강당지 북편 배수로 유리(□)와 N14W13지역 유리(锑)의 주성분 평균함량은 PbO 73%, SiO_2 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 Al_2O_3, Fe_2O_3 의 평균함량이 각각 0.27%, 0.17%로서 동금당지 및 강당지 유리(▲)와 N14W13지역 유리(锑)보다 다소 높았다.

그리고 분석한 시료들의 구성 성분간의 상관관계를 알아보기 위하여 상관계수[12,22]를 구한 결과를 표 5에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 상관계수가 0.40 이상으로 높은 성분들의 조합을 살펴보면 (Al_2O_3, Fe_2O_3)가 0.526 이고, 반대로 음의 값을 나타내는 원소의 조합은 (SiO_2, PbO)로서 - 0.914 이었다. 여기서 알루미늄과 철은 상관계수가 높고 미량으로 존재하므로 불순물로서 주원료 속에 함께 포함된 것으로 볼 수 있다. 실리콘과 납

은 주성분으로서 상관계수가 큰 음의 값을 나타내고 있는데 이는 고순도의 실리콘과 납을 사전에 별도로 준비하여 혼합하였다는 것을 의미한다.

유리에 녹색을 띠는 성분은 전이원소로서 철과 구리가 이에 해당된다[23,24]. 분석데이터로 볼 때 이들 성분은 유리에 의도적으로 첨가한 것은 아니고 불순물로서 미량 섞여있었기 때문이다. 미륵사지 유리의 색깔은 대부분 녹색이지만 표 2에서 보듯이 경우에 따라 황록색을 띠는 것도 발견되는데 이것은 철 성분에 의한 것으로 산화제일철에 대한 산화제이철의 비[Fe(III)/Fe(II)]가 증가할 때 나타나는 것으로 보고[28]되어 있다.

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

<표3> 주성분에따른 고유값과기여도 및누적율(%)

구성성분	고유벡터계수		공통성(Communalities)	
	주성분1	주성분2	주성분1	주성분2
Al_2O_3	- 0.300	- 0.645	17.9	63.1
SiO_2	- 0.641	0.311	81.9	14.6
Fe_2O_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

<표 4> 고유벡터계수와공통성

구성성분	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CuO	PbO
Al_2O_3	1.000				
SiO_2	0.055	1.000			
Fe_2O_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

<표 5> 구성성분간의 상관계수

(2) 납유리의 용융온도

미륵사지에서 출토된 녹색 유리는 앞의 성분 분석 결과에서 보듯이 용융제로서 납을 사용한 것으로 확인되었다. 용해온도는 유리의 구성 성분의 종류와 함량에 따라 용해온도

도 다를 것이다. 미륵사지의 납유리 35점은 표 2에서 보는바와 같이 성분조성이 거의 일정한데 납 및 실리카의 평균함량이 각각 73.6% 및 26.1% 이었다. 따라서 본 연구에서는 미륵사지 납유리의 용해온도를 추정하기 위하여 고온촬영현미경을 사용하여 온도변화에 따른 유리의 색깔 및 형태 변화를 관찰하였다. 먼저 50 ℃에서의 유리 상태를 관찰하였고 590 ℃, 670 ℃ 및 700 ℃에서 유리가 변화하는 과정을 볼 수 있었다. 사진 3에서 보듯이 590 ℃에서 색깔이 검게 변하였으며 670 ℃에서는 유리가 둥글게 변하였고 700 ℃에서는 유리 형태가 완전히 구형으로 변한 모습을 볼 수 있었다. 이 결과로부터 납유리는 670 ℃ 부근에서 용해되기 시작한다고 추정할 수 있다.

(3) 납 원료의 산지추정

납은 원자번호가 82이며 질량수가 204, 206, 207, 208인 4가지의 동위원소를 가지고 있다. 질량수가 204인 ^{204}Pb는 가장 안정한 납동위원소로서 지구 생성 시 존재하였던 것이며, ^{206}Pb은 ^{238}U로 부터, ^{207}Pb는 ^{235}U로 부터, ^{208}Pb는 ^{232}Th의 방사성붕괴에 의해 생성된 것이다. 방사성붕괴에 의해 생성된 납(^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb)은 처음부터 존재하던 납(^{204}Pb)과 혼합하여 어느 시기에 방연석을 형성하는데 이때 방연석은 일정한 납동위원소비($^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{206}Pb$, $^{208}Pb/^{206}Pb$) 값을 나타내게 된다. 즉, 각 지역의 방연석은 생성과정을 반영하는 고유한 납동위원소비 값을 나타낸다. 따라서 고대에 납유리 제조를 위해 어느 지역의 방연석을 사용하였다면 방연석의 납동위원소비는 납유리에 그대로 유지되므로 납동위원소비를 분석하면 그 산지를 추정할 수 있게 된다. 바꿔 말하면 이들 유리의 납동위원소비는 납유리를 제조하기 위해 가져다 쓴 방연석의 동위원소비를 의미하는 것이다.

미륵사지 녹색 유리는 35점 모두 납의 함량이 70% 이상이어서 의도적으로 납을 첨가한 것이다. 열이온화질량분석법에 의한 납유리 14점의 납동위원소비 분석결과를 표 6에 나타내었다.

① 도식 A와 B[20,21] : 납유리에서 납 원료의 산지추정을 위해 $^{207}Pb/^{206}Pb$와 $^{208}Pb/^{206}Pb$을 축으로 한 그림 3(a) (도식 A) 및 $^{206}Pb/^{204}Pb$와 $^{207}Pb/^{204}Pb$를 축으로 한 그림 3(b) (도식 B)를 사용하였다. 여기에서 보는 바와 같이 한국, 중국 및 일본의 방연석 영역이 잘 나타나 있어 납의 산지 분류에 유용하게 사용되고 있다. 표 6의 납동위원소비 데이터를 그림 3(a)와 그림 3(b)에 각각 나타내었다. 그 결과 그림에서 보는 바와 같이 미륵사지에서 출

번호	명칭	출토위치	납동위원소비					판별점수	
			206/204	207/204	208/204	207/206	208/206	DS_1	DS_2
1[a]	납유리(no.1)	미륵사지동원금당지	17.455	15.610	38.817	0.8943	2.2238	2.362	- 0.413
2[a]	납유리(no.2)	〃	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)	미륵사지동원금당지	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)	〃	17.454	15.616	38.903	0.8947	2.2289	2.442	- 0.418
11[c]	납유리(mr5)	〃	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

<표6> 미륵사지 출토납유리의납동위원소비 및판별점수
a, b, c는각문헌25, 26, 27에서결과를발췌한것임

토된 유리 편은 모두 한국북부 지역의 방연석에 속한다는 것을 알 수 있다. 여기서 한국북부는 북위 37.5°이북 지역을 의미한다. 납유리가 위치하는 방연석의 분포는 경기도 부평광산의 납동위원소비와 유사하다는 것을 알 수 있었다.

② 선형판별식분석[12,22] : 다변수분석법중 선형판별식분석법(SLDA)으로 방연광의 분류를 위한 판별함수를 구한 바 있다. 한국, 일본 및 중국 방연석 시료 134종의 전체 납동위원소비 데이터[20]를 사용하여 선형판별식분석을 수행한 결과이다.

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

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

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

미륵사 동원 금당지 유적의 납유리 14점의 납동위원소비를 위의 판별식을 사용하여 각 시료의 판별점수를 구하고 표 6에 함께 나타내었다. 표 6의 판별점수(DS_1, DS_2)를 사용하여 그림 3(c)에 나타내었는데 그림에서 보는 바와 같이 미륵사지 납유리는 한국북부

지역 범위에 포함되었다. 따라서 위의 납유리 14점에 대한 납동위원소비를 사용하여 나타낸 그림 3(a) 3(c)의 결과를 서로 비교해 보면 이들 산지추정 결과는 모두 일치한다는 것을 알 수 있다.

2. 미륵사지 납유리의 유통

위의 몇 가지 분석 결과를 종합하면 미륵사의 납유리는 자체적으로 생산되었는데 납 원료를 경기도 부평광산 부근에서 조달하여 일정한 배합 비로 유리를 생산하였다는 점에서 중요한 정보를 제공하고 있다. 따라서 이러한 미륵사지 납유리의 분석 결과를 바탕으로 타 유적에서 발견되는 납유리와 비교해 봄으로써 미륵사지 유리와 동일한 것인지, 또 동일하다면 몇 점이 발견되는지 등을 헤아리면 미륵사지 유리의 유통(유출 또는 전달) 관계를 연구할 수 있는 과학적 근거가 마련된다. 또한 미륵사지 납유리는 완성품이 아닌 판상 또는 괴상이어서 여러 형태로 가공하여 언제든지 사용할 수 있으므로 사찰 내에서 뿐만 아니라 필요에 따라서는 가공된 제품 또는 괴상의 유리를 그대로 외부에 제공했을 가능성이 있다.

실제로 몇몇 고대 유적에서 나온 납유리를 분석해 본 결과 익산 왕궁리 유적의 납유리의 성분조성과 납동위원소비가 미륵사지 납유리와 모두 일치한다는 것을 알 수 있었다

번호	명 칭	출 토 지	시대	색깔	비중	성분조성(%)				
						Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CuO	PbO
1[a]	유리팔찌(1527)	일본후꾸오까	7세기	녹색	?	0.44	25.4	0.19	1.67	70.8
2[a]	유리구슬(1529)	일본후꾸오까미야지다께고분	7세기	녹색	5.4	0.33	21.9	0.07	0.38	75.6
3[a]	유리판(1530)	일본후꾸오까미야지다께고분	7세기	녹색	5.3	0.70	25.0	0.07	0.42	74.0
4[b]	유리(도가니내부)	일본나라현아스카유적	7세기말	황갈색	?	0.10	26.1	0.11	0.05	74.2
5[b]	유리(도가니내부)	일본나라현아스카유적	7세기말	적갈색	?	0.10	32.5	0.20	0.23	72.8
6[b]	유리(도가니내부)	일본나라현아스카유적	7세기말	담녹색	?	0.10	24.4	0.10	0.05	66.7
7[a]	유리구슬(1536)	일본나라현정창원소장	8세기	갈색	5.3	0.13	23.7	0.97	0.19	72.6
8[a]	유리구슬(1537)	일본나라현정창원소장	8세기	적갈색	5.3	0.30	24.8	0.69	0.55	73.6
9[a]	유리구슬(1538)	일본나라현정창원소장	8세기	녹색	5.3	0.31	24.7	1.08	1.44	71.9
10[a]	유리구슬(1539)	일본나라현정창원소장	8세기	투명	4.4	0.19	32.8	tr	0.35	66.0
11[a]	유리구슬(1541)	일본나라현약사사지	8세기	녹색	5.3	0.025	28	0.22	0.54	70
12[a]	유리구슬(1542)	일본나라현약사사지	8세기	황색	5.1	0.061	28	0.19	0.10	66

<표 7> 일본유적 출토지별납유리의색깔, 비중및성분조성(%)
a, b는문헌29 및 30에서일부데이터를발췌한것임. tr은 trace(흔적)

(미발표). 또한 백제시대에는 이미 일본과 빈번한 접촉으로 많은 물자의 교환이 이루어졌으며 이에 대한 역사적 정황이 확보되어 있어 일본의 고대유적에서 나온 납유리와 비교해 보고자 하였다. 이와 같은 관점에서 관련 문헌 자료[29,30,31]를 조사하여 일본의 고대 유적에서 출토된 납유리의 성분조성 및 납동위원소비 데이터를 정리하여 표 7 및 표 8에 나타내었다. 표 7에서 보듯 일본에 납유리가 출현한 시기는 7 세기경으로 후꾸오까 미야지다께 유적에서 유리팔찌, 유리구슬 및 유리판이 발견되었고 나라현 아스카 유적에서는 유리도가니가 발견되어 7 세기말에 유리의 제조가 이루어졌음을 알 수 있는 자료이다. 또 나라현 정창원과 약사사지에서는 납유리 구슬이 다량 발견되었는데 8 세기로 보고 있다. 이들 12 점에 대한 성분분석 결과를 표 7에서 보면 납유리로서 다소 차이는 있으나 실리카 및 산화납의 함량은 대략 22 33% 및 66 76% 범위이며 비중은 5.3 정도이고 색깔은 대부분 녹색이다. 이들 데이터는 앞서 분석한 미륵사지 유리와 성분조성이 유사해서 상호 관련성을 충분히 나타나는 자료라고 판단된다. 또한 동 유리들에 대한 납동위원소비 데이터를 표 8에 나타내었다.

번호	명 칭	출 토 지	납동위원소비					판별점수	
			206/204	207/204	208/204	207/206	208/206	DS1	DS2
1[a]	유리팔찌(1527)	일본후꾸오까	17.082	15.621	38.554	0.9145	2.2570	3.260	- 0.381
2[a,b]	유리구슬(1529)	일본후꾸오까마야지다께고분	17.406	15.629	38.930	0.8979	2.2366	2.628	- 0.391
3[a,b]	유리판(1530)	일본후꾸오까마야지다께고분	17.361	15.620	38.889	0.8997	2.2400	2.704	- 0.422
4[b]	유리(도가니내부)	일본나라현아스카유적	18.424	15.629	38.591	0.8483	2.0946	- 0.356	0.011
5[b]	유리(도가니내부)	일본나라현아스카유적	18.413	15.611	39.533	0.8478	2.0927	- 0.410	- 0.040
6[b]	유리(도가니내부)	일본나라현아스카유적	18.122	15.342	38.894	0.84657	2.09104	- 0.735	- 0.910
7[a,b]	유리구슬(1536)	일본나라현정창원소장	18.430	15.621	38.546	0.8476	2.0915	- 0.420	- 0.002
8[a,b]	유리구슬(1537)	일본나라현정창원소장	18.433	15.627	38.567	0.8478	2.0923	- 0.399	- 0.014
9[a,b]	유리구슬(1538)	일본나라현정창원소장	18.423	15.619	38.541	0.8478	2.0920	- 0.411	- 0.010
10[a,b]	유리구슬(1539)	일본나라현정창원소장	18.440	15.628	38.578	0.8475	2.0921	- 0.408	0.017
11[a,b]	유리구슬(1541)	일본나라현약사사지	18.426	15.612	38.538	0.8473	2.0915	- 0.437	- 0.033
12[a,b]	유리구슬(1542)	일본나라현약사사지	18.413	15.607	38.522	0.8476	2.0921	- 0.427	- 0.051

<표8> 일본 유적출토지별납유리의 납동위원소비및 판별점수

a, b 는각각문헌29, 31에서일부발췌한것임

이들 납동위원소비 데이터를 사용하여 앞서 설명한 도식 A와 B 그리고 선형판별분석을 사용한 납유리 12점의 분포도를 그림 4(a) (c)에 나타내었다. 그림에는 미륵사 납유리의 분포 위치와 함께 일본의 납유리 위치를 표시하여 쉽게 비교할 수 있도록 하였다. 그림 4(a)와 (b)에서 보면 3개 시료(No. 1 3)는 일본 후꾸오까 유적에서 출토된 유리제

품으로서 모두 한국 북부지역에 포함되어 있는데 특히 후꾸오까 미야지다께 고분의 유리(No. 2, 3)는 모두 익산 미륵사지 유리와 동일한 곳에 모여 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 1번 시료는 한국산 납을 사용하였으나 미륵사 유리와는 다른 지역의 납 원료를 사용한 것으로 보인다. 그밖에 시료(No. 4 12)는 모두 일본산 납광석 지역에 뭉쳐 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 4(c)의 선형판별식분석 결과에서도 동일한 결과를 보여 주고 있다.

따라서 위의 결과를 종합하면 미륵사지의 납유리는 7세기경 일본의 후꾸오까 미야지다께 고분에서 가공된 유리제품(유리팔찌, 유리구슬, 유리판)으로 출현된다는 것을 알 수 있다. 그리고 7세기말부터는 일본 국내의 납광산에서 납을 조달하여 유리제품을 제조한 것으로 나라현의 아스카 유적에서 발견된 유리 도가니 그리고 정창원 및 약사사지의 유리제품의 분석결과에서 확인할 수 있다.

V. 맺음말

유리의 성분조성 : 익산 미륵사지 유적의 세 지점에서 출토된 녹색 납유리 35점의 각 시료에서 각 5종의 산화물을 분석하였다. 유리 편의 두께는 작게는 1.2mm에서 크게는 21mm 정도이었다. 분석 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% 이하였다. 주성분분석(PCA)을 수행한 결과 세 지점의 유리가 분리되는 것을 알 수 있는데 이는 주성분과 미량성분의 조성 차이에 기인된 것이다. 즉, 동금당지 및 금당지 유리(▲)는 다른 곳 유리(□,銻)보다 주성분인 납의 농도가 3% 정도 더 높았고 실리카의 농도는 2% 낮았다. 그리고 강당지 북편 유리(□)는 다른 곳 유리(▲,銻)보다 알루미나와 철 산화물의 농도가 다소 높았는데 이는 실리카 원료로 사용한 모래에 포함된 불순물의 함량 차이인 것으로 판단된다.

유리의 색깔, 비중 및 용해온도 : 유리 편의 색깔은 주로 녹색이지만 초록색과 황록색을 나타내는 것도 있다. 유리가 녹색을 띠는 것은 불순물로 들어있는 철과 구리 산화물에 의한 것이다. 일부 유리는 황록색을 띠는데 이는 불순물로 함유된 철산화물의 비[Fe(III)/Fe(II)]가 증가하면서 나타나는 현상으로 알려져 있다. 납유리의 비중은 대략 4.4 5.4 범위이었으며 용해온도는 670 ℃ 부근으로 추정되었다.

납 원료의 산지 : 미륵사지 납유리를 제조하기 위한 납 원료의 산지추정 결과는 모두 한국 북부 산으로 추정되었는데 위치로 보아 경기도 부평지역 광산이 유력시 된다. 한반도의 납동위원소비는 북위 37.5°를 경계로 이북과 이남으로 양분된다.

미륵사지 납유리의 유통(유출 또는 전달) : 미륵사지 납유리와 일본의 납유리를 비교하였다. 성분조성과 납동위원소비의 결과를 종합하면 미륵사지의 납유리가 7세기경 일본의 후꾸오까 미야지다께 고분에서 유리팔찌, 유리구슬 등의 가공된 제품으로 출현하였다고 판단된다. 7세기말부터는 일본 국내에서 납광석을 자체적으로 조달하여 유리제품을 제작한 것으로 나라현 아스카유적. 정창원 소장품, 약사사지에서 발견된다.

참고문헌

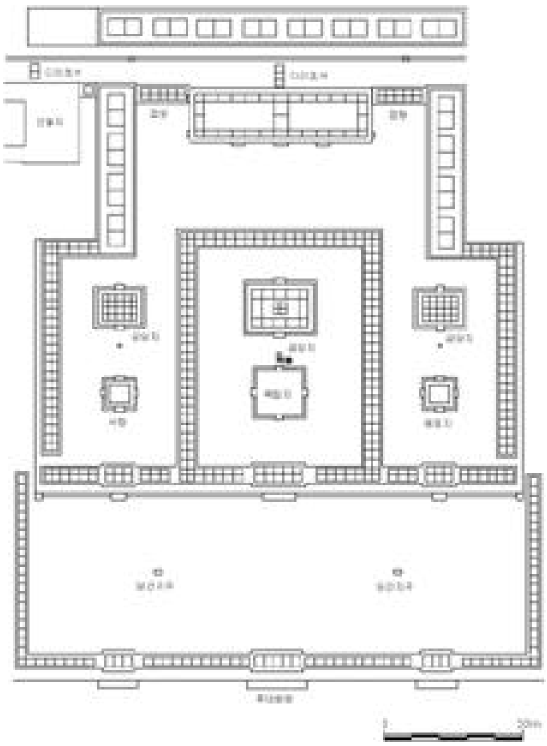
1. 文化財管理局 文化財研究所, 1982,『彌勒寺址 發掘調查中間略報告』
2. 文化財管理局 文化財研究所, 1989,『彌勒寺, 遺蹟發掘調查報告書 I』, pp.506 514
3. 국립부여문화재연구소, 1996,『彌勒寺, 遺蹟發掘調查報告書 II』
4. 전라북도익산지구문화유적지관리사업소, 1997,『미륵사지유물전시관』
5. Zvigoffer, 1980, Archaeological Chemistry, John Wiley & Sons, pp.136 166
6. S. Bowman, 1991, Science and the Past, British Museum Press, pp.37 56
7. 이인숙, 1989.「한국 고대 유리의 분석적 연구(I)」,『古文化』, 제34집, 韓國大學博物館協會, pp.79 96
8. C Lee, M.Z. Czae, S Kim, and H.T. Kang, 1992, 'Characterization of Korean Ancient Glass Pieces by Pattern Recognition Method ', Journal of the Korean Chemical Society, vol. 36, No. 1, pp.113 124
9. I. Lee, 1991, 'Analytical Data of Ancient Glasses from Southern Part of Korea ', Annual Bulletin of Seoul National University Museum ,vol. 3, Seoul National University Museum, pp.79 96
10. Koezuka T, Yamadsaki K. 1995,「Chemical Compositions of Ancient Glasses Found in Japan - A Historical Survey - 」, Glass Archaeometry, Proceedings of XVII International Congress on Glass , Chinese Ceramic Society: Beijing, pp.469 474
11. 김규호, 2001. 12,「한국에서 출토된 고대유리의 고고화학적 연구」, 중앙대학교대학

원 화학과, 박사학위논문

12. 조경미, 유혜선, 강형태, 1999. 9, 「황남대총 98호분 출토 유리의 과학적 분석」,『박물관 보존과학』 창간호, 국립중앙박물관, pp.61 - 74
13. 김규호, 허우영, 김동원, 1998, 「SEM - EDS를 이용한 경남 김해 양동리 출토 유리구슬의 분석 고찰」, 『보존과학회지』, 한국문화재보존과학회, vol. 1, No. 1, pp.23 30
14. 김규호, 허우영, 1998, 「SEM - EDS를 이용한 임당유적 출토 유리질 구슬의 재질분석」,『경산 임당유적(I VI)』, 한국토지공사 · 한국문화재보호재단, 부록 pp.183 192
15, 유혜선, 강형태, 2001. 6, 「武寧王陵出土 琉璃의 科學的 分析」,『百濟 斯麻王』, - 무령왕릉발굴 그후 30년의 발자취 - , 국립공주박물관, pp.209 214
16. 유혜선, 2000, 「부여 능산리출토 유리의 과학적 분석」,『陵寺』, 국립부여박물관 유적조사보고서 제8책, 국립부여박물관, pp.241 248
17. Brill, R. H and J. M. Wampler, 1967, American Journal of Archaeology, pp.71
18. Brill, R. H et al, 1974, Recent Advance in Science and Technology of Materials
19. Barnes I. L. et al, 1986, 'The Technical Examination, Lead Isotope Determinaton and Elemental Analysis of Some Shang and Zhou Dynasty Bronze Vessels'2nd International Conference of BUMA, Ed. Maddin R, pp.21 26
20. 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
21. 馬淵久夫, 平尾良光, 1983, 「鉛同位體比法による漢式鏡の硏究(二)」,『MUSEUM』, No.382, pp.16 26
22. Coomans, D and Massart, D.L. 1979, Multivariate Analysis, Anal. Chi. Am. Acta, vol. 112, pp.97
23. Brill, R.H, Tong S.S.C and Dohrenwend, 1991, 'Chemical Analyses of Some Early Chinese Glasses ', SCIENTIFIC RESEARCH IN EARLY CHINESE GLASS, Proceedings of The Archaeometry of Glass Sessions of the 1984 International Symposium on Glass, Beijing, September 7, 1984, A Publication of Corning Museum of Glass. pp.31 58
24. Lal, B.B, 1987, 'Glass Technology in Early India ', ARCHAEOMETRY ON GLASS, XIV International Congress On Glass New Delhi, March 2 6, 1986, Indian Ceramic Society, pp.44 56

25. 최주, 1991,「한국 고대유리의 국내제조에 대하여」,『선사와 고대』 제1집, pp.1 7
26. Brill, R.H. and Shirahata, H., 1995, PROCEEDING OF XVII INTERNATIOAL CONGRESS ON GLASS, CHINESE CERAMIC SOCIETY : BEIJING, pp.491 496
27. 平尾良光, 2001,『古代東アジア青銅の流通』, 鶴山堂 出版部, pp.63 - 84
28. 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
29. 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, vol. 11, Freer Gallery of Art, Smithsonian Institution, Dep`t of the History of Art, University of Michigan, pp.87 109
30. 肥塚隆保, 1995,「古代珪酸 ガラスの研究, - 彌生 奈良時代のガラス材質の變遷 - 」,『文化財論叢II』, 奈良文化財研究所 40週年, pp.929 967
31. Koezuka Takayasu, 2001, 'Chemical Composition and Lead Isotope Ratios of Ancient Glasses Found in Japan', Bulletin of the National Museum of Japanese History, vol. 86, pp.233 249

<사진1> 미륵사지 전경



<그림1> 미륵사지 가람배치

a. 강당지 북편배수로(N13)상층(No. 1~15)

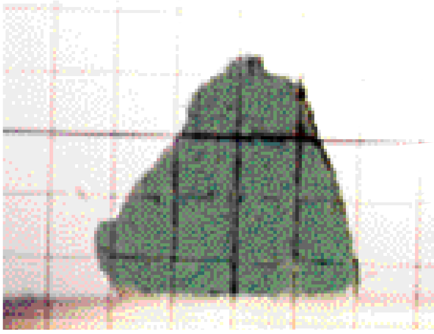
b. 동금당지및 강당지(No. 16~18)

c. 동금당지및 강당지(No. 19~22)

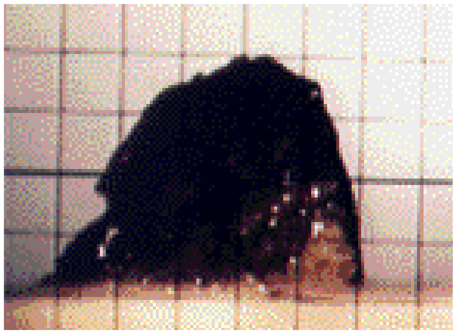
d. N14W13(No. 23~31)

e. N14W13(No. 32~35)

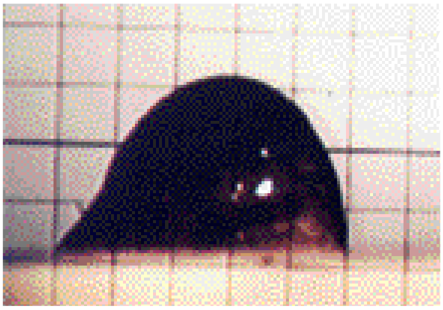
<사진2> 익산 미륵사지출토 위치별유리편



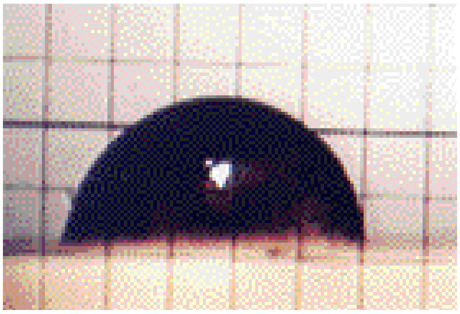
a. 50。C



b. 590。C

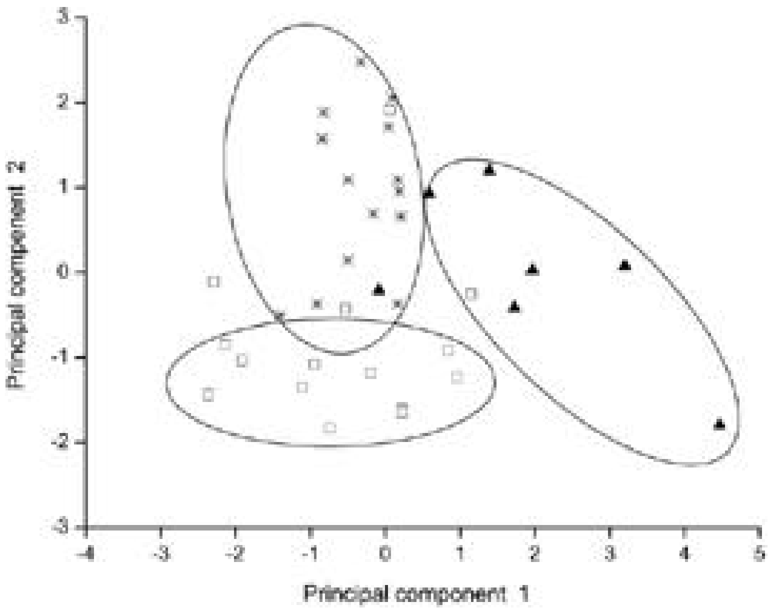


c. 670。C

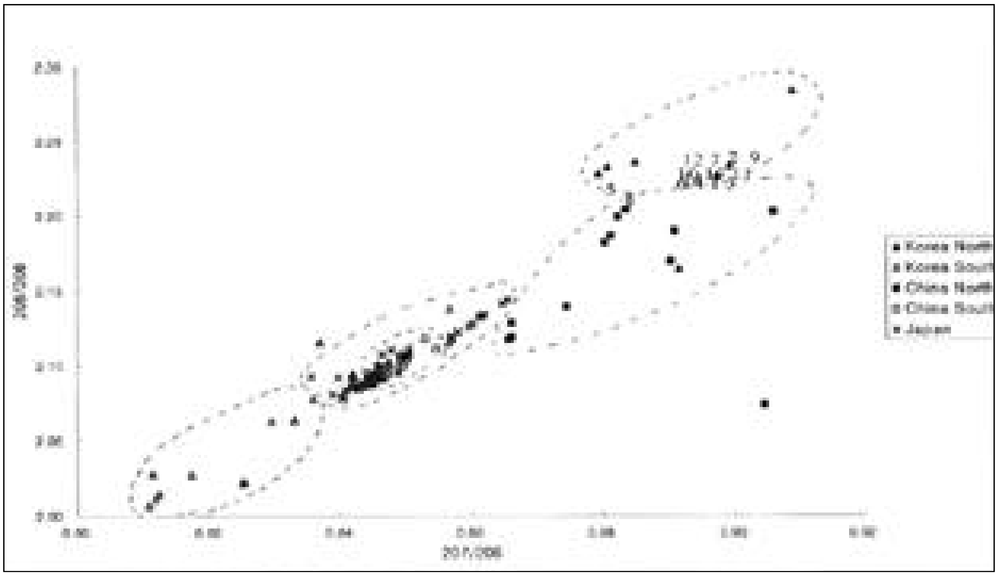


d. 700。C

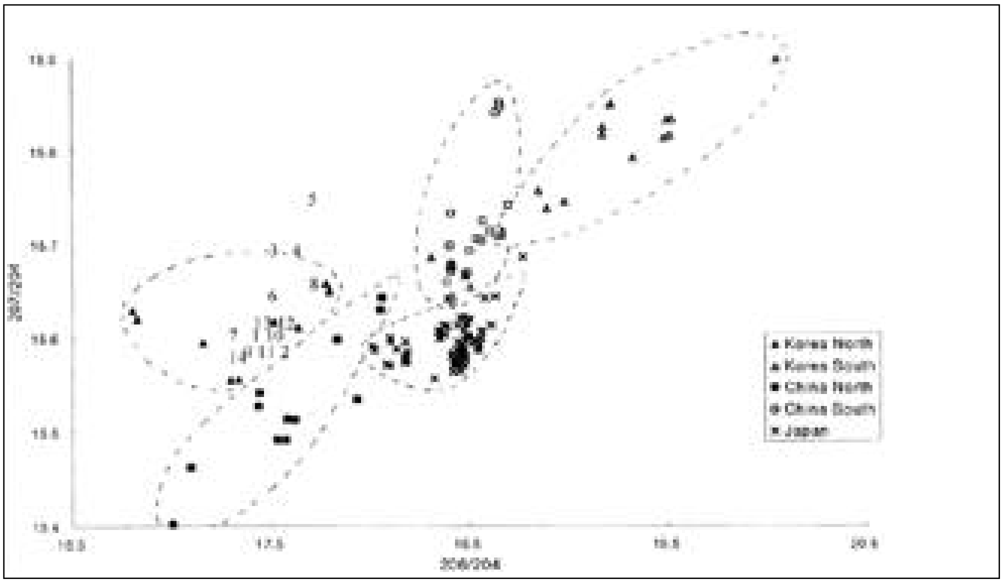
<사진 3> 납유리의온도별 고온촬영현미경 사진



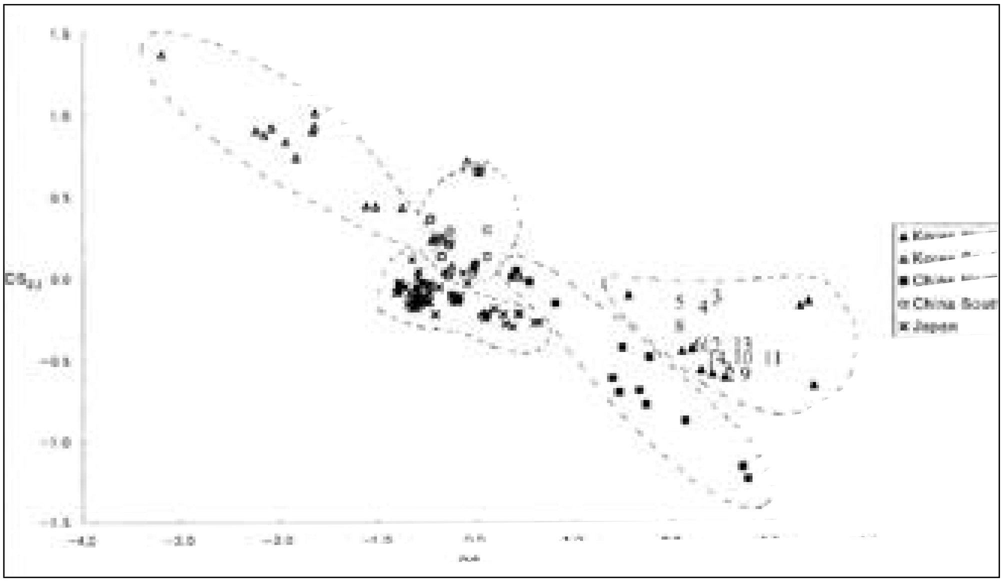
<그림2> 주성분분석(PCA)에의한미륵사지 납유리의분포도(□; 강당지북편배수로 상층,
▲; 동금당지및 강당지, ⌘; N14W13)



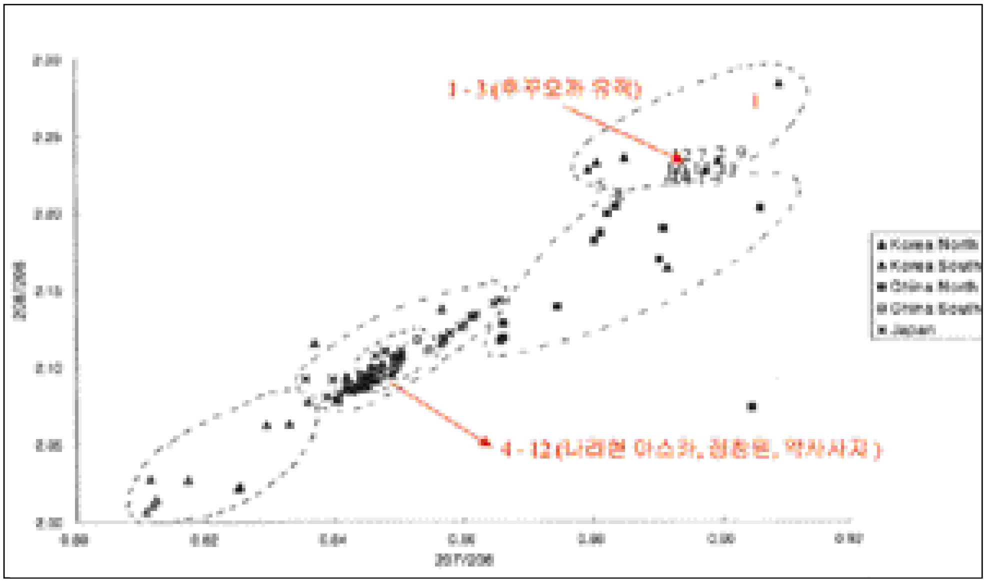
<그림3(a)> 미륵사지납유리 14점의납동위원소비분포(도식A).



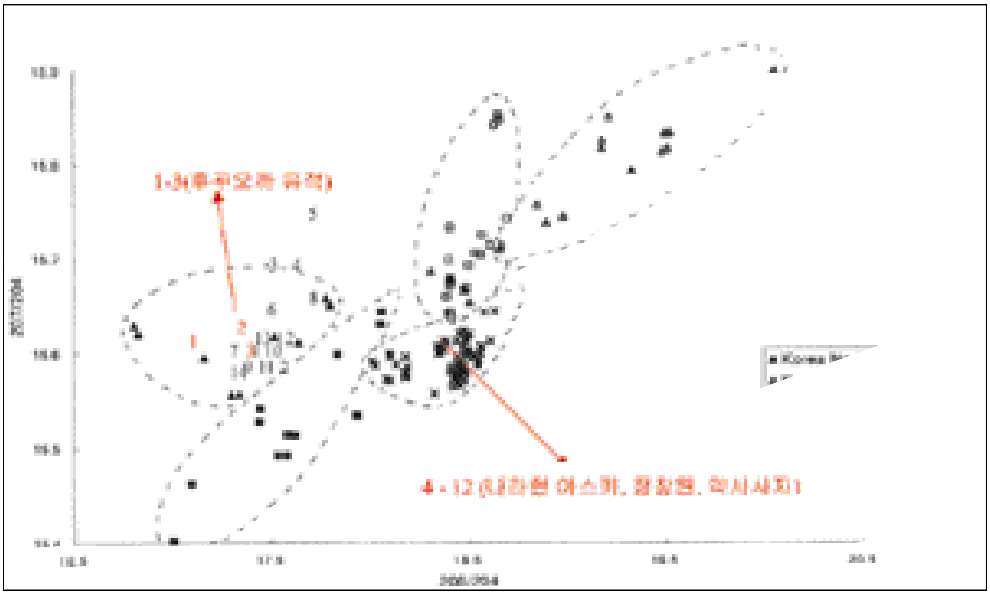
<그림3(b)> 미륵사지 납유리 14점의 납동위원소비 분포(도식 B)



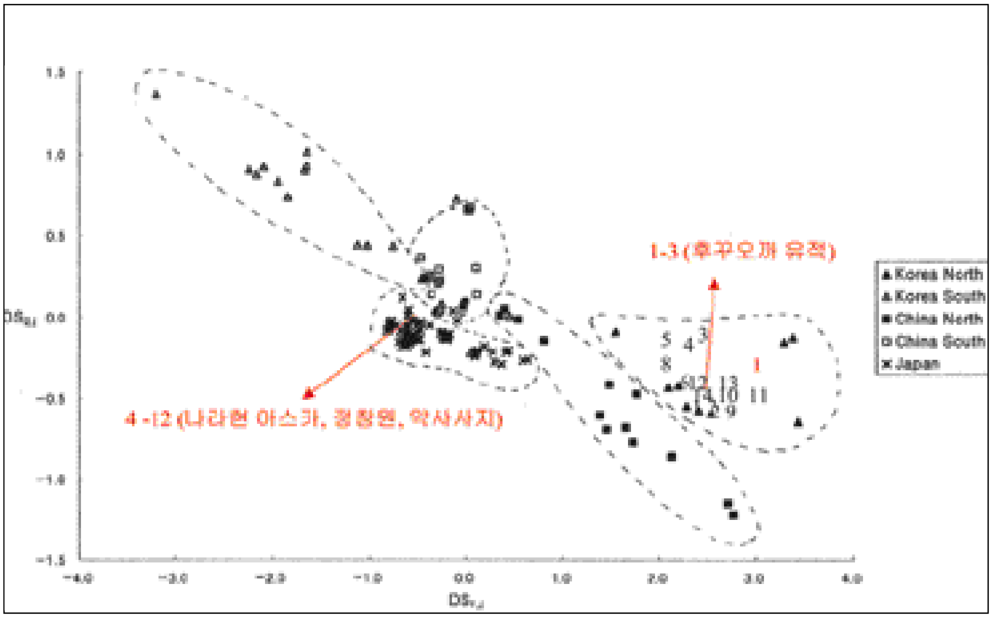
<그림3(c)> 선형판별식분석(SLDA)에의한미륵사지 납유리 14점의 분포



<그림4(a)> 미륵사지납유리 14점의납동위원소비분포도와일본유적출토납유리의동위원소비분포도(도식 A)



<그림4(b)> 미륵사지 납유리 14점의납동위원소비 분포도와일본유적 출토납유리의
동위원소비분포도(도식 B)



<그림4(c)> 선형판별식분석(SLDA)에의한 미륵사지납유리 14점의분포도와
일본유적출토유리의 납동위원소비분포

ABSTRACT

Application of Science for Interpreting Archaeological Materials(II)

- Production and Flow of Lead Glass from Mireuksa Temple -

Kang, Hyung-Tae
Department of Conservation Science, National Museum of Korea
Kim, Seong-Bae
Buried Cultural Properties Division, Cultural Properties Administration
Huh, Woo-Young
HO-AM Conservation Institute of Cultural Properties
Kim, Gyu-Ho
Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University

Glass pieces excavated from Mireuksa Temple dated 7th century A.D. were characterized by chemical composition, specific gravity and melting point. Lead isotope ratios of lead glasses were also compared with those of lead ore to attribute which lead ore was delivered for making lead glass. It was known that some lead glasses found in Japan were similar with those of Mireuksa Temple as comparing the data of chemical composition and lead isotope ratios.

Characteristics of lead glass from Mireuksa Temple Thirty five glass pieces of Mireuksa Temple were analyzed for five oxides and found that all was lead glass system(PbO-SiO_2) with the range of 70 79% for PbO and 20 28% for SiO_2. The concentrations of oxides such as Al_2O_3, Fe_2O_3 and CuO were below 0.4%, 0.3% and 0.9%, respectively. Principal component analysis(PCA) as a statistical method was carried out to classify glasses with the similarities of chemical concentrations. The result of PCA has shown that three groups of glasses were created according to the excavation positions and two major oxides(PbO and SiO_2) greatly contributed to the dispersion of glasses on principal component 1(PC1) axis and trace element oxides(Al_2O_3 and Fe_2O_3) for PC2 axis. Most of lead glasses were greenish by the efficacy of iron and copper oxides and some showed yellowish-green. The gravity of lead glasses was about 4.4 5.4 and estimated melting point was near 670 ℃. Lead isotope ratios of glasses were analyzed and found quite close to a lead ore from the Bupyeong mine in Gyeonggi-do.

Comparison with lead glasses found in Japan Lead glasses of Mireuksa Temple were com-

pared with those of Japan on the basis of chemical and physical data. Chemical compositions of Japanese lead glasses dated 7th 8th century A.D. were nearly similar with those of Mireuksa Temple but lead isotope ratios of those were separated into two groups. Three distribution maps of lead ores of Korea, Japan and China with lead isotope ratios were applied for lead glasses found in Japan. The result have shown that the locations of lead glasses from Fukuoka Prefecture coincided with the region of northen part of Korea and similar with those of Mireuksa Temple and lead glasses from Nara Prefecture dated 8th century A.D. were located in the region of Japanese lead ore. This research has demonstrated that lead glasses of Mireuksa Temple conveyed to Miyajidake site, Fukuoka Prefecture around 7th century A.D. and glass melting pots and glass beads excavated from Nara Prefecture confirmed the first use of Japanese lead ore for production of lead glasses from the end of 7th century A.D.