

고고자료의 자연과학 응용(III)

황남대총(남분)의 일부 서역계 유리제품에 대한 과학적 특성 분류

강 형 태 국립중앙박물관 보존과학팀
조 남 철 공주대학교 문화재보존과학과

I 머리말

II 고대유리의 과학적 연구법

III 분석방법

1. 시료 및 준비
2. 비중 측정
3. 전자현미경분석
4. 유도결합플라즈마분광분석

IV 결과 및 고찰

1. 유리용기의 물리적 특성
 - 1) 비중
 - 2) 기포
2. 유리용기의 화학적 특성
 - 1) 주요성분
 - 2) 주성분분석(PCA)에 의한 분류
 - 3) 미량성분

V 맺음말

2008

Annual Review in Cultural Heritage Studies

Vol. 41 No. 1

고고자료의 자연과학 응용(III)

황남대총(남분)의 일부 서역계 유리제품에 대한 과학적 특성 분류

강형태^a · 조남철^b

^a국립중앙박물관 보존과학팀 ^b공주대학교 문화재보존과학과

[투고일자 : 2008. 08. 20 / 심사일자 : 2008. 10. 01 / 게재확정일자 : 2008. 10. 10]

국문초록

경주 황남대총 남분에서 출토된 서역계 유리제품의 미세 단편(무색, 녹청색 및 감청색) 36점 각각에 대한 두께, 비중 및 기포 크기를 측정하고, 10종의 주요성분 및 13종의 미량성분 함량 데이터를 사용하여 색깔별로 유리편을 특성화하였다. 주요 성분중에서 MgO와 K₂O의 함량은 로마계유리 및 사산계유리를 구별하는 지표가 되는 산화물로써 본 분석을 통하여 황남대총 남분의 유리제품이 어떤 계통인지 분류하였다.

유리편은 모두 소다유리(Na₂O-CaO-SiO₂)이며 용융제, 안정제 및 발색제의 특성에 따라 뚜렷이 분류되었다. 구성 성분 간의 상관관계가 높은 원소의 조합은 (MgO, K₂O), (MnO, CuO) 이었다. 또한 13종(Rb, Sr, Ba, Zr, Cr, Ni, Cs, Pb, Co, Cu, Fe, Mn, Ti)의 미량성분 함량은 색깔별로 무색, 녹청색 및 감청색 유리를 확연히 분류할 수 있어 향후 서역계 유리의 제작 원료 및 제작지를 정교하게 연구하는 데 중요한 원소들임을 알 수 있다.

무색(반투명)유리 : 비중은 1.50±0.04이며 내부에 원형 및 타원형의 기포들이 일정한 방향으로 길게 나열되어 있고 큰 것은 길이가 0.35mm 정도이다. 무색유리는 소다유리이면서 CaO 및 Al₂O₃ 농도 각각 5%를 기준으로 보면 HCLA(High CaO, Low Al₂O₃)이며 MgO 및 K₂O 농도가 1.5 %이상인 HMK(High MgO, High K₂O)이다. 소다의 원료로서 식물 재를 사용하였으며 HMK이므로 사산계유리로 판단된다. 무색유리에서 착색제로 작용하는 성분의 총합은 1%이하로서 그 값이 적어 유리의 색상에 관여도가 매우 적다고 할 수 있다.

녹청색(반투명)유리 : 비중 1.58±0.06이며 내부에 0.1~0.2mm 정도의 작은 기포가 분포하고 있다. 소다유리로서 HCLA이며 HMK로 분류된다. 따라서 이 녹청색 유리도 소다의 원료로서 식물 재를 사용한 것으로 생각되며 사산계유리로 판단된다. 녹청색을 내는 착색제로 작용하는 성분의 총합은 약 4%이며 MnO, Fe₂O₃ 및 CuO의 작용에 의한 것이다.

감청색유리 : 비중 1.48±0.19이며 내부에 기포가 거의 없다. 이 유리는 HCLA이며 LMK(Low MgO, Low K₂O)로 분류된다. 이 감청색 유리는 소다의 원료로서 광물(natron)을 사용한 것으로 로마계유리의 특성을 잘 나타낸 제품이다. 녹청색을 내는 착색제로 작용하는 성분의 총합은 약 3%로서 Fe₂O₃, CuO 및 Co가 그 역할을 한 것으로 보인다.

국내에서 출토된 서역계 유리제품이 실크로드를 경유해 동아시아로 유입되고 어떻게 한국 남부에 까지 오게 되었는지, 그 제작지는 어디인지에 대한 논의가 많이 이루어지고 있다. 본 연구는 황남대총의 유리제품을 물리 및 화학적으로 특성화한 결과이며 향후 국내 또는 국외에 있는 서역계 유리제품의 제작지 및 유통경위를 추적할 수 있는 과학적 지표가 될 것이다.

주제어 : 황남대총(남분), 서역계 유리제품, 로마계유리, 사산계유리, 주요성분, 미량성분, 주성분분석(PCA)

I. 머리말

현재까지 우리나라 대형 왕릉급 고분에서 출토된 유리제품 중 유리용기는 9건 23점으로서 동양에서는 가장 많이 보유하고 있는 것으로 알려져 있다(권영필 2000: 155). 즉, 황남대총 남분에서 5점, 황남대총 북분에서 5점, 서봉총에서 3점, 천마총에서 3점, 금관총에서 2점, 금령총에서 2점, 경북 월성 안계리 4호분에서 1점, 경주 월성로 가 - 13호분에서 2점, 합천 옥전 M 1호 고분에서 1점이다(권영필 2000: 155; 이한상 2004: 147). 이들은 모두 알카리 유리로서 소위 후기(로마계 유리)라고 알려져 있으며 용기도 다양하고 세련된 모습을 갖추고 있어 동양 삼국에서 단연 으뜸의 수장품으로 꼽히고 있다(권영필 2000). 이들 유리용기는 대부분 동부 지중해 연안에서 4세기를 중심연대로 5세기 전반에 걸쳐 유행했던 것들로 보고 있으며 특히 시리아 지역에서 만들어진 후기 로마계유리로서 유형별 분포를 보면 대체로 코카서스지역, 남시베리아, 중앙아시아등 유라시아 대륙의 스텝루트를 따라 발견되는 유리제품으로 보고 있다(김원룡 1984: 1; 권영필 2000: 155).

그러면 대부분 서아시아 제품으로 보이는 이 유리용기들이 언제, 어디서, 어떻게 한국의 남쪽에까지 대량으로 유입되었는지에 대한 문제를 생각해 볼 수 있다. 이들 유리용기는 전 세계를 지역적으로 직접 연결 지어 볼 수 있는 중요한 유물이 되며, 따라서 그 정확한 산지추정과 교역 루트의 확인은 실크로드 해양로 및 스텝로를 통한 한국 고대문화와 외부와의 접촉을 검증할 수 있는 직접적인 열쇠가 된다고 볼 수 있다(이인숙 1993: 1, 이한상 2004: 147). 이를 위해서 대부분의 연구자들은 각 유리용기의 기형, 제작기법 및 장식기법을 유형별로 분류하는 연구에 집중하고 있으나 동시에 화학성분을 통한 제작지 확인과 이의 분포에 따른 유입과정을 밝혀야 할 것이다(Lee 1991: 79; 이인숙 1993: 1).

최근 국내에서는 고대 유리에 대한 과학적 연구 방법에 많은 진전이 이루어 졌고 나름대로 분석 데이터가 축적(김규호 2001; 강형태 2003: 241)되어 가고 있으며 일부 서역유리에 대한 분석(강형태 1995: 157;

조경미 외 1999: 61; 김규호 2000: 129)이 이루어진 바 있다. 또한 여러 국가별로 서역유리에 대한 적지 않은 자료들이 축적(Caley 1962; Brill 1995; Brill 1999)되고 있어 비교 연구가 가능하게 되었지만 분포하는 지역이 워낙 광범위하여(김원룡 1984: 1; 권영필 1991: 9) 그 한계가 있을 수 있다. 그리고 서역유리의 주요 화학성분 데이터에 의한 분류뿐만 아니라 제작의 추정을 위해서는 유리의 모든 가시적, 물리적 및 화학적 통합데이터를 함께 구축하여야 할 것이다.

본고는 국내에서 출토된 서역계 유리제품에 대한 과학적 연구의 일환으로서 황남대총 남분에서 출토된 유리용기의 미세 단편을 색깔별로 입수하여 여러 가지 과학적인 분석을 수행하고 그 결과를 정리한 것이다. 이들 자료는 필자가 국립문화재연구소에 근무할 당시 경주문화재연구소에서 입수한 것이며 이제 비로소 이에 대한 물리 및 화학적 데이터를 본 고에서 발표하게 되었다. 황남대총 남분에서 출토된 36개 미세 유리 편(무색, 녹색 및 감청색)에 대한 두께의 범위, 기포의 형태 및 크기, 그리고 주요성분 및 미량성분의 함량데이터를 사용하여 색깔별로 유리 편을 특성화하는 연구를 수행한 것이다.

각 유리 편 시료의 분석을 위해 전자현미경에 부착된 에너지분산형 X-선 분석기(EDS)를 사용하여 주요성분의 함량을 결정하였고 미량성분은 유도결합플라즈마질량분석법(ICP-MS)으로 함량을 결정하였다. 고대유리의 분석을 위해서는 주로 전자현미경에 부착된 에너지분산형 X-선 분석기를 사용하는데 이 방법은 유리의 구조 및 결정물질을 확인할 수 있고 미세 결정을 분석할 수 있다는 장점이 있다(Koezuka 1995; Brill 1999: 469; 김규호 2001). 이들 분석 데이터의 해석 방법으로는 다변수분석법(Coomans 1979: 97)중 주성분분석(principal component analysis: PCA)을 채용하여 시료를 분류하고자 시도하였다.

황남대총 남분의 유리용기 편에 대한 이러한 일련의 분석 결과를 종합하고 특성화하면 향후 다른 지역의 서역유리와 비교할 수 있고 유리 제작지 및 교역에 관한 확고한 과학적 증거를 제공할 것이다. 유리분석을 통해 고대 동양 문화에서의 한국의 위치를 논해 볼 수 있는 것이다(Lee 1991).

II. 고대유리의 과학적 연구법

고대 유리를 대상으로 과학적 연구를 수행할 경우에는 몇 가지 관점에서 분석이 이루어진다. 이 유리제품을 어떠한 원료를 사용하여 어떻게 제조되었는지, 그 배합비는 어떠한지 그리고 유리의 색깔을 내기 위해 어떤 성분을 의도적으로 첨가했는지를 조사하면 당시 유리 제작에 대한 유익한 정보를 얻을 수 있다(Zvigoffer 1980: 136; Ferank 1982: 71; Lambert 1998: 104). 유리는 주성분이 실리카로서 모래 또는 자갈을 분쇄하여 주재(former)로 사용하는데 여기에 용융제(modifier)를 섞어 녹여서 제조하는 것이 보통이다. 물론 실리카를 녹여 순수한 실리카 유리를 만들 수 있지만 용해온도가 1,700°C 이상으로서 이는 고대의 기술로는 이루기 어려운 온도이다. 그래서 보통 실리카에 용융제로서 천연소다, 나무 재 또는 초재료를 사용하는데 그 역할을 하는 것이 소다와 칼리이다. 그러면 유리의 용해온도를 700~900°C까지 낮출 수 있어 작업하기가 용이하다(Bowman 1991: 37; Brill 1991: 31; Mirti 2001: 491). 그러나 물에 녹기 쉽고 내구성이 약해서 불안정하므로 안정제(stabilizer)를 첨가하는데 이 안정제는 대부분 나무 재의 부산물에 함유되어 있다. 안정제로 작용하는 것은 칼슘, 알루미늄, 마그네슘이며 납을 첨가하기도 한다. 또한 유리에 색깔을 넣기 위해서 철, 구리, 코발트, 망간 등 착색제를 첨가하지만 불순물로 섞여 있는 성분들에 의해서도 여러 가지 색깔을 나타내기도 한다(Zvigoffer 1980: 136; Ferank 1982: 71; Lambert 1998: 104).

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 갖고, 또 유리의 색깔을 나타내는데 어떠한 성분이 착색제로서 주요한 역할을 하는지를 밝혀내는 것이다(Bowman 1991: 37; Mirti 2001: 491). 용융제로 쓰인 소다와 칼리의 함량은 식물재를 사용하였는지 아니면 광물을 사용하였는지 원료의 선택을 알아낼 수 있는 단서가 된다. 또한 유리에

포함되어 있는 미량성분(ppm 단위)의 종류와 함량도 중요하다. 미량성분은 실리카, 용융제 및 안정제 등 유리제조시에 자연적으로 포함되는 불순물로서 미량성분의 함량 분포 패턴은 원료의 종류 및 산지 연구에 중요한 역할을 한다. 그리고 유리에 납이 함유된 경우에는 납동위원소비(lead isotope ratio)를 분석하여 원료의 산지를 추정할 수 있는 방법이 개발되어 있다(Brill 1979: 87; 최주 1991: 1; Koezuka 2001: 929; Henderson 2005:665).

이렇듯 고대 유리시료에서 얻은 많은 성분분석 데이터를 해석하고 비교하기 위한 통계적 처리 방법으로서 다변수분석법(multivariate analysis)을 채용하고 있다(Coomans and Massart 1979: 97; 강형태 외 2003: 241). 주성분분석법(PCA : principal component analysis)은 시료들 간에 유사한 성질을 갖는 시료들끼리는 서로 모여져 같은 군(群)을 형성하게 하는 방법이다. 선형판별식분석법(SLDA : statistical linear discriminant analysis) 및 SIMCA법(statistical isolinear multiple components analysis)(Christie *et al.* 1979: 233)으로는 각 군들에 대한 수학적 분류 규칙을 만들 수 있다.

이러한 일련의 과학 분석 결과는 당시 지역 문화권의 유리제조 기술, 사용 원료의 특성 뿐 아니라 유리제품의 유통(유출 또는 전달 등) 관계를 밝힐 수 있는 과학적 근거가 된다.

III. 분석방법

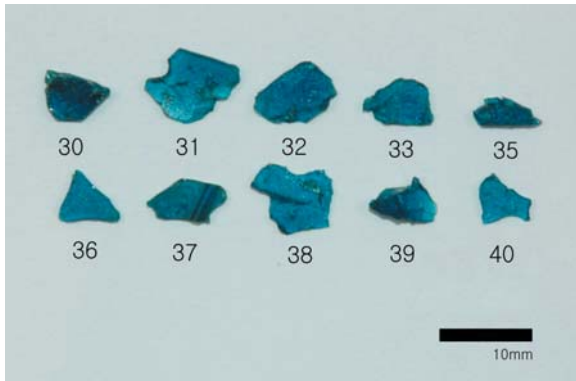
1. 시료 및 준비

황남대총 남분에서 입수한 유리 조각편들 중 미세 단편을 색깔별로 입수하였다. 이들 편들은 모두 모난 얇은 각형으로서 유리용기가 깨져 생긴 편들로서 나타날 수 있는 모습이며 <사진 1>에서 보듯 구슬류는 아닌 것이다.

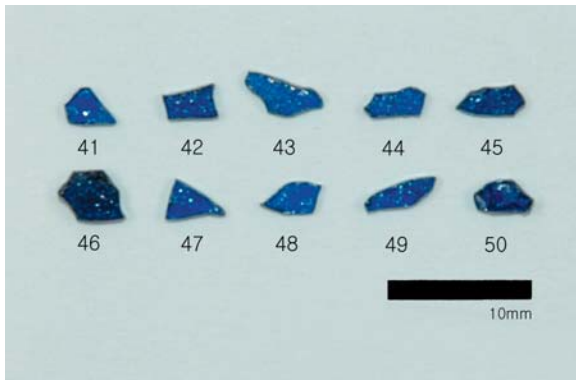
이들 편들은 색깔 별로 살펴보면 각각 두께, 색상 등이 일치하여 완형의 유리용기가 파손된 파편들이 아닌가 생각할 수 있다. 그러나 조각끼리 맞추어지지 않아 동일한 유리용기의 파편들인지 확인할 수 없으며,



(a) 유리 편 (무색 반투명)



(b) 유리 편 (녹청색 반투명)



(c) 유리 편 (감청색 불투명)

(사진 1) 황남대총(남분) 출토 유리용기 편 (시료 번호는 <표1>참조)

용기 형태나 크기를 추정하기도 어렵다.

유리 시료 36점을 광학현미경으로 관찰하여 시료의 상태, 색상, 기포 등을 기록하였다. 이들 시료를 에틸알콜을 사용하여 분석 면의 오염물질을 제거한 다음 전처리 없이 표면에 대한 성분을 SEM에 부착된 EDS로 정성분석하였다. 다음 정량분석을 위해 선택한 시

료의 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 1,200, 2,400, 4,000번의 사포와 1 μ m의 알루미나 페이스트(paste)로 연마하였다. 연마과정에서 오염된 이물질을 제거하기 위하여 초음파세척기에서 탈 이온수로 10분간 3회 세척한 후 24시간 건조시켰다.

2. 비중 측정

유리 편 의 물성에 따른 분류 방법으로서 비중 측정을 위해 비중측정용 저울(Mettler Toledo PR503)을 사용하였다. 유리 편 의 물속에서의 무게(W2), 건조기에서 105 $^{\circ}$ C, 2시간 건조시킨 후 공기 중에서의 유리 편 의 무게(W1)를 측정하여 다음 식으로 비중을 측정하였다. 비중 = [W1/(W1-W2)]

3. 전자현미경분석

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-선 분석기(EDS, Kevex Super, USA)가 부착된 주사전자현미경(JEOL JSM-5910LV, Japan)를 활용하였다. 각 시료에 대하여 3개 소를 분석하였고 평균과 표준편차를 구하였다(Koezuka 1995: 469; 김규호 2001).

4. 유도결합플라즈마분광분석

유리 시료 13점을 색깔별로 골라서 각각 60ml Teflon 용기(Saville, USA)에 넣고 혼합산(HNO₃ : HF : HClO₄ = 4 : 4 : 1)을 5ml 넣은 다음 뚜껑을 닫고 가열판위에서 130 $^{\circ}$ C로 12시간 가열하였다. 뚜껑을 열고 가열하여 건고 상태를 만든 후 위의 과정을 다시 일회 반복하였다. 각 용기에 Boric acid와 HClO₄를 넣고 건고상태까지 가열 한 후 1% HNO₃ 용액으로 20g을 만들었다. 시료 분석을 한국기초과학지원연구원에

의뢰하여 주요원소는 ICP-AES(OPTIMA 4300DV, Perkin Elmer USA), 미량원소 및 희토류원소는 ICP-MS(X series Thermochemical UK)를 사용하여 성분 함량을 결정하였다.

IV. 결과 및 고찰

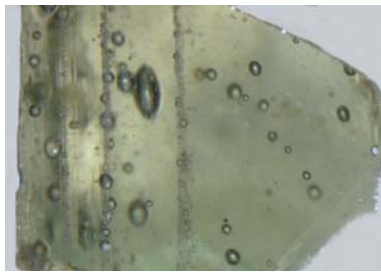
1. 유리용기의 물리적 특성

〈표 1〉 유리용기 편의 색깔, 두께, 비중 및 가시적 특징

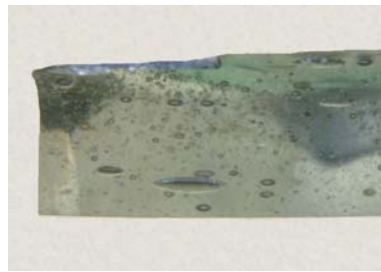
부호	번호(원번호)	색깔	투명도	두께(mm)	비중	특 성
■	1(1)	무 색	반투명	1.2~2.2	1.48	기포들의 방향성이 있음. 크기: 원형(0.15mm), 타원형(0.2x0.4mm)
	2(2)	무 색	반투명	2.1~2.3	1.55	작은 기포(0.15mm, 0.17mm) 및 진갈색의 작은 불순물 보임
	3(5)	무 색	반투명	2.1~2.6	1.51	기포들의 방향성이 있음. 원형 및 타원형 기포
	4(6)	무 색	반투명	1.7~2.0	1.51	작은 기포 및 작은 불순물 보임
	5(7)	무 색	반투명	1.8~1.9	1.52	기포들의 방향성이 있으며 기포 속에 작은 갈색 불순물들이 보임
	6(8)	무 색	반투명	2.1~2.5	1.51	작은 기포들의 방향성이 있음. 작은 갈색 불순물들이 분포함
	7(9)	무 색	반투명	2.0~2.1	1.53	기포들의 방향성이 있음. 원형 및 타원형 기포
	8(10)	무 색	반투명	2.1~2.6	1.46	기포들의 방향성이 있음. 원형 및 타원형 기포
	9(11)	무 색	반투명	3.6~4.7	1.42	기포들의 방향성이 있음. 타원형(0.25x0.15mm), (0.35x0.2mm)
	10(12)	무 색	반투명	1.8~2.3	1.52	작은 기포들의 방향성이 있음
	11(13)	무 색	반투명	3.0~3.2	1.48	기포들의 방향성이 있음. 타원형(0.35x0.2mm), (0.2x0.15mm)
	12(14)	무 색	반투명	1.7~1.8	1.49	기포들의 방향성이 있음(원형)
	13(26)	무 색	반투명	2.0~2.2	1.51	기포들의 방향성이 있음. 원형 및 타원형 기포
	14(27)	무 색	반투명	1.8~2.0	1.49	기포들의 방향성이 있음. 원형 및 타원형 기포
	15(28)	무 색	반투명	1.4~3.0	1.54	기포들의 방향성이 있음. 원형 및 타원형 기포
	16(29)	무 색	반투명	1.1~1.7	1.43	기포들의 방향성이 있음. 원형 및 타원형 기포
□	17(30)	녹 청	반투명	1.3~1.7	1.57	작은 기포들이 넓게 퍼져있음
	18(31)	녹 청	반투명	0.9~1.1	1.53	작은 기포들이 넓게 퍼져있음
	19(32)	녹 청	반투명	1.2~1.3	1.55	작은 기포들이 넓게 퍼져있음
	20(33)	녹 청	반투명	1.1~1.3	1.59	원형의 크고 작은 기포들이 퍼져있음(0.17mm, 0.13mm)
	21(35)	녹청반	투 명	1.7~1.9	1.56	작은 기포들이 넓게 퍼져있음(0.1mm, 0.17mm)
	22(36)	녹 청	반투명	1.1~1.2	1.63	작은 기포들이 넓게 퍼져있음(0.2mm, 0.15mm)
	23(37)	녹 청	반투명	1.0~1.6	1.49	작은 기포들이 넓게 퍼져있음
	24(38)	녹 청	반투명	1.0~1.2	1.56	작은 기포들이 넓게 퍼져있음
	25(39)	녹 청	반투명	0.7~2.2	1.65	작은 기포들이 넓게 퍼져있으며 내부에 긴 선이 보임
	26(40)	녹 청	반투명	0.9~1.2	1.63	작은 기포들이 넓게 퍼져있음
+	27(41)	감청색	불투명	0.89~0.92	1.48	기포 없음. 짙은 청녹색 줄무늬가 5~6줄로 띠를 이룸(0.5mm)
	28(42)	감청색	불투명	0.98~1.01	1.38	기포 없음. 짙은 청녹색 줄무늬가 2줄로 펼쳐져 있음(0.2m)
	29(43)	감청색	불투명	0.83~0.87	1.44	작은 기포가 있음(0.05mm)
	30(44)	감청색	불투명	0.90~0.95	1.67	작은 기포가 있음+
	31(45)	감청색	불투명	0.93~0.96	1.7	작은 기포가 있음
	32(46)	감청색	불투명	1.30~1.39	1.53	작은 기포가 있음
	33(47)	감청색	불투명	0.94~0.98	1.14	작은 기포가 있음
	34(48)	감청색	불투명	0.74~0.81	1.33	줄무늬가 얇게 있음
	35(49)	감청색	불투명	0.95~0.99	1.43	작은 기포가 있음
	36(50)	감청색	불투명	1.41~1.51	1.67	짙은 청녹색 줄무늬가 많으며 작은 기포들이 방향성 있음

1) 비중

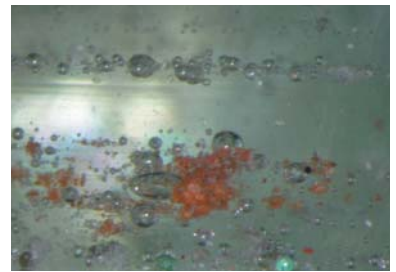
황남대총 남분에서 출토된 유리 용기 편들을 색깔 별로 정리하였다. 우선 무색의 유리 편과 녹색 유리 편은 반투명이고, 감청색 유리 편은 불투명성이다. 이들 편들의 두께 및 비중을 측정하고 그 결과를 〈표 1〉에 나타내었다. 무색 유리는 비중이 1.42~1.55 범위에 있으며 평균 1.50 ± 0.04 이었고, 녹색 유리는 1.49~1.65 범위이며 평균 1.58 ± 0.06 , 그리고 감청색 유리는 1.14~1.71 범위로서 평균은 1.48 ± 0.19 이었다. 유리 편의 두께는 일정치 않으나 무색유리는



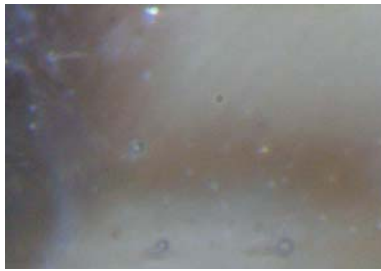
(a) no. 1 (x40)



(b) no. 5 (x16)



(c) no. 7 (x40)



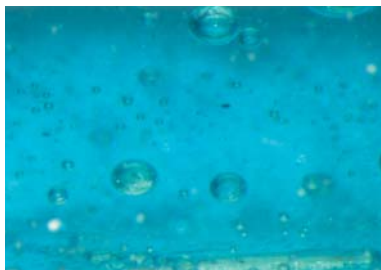
(d) no. 8 (x40)



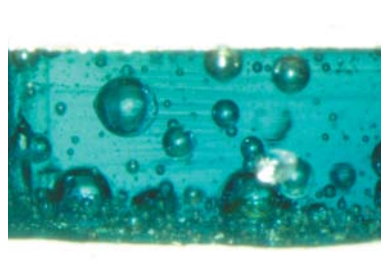
(e) no. 33 (x16)



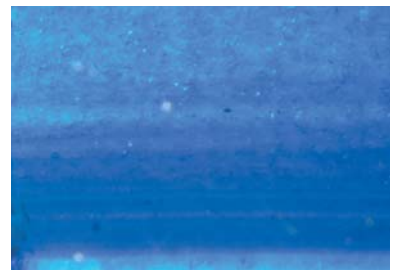
(f) no. 34 (x25)



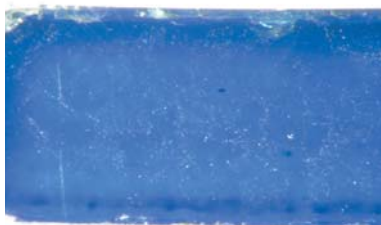
(g) no. 35 (x40)



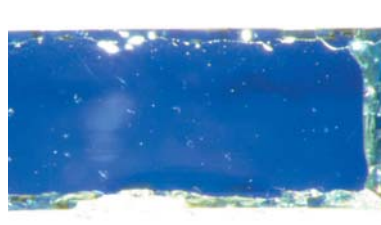
(h) no. 37 (x40)



(i) no. 41 (x40)



(j) no. 43 (x40)



(k) no. 44 (x40)



(l) no. 45 (x40)

〈사진 2〉 황남대총 (남분) 출토 일부 유리 편의 현미경 사진 (시료번호는 〈표1〉참조)

1.1~4.7mm, 녹색 유리편은 0.7~2.2mm, 감청색 유리편은 0.74~1.51mm 범위 이었다. 따라서 감청색을 띠는 유리제품은 가장 얇고 무색 유리제품이 가장 두껍다는 것을 알 수 있다.

2) 기포

유리 편의 미시적 관찰을 통하여 기포의 형태 및 크기 등 특성을 〈표 1〉에 나타내었으며 일부 시료의 미세구조는 〈사진 2〉에서 볼 수 있다. 〈사진 2〉에서

보듯 무색 유리(■)는 원형 및 타원형의 기포가 존재하는데 기포들이 한 방향을 따라 길게 나열되어 있으며 기포 안에 불순물이 들어 있는 것을 확인할 수 있었다. 타원형의 기포는 길이가 0.2~0.35mm 이었다. 녹색 유리(□)는 기포가 0.1~0.2mm 정도의 작은 기포로서 전반적으로 넓게 분포하고 있다. 감청색 유리(+)는 기포가 거의 없으며 기포의 크기도 0.05mm 로서 작은 것이다. 줄무늬가 여러 줄로 띠를 형성하고 있음을 알 수 있었고 그 띠 두께는 약 0.2~0.5mm 범위이었다. 유리

편 내부의 기포의 수, 크기 및 방향은 유리의 제작법을 유추할 수 있는 데이터가 된다. 특히 무색 유리에서는 크고 작은 기포가 많이 보이는데 이는 용기를 냉각하는 과정에서 냉각시간이 짧아 기포들이 완전히 빠져나가지 못해 생긴 것들이다.

2. 유리용기의 화학적 특성

1) 주요성분

유리편 36점에 대하여 각각 10종의 성분을 산화물 형태로 분석하였고 그 결과를 <표 2>에 나타내었으며 색깔 별로 각 산화물의 평균 및 표준편차를 <표 3>에 나타내었다. <표 2>에서 보듯 세 종류의 유리편은 모두 Na₂O 14~17%, CaO 5~6% 범위를 갖는 소다유리 (Na₂O-CaO-SiO₂)임을 알 수 있다.

소다유리를 분류할 때에는 CaO 및 Al₂O₃의 함량을 5%를 기준으로 분류하며, K₂O 및 MgO의 함량을 1.5%로 기준으로 소다원료로서 광물(Natron) 또는

<표 2> 유리용기 색깔별 부호 및 주요 성분조성(%)

부호	번호 (원번호)	색깔	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	CuO
■	1(1)	무색	14.1	2.90	1.18	70.8	4.16	6.22	0.02	-	0.62	-
	2(2)	무색	14.4	3.23	1.21	70.0	4.36	6.02	0.17	0.08	0.54	0.22
	3(5)	무색	12.5	3.30	0.87	71.9	3.75	7.22	-	0.18	0.37	0.25
	4(6)	무색	12.9	3.57	1.25	71.0	3.73	7.02	-	0.15	0.48	0.14
	5(7)	무색	14.4	3.17	1.16	70.3	4.35	5.99	0.07	-	0.60	0.21
	6(8)	무색	14.1	3.50	1.37	70.3	4.18	6.02	-	-	0.61	-
	7(9)	무색	12.6	3.59	1.10	71.2	3.79	7.13	0.09	-	0.57	0.19
	8(10)	무색	14.9	3.21	1.19	69.7	4.39	6.07	0.01	-	0.54	0.17
	9(11)	무색	14.4	3.37	1.14	70.1	4.26	6.22	-	0.08	0.56	0.0
	10(12)	무색	14.1	3.12	1.05	70.3	4.51	6.25	0.16	-	0.57	-
	11(13)	무색	13.9	3.07	1.28	70.5	4.39	6.27	0.05	0.04	0.52	0.01
	12(14)	무색	14.4	3.23	1.27	70.3	4.20	6.09	0.04	0.07	0.43	0.18
	13(26)	무색	13.6	3.87	0.69	70.8	4.12	6.50	0.56	-	0.29	0.90
	14(27)	무색	14.4	3.32	1.21	70.2	4.44	5.95	0.11	-	0.49	-
	15(28)	무색	14.2	2.94	1.21	70.7	4.18	6.25	0.22	-	0.33	0.06
	16(29)	무색	14.5	3.08	1.10	70.4	4.42	6.06	0.07	-	0.50	-
□	17(30)	녹청	13.2	3.00	2.14	71.1	4.07	5.05	0.14	0.68	0.62	2.28
	18(31)	녹청	13.9	3.06	2.09	70.3	4.03	5.38	0.09	0.55	0.66	2.57
	19(32)	녹청	14.7	2.98	2.05	69.4	4.12	5.23	0.06	0.57	0.88	2.44
	20(33)	녹청	15.0	2.67	2.17	69.3	4.26	5.24	0.05	0.63	0.71	2.10
	21(35)	녹청	15.5	2.97	2.13	68.6	4.19	5.17	0.11	0.72	0.63	2.29
	22(36)	녹청	15.7	2.87	2.05	68.3	4.33	5.23	0.13	0.68	0.72	2.46
	23(37)	녹청	15.6	2.84	2.00	68.7	4.21	5.16	0.24	0.50	0.79	2.18
	24(38)	녹청	14.7	2.75	2.12	69.5	4.23	5.14	0.20	0.57	0.79	2.44
	25(39)	녹청	15.0	2.80	1.91	69.9	4.24	5.16	-	0.46	0.68	2.68
	26(40)	녹청	15.1	2.95	1.87	69.1	4.27	5.20	0.17	0.69	0.66	2.35
+	27(41)	감청색	16.9	1.11	2.48	70.8	0.41	6.19	0.21	0.11	1.78	0.18
	28(42)	감청색	16.4	0.95	2.38	71.6	0.35	6.31	0.20	-	1.84	0.36
	29(43)	감청색	16.9	0.95	2.34	71.3	0.42	6.18	0.09	0.03	1.88	0.79
	30(44)	감청색	17.6	1.00	2.44	70.3	0.39	6.06	0.32	0.11	1.76	0.34
	31(45)	감청색	16.1	0.96	2.41	72.1	0.45	6.00	0.23	0.12	1.67	0.24
	32(46)	감청색	17.0	0.95	2.17	71.2	0.38	6.34	0.13	-	1.83	0.45
	33(47)	감청색	15.9	0.91	2.39	71.7	0.44	6.22	0.21	0.15	2.06	0.40
	34(48)	감청색	16.1	0.68	2.32	72.4	0.37	6.00	0.10	0.19	1.86	0.61
	35(49)	감청색	16.4	0.75	2.30	71.7	0.40	6.25	0.20	0.11	1.92	0.46
	36(50)	감청색	16.4	0.97	2.26	71.8	0.45	6.02	0.15	0.11	1.82	0.40

〈표 3〉 유리용기 편의 그룹별 주요 성분의 평균(%) 및 표준편차

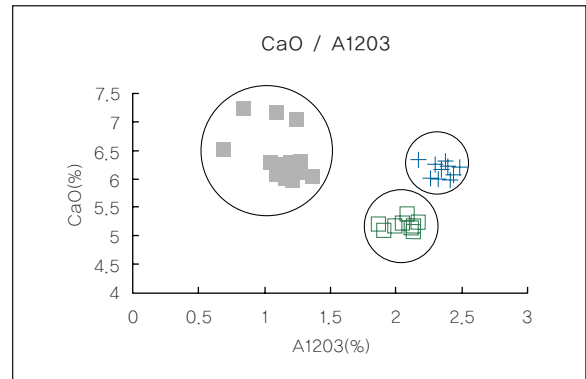
부호	그룹별 (시료수)	색깔	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	CuO
■	I(16)	무색	14.0 (0.71)	3.28 (0.26)	1.14 (0.16)	70.5 (0.53)	4.20 (0.25)	6.33 (0.42)	0.10 (0.14)	0.04 (0.06)	0.50 (0.10)	0.15 (0.22)
□	II(10)	녹청	14.8 (0.78)	2.89 (0.12)	2.05 (0.10)	69.4 (0.84)	4.20 (0.09)	5.20 (0.09)	0.12 (0.07)	0.61 (0.09)	0.71 (0.08)	2.38 (0.18)
+	III(10)	감청	16.6 (0.52)	0.92 (0.12)	2.35 (0.09)	71.5 (0.61)	0.41 (0.03)	6.16 (0.13)	0.18 (0.07)	0.09 (0.06)	1.84 (0.10)	0.42 (0.18)

식물 재를 사용하였는지를 판단하고 있다. 즉 K₂O와 MgO가 1.5% 이하면 나트론을 사용하였다고 보며, 그 이상이면 식물 재를 사용한 것으로 판단한다.

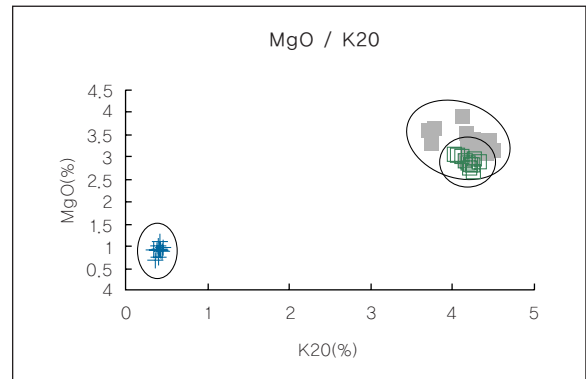
본 연구에서 소다원료를 어떤 것으로 썼는지에 대한 의미는 중요하다. 연구자들(Sayer and Smith 1974: 47; Bowman 1991: 41; Lambert 1997: 117)에 의하면 로마계유리와 사산계유리를 구분하는 방법으로서 K₂O 및 MgO의 농도를 보는데, 시리아와 팔레스타인 지역의 로마계유리는 지중해연안의 모래를 실리카원료로 사용하며 소다원은 이집트 서쪽 사막에 있는 와디(Wadi)에서 나트론(Natron)을 계속 가져다 썼다가 9세기 중반(AD 845)에는 소다 공급이 중지되어 식물 재를 사용하였다고 한다. 그러나 메소포타미아를 중심으로 하는 사산계유리는 소다원으로서 지속적으로 식물 재를 사용하였다는 내용을 제시하고 있다(Lambert 1997). 따라서 황남대총(남분)의 조성시기를 5세기로 보면 유리용기 편의들의 K₂O 및 MgO 농도로부터 이것이 로마계인지 사산계인지 여부를 판단하는데 사용할 수 있다.

무색(■)유리 : 〈표 2〉에서 CaO 및 Al₂O₃의 함량은 각각 6.0~7.0% 및 0.7~1.4% 범위이다. 따라서 이 유리는 HCLA(High CaO, Low Al₂O₃)로 분류되고 K₂O 및 MgO의 함량은 각각 3.7~4.5% 및 2.9~3.6% 범위이므로 HMK(High MgO, High K₂O)로 분류될 수 있다. 이러한 함량관계를 〈그림 1〉에 나타내었다. 〈그림 1(b)〉를 보면 녹청색 유리와 겹쳐있는 것을 볼 수 있는데 이는 동일한 식물 재를 함께 사용했다는 것을 의미한다. 무색 유리는 소다의 원료로서 식물 재를 사용한 것이므로 사산계 유리라고 추정된다. 무색유리에서 착색제로 작용하는 성분의 총합은 1%이하로서 그 값이 매우 적어 유리의 색상에 관여하는 정도가 매우 작다고 할 수 있다.

녹청색(□)유리 : 이 유리는 위에서 언급했듯이 CaO 및 Al₂O₃의 함량이 각각 약 5.0% 및 1.9~2.2% 범위이므로 HCLA로 분류된다. 그리고 K₂O 및 MgO의 함량은 각각 4.0% 정도 및 2.7~3.1% 범위이므로 HMK로 분류된다(〈그림 1 참고〉). 따라서 이 녹청색 유리도 위의 무색 유리와 함께 소다의 원료로서 식물 재를 사용한 것으로 생각할 수 있어(Brill 1999; Shortland and Tite 2000: 97) 사산계유리로 추정된다. 녹



(a) CaO vs Al₂O₃



(a) MgO vs K₂O

〈그림 1〉 황남대총(남분) 출토 유리용기 편의 색깔별 주요성분 농도 분포
무색(■), 녹청색(□), 감청색(+)

청색을 내는 착색제로 작용하는 성분의 총합은 약 4%이며 특히 MnO, Fe₂O₃ 및 CuO의 역할이 큰 것으로 판단된다.

감청색(+)유리 : 이 유리는 CaO 및 Al₂O₃ 농도를 보면 각각 6.0~6.3% 및 2.2~2.5% 범위로서 HCLA로 분류된다. 그러나 K₂O 및 MgO의 함량은 각각 0.35~0.45% 및 0.7~1.1% 범위로서 모두 1.5% 이하이므로 LMK(Low MgO, Low K₂O)로 분류된다. 이들 함량관계를 <그림 1(a)> 및 <그림 1(b)>에서 볼 수 있다. 따라서 이 감청색 유리는 소다의 원료로서 광물(natron)을 사용한 것으로 판단되며 로마계유리의 특성을 잘 나타내고 있다. 녹색색을 내는 착색제로 작용하는 성분의 총합은 약 3%로서 Fe₂O₃ 및 CuO가 그 역할을 한 것으로 보인다.

다음 유리 시료들의 구성 성분간의 상관관계를 알아보기 위하여 상관계수를 계산한 결과를 <표 4>에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 상관계수가 0.80 이상으로 높은 성분들의 조합을 살펴보면 (Na₂O, Fe₂O₃) 0.84, (MgO, K₂O) 0.96, (MnO, CuO) 0.94임을 알 수 있다. 이렇게 상관계수가 높은 것은 유리 제작에 사용한 원료에 포함되어 있는 특정 성분들이 상호 밀접한 관계를 나타낸다는 것을 의미한다. 앞서 MgO와 K₂O는 1.5% 이상이면 식물 재를 사용한 것으로 판단하는데 이 식물에 포함된 두 성분의 함량은 항상 일정한 농도관계를 유지한다는 것을 의미한다. 또한 MnO와 CuO는 발색제로서 이들 성분 함량은 미량이지만 주원료 속에서 불순물로 함께 포함된 것이라 볼 수 있다.

2) 주성분분석(PCA)에 의한 분류

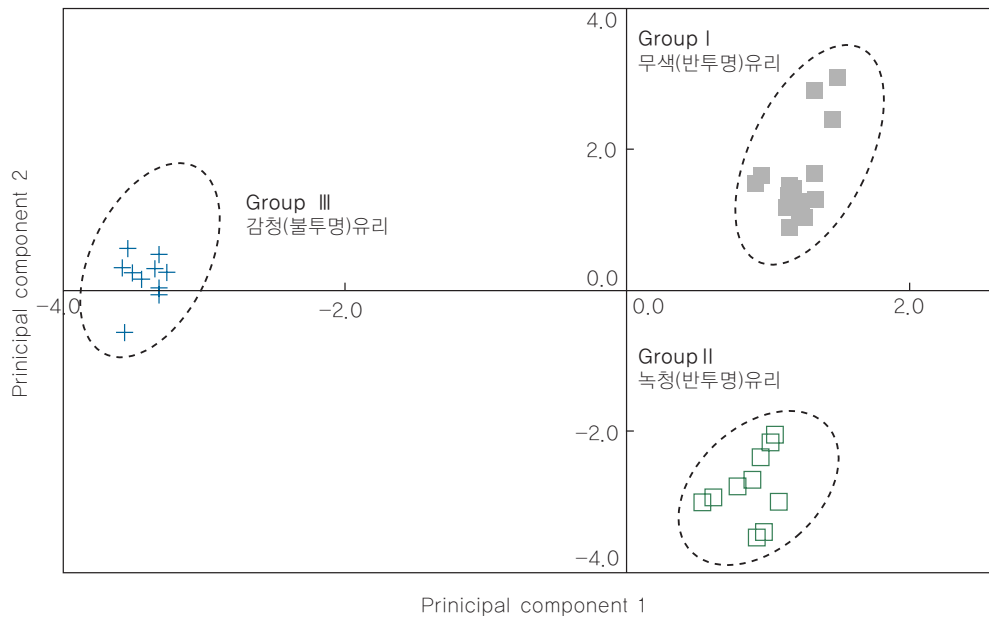
유리 편 시료들의 농도 값을 <표 2>에 나타내었는데 이 값들이 너무 많아서 유리의 종류별로 어떻게 분류되는지를 한눈에 보기 어렵다. 36개 유리 편에서 분석한 각 10종의 성분 농도 값을 모두 동시에 사용하는 통계분석을 수행하였다. 주성분분석(PCA)을 사용하면 시료의 성분 농도 분포에 따라 유사한 시료끼리는 한데 모여 각각의 군(群)을 형성하므로 각 군에 속한 시료의 성분 농도의 특성을 비교 분석 할 수 있다.

<그림 2>는 황남대총에서 색깔별로 입수한 유리 편들의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯 소다유리는 크게 세 개의 그룹으로 확연히 나뉘어 지는 것을 확인할 수 있다. PCA분석은 각 분포를 성분 농도별로 해석할 수 있는 장점이 있다(Coomans and Massart 1979: 97; Shortland and Tite 2000: 141). X축에서 유리들이 넓게 분포하는 것은 MgO, K₂O에 의한 것임을 알 수 있다. 즉 양의 방향으로 갈수록 그 농도 값은 증가한다는 것을 <표 2>에서 확인할 수 있으며 Y축에서는 양의 방향으로 갈수록 MnO, CuO의 농도 값이 떨어진다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 소다유리가 용융제와 발색제의 농도 차이로서 분류된다는 것을 의미하며 앞의 상관관계에서의 결과와도 일치한다는 것을 알 수 있다.

그림을 보면 색깔별로 뚜렷이 구분이 되고 그룹 내의 시료들이 잘 뭉쳐 있는 것으로 보아, 각 그룹의 시료들은 각각 같은 유리용기에서 떨어져 나온 파손편들이 아닌가도 생각된다.

<표 4> 성분조성간의 상관계수

부호	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	CuO
Na ₂ O	1.00									
MgO	-0.86	1.00								
Al ₂ O ₃	0.77	-0.79	1.00							
SiO ₂	0.07	-0.53	0.09	1.00						
K ₂ O	0.77	0.96	-0.69	-0.66	1.00					
CaO	-0.23	-0.04	-0.47	0.65	-0.25	1.00				
TiO ₂	0.30	-0.26	0.19	0.09	-0.31	-0.02	1.00			
MnO	-0.004	0.14	0.44	-0.58	0.28	-0.80	-0.04	1.00		
Fe ₂ O ₃	0.84	-0.98	0.79	0.52	-0.97	0.07	0.26	-0.15	1.00	
CuO	0.04	0.12	0.43	-0.58	0.26	-0.83	0.05	0.94	-0.12	1.00



〈그림 2〉 주성분분석(PCA)에 의한 유리편의 분류 결과
무색(■), 녹청색(□), 감청색(+)

3) 미량성분

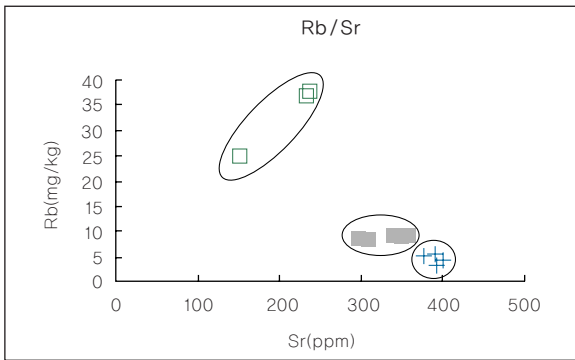
유리제품을 제작하는데 주 원료는 실리카, 식물재 또는 광물 및 착색제를 조합하여 녹여 만든다. 그래서 일반적으로 분석하는 성분은 대략 10종으로서 백분율(%) 단위로 분석하여 유리의 종류 및 특성을 연구하고 있다. 또한 주 원료에 포함되어 있는 ppm 단위의 미량성분은 주 원료의 불순물로 포함되는 성분으로서 유리의 특성 분류 및 원료의 근원을 밝히는데 중요한 역할을 한다. 따라서 될 수록 많은 미량성분의 함량

데이터를 분석하고 주요성분 분류결과를 비교하면 보다 명확히 특성별로 분류할 수 있다.

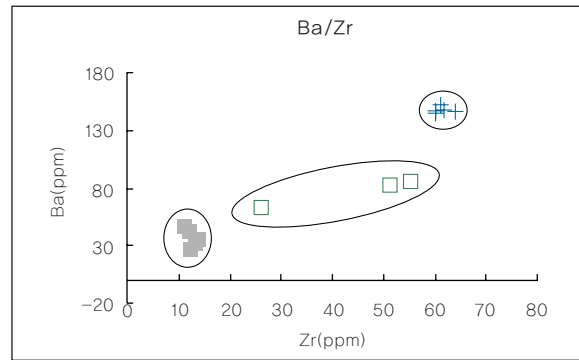
본 연구에서는 앞서 PCA결과 분류된 각 그룹에 포함된 일부 시료들을 색깔별로 13점 선정하여 유도결합플라즈마 질량분석법(ICP-MS)으로 미량성분원소 20종을 분석하였다. 이 중에서 각 그룹을 완벽하게 분류할 수 있는 미량원소 13종을 선정하여 〈표 5〉에 나타내었고 이들 관계를 〈그림 3〉(a)~(g)에 나타내었다. 그밖에 7종의 미량성분도 각 그룹을 구분하는데 좋은

〈표 5〉 유리용기 편의 색깔별 미량성분의 함량

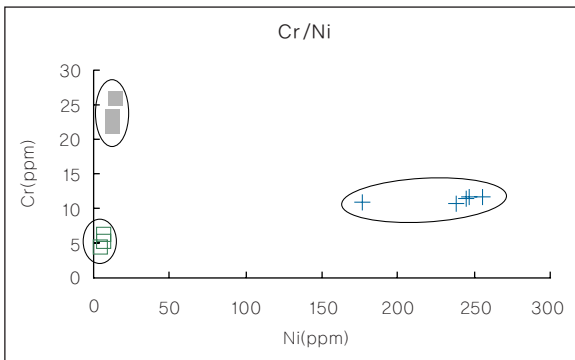
부호	그룹별 (시료수)	번호 (원번호)	색깔	Fe (%)	Mn (%)	Ti (%)	Ba (ppm)	Sr (ppm)	Cu (ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Ni (ppm)	Zr (ppm)	Pb (ppm)	Rb (ppm)	Cs (ppm)
■	I (5)	8(10)	무색	0.28	0.02	0.04	35.2	350	28	1.81	23.1	13.2	13.9	2.0	9.0	0.3
		9(11)	무색	0.28	0.02	0.03	45.7	298	22	1.90	25.6	14.6	11.2	2.6	8.4	0.1
		10(12)	무색	0.30	0.02	0.03	41.8	310	205	1.98	25.7	15.1	12.3	2.1	8.3	0.2
		11(13)	무색	0.26	0.02	0.03	26.4	341	80	1.82	21.9	13.4	12.6	2.8	9.1	0.1
		12(14)	무색	0.29	0.02	0.03	31.6	358	27	1.83	22.7	13.1	13.3	3.7	9.0	0.1
□	II (3)	18(31)	녹청	0.31	0.23	0.04	62.0	154	9810	5.7	4.2	5.8	26.2	19.8	24.8	0.4
		19(32)	녹청	0.43	0.32	0.05	85.2	234	13800	6.1	4.9	7.5	55.5	16.2	36.6	0.6
		20(33)	녹청	0.42	0.31	0.05	82.4	237	13150	6.0	6.0	7.1	51.7	16.6	37.5	0.6
+	III (5)	27(41)	감청색	1.08	0.04	0.07	146	377	2070	1426	11.7	247	63.9	1518	5.2	<0.1
		28(42)	감청색	1.12	0.04	0.07	147	390	2150	1466	11.7	256	61.6	1622	5.5	<0.1
		29(43)	감청색	1.13	0.04	0.07	145	393	2080	1406	11.0	177	60.1	1531	3.4	<0.1
		30(44)	감청색	1.12	0.04	0.07	147	399	2020	1389	10.7	238	60.0	1530	4.4	<0.1
		31(45)	감청색	1.10	0.04	0.07	152	391	2140	1418	11.5	245	61.4	805	5.1	-



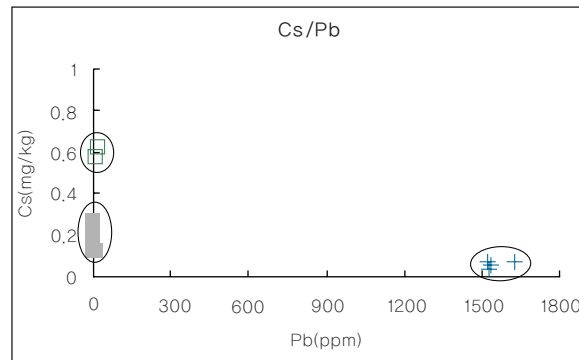
(a) Rb vs Sr



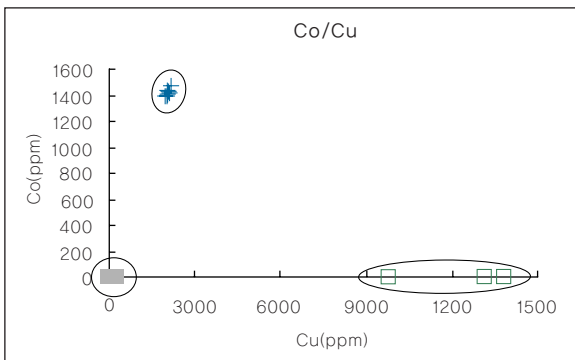
(b) Ba vs Zr



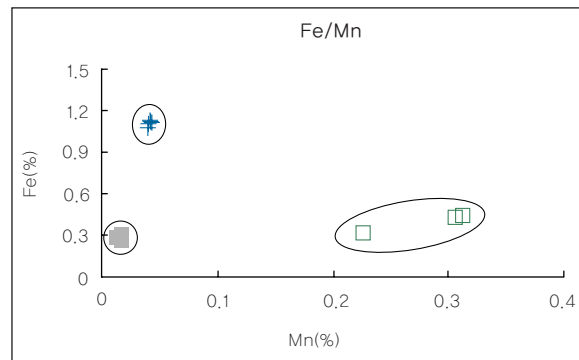
(c) Cr vs Ni



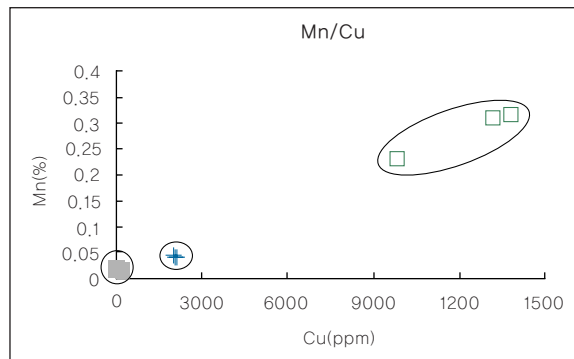
(d) Cs vs Pb



(e) Co vs Cu



(f) Fe vs Mn



(g) Mn vs Cu

〈그림 3〉 황남대총(남분) 유리 편의 색깔별 미량성분의 농도 분포
 무색(■), 녹색(□), 감청색(+)

성분임을 알 수 있었다.

앞서 언급했듯이 발색제로는 Fe, Cu, Co, Mn 등이 작용을 하는데 <표 5>에서 무색유리(■)는 발색제로서 쓰이는 성분의 농도가 적어서 색깔을 내지 못한 것으로 보인다. 녹청색(□)은 표에서 보듯 Mn 및 Cu의 함량을 보면 감청색의 경우 약 0.3% 및 1.3%로서 두 성분은 녹청색을 나타내는데 기여한 것으로 보인다. 그리고 미량성분으로 Rb 함량이 30ppm 정도로 제일 높다. 감청색(+)은 다른 색깔의 유리에 비해서 Co의 함량이 평균 약 1,400ppm으로 제일 높아 발색제로서 역할을 하였고 Fe, Cu도 역시 함께 기여한 것이다. 또한 특이한 것은 Ba, Ni, Zr 및 Pb의 함량도 표에서 보듯 제일 높은 값을 나타내고 있다는 점이다. 이러한 위의 결과는 <그림3>에서도 쉽게 볼 수 있다. <그림 3>(a)~(g)는 이들 세 가지 유리의 미량성분 함량에 뚜렷한 구분이 있다는 것을 보여주고 있다. 향후 이 13종의 미량성분 데이터 및 분포도는 향후 국내 고분에서 발견된 또는 국외에 소재하는 서역계 유리의 비교 및 제작지 문제를 해결할 수 있는 좋은 자료라고 판단된다.

감청색 유리에서 Pb는 미량으로 0.15% 정도이지만 납동위원소비(Brill *et al.* 1979: 87; Barns *et al.* 1986: 21; Koezuka 1995: 469)를 측정하면 산지의 추정 가능성이 높을 것으로 보인다. 즉, Brill 등에 의해서 작성한 지중해연안 국가들의 납동위원소비 지도를 참고로 데이터를 대입하면 어느 지역의 납광석 범위에 들어오는지 확인할 수 있다.

또한 최근하는 산소(O), 스트론튬(Sr) 및 Sr-Nd 동위원소법으로 원료의 산지 추정이 가능하다(Henderson 2005 : 665 ; Degryse and Schneider 2008 : 1993)

V. 맺음말

경주 황남대총 남분에서 출토된 유리용기는 후기 로마계 제품으로서 대부분 동부 지중해 연안에서 4세기에서 5세기 전반에 걸쳐 제작했던 것들로 보고 있다. 이 유리용기들이 과연 어디에서 흘러들어 왔는지에 대한 고미술사적 연구는 진행되고 있으나 유리 그 자체

에 대한 과학적 데이터 및 해석이 부족한 듯하다(강형태 외 1995: 157; 김규호 2000: 129).

본고는 황남대총 유리용기 편의 물리 및 화학적 특성을 규격화하고 향후 유리용기가 유래했을 것으로 예상되는 시리아 지역, 코카서스지역, 남시베리아, 중앙아시아 등 유라시아 대륙에 분포하는 서역계 유리를 비교하기 위한 연구의 일환이다.

황남대총에서 발굴된 유리용기의 미세 단편의 미시적 관찰을 통하여 기포의 형태 및 크기 등을 보면 무색 유리는 원형 및 타원형의 기포들이 일정한 방향으로 길게 나열되어 있고 길이가 큰 것은 0.35mm 이며 기포 속에 불순물이 들어 있는 것들도 있었다. 유리 편 내부의 기포의 수, 크기 및 방향은 유리용기의 제작방법을 이해하는데 유용하며 향후 서역유리와 비교에 중요한 부분이다.

황남대총의 유리용기 편(무색, 녹청색 및 감청색)은 색깔에 관계없이 모두 소다유리계통($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$)이며 모두 HCLA(High CaO, Low Al_2O_3)로 분류되었다. 무색, 녹청색 유리는 모두 HMK(High MgO, High K_2O)이어서 소다의 원료로서 식물 재를 사용한 것으로 생각되며 사산계 유리제품일 가능성이 크다. 감청색유리는 HCLA로 분류되며 LMK(Low MgO, Low K_2O)이다. 따라서 이 감청색 유리는 소다의 원료로서 광물(natron)을 사용한 것으로 판단되며 로마계통의 유리임을 시사하고 있다.

13종의 미량성분은 세 가지 유리를 명확히 구분하는 원소임을 알았으며 감청색 유리의 경우 Ba, Ni, Zr 및 Pb의 함량이 제일 높은 값을 나타내고 있다는 점이 특이하였다. Pb는 0.15% 정도 함유하고 있어 향후 납동위원소비 측정에 의한 산지의 추정이 가능할 것이다. 또한 산소 및 스트론튬 동위원소비에 대한 연구도 함께 분석해 나갈 것이다.

본 연구에서 분석한 주요성분 및 미량성분의 데이터와 분포도는 향후 국내에서 발견된 또는 국외에 소재하는 서역계 유리의 비교 및 제작지 문제를 해결할 수 있는 좋은 자료가 될 것으로 생각된다.

참고문헌

- 강형태, 김성배, 허우영, 김규호, 2003, 「고고자료의 자연과학 응용(II) -익산 미륵사지 납유리의 제조 및 유통-」, 『문화재』 제36호, 국립문화재연구소, pp.241~266.
- 강형태, 정영동, 이수영, 1995.10, 「다변량해석에 의한 신라고분 유리제품의 분류」, 『황남대총유물보존처리보고서』, 국립경주문화재연구소, pp.157~168.
- 권영필, 2000. 11, 「황남대총과 신라의 국제교류」, 『황남대총의 재조명』, 제1회 국제학술대회, 국립경주문화재연구소, pp.155~171.
- 권영필, 1991, 「한국고대미술의 중앙아시아와의 접촉」, 『실크로드와 한국문화 연구』, 유네스코한국위원회, pp.9~30.
- 김규호, 2001. 12, 「한국에서 출토된 고대유리의 고고화학적 연구」, 중앙대학교대학원 화학과, 박사학위논문.
- 김규호, 2000. 11, 「경주 황남대총 남분 출토 유리의 과학적 연구」, 『황남대총의 재조명』, 제1회 국제학술대회, 국립경주문화재연구소, pp.129~143.
- 김원룡, 1984. 6, 「고대한국과 서역」, 『미술자료』 제34호, 국립중앙박물관, pp.1~26.
- 이인숙, 1993. 5, 「삼국시대의 유리」, 『동서문화교류와 동양의 고대 유리』, 제5회 학술강연회, 인촌기념관, 고려대학교 한국학연구소
- 이한상, 2004. 1, 「적석목곽분 출토 황금장식과 유리제품의 원류」, 『신라문화』 23권, pp.147~174.
- 조경미, 유혜선, 강형태, 1999. 9, 「황남대총 98호분 출토 유리의 과학적 분석」, 『박물관 보존과학』 창간호, 국립중앙박물관, pp.61~74.
- 최주, 1991, 「한국 고대유리의 국내제조에 대하여」, 『선사와 고대』 제1집, pp.1~7.
- 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.
- Barnes I. L. et al., 1986, 'The Technical Examination, Lead Isotope Determination and Elemental Analysis of Some Shang and Zhou Dynasty BronzeVessels' 2nd International Conference of BUMA, Ed. Maddin R, pp.21~26.
- Bowman S., 1991, *Science and the Past*, British Museum Press, pp.37~56.
- 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.
- 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, Dept of the History of Art, University of Michigan, pp.87~109.
- Brill, R. H, 1999, *Chemical Analyses of Early Glasses*, Volume 2, The Corning Museum of Glass.
- Brill, R.H. and Shirahata, H., 1995, *PROCEEDING OF XVII INTERNATIONAL CONGRESS ON GLASS*, CHINESE CERAMIC SOCIETY : BEIJING, pp.491~496.
- Caley E. R, 1962, 'Roman glass', *Analysis of Ancient Glasses*, The Corning Museum of Glass, pp.93~104.
- Christie O. H. J., Brenna J. A. and Straume E., 1979, Multivariate classification of Roman glasses found in Norway, *Archaeometry* 21. 2, pp.233~241.
- Coomans, D and Massart, D.L. 1979, *Multivariate Analysis*, Anal. Chi. Am. Acta, vol. 112, pp.97.
- Degryse P. and Schneider L., 2008, 'Pliny the Elder and Sr-Nd Isotope:Tracing the Provenance of RnwMaterials for Roman Glass Production; *J. of Archeological Science*, Vol. 35, Elsevier, pp. 1993~2000.
- Ferank S., 1982, *Glass and Archaeology*,

- Academic Press. pp.71~86.
- Henderson J. et al., 2005, 'The Use of Oxygen, Strontium and Lead Isotopes to Provenance Ancient Glasses in the Middle East', *J. of Archaeological Science*, Vol. 32, Elsevier, pp. 665~673.
 - 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.
 - 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.
 - Lambert J. B. 1998, *Traces of the Past*, Perseus Publishing, pp.104~127.
 - Lee I, 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.
 - 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.
 - Shortland A. J., and Tite M. S., 2000, 'Raw Materials of Glass From Amarna and Implications for the origins of Egyptian Glass', *Archaeometry*(1), pp.141~151.
 - Sayer, E.V. and Smith R.W., 1974, 'Analytical Studies of Ancient Egyptian Glass' In *Recent Advances in the Science and Technology of Materials*, Vol. 3, ed. G.E. Rindone, Plenum, pp.47~70.
 - Zvigofer, 1980, *Archaeological Chemistry*, John Wiley & Sons, pp.136~166.

Application of Science for Interpreting Archaeological Materials(III)

Characterization of Some Western Asia Glass Vessels from South Mound of Hwangnamdaechong

Kang, Hyung Tae^a · Cho, Nam Chul^b

^aConservation Science Team, National Museum of Korea

^bDept. of Cultural Heritage Conservation Science, Kongju National University

[Received : 20 August 2008 / Revised : 1 October 2008 / Accepted : 10 October 2008]

Abstract

Thirty six samples of Western asia glass vessel shards which were excavated from South Mound of Hwangnamdaechong were each measured for thickness, pore size and specific gravity and analyzed for ten major compositions and thirteen trace elements. The glass samples with colorless, greenish blue and dark purple blue were well classified by principal component analysis(PCA).

All glass shards of Hwangnamdaechong belonged to Soda glass system ($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$) which have the range of 14~17% Na_2O and 5~6% CaO . The correlation coefficients of (MgO , K_2O) and (MnO , CuO) showed above 0.90. The concentrations of thirteen trace elements apparently differentiated from colorless, greenish blue and dark blue glasses. We found that thirteen trace elements were very important indices for studying raw material of glass and the origin of glass making.

Colorless glass : The specific gravity is 1.50 ± 0.04 . Circle or oval circle pores are observed with regular direction in internal zone and the longest one is about 0.35 mm. The raw material of sodium must be the plant ash because sodium glasses contain HCLA(High CaO , Low Al_2O_3) and HMK(high MgO , high K_2O) and suggested to Sasanian glass. The total amount of coloring agent of colorless glass is below 1 % which is too small to attribute to the color.

Greenish blue glass : The specific gravity is 1.58 ± 0.04 . The fine pores which are 0.1~0.2mm are dispersed in internal zone. Sodium glasses are distributed to HCLA and HMK. Therefore the greenish blue glass also have used plant ash for raw material of sodium with the same as colorless glass. It was also suggested to the glass of Sasanian. The total amount of coloring agent of greenish blue glass is about 4% under the influence of working MnO , Fe_2O_3 and CuO .

Dark purple blue glass : The specific gravity is 1.48 ± 0.19 . There are rarely pores in internal zone. They are distributed to HCLA and LMK(Low MgO , Low K_2O) and suggested to Roman glass. The raw material of sodium is estimated to natron. The total amount of coloring agents of greenish blue is about 3% by Fe_2O_3 and CuO .

These studies for western asia glass shards from South Mound of Hwangnamdaechong could be used in the future as the standard data which could be compared with those of other several graves in Korea and dispersed in foreign areas.

Keywords : South Mound of Hwangnamdaechong, Roman glass, Sasanian glass major chemical composition, trace elements, principal component analysis(PCA)