

중성자방사화분석을 활용한 경상남도 백자의 산지 및 특성 분류

김나영 | 김규호

공주대학교 문화재보존과학과

The Provenance and Characteristic Classification of the White Porcelain in the Gyeongsangnam-do by Neutron Activation Analysis

Na-young Kim | Gyu-ho Kim

Department of Cultural Heritage Conservation Science, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

초 록 경상도지역의 두동리, 백련리, 사촌리 가마터 출토 백자편 총 47점에 대하여 중성자방사화분석으로 태토의 미량성분 함량을 측정하고 주성분분석(PCA)과 판별분석(LDA)으로 통계처리하여 가마터별 산지 및 특성을 분류해 보았다. 주성분분석과 판별분석에서 이용한 미량성분은 17개(Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Eu, Hf, La, Lu, Rb, Sc, Sm, Ta, Th, V, Yb) 원소이며, 분류에 기여한 원소는 6개(Dy, Sm, La, Ce, Lu, Sc) 원소로 확인된다. 가시적 특징에 따라 구분되는 연질과 경질백자는 미량성분의 화학적 조성이 유사하여 원료의 조성 차이가 없는 것으로 확인되나, 양질(I)과 조질백자(II)는 화학적 조성에 차이가 나타남에 따라 원료의 채취 장소나 수비와 첨가제 사용의 제작 과정에 차이가 있었을 것으로 판단된다.

중심어: 중성자방사화분석, 산지 추정, 경질백자, 연질백자, 주성분분석, 판별분석

ABSTRACT This study analyze concentration of minor and trace elements on 47 white porcelains excavated from Dudong-ri, Baekryeon-ri, Sachon-ri kilns in Gyeongsangnam-do by NAA(neutron activation analysis) and try to classify the provenance and characteristics according to the analytical result. Each kilns are divided into the group by PCA(principal component analysis) and LDA(linear discrimination analysis) using 17 elements; Ba Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Eu, Hf, La, Lu, Rb, Sc, Sm, Ta, Th, V, Yb. The contribution elements are Dy, Sm, La, Ce, Lu, Sc. And soft and hard white porcelains are similar with the chemical composition of the use materials therefore the difference of the chemical composition not confirmed a cause. The analytical results of the fine(I) and poor(II) quality white porcelains presume the difference of the provenance of clay materials or the production process such as difference purify and additive materials.

Key Words: neutron activation analysis(NAA), provenance, hard white porcelain, soft white porcelain, principal component analysis, discriminant function

I. 서론

도자기는 일상생활에 항상 필요했던 필수품으로 인류 문명의 어느 곳에서나 흙과 불로써 만들어진 최초의 수공업 제품 중에 하나이며 점차 제작기술이 발전됨에 따라 1200 °C 이상의 고온에서 만들어지는 자기가 제작되었다. 우리나라의 최초의 고화도 자기는 학자들 간에 이견이 다양하지만 9 C 전반에서 10 C 후반에 발생된 것으로 추정되고 있으며 당시에 중국과 우리나라에서만 생산되었다. 따라서 도자기의 초기 연구는 제작기술과 발전과정 등에 집중되었으며 근래에는 당시 사회의 생산과 분배 교역 등을 규명하고자 산지 추정 연구가 활발히 진행되고 있다.

도자기 산지 추정은 사용된 점토 원료가 지구화학적 과정의 산물이며 풍화 후에도 압축의 화학적 특성이 그대로 남아있어 생산지의 지질학적 특성을 그대로 반영한다는 근거에 의해 미량성분의 함량을 측정함으로써 이루어지고 있다¹⁾. 따라서 연구 방법은 미량성분 분석에 주로 사용되는 중성자방사화분석과 유도결합플라즈마발광분석이 주로 이용되고 있으며 근래에 들어 X-선형광분석 등이 활용되고 있다. 그러나 점토 원료는 다양한 장소에서 채취될 수 있으며 배합과 수비 그리고 첨가제 등과 같은 일련의 제작 과정에 의해 미량성분의 패턴이 변화할 수 있으므로 채취된 장소를 찾기에는 아직까지 여러 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 2000년 이후에 조사된 경상도지역의 진해시 두동리, 하동군 백련리, 사천시 사촌리 가마터에서 출토된 백자편을 대상으로 중성자방사화분석에 의한 미량성분 분석을 통해 제작소의 산지 분류 가능성을 확인해보고자 하였다. 또한, 백자편은 태토의 다양한 특성에 따라 연질과 경질백자로, 태토의 정선 정도에 따라 양질(I)과 조질백자(II)로 구분되는 가시적 특징과 원료와의 상관관계를 검토하였다.

II. 연구 대상 및 시료

1. 가마터 개요

1) 진해시 두동리 가마터²⁾

경남 진해시에 위치한 두동리 가마터는 경사가 급한 지형에 동서 방향으로 총 6기의 가마가 발견되었다. 그 중 2호 가마는 길이 24.5m, 폭 1.3m로 경사면에 축조된 오름가마로써 회구부에서 연도부까지 바닥과 벽체 등의 중요한 부분이 남아있다.

출토유물은 대접, 접시, 종지, 잔 등의 반상용기가 대부분이지만 마상배(馬上杯), 이배(耳杯), 화형접시, 전접시, 벼루, 연적 등의 특수 기종도 다양하다. 또한 태토에 의해 분청사기, 회청사기, 백자, 흑유, 옹기로 구분해 볼 수 있으며 분청사기와 회청사기가 전체 유물의 대부분을 차지한다. 번조는 갑발없이 여러 개의 그릇을 포개어 구웠는데 바닥에는 모래를 깔고 그릇 사이에는 모래비짐을 사용하였다.

두동리 가마는 출토유물 중 연질과 경질로 구분되는 백자의 비율이 매우 적고 특히 경질백자의 양이 매우 극소량이다. 또한 대부분의 자기가 귀얄분청사기라는 점에서 분청사기를 제작하다가 백자 생산 시작 단계에서 폐기된 것으로 판단된다. 즉 두동리 가마터의 운영시기는 15 C 중반에서 16 C 전반으로 추정해 볼 수 있다.

2) 백련리 가마터³⁾

백련리 가마터는 경남 하동군에 수자원과 양질의 점토 및 연료를 획득하기 용이한 지역에 위치하고 있다. 조사에서 확인된 가마는 소성실의 일부와 가마 벽체의 파편만이 부분적으로 평지에서 확인되었다.

출토유물은 분청사기와 백자로 대접, 완, 접시, 병 등 일상생활 용기가 대부분이지만 제기와 같은 특수 기종이 존재하기도 한다. 또한 대부분 민간용품이지만 흑상감 백자, 어문의 병편, 조문음각의 호편 등과 같은 극소수의 고급품이 확인된다. 도편의 유색은 연록색이 주류를 이루지만 그 외에 담청색과 회백색 등이 일부 존재한다. 번조는 일부 도침이 확인되지만 갑발이 한 점도 발견되지 않았으며 사질의 내화도를 손톱만한 크기로 받침을 사용하였다.

가마의 조업 시기는 출토유물이 극소수의 귀얄과 덩병 분청사기 그리고 대부분 아직 기형이 분청사기의 양식을 하고 있는 푸른색의 백자로 확인됨에 따라 분청사기에서 백자 생산으로 넘어가기 시작하는 16 C 중반에서 후반으로 추정된다.

3) 사촌리 가마터¹⁰⁾

경남 사천시에 위치하는 사촌리 가마터는 시굴조사를 통한 다량의 백자편과 일부의 가마 벽체편 및 소토의 확인으로 가마터의 존재가 확인되었으나 현재 가마가 모두 파괴되어 그 흔적을 찾아보기 어렵다.

출토유물은 접시, 잔, 완 등의 백자로, 태토는 정선된 백토이며 유약은 자기 내외의 전면에 다소 불량하게 시유되었다. 번조는 모래가 섞인 내화토 비집을 사용하여 여러 개의 그릇을 포개구이 하였다.

사촌리 가마터는 수습된 백자편의 번조 방법과 유약의 색조가 모두 유사하여 전문적으로 백자만 생산하던 가마터로 17 C에 조업이 이루어졌을 것으로 판단된다. 특히 기종이 한정적이며 태토나 유약의 색에 거의 변화가 없다는 점, 그리고 번조 방법이 모두 동일하다는 점을 통해 조업 기간이 짧았을 것으로 추정하고 있다.

2. 연구 시료

연구 시료는 두동리(16점), 백련리(22점), 사촌리(9점) 가마터에서 출토된 총 47점의 백자편을 선정하였다 (Figure 1). 선정된 백자편은 태토와 유약의 색상, 태토 단면의 치밀도, 구성입자의 크기와 균일도 등의 가시적

특징에 따라 연질백자와 경질백자로 구분하였다. 또한, 태토의 정선도에 따라 두동리의 경질백자와 백련리의 연질과 경질백자는 각각 양질(I)과 조질백자(II)로 세분하였다.

III. 분석 방법

1. 중성자방사화분석(Neutron Activation Analysis, NAA)

연구 시료는 유약을 제거하고 초음파 세척한 후 105 °C에서 2시간 건조하여 마노사발로 200mesh 이하로 분말화하였다. 분말 시료는 단 반감기 핵종은 50mg을, 중·장 반감기 핵종은 100 ~ 200 mg을 칭량하여 폴리에틸렌 바이알에 넣어 밀봉하였다.

중성자방사화분석은 한국원자력연구소의 하나로 연구용 원자로에서 단 반감기 핵종의 경우 NAA #3 조사공에서 2초, 중·장 반감기 핵종의 경우 IP-4 조사공에서 1시간 동안 실시하였다. 그리고 시료의 조사 위치에 따른 방사화율의 차이를 결정하기 위해서 Al-wire와 Fe-wire를 각 시료와 동시에 중성자를 조사하여 중성자속을 측정

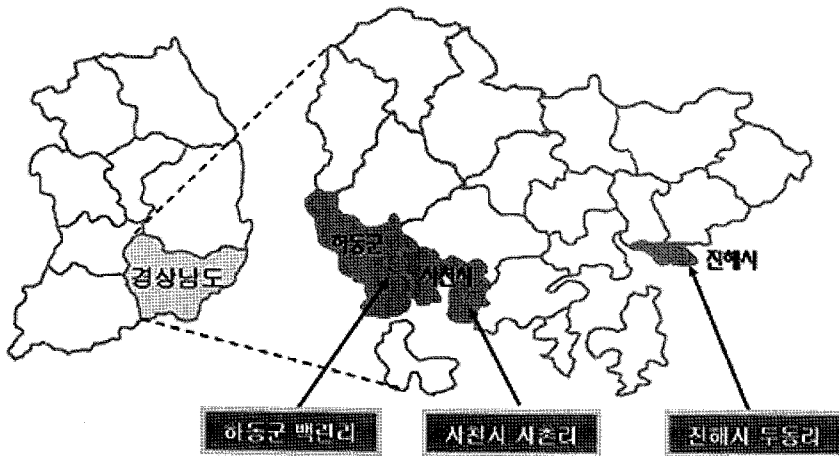


Figure 1. Excavation distribution chart on the white porcelain kiln in Gyeongsangnam-do.

하여 열중성자속은 NAA #3 조사공이 1.30×10^{14} n/cm²·sec, IP-4 조사공이 $2.92 \sim 4.5 \times 10^{13}$ n/cm²·sec 범위로 나타났다.

감마선 계측은 HPGe Semiconductor가 부착된 16k-Multichannel Analyzer(MCA)의 감마선계측기(EG&G ORTEC, USA)를 이용하였다. 단 반감기 핵종은 20분과 50분, 중·장 반감기 핵종은 5일과 13일 이상 냉각하여 각각 500, 1200, 2000, 5000초 동안 계측하여 연구 시료와 동일한 실험 조건에서 측정한 미국표준기술원(NIST)의 인증표준시료 NIST SRM 2711-Montana Soil의 값과 비교하여 Al, As, Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Eu, Fe, Hf, K, La, Lu, Mg, Mn, Na, Rb, Sb, Sc, Sm, Sr, Ta, Th, Ti, V, W, Yb 등의 28개 미량성분을 정량화하였다.

2. 데이터 해석 방법

1) 주성분분석(Principal Component Analysis, PCA)¹⁴⁾

주성분분석은 해석하고자 하는 다차원의 데이터로부터 정보 손실을 최소화하여 새로운 변수를 만들어내는 방법으로 그 통계처리의 원리는 다음과 같다. 각 M개의 변수로 된 N개의 시료는 한 세트의 데이터를 M차원의 공간에 N개점으로 간주한다. 이를 기초로 시료 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 에 대하여 성분 $j(j=1, 2, \dots, m)$ 의 값 X_{ij} 는 데이터 행렬을 구성하여 이 때 각 변수들의 값(각 원소의 합량)은 상호간의 큰 격차를 보이거나 하나의 변수 내에서 최대, 최소치의 편차가 큰 격차를 보이는 것을 균등하게 해주어 분포상의 편향성을 교정해 준다. 이 표준화 방법으로 각 데이터를 평균 0 및 단위표준편차를 갖는 새로운 변수 z_{ij} 로 변환한다(autoscaling).

$$z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j}$$

\bar{x}_j = 각 시료에 대한 성분값의 평균

s_j = 각 시료에 대한 성분값의 표준편차

시료 i 에 대한 k 번째 주성분 값 P_k 는 z_{ik} 와 각 변수에 대한 요인점수계수행렬(factor score coefficient matrix)

에서 k 번째 고유벡터와 j 번째 값 v_{jk} 와 z_{ij} 의 곱의 합으로 나타난다.

$$P_{ik} = \sum_{j=1}^m z_{ij} \cdot v_{jk}$$

주성분분석은 주성분(PC, principal component)이 원래의 모든 변수가 가지고 있는 정보를 얼마나 설명할 수 있는지는 기여율과 제 1 주성분에서 제 m 주성분까지의 기여율의 합계를 나타낸 누적기여율로 표시하며 일반적으로 누적기여율이 큰 주성분 1과 2를 주로 사용한다. 그리고 공통성(Communality)은 상대적으로 주성분에 크게 기여하는 변수(원소)를 확인할 수 있다.

2) 판별분석(Linear Discriminant Analysis, LDA)¹⁶⁾

선형판별분석은 분류되어 있는 집단 간의 차이를 설명해 줄 수 있는 독립변수를 찾아내고 이들의 선형결합으로 판별식을 만들어 분류하고자 하는 각 대상들이 속하는 집단을 찾아내는 방법으로 고고자료에서 출토지와 산지가 명확하게 정의된 경우에는 선형판별식을 통하여 판별함수를 제시하면 새로운 개체가 유입되었을 때 판별함수에 적용하여 어떤 집단에 속하는지 판단할 수 있다.

추정된 판별식이 집단간의 차이를 잘 반영하는지에 대한 검증은 Wilk's Lamda(λ)값을 보고 판단할 수 있다. Wilk's Lamda(λ)값은 집단내 분산/(집단내 분산 + 집단간 분산)의 비율로서 0에서 1사이의 값을 갖는다. 집단간 분산이 집단내 분산에 비하여 상대적으로 커질수록 λ 값이 작아지므로 λ 값이 작을수록 판별식의 집단간 판별력이 높다고 할 수 있다. 또한, 판별식이 실제의 집단을 잘 분류하는지 판단하기 위해서 분류표(Classification Table)를 이용하여 Hit Ratio를 계산함으로써 판단이 가능할 수 있다. Hit Ratio는 정확히 분류된 표본의 수를 전체 표본의 수로 나눈 값을 말한다.

IV. 연구 결과 및 고찰

1. 중성자방사화분석

중성자방사화분석은 도자기 태토의 28개 미량성분 함

량을 결정하였으나, 다수의 시료에서 검출되지 않은 As, Al, W, Ti, Mg 등과 여러 범위가 큰 Sb 등을 제외한 Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Eu, Hf, La, Lu, Rb, Sc, Sm, Ta, Th, V, Yb 등의 17개 미량성분을 주성분분석 및 판별분석의 변수로 이용하였다. 이를 정리한 결과는 Table 1과 같다.

2. 주성분분석에 의한 가마터별 산지 분류

백자의 가마터별 산지 분류 가능성은 백자편 47점의 17개 미량성분을 SPSS(statistical package for social science) 12.0 통계 프로그램을 이용한 주성분분석으로 평가하였다. 이 때 도출된 고유값(Eigenvalue)과 기여율(Variance) 및 누적기여율(Cumulative)은 Table 2, 공통성(Communalities)과 성분행렬(Principal Component)은 Table 3과 같다. 또한 각 변수를 주성분 1과 2에 대입하여 각 시료의 주성분 점수를 Figure 2에 도식화하였다.

Table 2에서 고유값이 가장 큰 주성분 1과 2의 누적 기여율은 69.1%로 전체 변수 100% 중에 Figure 2가 반영한 정도를 의미한다. Table 3의 공통성은 변수들이 전체 주성분에 기여한 정도를 표시하는 것으로 주성분 1에서 La, Sm, Dy, Ce, Eu, 주성분 2에서 Th 성분이 크게 기여하여 전체적으로 Dy, Sm, La, Ce, Lu, Sc 성분의 기여도가 큰 것으로 확인된다. 따라서 경상도지역 출

Table 2. Eigenvalue and cumulative portion by PCA using 17 trace elements

Component	Eigenvalue	Variance(%)	Cumulative(%)
1	7.877	46.3	46.3
2	3.876	22.8	69.1
3	1.910	11.2	80.4
4	1.084	6.4	86.7
5	0.895	5.3	92.0

Table 3. Communalities and principal component by PCA using 17 trace elements

Trace Elements	Principal Component		Communalities
	1	2	
Ba	0.486	0.677	0.695
Ce	0.866	0.295	0.838
Co	0.275	0.708	0.577
Cr	0.400	0.516	0.426
Cs	0.680	0.341	0.578
Dy	0.890	-0.328	0.900
Eu	0.820	-0.323	0.776
Hf	0.739	-0.063	0.551
La	0.919	0.132	0.862
Lu	0.798	-0.419	0.812
Rb	0.581	0.442	0.534
Sc	0.587	-0.680	0.807
Sm	0.894	-0.267	0.869
Ta	0.384	0.642	0.559
Th	-0.097	-0.875	0.774
V	0.663	-0.130	0.457
Yb	0.790	-0.337	0.737

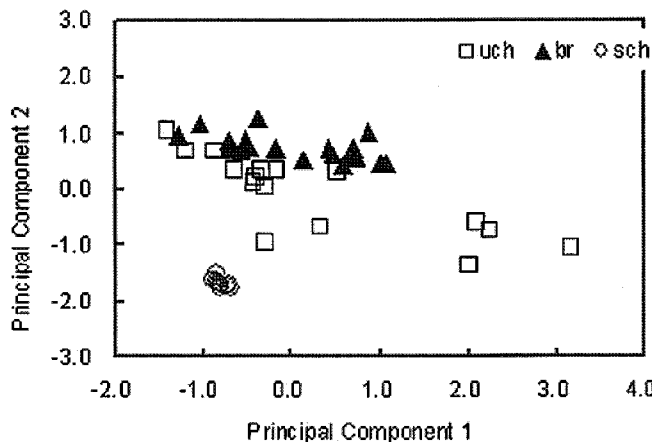


Figure 2. Bivariate plot of first two principal components by 17 trace elements for 47 samples.

토 백자의 제작소 산지 분류에는 Dy, Sm, La, Ce, Lu, Sc가 다른 성분들에 비해 기여 정도가 큼을 알 수 있다.

주성분분석 결과를 도식한 Figure 2에서 일부 두동리와 백련리 백자편의 분류 정도가 낮게 나타나지만, 두동리, 백련리, 사촌리는 각 가마터별로 그룹을 형성하는 것을 알 수 있다. 각 가마터별로 형성된 그룹의 분산도는 사촌리(sch), 백련리(br), 두동리(uch) 가마터 순으로 커지는데 이는 각 가마터에서 사용된 원료의 특성을 제시하는 자료로 사촌리, 백련리, 두동리 가마터 순으로 원료가 다

양하게 사용된 것으로 추정해 볼 수 있다. 즉, 백자만을 전문적으로 생산한 사촌리 가마터에 비해 분청사기와 백자를 동시에 생산한 두동리와 백련리 가마터는 사용 원료가 더욱 다양했을 것을 의미한다. 또한 백련리 가마터에 비해 분청사기, 회청사기, 흑유, 용기, 백자 등 출토유물의 종류가 매우 다양하고 잔존하는 백자편의 비율이 현저히 낮은 두동리 가마터는 백자의 사용 원료가 가장 다양하며 복합적으로 배합되었을 가능성이 매우 높다는 점을 제시하는 자료이다.

Table 4. Eigenvalue and cumulative portion by PCA using trace elements on Dudong-ri, Baekryon-ri and Sachon-ri samples

Component	Dudong-ri			Baekryon-ri			Sachon-ri		
	Eigenvalue	Variance(%)	Cumulative(%)	Eigenvalue	Variance(%)	Cumulative(%)	Eigenvalue	Variance(%)	Cumulative(%)
1	10.150	59.7	59.7	10.199	60.0	60.0	5.417	31.9	31.9
2	2.514	14.8	74.5	2.398	14.1	74.1	4.466	26.3	58.1
3	1.506	8.9	83.4	2.098	12.3	86.4	2.607	15.3	73.5
4	0.993	5.8	89.2	0.826	4.9	91.3	1.983	11.7	85.1
5	0.744	4.4	93.6	0.577	3.4	94.7	1.098	6.5	91.6

Table 4. Eigenvalue and cumulative portion by PCA using trace elements on Dudong-ri, Baekryon-ri and Sachon-ri samples

Trace Elements	Dudong-ri			Baekryon-ri			Sachon-ri		
	Principal Component 1	Principal Component 2	Communalities	Principal Component 1	Principal Component 2	Communalities	Principal Component 1	Principal Component 2	Communalities
Ba	0.558	0.479	0.541	-0.278	-0.149	0.099	-0.603	-0.035	0.365
Ce	0.898	-0.322	0.911	0.953	-0.227	0.961	-0.399	-0.712	0.667
Co	-0.426	-0.455	0.389	0.220	0.426	0.230	0.008	0.624	0.390
Cr	0.818	-0.040	0.670	0.563	0.740	0.865	0.200	0.429	0.224
Cs	0.646	0.570	0.743	0.741	0.150	0.572	-0.701	-0.159	0.516
Dy	0.975	-0.106	0.963	0.916	-0.160	0.865	0.757	-0.366	0.707
Eu	0.895	-0.392	0.955	0.773	0.132	0.615	0.439	0.572	0.520
Hf	0.838	0.020	0.703	0.903	0.245	0.875	-0.434	0.842	0.898
La	0.927	-0.236	0.915	0.885	-0.393	0.938	-0.125	-0.450	0.218
Lu	0.931	0.252	0.930	0.918	-0.317	0.942	0.751	0.215	0.611
Rb	0.449	0.791	0.826	0.615	-0.548	0.679	-0.538	0.031	0.290
Sc	0.928	-0.076	0.868	0.774	0.536	0.886	-0.546	0.806	0.948
Sm	0.916	-0.341	0.956	0.950	-0.175	0.933	0.738	0.585	0.887
Ta	-0.247	0.537	0.350	0.673	0.245	0.513	0.006	0.657	0.432
Th	0.266	0.387	0.221	0.894	-0.313	0.897	-0.772	0.539	0.886
V	0.825	-0.330	0.790	0.730	0.609	0.904	0.891	-0.162	0.820
Yb	0.931	0.262	0.934	0.869	-0.259	0.823	0.554	0.447	0.507

3. 주성분분석을 이용한 원료의 특성 분류

두동리, 백련리, 사촌리 가마터에서 출토된 연질백자는 경상도와 전라도 지역에서 한정적으로 나타나며 중국의 원말명초(元末明初) 백자의 영향을 받은 경질백자와 특성 차이를 보이는 것으로 알려져 있다. 지금까지 연구된 바에 의하면 연질과 경질백자의 차이는 가시적 특징이 물질

과 관계가 높지만 화학 조성 및 번조 온도와 상관성이 적다²⁾ 혹은 조성과 밀접한 관련이 있다³⁾ 등 상반된 연구 결과가 발표된 바 있으나 아직까지 그 이유를 제시하지 못하고 있는 실정이다. 이를 확인하기 위한 방법의 하나로 각 가마터별로 연질과 경질, 양질(I)과 조질백자(II)의 가시적 특징에 따른 원료의 상호 관계를 주성분분석으로 분류한 결과는 다음과 같다.

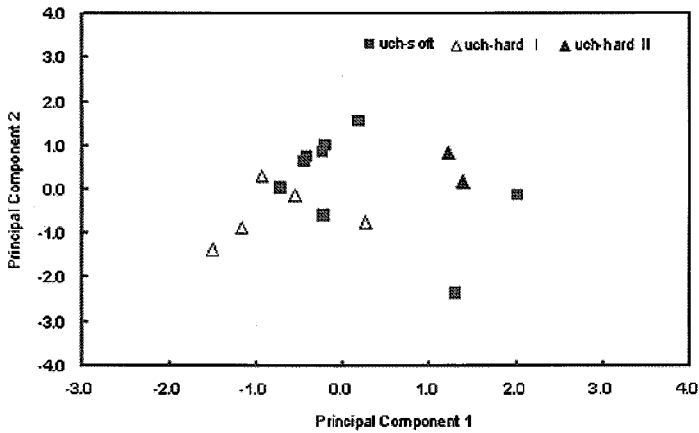


Figure 3. Bivariate plot of first two principal components by trace elements on Dodong-ri samples.

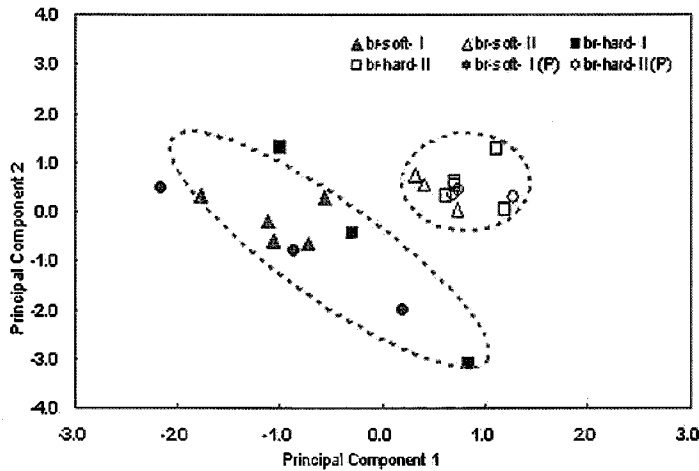


Figure 4. Bivariate plot of first two principal components by trace elements on Baekryeon-ri samples.

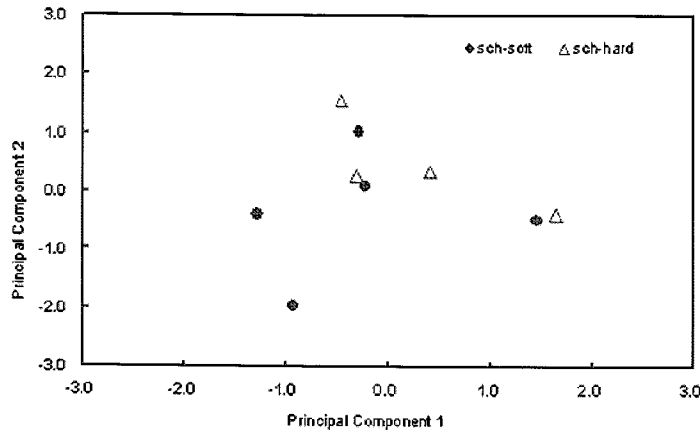


Figure 5. Bivariate plot of first two principal components by trace elements on Sachon-ri samples.

각 가마터별 백자의 가지적 특성에 따른 주성분분석에서 누적기여율은 두동리와 백련리 가마터가 각각 74.5%와 74.1%로 다소 높게 나타나지만, 사촌리 가마터는 58.1%로 매우 낮게 나타나는 점에서 사촌리 가마터에서 생산된 연질과 경질백자의 원료 유사성이 높은 것을 알 수 있다(Table 4). 그리고 주성분 1과 2에서 기여 정도가 큰 원소는 두동리가 Dy, Sm, Eu, Yb, Lu, La, Ce, Sc, Rb, 백련리가 Ce, Lu, La, Sm, V, Th, Sc, Hf, Dy, Cr, Yb, 사촌리가 Sc, Hf, Sm, Th, V 성분 순으로 나타난다(Table 5).

이를 기초로 도식한 주성분분석 그래프에서 연질과 경질백자는 두동리, 백련리, 사촌리 가마터 모두에서 미량 성분 패턴에 차이가 확인되지 않았으며, 이를 통하여 연질과 경질백자의 특성은 사용 원료에 대한 화학적 조성 차이가 아님을 재확인하였다(Figure 3~5). 반면 백련리 백자편은 양질(I)과 조질백자(II)에서 미량성분의 패턴 차이가 확인되며 이는 원료의 산지나 수비와 첨가제 사용 등의 제작 과정에 차이가 있었을 가능성이 높다고 추정된다.

이와 같은 주성분분석 결과는 동일 가마터에서 생산된 백자에서도 사용 원료가 다를 가능성이 있음을 나타내는 것으로 도자기 태토 원료에 대한 산지 추정에 어려움이 있음을 보여주는 근거이다. 따라서 가마터별 출토 도편에

대한 가지적 특징도 사용 원료를 짐작할 수 있는 중요한 지표가 되므로 반사도, 흡수율, 기공률 등 물리적 특성 분석 등도 함께 조사하고 이를 종합적으로 검토할 필요가 있다.

4. 판별분석을 이용한 가마터별 산지 분류

판별분석은 대상 시료의 출토지가 확실한 경우에 이를 각 그룹으로 분류할 때, 유용하게 이용할 수 있는 방법으로 이 때 작성된 판별함수에 미지 시료를 대입하여 각 가마터와의 상관성을 파악할 수 있다⁴⁾.

판별함수의 결과에서 17개 성분이 판별함수에 기여한 정도는 Table 6과 같이 Th, Ta, Co, Ba, Cr 성분 순으로 확인된다. 그리고 고유값과 누적기여율 및 정준상관계수(Canonical Correlation) 등 판별함수의 자료 반영도에서 두동리, 백련리, 수촌리 가마터에 분류 정도를 알 수 있는 정준상관계수는 각각 0.987과 0.945로 매우 높게 나타난다(Table 7). 이를 기초로 다음과 같이 판별함수 1과 2가 계산되며 이 식에 대입하여 미지시료의 산지를 추정해 볼 수 있다.

$$\text{함수1} = 0.013\text{Ba} + 0.159\text{Ce} + 0.023\text{Co} - 0.004\text{Cr} - 0.276\text{Cs} - 0.664\text{Dy} + 5.527\text{Eu} + 0.963\text{Hf} - 0.005\text{La} -$$

Table 6. Equality of group means by LDA

Variance	Wilks' Lambda	F
Ba	0.373	36.960
Ce	0.625	13.175
Co	0.307	49.682
Cr	0.435	28.531
Cs	0.734	7.955
Dy	0.842	4.141
Eu	0.979	0.465
Hf	0.925	1.793
La	0.772	6.503
Lu	0.845	4.034
Rb	0.596	14.888
Sc	0.777	6.322
Sm	0.935	1.527
Ta	0.274	58.361
Th	0.257	63.589
V	0.966	0.783
Yb	0.751	7.308

$$0.891Lu + 0.014Rb - 0.686Sc - 1.911Sm - 1.959Ta - 0.153Th + 0.028V + 0.728Yb - 4.096$$

$$\text{함수2} = 0.001Ba - 0.021Ce + 0.013Co - 0.004Cr - 0.015Cs + 1.876Dy - 2.535Eu - 0.126Hf - 0.081La - 10.991Lu + 0.020Rb + 0.217Sc + 0.438Sm + 2.044Ta + 0.007Th - 0.043V + 0.435Yb - 3.554$$

두동리, 백련리, 수촌리 가마터에서 출토된 47점의 백자 시료에 대한 판별함수는 Figure 6과 같이 도식된다. 이 결과에서 판별분석은 주성분분석보다 매우 뛰어난 분별력으로 각 가마터별로 분류됨을 알 수 있다. 따라서 판별분석은 다양한 장소에서 원료를 채취하였거나 배합과 첨가제 사용의 복잡한 제작 과정을 거쳐 정확한 원료의 산지 추정이 어려운 태토 원료를 가마터별로 자료를 체계화함으로써 가마터 산지 분류의 지표 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Table 7. Canonical discriminant functions by LDA

Function	Eigenvalue	Variance(%)	Cumulative(%)	Canonical Correlation	Wilks' Lambda	Chi-square	F
1	39.042	82.5	82.5	0.987	0.003	213.152	34
2	8.309	17.5	100.0	0.945	0.107	80.314	16

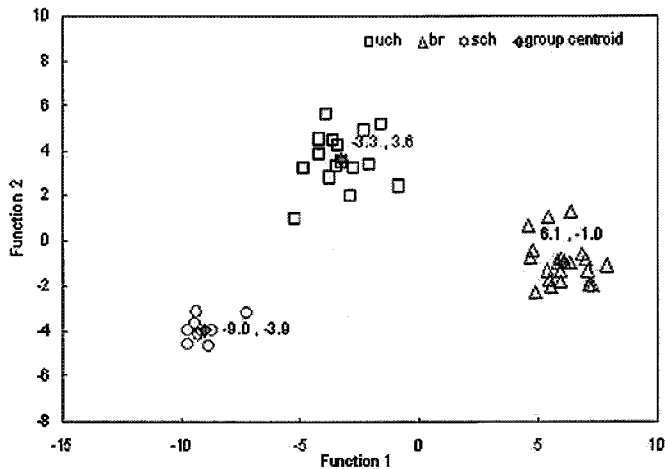


Figure 6. Plot of first two linear discriminant function by trace elements for 47 samples.

V. 결론

경상남도 진해시 두동리, 하동군 백련리, 사천시 사촌리 가마터에서 출토된 47점의 백자편에 대하여 중성자방사화분석으로 태토의 미량성분 함량을 측정하고 주성분분석과 판별분석을 이용한 가마터 및 가시적 특징에 따른 분류 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 태토의 미량성분 함량은 28개 성분을 측정하였으나 다수의 시료에서 검출되지 않은 성분과 여러 범위가 큰 성분 등을 제외한 Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Eu, Hf, La, Lu, Rb, Sc, Sm, Ta, Th, V, Yb의 17개 성분을 주성분분석과 판별분석에 이용하였다.
2. 주성분분석 분류 결과에서 두동리, 백련리, 사촌리 가마터는 각 가마터별로 분류되며, 분류에 크게 기여하는 미량성분은 Dy, Sm, La, Ce, Lu, Sc의 6개 원소로 확인되었다. 또한, 각 가마터별 분산도의 차이는 각 가마터에서 사용한 원료의 차이와 상관관계가 높은 것으로 판단된다.
3. 연질과 경질백자는 사용 원료의 화학적 조성 차이가 확인되지 않으나, 양질(I)과 조질백자(II)는 미량성분의 패턴 차이가 확인된다. 따라서 양질(I)과 조질백자(II)는 원료의 산지가 다르거나 수비와 첨가제 사용의 제작 과정에 차이가 있었을 가능성이 높다. 4. 판별분석은 주성분분석에 의한 산지 분류보다 더욱 분별력 있는 분류 결과를 얻을 수 있었으며 이를 통하여 미시 시료에 대한 산지 추정 지표로 활용할 수 있음을 제시하였다. 각 가마터별로 분석 자료를 체계화한다면 도자기의 산지 추정 및 상호 관계를 추정할 수 있는 과학적 근거 제시가 될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 과학기술부에서 시행한 2005년도 원자력연구기반 확충사업의 일환인 “중성자 방사화분석을 이용한 전통 도자기의 고고학적 분류 기법 개발”의 연구 결과입니다.

참고문헌

1. 최몽룡, 신숙정, 이동영, *고고학과 자연과학*, 서울대학교출판부, 97-122(1996)
2. 고민정, “경상남도 요지 출토 경질과 연질백자에 대한 물성 및 원료 분석 -두동리, 백련리, 사촌리를 중심으로-”, *공주대학교 석사학위논문*, (2006)
3. 강경인, “조선전기 연질백자 제작기술에 대한 과학적 연구”, *한국미술사교육학회*, 제 33회 추계학술발표회 발표자료집, (2005)
4. 조남철, “성분분석, 미세조직 및 자기적 특성에 의한 한반도 흑요석의 분류 연구”, *강원대학교 대학원 박사학위 논문*, (2006)
5. 조남철, 박용희, 도성재, 강형태, 남인탁, “성분분석 및 자기적 특성에 의한 한반도 흑요석의 분류 연구”, *한국문화재보존과학회*, 16, 89-113(2004)
6. 김은정 외, *원도우용 SPSS 통계분석*, 편집자명, 석정, 출판도시명, 398-420(2001)
7. 강형태, 이철, “중성자 방사화분석에 의한 한국자기의 분류”, *보존과학연구*, 6, 국립문화재연구소, (1985)
8. 김지태 외, *鎭海 熊川陶窯地 II*, 경남발전연구원 역사문화센터, (2004)
9. 최중혁 외, *하동 백련리 도요지*, 경남문화재연구원, (2002)
10. 김윤희 외, *사천시 하남면 사촌리 도요지 시굴조사 결과보고*, 경남문화재연구원, (2003)
11. 강형태, 홍종욱, 김승원, 정광용, “다변량해석에 의한 제주도 고대토기의 산지연구”, *한국전통과학기술학회지*, 1, 139-151(1994)
12. 히라오 요시미즈 편저, *문화재를 연구하는 과학의 눈*, 학연문화사, 105-111(2001)
13. A.Yoshitani, N.A.Kononenko, T.Tomoda, V.K.Popov, I.U.Slepzov, “On the Sources of the Obsidian Flakes from Some Late Palaeolithic Sites in Southern Part of Central Primorye, Far East Russia”, *考古學과 自然科學*, 47, 1-12(2004)
14. Enrico Ciliberto and Giuseppe Spoto, *Modern Analytical Methods in Art and Archaeology*, Dipartimenti di Scienze Chimiche Università di

- Catania Catania, A John Wiley&Sons INC, Italy,
91-134(2000)
15. Marco Ferretti, *Scientific Investigations of Works
of Art*, ICCROM, Rome, 7-10(1993)
16. Mark Pollard and Carl Heron, *Archaeological
Chemistry*, The Royal Society of Chemistry, 54-
61(1996)
17. Y. V. Kuzmin, V. K. Popov, M. D. Glascock,
M. S. Shackley, "Source of Archaeological
Volcanic Glass in the Primorye(Maritime)
Province far East", *Archaeometry*, 44(4), 505-
515(2002)
-