

중성자 방사화분석에 의한 고려 후기 기와의 산지 연구

정광용*, 김명진*

대전광역시 동구 가양2동 77-3 대전보건대학 박물관과, 300-711.

*대전광역시 유성구 궁동 220 충남대학교 백제연구소, 305-764.

(2001. 8. 10. 접수)

A provenance study of roof tiles from the late Korea dynasty using Neutron Activation Analysis

Kwang-Yong Chung*, Myung-Jin Kim*

Dept. of Musology, Daejeon Health Science College
77-3 Gayang2-Dong, Taejon 300-711, Korea.

*Paekche Research Institute, Chungnam National University
220 Kung-Dong, Taejon 305-764, Korea.

(Received Aug. 10, 2001)

요약 : 고려말 삼별초의 대몽항쟁지인 진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적에서는 문양과 형태가 동일한 암숫막새 유물이 출토되었다. 중성자 방사화분석법을 이용하여 각 유물들을 미량성분분석하고 그 결과를 다중상관분석과 판별분석하여 원료인 점토 산지의 동일성을 알아보았다. 다중상관분석 결과 미량성분원소 [La : Sm]과 [Lu : Yb] 사이에 높은 선형 증가의 관계가 존재하였으며 이를 바탕으로 판별분석 결과 미량성분원소 Cr, Sc, $\Delta(\Sigma(Lu, Yb))$, Eu에 대하여 청도 토기 가마터 유적, 청양 기와 가마터 유적, 진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적, 장도 청해진 유적은 95% 이상의 분류정확도로 유물의 원료산지가 서로 명확히 구분되었다. 그 결과 진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적에서 출토된 암숫막새 유물들의 원료 산지가 서로 동일하다는 것을 알았다.

Abstract : Both concave and convex roof-end tiles having same style and shape are excavated in Yongjangsung castle at Jindo and Bumhwasa temple at Wando in Jeollanam-Do that are the Sambyulcho's resistance sites against Mongolia in the late Koryo dynasty. Obtained data by NAA have been used to classify the equality of a raw materials' provenance by multiple correlation analysis(MCA) and discriminant analysis. The results of MCA has shown that there are very high correlation for [La : Sm], and [Lu : Yb]. Exactly pottery site at Chungdo, roof tile site at Chungyang, Yongjangsung castle and Bumhwasa temple and Chunghaejin site at Jangdo were distributed for four trace elements, Cr, Sc, $\Delta(\Sigma(Lu, Yb))$ and Eu by discriminant analysis, and their accuracy is above 95%. This means that Yongjangsung castle and Bumhwasa temple have same raw materials' provenance.

Key words : provenance analysis, roof-end tiles, neutron activation analysis, discriminant analysis

★ Corresponding author

Phone: +82+(0)42-630-5961, Fax.: +82+(0)42-628-1423

E-mail: kyjung@tjhealth.ac.kr

1. 서 론

최근 고고학의 연구경향은 유물의 형식분류와 편년 연구에 치중했던 전통고고학의 입장에서 벗어나 자연 과학적 연구결과를 대폭 수용하고 이를 바탕으로 인간행위를 체계적으로 분석하고 이해하려는 방향으로 변해가고 있다. 이러한 자연과학적 연구방법으로는 현재 산지연구^{1,3}와 제작기술^{4,5}, 절대연대측정^{6,8} 등이 대표적이다.

유물과 유적에 대한 절대연대측정이 고고학 자료의 해석에 있어 시간축을 형성한다면 산지연구는 고대 물자의 분포와 이동에 관한 공간적 범위를 설정하려는 연구이다. 그러므로 산지연구에서는 생산·분배·교역(exchange) 등에 참여하는 인간행위의 직접적인 증거를 찾고, 인간과 사회집단 내의 경제적·사회적 필요성에 의하여 분배하고 교역하는 상호작용을 이해함을 목적으로 한다^{9,10}.

토기, 도자기 및 기와 제작의 주원료인 점토는 암석의 풍화로 생성된다. 암석은 그 지역의 지반에 대한 지구화학적 특성을 내포하고 있으며 풍화로 인해 점토가 된 후에도 이 화학적 특성은 여전히 유지된다. 그러므로 점토의 지구화학적 특성 차이는 곧 지역차를 반영하며 이를 이용해 유물의 산지를 추정할 수 있다.

전라남도 진도군 진도 용장성(龍藏城) 유적¹¹과 완도군 완도 법화사지(法華寺址) 유적¹²은 고려 후기 삼별초(三別抄)의 대몽항쟁 유적으로 이곳에서 발굴된 암숫막새는 문양과 형태상으로 서로 동일하다. 또한 이들 유적에서 발굴된 유물들은 드물게도 절대연대를 알 수 있는 매우 귀중한 자료들이다. 이러한 유물의 특이성으로 인하여 당시 제작집단과 산지, 그리고 교역에 대한 고고학적 추정이 활발하게 논의되고 있으며 이러한 논의의 자연과학적 연구방법으로는 미량성분분석에 의한 산지추정이 현재 가장 타당하다.

이 연구에서는 진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적의 암숫막새 유물에 대한 원료산지 추정을 주 연구대상으로 하고 이의 분석을 위해 미량성분원소 분석법인 중성자 방사화분석법(neutron activation analysis: NAA)^{13,14}를 사용하였다. 그리고 이들 유물과 비교·검증의 목적으로 충청남도 청양군 관현리 기와가마터 유적¹⁵과 경상북도 청도군 각남면 토기가마터 유적, 전라남도 완도군 장도 청해진(淸海鎭) 유적¹⁶의 유물에 대한 분석 결과를 활용하였다).

중성자방사화분석법으로 결정된 미량성분 원소들에 대한 수학적 통계처리를 위해 SPSS(statistical package for the social science) for windows(Ver. 10.0)를 이용하였다.

2. 분석 유물의 고고학적 성격

진도 용장성(1271년) 유적은 삼별초의 대몽항쟁시 기존의 사찰을 개축하여 조성된 궁성(宮城)으로 삼별초가 여몽 연합군에 밀려 제주로 철수한 후 여몽 연합군에 의해 소실된 유적이다. 따라서 삼별초가 제주로 철수한 시기인 원종(元宗) 12년(1271) 5월이 하한임을 알 수 있다. 완도 법화사지(1271년) 유적은 강진의 백련결사(白蓮結社)와 진도를 중심으로 대몽항쟁을 이끌었던 삼별초와 관련된 사찰로 특히 진도 용장성과 동일한 막새가 출토되어 그 하한을 삼별초 활동과 연관지어 삼별초의 제주로의 후퇴 시기로 파악하고 있다. Fig. 1, 2는 진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적에서 출토된 암숫막새의 문양을 탁본한 것이다.

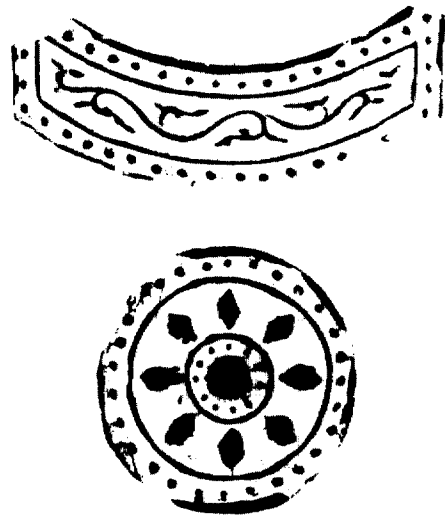


Fig. 1. Concave and convex roof-end tiles of Yongjangsung at Jindo.

- 1) 이하, 전라남도 진도군 진도 용장성 유적, 전라남도 완도군 완도 법화사지 유적, 경상북도 청도군 각남면 토기가마터 유적, 충청남도 청양군 관현리 기와가마터 유적, 전라남도 완도군 장도 청해진 유적을 각각 진도 용장성 유적, 완도 법화사지 유적, 청도 토기가마터 유적, 청양 기와가마터 유적, 장도 청해진 유적으로 약칭한다.

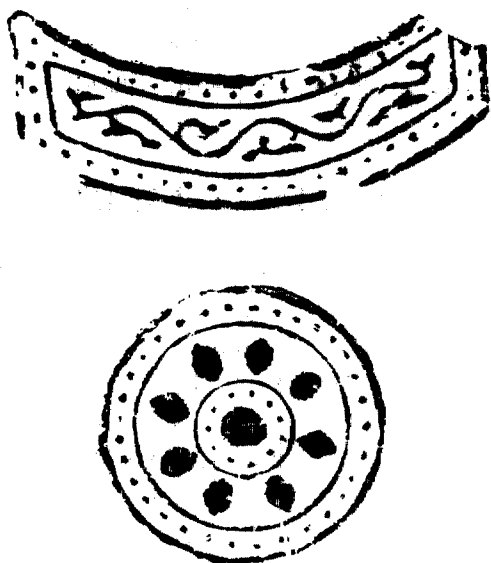


Fig. 2. Concave and convex roof-end tiles of Bubhwasu at Wando.

진도 용장성(1271년) 유적과 완도 법화사지 유적의 출토 유물과 제주 법화사(法華寺) 유적¹⁷의 출토 유물은 기형과 유색, 문양, 번법 등 제작 수법이 매우 유사하여 13세기 후기 청자의 성격을 잘 보여 주고 있다.

3. 실험방법과 통계분석

3.1. 시료의 분석

진도 용장성 유적에서 10종의 시료, 완도 법화사지 유적에서 10종의 시료, 청도 토기가마터 유적에서 12종의 시료, 청양 기와가마터 유적에서 8종의 시료, 그리고 장도 청해진 유적에서 6종의 시료를 입수하여 총 46종의 시료를 분석하였다. 각 유적의 위치를 Fig. 3에 나타내었다.

3.1.1. 시료의 전처리 및 준비

시료의 표면을 탈이온수(deionized water)로 깨끗이 세척한 다음 건조기 내에서 100℃로 24시간 건조한 후 텅스텐카바이드 드릴 등을 이용하여 오염된 외부를 제거하였다. 시료의 대표성과 균질도를 높이기 위하여 막자사발을 사용하여 분쇄하고, 100mesh 이하의 분말을 취하였다. 약 100mg의 시료분말을 잘 세척된 폴리에틸렌 용기에 넣고 밀봉하였다. 단일비교체로

써 함량을 알고 있는 Co 약 100mg을 같은 종류의 용기에 넣고 밀봉하였다.

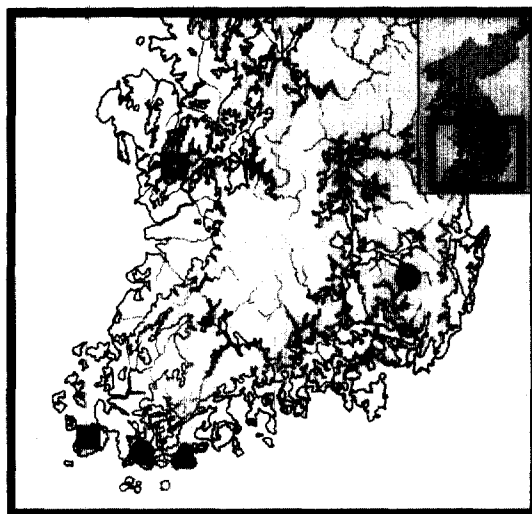


Fig. 3. Position of each cultural site(■ : Yongjansung at Jindo, ● : Bubhwasu at Wando, ● : pottery-kiln site at Chungdo, ■ : roof tiles site at Chungyang, and ▲ : Chunghaejin at Jangdo).

3.1.2. 중성자조사 및 계측

준비된 시료분말을 한국원자력연구소의 연구용 원자로인 HANARO 내의 기송관(PTS #1)에서 표준시료(SRM)와 함께 1시간동안 조사시켰다. 시료의 중성자조사시의 열중성자선속(thermal neutron flux density)은 $1.7 \times 10^{13} n/cm^2 \cdot sec$ 이었다. 중성자조사된 각 핵종의 반감기를 고려하여 적절한 시간동안 냉각시킨 후에 계측하였다.

각 시료에 대한 특성 감마선 계측은 EG&G ORTEC사의 GMX 25190 검출기(상대효율 : 25%, 분해능 : ^{60}Co 핵종의 1332 keV에서 반치폭이 1.9keV)를 사용하였으며 개인용 컴퓨터 및 EG&G ORTEC사의 919 MCB와 연결하여 사용하였다. 에너지 및 효율의 검정·교정을 통한 정성 및 정량분석을 위하여 860~1840 keV의 에너지를 갖는 NEN사의 디스크형 다핵종 표준선원을 사용하였다.

특성감마선 계측시 중성자 간섭으로 인하여 함께 나타나는 피크를 제외 한 후 검출효율이 좋으며 피크면적이 높게 나타나는 핵종들 중 17개의 핵종을 선택하여 분석에 이용하였다. 중성자조사 및 방사능 계측

조건 그리고 해당조건에서 분석되어진 원소들을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Analytical condition used for the analysis of archaeological samples

Irradiation facility	Neutron flux (n/cm ² · sec)	Sample weight	Irradiation time
PTS	1.7 × 10 ¹³	100mg	1 hr
PTS	1.7 × 10 ¹³	100mg	1 hr

Cooling time	Counting time	Elements detected
5 ~ 10 days	2000 s	Ca, K, Na, La, Sm
15 ~ 20 days	4000 s	Ba, Ce, Co, Cs, Cr, Eu, Fe, Hf, Rb, Sc, Lu, Yb

3.1.3. 데이터의 처리

시료에 함유되어 있는 원소들의 정량분석은 핵 데이터¹⁸가 내장되어 있고 Table 1에 정해진 분석조건에 따라 계수율, 성분함량, 계측오차 및 검출한계 등의 자료가 자동으로 계산되는 Labview 5.0으로 작성한 POWER-NAA 통합전산프로그램¹⁹을 사용하였다. 방사능 계측의 검출한계 값은 10%의 계측불확도를 허용하는 조건인 Currie의 정의²⁰를 사용하여 계산하였다.

3.2 통계분석

미량성분분석을 위해 선택된 시료는 각 시료들에 포함된 성분원소와 그 함량들을 조사·비교, 그리고 검토하는 과정을 거친다. 많은 양의 시료들이 분석된다면 그로부터 유물의 속성에 관계된 다수의 성분원소와 그 속성상태인 함량에 대한 데이터를 얻게 되고, 이러한 데이터의 통계적인 처리를 통해 유물의 산지를 분류하고 그 타당성을 검증할 수 있다.

산지추정에 대한 통계적 처리는 크게 두가지로 구분된다. 하나는 분석된 시료를 화학적·암석학적 특성에 따라 분류한 후 이를 고고학적 개념과 대응시켜 집단(group)으로 분류하는 것이고, 다른 하나는 미지의 시료를 이들 집단에 사상(mapping)하기 위한 함수를 세우는 것이다. 첫번째 작업을 위해 분석된 시료들에 대해 다중상관분석(multiple correlation analysis)과 판별분석(discriminant analysis)을 수행하였고 두번째 작업

을 위해 이들 판별분석을 통해 얻어진 결과로부터 판별함수(Fisher's linear discriminant function)를 도출했다.

3.2.1 다중상관분석

변수들 간에 얼마나 밀접한 선형관계를 가지고 있는지 나타내는 피어슨 상관관계수(Pearson correlation coefficient) r 값은 다음과 같이 주어지며,

$$r = \frac{\sum(X_i - \langle X \rangle)(Y_i - \langle Y \rangle)}{\sqrt{\sum(X_i - \langle X \rangle)^2} \sqrt{\sum(Y_i - \langle Y \rangle)^2}}$$

여기서 X_i , Y_i 는 성분원소, $\langle X \rangle$, $\langle Y \rangle$ 는 성분원소의 평균을 의미한다. 상관관계수 r 값이 $|r| \geq 0.8$ 이면 강한 상관관계가 존재하고 $0.6 \leq |r| < 0.8$ 이면 상관관계가 있음, $0.4 \leq |r| < 0.6$ 이면 약한 상관관계가 있음을 의미한다.

3.2.2 판별분석

판별분석은 연속형 자료로 구성된 독립변수(independent variable: IV)의 선형조합을 이용하여 모든 케이스(case)들을 집단변수(group variable: GV)인 종속변수(dependent variable: DV)로 분류하고 예측할 목적으로 사용되는 통계기법이다.

판별분석의 유의성 검증은 산출된 판별함수가 통계적으로 얼마나 유의미한가를 검증하는 것으로 정준상관관계수(canonical discriminant function coefficient), Wilks' lambda, 고유값(eigenvalue), χ^2 값을 이용한다.

일반적인 판별함수식은 다음과 같이 나타내지며,

$$Z_j = B_{0j} + \sum B_{ij} \cdot X_{ij}$$

Z 는 판별점수, B_0 는 상수, B 는 판별계수 그리고 X 는 독립변수를 의미한다.

판별분석할 자료들은 다음과 같은 기본 가정을 만족해야 한다²¹. 첫째 특별한 경우를 제외하고 집단간 동등한 표본 크기를 가정할 필요는 없으나 가장 작은 집단의 케이스 수는 최소한의 예측변수(predictor variable: PV)의 수를 초과해야 한다. 둘째 다변량(multivariate) 정상성을 따라야 한다. 셋째 분산-공분산(variance-covariance) 행렬의 동질성을 확보해야 한다. 넷째 예측변인의 모든 쌍이 선형적 관계에 있어야 한다. 마지막으로 지나친 다중공선성(multicollinearity)이 없어야 한다.

통계적으로 유의미한 판별함수의 수는 집단수-1 또는 사용된 예측변수의 수와 같이 나오는데 이 중 작은 값을 선택한다. 이들 판별함수 중에 첫 번째와 두 번째 판별함수가 집단을 가장 잘 구분하고 나머지 판별함수는 집단을 구분하는데 거의 부가적인 정보를 제공하지 못하는 것이 보통이다.

4. 결 과

도·토기, 기와의 원료인 점토는 Si, Al, Fe, Ca, K, Na, Mg 등의 원소가 주성분을 이루고 있다. 이 실험에서 정량분석한 Ca, K, Na, Fe 원소들은 함량분포의 범위가 서로 겹치는 것들이 많고 변수내 분산이 개개의 정량값의 분산보다 작아 유물의 산지를 구분하는 특성원소로 적합하지 않으므로 통계분석시 제외하였다²². 진도 용장성 유적 21번 시료의 Ba 값은 평균값보다 10배 이상 크게 측정되어 잘못된 값으로 판단하고 통계분석시 평균값으로 대체하였다. 분석시료에 대한 고고학적인 명칭과 특징, 중성자방사화분석으로 구한 각 원소의 함량 등을 Table 2에 요약하였다.

4.1 다중상관분석

중성자 방사화분석을 통해 얻어진 Table 2의 미량 성분원소 값을 사용하여 분석한 원소들간의 다중상관관계는 Table 3과 같으며, 성분원소 집합 중에서 [Sc : Co], [La : Sm]과 [Lu : Yb]의 성분원소가 상관관계를 가짐을 알 수 있었다. 특히 [La : Sm]의 집합은 $r = 0.893$, [Lu : Yb]의 집합은 $r = 0.941$ 로 매우 높은 상관관계를 가지며, Fig. 4, 5에서 보는 바와 같이 La와 Sm, Lu와 Yb의 원소들 사이에 높은 선형 증가의 관계가 있음을 의미한다.

이들 원소의 상관관계는 이 연구에서 분석한 Ca, K, Na, Fe 와 같은 주성분 원소를 따르는 미량원소의 집단일 가능성 또는 유물의 산지연구를 수행함에 있어 점토 성분원소들 사이의 구속조건(constraint condition)일 가능성을 시사하고 있으나, 지구화학적으로 어떠한 의미가 있으며 산지연구에 어떠한 영향을 미칠 것인가는 누락된 다른 원소들과 보다 많은 시료의 분석 후에 검토해 보아야 할 것이다.

Table 2. Analytical results of archaeological samples by neutron activation analysis

Sample No.	Sites	Relics Name	Elements(mg/kg)												
			Ba	Ce	Co	Cs	Cr	Eu	Hf	La	Rb	Sc	Sm	Lu	Yb
1	Pottery-kiln site at Chungdo	Pottery	512	89.0	14.9	7.9	64.7	1.6	6.9	34.7	109	19.1	6.0	0.8	2.1
2		Pottery	353	76.2	11.7	7.9	54.5	1.3	5.3	32.3	65.2	17.3	5.5	0.7	2.2
3		Pottery	545	86.2	28.1	11.7	106	1.8	6.5	51.9	76.5	18.1	8.6	0.9	2.7
4		Pottery	332	72.3	8.1	7.6	59.9	1.3	5.9	33.2	66.9	18.6	5.9	0.8	2.4
5		Pottery	361	75.0	14.9	7.6	62.6	1.5	6.3	34.1	155	18.5	5.9	0.8	2.2
6		Pottery	301	96.9	6.8	6.2	63.5	1.6	6.6	50.6	77.1	17.3	8.4	0.9	2.7
7		Pottery	554	61.7	7.8	6.6	65.0	1.2	6.9	52.8	120	18.6	8.6	0.9	2.9
8		Pottery	249	62.5	8.5	6.4	56.0	1.0	5.9	54.8	112	19.5	9.1	0.8	2.7
9		Pottery	552	81.5	9.5	10.4	80.4	1.5	6.7	50.2	109	19.1	8.4	0.9	2.8
10		Pottery	547	101	9.0	7.8	83.3	1.9	7.0	50.2	128	18.5	8.5	0.9	2.5
11		Pottery	443	79.6	10.7	7.6	58.8	1.1	7.0	45.3	118	18.2	7.8	0.8	2.7
12		Pottery	477	56.0	4.7	3.5	28.8	1.7	7.0	49.8	123	18.5	8.3	0.9	2.8
13	Roof tiles site at Chungyang	Roof tile	420	109	8.7	9.7	136	1.5	8.0	50.3	122	19.5	9.0	0.9	3.0
14		Roof tile	692	102	11.6	10.6	147	.6	7.4	46.5	90.8	18.2	8.0	0.8	2.5
15		Roof tile	640	106	7.7	4.7	131	1.5	6.6	49.7	150	17.4	7.9	0.8	2.6
16		Roof tile	511	95.3	9.2	7.3	103	1.4	7.3	52.6	114	18.5	9.0	0.8	2.8
17		Roof tile	604	102	10.9	8.6	98.2	2.4	7.3	52.8	116	18.4	9.1	0.9	2.7
18		Roof tile	464	90.0	18.3	8.8	110	2.6	6.9	53.4	119	18.5	9.2	0.8	2.8
19		Roof tile	609.0	98.2	15.0	8.6	94.3	1.6	6.6	49.1	68.2	19.3	9.2	0.9	2.9
20		Roof tile	708	98.5	13.2	9.1	110	2.1	6.6	55.6	98.1	19.9	9.8	0.9	3.1
21	Yongjansung at Jindo	Roof-end tile	6967	101	13.0	10.9	96.2	1.3	6.9	34.7	109	19.1	6.0	0.8	2.1
22		Roof-end tile	676	89.0	8.6	11.2	81.5	2.3	5.3	32.3	65.2	17.3	5.5	0.7	2.2
23		Roof-end tile	529	95.8	8.5	12.8	76.3	1.8	6.5	51.9	76.5	18.1	8.6	0.9	2.7

Table 2. Continued

Sample No.	Sites	Relics Name	Elements(mg/kg)												
			Ba	Ce	Co	Cs	Cr	Eu	Hf	La	Rb	Sc	Sm	Lu	Yb
24	Yongjansung at Jindo	Roof-end tile	524	92.9	13.1	9.4	83.7	2.1	5.9	33.2	66.9	18.6	5.9	0.8	2.4
25		Roof-end tile	559	101	8.1	11.7	93.0	2.4	6.3	34.1	155	18.5	5.9	0.8	2.2
26		Roof-end tile	631	95.4	9.1	8.6	68.7	2.3	6.6	50.6	77.1	17.3	8.4	0.9	2.7
27		Roof-end tile	715	98.8	9.2	10.2	75.7	2.3	6.9	52.8	120	18.6	8.6	0.9	2.9
28		Roof-end tile	498	104	9.4	9.7	86.4	2.7	5.9	54.8	112	19.5	9.1	0.8	2.7
29		Roof-end tile	468	100	15.4	9.6	91.9	2.7	6.7	50.2	109	19.1	8.4	0.9	2.8
30		Roof-end tile	781	101	9.6	11.3	89.3	1.8	7.0	50.2	128	18.5	8.5	0.9	2.5
31		Roof-end tile	515	82.6	12.8	10.6	92.9	1.8	7.0	45.3	118	18.2	7.8	0.8	2.7
32		Roof-end tile	472	94.0	9.9	10.3	80.6	2.6	7.0	49.8	123	18.5	8.3	0.9	2.8
33		Roof-end tile	657	94.3	10.5	8.0	94.3	2.6	8.0	50.3	122	19.5	9.0	0.9	3.0
34	Bubhwasu at Wando	Roof-end tile	604	86.0	9.6	9.5	94.7	2.6	7.4	46.5	90.8	18.2	8.0	0.8	2.5
35		Roof-end tile	530	88.7	11.9	11.6	89.4	1.8	6.6	49.7	150	17.4	7.9	0.8	2.6
36		Roof-end tile	675	92.9	11.7	12.8	76.8	3.6	7.3	52.6	114	18.5	9.0	0.8	2.8
37		Roof-end tile	500	100	11.7	11.5	74.9	2.7	7.3	52.8	116	18.4	9.1	0.9	2.7
38		Roof-end tile	671	94.7	10.4	11.7	72.2	1.4	6.9	53.4	119	18.5	9.2	0.8	2.8
39		Roof-end tile	657	95.4	8.7	8.3	82.2	3.2	6.6	49.1	68.2	19.3	9.2	0.9	2.9
40		Roof-end tile	545	103	11.4	11.6	78.1	2.6	6.6	55.6	98.1	19.9	9.8	0.9	3.1
41		Roof tile	595	65.3	10.7	9.2	90.9	0.9	6.7	35.8	180	14.6	5.0	0.6	2.2
42	Chunghaejin at Jangdo	Roof tile	542	108	10.7	9.3	90.7	1.7	6.7	57.7	118	16.3	8.1	1.0	3.8
43		Roof tile	752	98.4	11.7	7.5	82.1	1.6	8.3	54.2	125	13.0	7.5	0.7	2.6
44		Roof tile	542	105	11.9	7.0	71.3	1.7	6.9	40.0	117	13.8	5.3	1.0	2.9
45		Roof tile	654	72.5	4.1	6.7	72.4	1.2	6.2	40.2	102	11.9	5.3	0.8	2.9
46		Roof tile	643	105	1.4	4.1	70.2	1.5	9.1	54.3	132	14.2	7.5	1.0	3.9

Table 3. Multiple correlation coefficients of elements

	Ba	Ce	Co	Cs	Cr	Eu	Hf	La	Rb	Sc	Sm	Lu	Yb
Ba	1.000												
Ce	0.376	1.000											
Co	-0.063	0.072	1.000										
Cs	0.244	0.311	0.412	1.000									
Cr	0.349	0.555	0.298	0.308	1.000								
Eu	0.217	0.358	0.133	0.369	0.020	1.000							
Hf	0.269	0.298	-0.292	-0.245	-0.032	0.179	1.000						
La	0.310	0.588	0.007	0.196	0.200	0.320	0.367	1.000					
Rb	0.249	0.243	0.177	0.272	0.348	-0.013	0.247	0.083	1.000				
Sc	0.002	0.265	0.391	0.654	0.282	0.370	-0.378	0.236	-0.097	1.000			
Sm	0.156	0.489	0.098	0.325	0.176	0.431	0.192	0.893	-0.107	0.529	1.000		
Lu	-0.210	0.036	0.522	0.024	0.034	-0.014	-0.246	0.231	-0.129	0.361	0.328	1.000	
Yb	-0.127	0.073	0.478	-0.016	0.068	-0.040	-0.187	0.345	-0.046	0.321	0.363	0.941	1.000

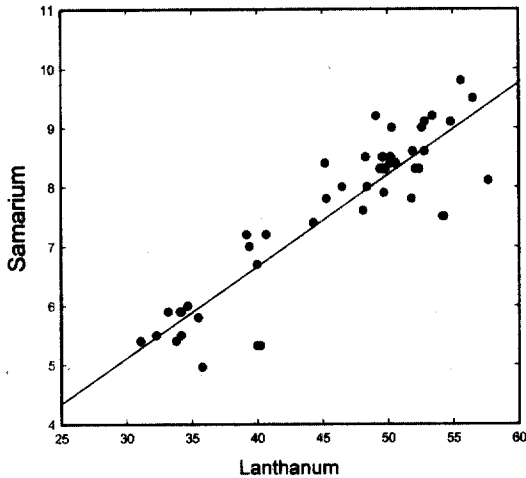


Fig. 4. Linear relation of La and Sm(r = 0.893).

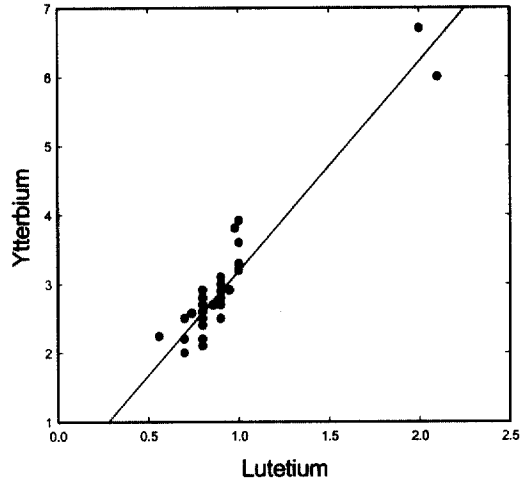


Fig. 5. Linear relation of Lu and Yb(r = 0.941).

4.2 판별분석

다중상관분석을 통해 얻어진 [La : Sm]과 [Lu : Yb] 집합의 높은 선형 증가는 판별분석 결과들 중 집단내 통합상관행렬(pooled within-correlation matrix)과 관계된다. 이는 높은 다중공선성을 의미하므로 판별분석의 기본가정과 대립된다. 그러므로 $\sum(La, Sm)$ 를 Ω , $\sum(Lu, Yb)$ 를 Δ 로 표시하는 새로운 변수를 생성한 후 판별분석을 수행하였다.

이 연구에서는 다음과 같은 방법으로 분석을 실시하였다. 첫째 유물이 발굴된 각각의 유적의 원료산지가 서로 독립된 개별 장소임을 가정하고 판별분석을 수행하였다. 둘째 이 결과를 바탕으로 진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적의 유물들이 동일한 원료산지를 갖음을 가정한 후 분석을 실시하고 판별함수를

구하였다. 마지막으로 용장성 유적과 완도 법화사지 유적만을 추출·분석하여 위 결과를 검증하였다.

Table 4는 유물이 발굴된 각각의 유적의 원료산지가 서로 독립된 개별 장소임을 가정하고 수행한 판별분석의 결과를 정리한 것이다. Cr, Sc, Δ , Eu의 원소들은 단계적 판별분석 과정에서 유적의 산지를 유의미하게 분류하는 모든 원소들이다. 단계별 lambda 값을 사용하여 예측변수들의 추가에 따른 설명 증가율 ξ^2 을 알 수 있으며, Cr만으로 유적의 산지를 분류하는 함수 모델에 대하여 60.4%의 높은 설명도를 갖고 있었으며 Sc가 포함될 때 약 29%의 설명도가 증가하였다. 따라서 유적의 산지를 분류하는 판별모델에서 통계적으로 유의미한 원소들 중 Cr이 가장 중요한 원소이고 Sc, Δ , Eu의 순서임을 알 수 있다.

Table 4. Discriminant analysis result of each cultural site

Predictor Variable	Mean (Std. Dev.)	Step	Step's lambda	Correlation of discriminant function and variable				Pooled correlation between predictor variable				Fisher's linear discriminant functions*				
				1	2	3	4	Cr	Sc	Δ	Eu	Chungdo	Chungyang	Jindo	Wando	Chunghaejin
Cr	84.117(21.530)	1	0.396**	0.321	0.568	-0.607	0.453	0.748	0.339	-0.174	-0.358	0.330	-0.294	-0.297	0.001	
Sc	16.895(2.417)	2	0.102**	-0.289	0.327	-0.545	0.716		0.637	-0.048	8.753	4.221	10.140	10.191	5.266	
Δ	3.795(1.101)	3	0.057**	0.010	-0.189	0.002	0.982			0.177	-4.901	-3.814	-7.849	-7.760	-3.121	
Eu	1.876(0.634)	4	0.034**	-0.191	0.465	0.821	0.270				7.744	11.006	12.419	13.704	8.098	
Constant											-56.687	-56.319	-82.995	-87.015	-38.856	
Eigenvalue				6.751	2.492	0.060	0.024									
Pct. of variance				72.4	26.7	0.6	0.3									

$\Delta = \sum(Lu, Yb)$, * : Yongjansung at Jindo, Bubhwasa at Wando, pottery-kiln site at Chungdo, roof tiles site at Chungyang, and Chunghaejin at Jangdo, ** : p<0,01

Std. Dev.(standard deviation), Pct.(percentage)

유적의 산지를 분류하기 위하여 판별함수로부터 판별점수를 계산하였다. 각 판별함수의 Eigen 값의 증가율을 의미하는 설명변량을 보면 판별함수 1은 72.4%의 분류 예측도를 갖으며 판별함수 2는 26.7%의 분류 예측도를 갖는다. 각 유적과 예상 집단 사이의 관계를 Table 6에 나타내었으며 이들 판별함수가 각 유적의 산지를 정확히 분류할 확률은 80.4%이다. Fig. 6은 판별함수 1과 2에 대하여 이들 유적들의 산포도를 그린 것이다.

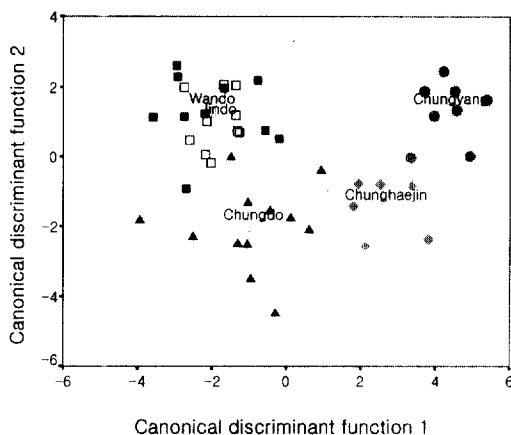


Fig. 6. Discriminant analysis result of each cultural site : Yongjansung at Jindo, Bubhwasa at Wando, pottery site at Chungdo, roof tiles site at Chungyang, and Chunghaejin at Jangdo.

Table 5는 진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적의 유물에 대하여 동일한 원료산지를 가정한 경우에 대하여 판별분석한 결과를 정리한 것이다. 이 경우 유의

한 예측변수는 Cr, Sc, Δ Eu 외에 Ba이 포함되었으나 설명도의 증가가 0.9% 밖에 증가하지 않으므로 판별함수의 간결성을 위해 제외하였다. 이 경우 각각의 원소들이 갖는 설명도의 증가와 판별함수가 갖는 분류 예측도는 Table 4의 결과와 거의 변화가 없이 일치한다.

각 유적과 예상 집단 사이의 관계를 나타낸 Table 6에서 진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적을 하나의 산지로 보았을 경우의 분류도는 100%로 다른 유적에 대하여 완전히 분류되는 집단임을 알 수 있다. 이들 판별함수가 각 유적의 산지를 정확히 분류할 확률은 95.7%이다. Fig. 7은 판별함수 1과 2에 대하여 이들 유적들의 산포도를 그린 것이다.

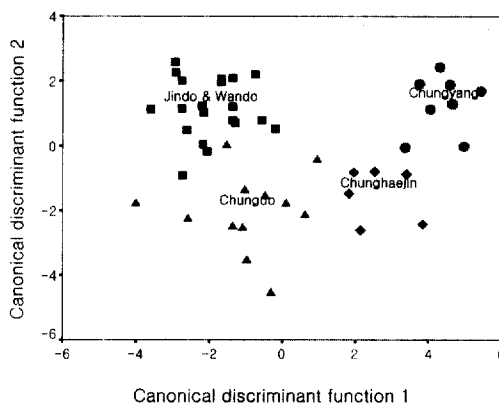


Fig. 7. Discriminant analysis result in case of assuming that Yongjansung at Jindo and Bubhwasa at Wando have a same raw material's provenance. Yongjansung at Jindo and Bubhwasa at Wando, pottery site at Chungdo, roof tiles site at Chungyang, and Chunghaejin at Jangdo.

Table 5. Discriminant analysis result in case of assuming that Yongjansung at Jindo and Bubhwasa at Wando have a same raw material's provenance

Predictor Variable	Mean (Std. Dev.)	Step	Step's lambda	Correlation of discriminant function and variable			Pooled correlation between predictor variable				Fisher's linear discriminant functions*			
				1	2	3	Cr	Sc	Δ	Eu	Chungdo	Chungyang	Jindo & Wando	Chunghaejin
Cr	84.117(21.530)	1	0.396**	0.323	0.570	0.753	0.747	0.336	-0.173	-0.366	0.339	-0.302	0.0011	
Sc	16.895(2.417)	2	0.102**	-0.288	0.331	0.838		0.637	-0.039	8.948	4.305	10.389	5.378	
Δ	3.795(1.101)	3	0.057**	0.010	-0.194	0.518			0.191	-5.051	-3.939	-8.037	-3.225	
Eu	1.876(0.634)	4	0.036**	-0.183	0.451	-0.550				7.489	10.818	12.769	7.891	
Constant										-57.533	-57.118	-85.333	-39.335	
Eigenvalue				6.728	2.460	0.042								
Pct. of variance				72.9	26.6	0.5				Pct. of grouped cases correctly classified = 95.7 %				

$\Delta = \Sigma(Lu, Yb)$, * : Yongjansung at Jindo and Bubhwasa at Wando, pottery-kiln site at Chungdo, roof tiles site at Chungyang, and Chunghaejin at Jangdo, ** : $p < 0.01$

Std. Dev.(standard deviation), Pct.(percentage)

Table 6. Relations between each cultural site and predicted classification group

Original group member ship	Predicted group membership										
	Group number = 5					Group number = 4					
		Chungyang	Chungdo	Jindo	Wando	Chunghaejin		Chungyang	Chungdo	Jindo & Wando	Chunghaejin
	Chungyang	83.3		8.3		8.3	Chungyang	83.3		8.3	8.3
	Chungdo		100.0				Chungdo		100		
	Jindo			60.0	40.0		Jindo &			100	
	Wando	10.0		20.0	70.0		Wando				
	Chunghaejin					100.0	Chunghaejin				100

이상의 판별분석 결과 진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적은 서로 구분되지 않는 하나의 집단이고, 각 유적들 사이의 분류 정확도는 95% 이상으로 서로 뚜렷히 구분되었다. 또한 장도 청해진 유적은 진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적과 지리적으로 상당히 근접한 곳에 위치하고 있으나 이들 집단간의 원료 산지는 완전히 다름을 알 수 있다.

미지 시료의 판별을 위한 Fisher의 선형 판별함수는 Table 4, 5의 끝부분에 각각 나타났다.

위의 통계분석에 이용된 유적들의 위치는 전국적으로 분포하고 있다(Fig. 3 참고). 진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적이 전국적인 범위에서 서로 같은 집단으로 분류되었을지라도 이들 유적만을 포함하는 국지적 분석 결과는 다른 특성을 보일 수 있으므로, 이들 유적만을 대상으로 판별분석을 수행하여 위의 분석 결과와 비교·검토해야 한다. Table 7은 진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적의 판별분석 결과를 정리한 것이다.

이들 두 유적에 대하여 유물의 원료산지를 유의하게 분류하는 예측원소는 단지 Hf 뿐이며 약 37%의 낮은 설명도를 갖는다. 판별함수를 통해 구해진 판별 점수가 유적의 산지를 분류하는 비율은 65%로 두 유적의 원료산지가 명확히 구분되지 않음을 의미한다. 따라서 용장성 유적과 완도 법화사지 유적은 동일한

원료산지를 갖음을 알 수 있으며 Cr, Sc, Δ , Eu는 진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적을 다른 유적들과 분류하는 예측 원소이다.

5. 결 론

진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적에서는 문양과 형태가 동일한 암숫막새 유물이 출토되었다. 중성자방사화분석을 통해 얻어진 미량성분원소들에 대하여 다중상관분석과 판별분석을 수행하였다. 다중상관분석 결과 미량성분원소 [La : Sm]과 [Lu : Yb] 사이에 높은 선형 증가의 관계가 존재하였으며 이를 바탕으로 판별분석 결과 미량성분원소 Cr, Sc, Δ (Σ (Lu, Yb)), Eu에 대하여 청도 토기 가마터 유적, 청양기와 가마터 유적, 진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적, 장도 청해진 유적은 95% 이상의 분류정확도로 유물의 원료산지가 서로 명확히 구분되었다. 그러므로 진도 용장성 유적과 완도 법화사지 유적에서 출토된 암숫막새 유물들의 원료 산지가 서로 동일함을 알 수 있다. 또한 고고학적인 관점에서 동일한 편년을 갖는 이들 유적의 특성상 동일 제작소에 제작되었거나 동일 기술집단에서 제작하였을 가능성이 높다고 추론할 수 있다. 이를 확인하기 위해 인근 지역의 토양시료와 가마터 유적들에 대한 추가 연구가 필요하다.

Table 7. Discriminant analysis results of Yongjansung castle at Jindo and Bubhwsa temple at Wando

Predictor Variable	Mean (Std. Dev.)	Step	Step's lambda	Correlation of discriminant function and variable		Fisher's linear discriminant functions*	
				1		Jindo	Wando
Hf	6.726(0.611)	1	0.629**	1.000		25.539	28.459
Constant						-81.762	-101.246
Eigenvalue				0.590		Pct. of grouped cases	
Pct. of variance				100.0		correctly classified = 65.0 %	

* : Yongjansung at Jindo and Bubhwsa at Wando, ** : $p < 0.01$
Std. Dev.(standard deviation), Pct.(percentage)

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력활성화개발사업 중 2000년 원자력연구기반확충사업의 일환인 하나로공동 이용활성화사업에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 三辻利一, "古代土器の産地推定法", ニュサイエンス社, 1983.
2. C. Lee, O. C. Kwon, D. I. Jung, I. C. Lee and N. B. Kim, *Bull. Kor. Chem. Soc.*, **7**, 438 (1986).
3. C. Lee, H.T. Kang and S. Kim, *Bull. Kor. Chem. Soc.*, **9**, 223 (1988).
4. M. S. Tite, *Archaeometry*, **7**, 131-144 (1969).
5. 강경인, "오창 송대리·상평리 유적에서 출토된 토기의 자연과학적 분석", In *청원 오창 유적(IV)*, pp. 461-501, 한국문화재보호재단, 2000.
6. 우형조, 김낙배, "C-14 측정에 의한 고고시료의 연대측정 연구", K-MOST/KIER-90/037, 한국자원연구소, 1990.
7. J. S. Volgel, K. W. Turteltaub, R. Finkel and D. E. Nelson, *Anal. Chem.*, **67**, 353-359 (1995).
8. D. G. Hong, S. B. Yi, R. B. Galloway, T. Tsuboi, T. Hashimoto, *J. of Radioanal. and Nucl. Chem.*, **247**, 179-184 (2000).
9. T. K. Earle, "Prehistoric Economics and the Archaeology of Exchange", Academic Press, London, 1982.
10. 최몽룡, 신숙정, 이동영, "고고학과 자연과학", pp 101-109, 서울대학교출판부, 서울, 1996.
11. 최성락, "진도 용장성", 목포대학 박물관, 1990.
12. 문화재연구소, "완도 법화사지", 문화재연구소, 1992.
13. G. J. Boule and M. Peisach, *J. Radioanal. Chem.*, **39**, 33 (1977).
14. J. I. Kim, *J. Radioanal. Chem.*, **63**, 121 (1981).
15. 대전보건전문대학, "청양관현리 기와가마터 발굴조사 약보고서", 대전보건전문대학, 1996.
16. 손보기, "장보고와 청해진", 해안, 서울, 1999.
17. 제주대학교박물관, "法華寺址", 제주대학교박물관, 1997.
18. L.A. Currie, *Anal. Chem.*, **40**, 586 (1968).
19. KAERI/NAA, Power-NAA Operation Manual (1999) ; The Unified Software Program for NAA, V.2, Reg.00-01-12-2395 (2000).
20. G. Erdtman, Neutron Activation Tables, vol. 6, New York(1976) ; IAEA, Handbook on Nuclear Activation Analysis Data, IAEA Tec. Rep. No. 273(1987) ; Michael D. Glascock, Tables for Neutron Activation Analysis, 4th ed., University of Missouri (1996).
21. 양병화, "다변량 자료분석의 이해와 활용", pp. 133-139, 학지사, 서울, 1998.
22. A. B. Poole and L. R. Finch, *Archaeometry*, **14**, (1972).