

중성자방사화분석법을 의한 활용한 경상남도 발굴 백자의 지방백자의 특성 분류

김나영, 김규호

공주대학교 문화재보존과학과

Characteristic Classification of the White Ware Excavated of Kyongsangnam-do by Neutron Activation Analysis

Na-Young Kim, Gyu-Ho Kim

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

I. 서론

토기의 산지 추정에 이용되는 중성자방사화분석법(NAA, Neutron Activation Analysis)을 활용하여 경상남도 발굴 백자에 대하여 출토 가마터별로 도자기의 특성 분류를 시도해 보았다. 분석시료는 경상남도 진해시 두동리, 하동군 백련리, 사천시 사촌리 가마터에서 출토 또는 수습된 백자편으로 태토의 특성에 따라 연질백자와 경질백자로 태토의 정선 정도에 따라 양질과 조질¹⁾로 구분하여 선정하였다. 일반적으로 연질백자는 태토와 유약의 색상이 황백색계통으로 자화가 낮은 특징에 따라 경질백자와 구분되며 도자사적 측면에서 연질백자는 고려 백자 경질백자는 원말명초 백자의 영향을 받은 것으로 알려져 있다. 경상도 지역에 한정적으로 나타나는 연질과 경질백자에 대한 과학적 분석은 아직 체계적으로 제시되지 못한 실정이나 지금까지 발표된 연구에서는 물리적 특성으로 보는 관점과 구성 성분에 따른 화학적 조성으로 보는 견해가 제시된 바 있다.²⁾

1) 양질과 조질 : 현재 도자사에서 연질백자 자체를 조질로 보고 있고 양질과 조질의 판단이 분류자에 EK라 차이를 보일수 있음

2) -고민정, 2005, 경상남도 요지 출토 경질과 연질백자에 대한 물성 및 원료 분석 -두동리, 백련리, 사촌리를 중심으로-, 공주대학교 석사학위논문

-강경인, 2005 「조선전기연질백자제작기술에대한과학적연구」 『제33회추계학술발표회발표자료집』 한국미술사교육학회

연구에서는 선정 시료를 가시적 특징에 따라 구분하고 중성자방사화분석법으로 Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Eu, Hf, La, Lu, Rb, Sc, Sm, Ta, Th, V, Yb 총 17개 미량성분의 함량을 결정하고 그 결과를 주성분분석법과 판별분석법으로 처리하여 출토 가마터별 산지, 연질 및 경질, 그리고 양질 및 조질에 따른 도자기의 태토 원료의 특성을 분류해 보고자 한다.

2. 분석 시료 및 방법

2-1. 분석 시료

분석시료는 경상남도 진해시 두동리와 하동군 백련리 가마터에서 출토된 각각 16점과 22점 그리고 사천시 사촌리 가마터에서 수습된 9점 등 총 47점을 선정하였다. 선정된 시편은 태토와 유약의 색상, 태토 단면의 치밀도, 구성입자의 크기와 균일도 등의 가시적 특징에 따라 연질백자와 경질백자로 구분하였다. 다시 태토의 질에 따라 두동리는 경질에서 양질(I형)과 조질(II형)로 백련리는 연질과 경질에서 각각 양질(I형)과 조질(II형)로 구분하였다. 분석 시료는 유약을 제거하고 초음파 세척한 후 105 °C에서 2시간 건조하여 마노사발로 200 mesh 이하로 분말화하였다. 중·장 반감기 핵종인 Rb, Sm, Sc 등 17개 성분은 100-200 mg을 폴리에틸렌 바이알에 넣어 사용하였다.

2-2. 분석 방법

미량성분 분석은 중성자방사화분석법(NAA, Neutron Activation Analysis)을 활용하였다. 중성자 조사는 한국원자력연구소의 하나로 연구용 원자로(원자로 출력 : 30MWth)에서 단 반감기 핵종은 NAA #3 조사공에서 2초, 중·장 반감기 핵종은 IP-4 조사공에서 1시간 동안 조사하였다. 시료의 조사 위치에 따른 방사화율의 차이를 결정하기 위해서 Al-wire와 Fe-wire를 각 시료와 동시에 조사하여 중성자속을 측정하였으며 감마선 계측은 HPGe Semiconductor가 부착된 16k-Multichannel Analyzer(MCA)의 감마선계측기(EG&G ORTEC, USA)를 이용하였다.

측정된 미량원소의 조성 결과는 주성분분석과 판별분석을 이용하여 분류에 기여하는 성분을 알아보고 판별함수를 작성하여 데이터베이스를 마련하였다.

3. 분석 결과 및 고찰

중성자방사화분석법으로 측정된 17개 미량성분을 변수로 두동리, 백련리, 사촌리 가마터에 대하여 주성분분석을 실시하였다.

각 주성분을 설명하는 분산의 크기를 나타내는 고유값이 큰 주성분 1과 2의 누적 기여율은 69.1 %이며(Table 1) 주성분 1에서는 La, Sm, Dy, Ce, Eu, 주성분 2에서는 Co 성분이 크게 기여한 것으로 나타났다(Table 2). 그리고 주성분 1과 2에 의해 설명되어지는 변수들의 분산 총합을 나타내는 공통성은 Dy, Sm, La, Ce, Lu, Sc 순으로 크게 나타났다.

Figure 1의 주성분분석에 의한 분류에서 선정 도편은 가마터별로 그룹을 형성하였으나 다양한 분산도의 차이를 보였다. 사촌리 도편은 분산도가 작으나 두동리 도편은 상대적으로 높은 분산도를 보인다. 이와 같은 분산도의 차이는 사용원료의 다양성과 밀접한 관계가 있을 것으로 추정된다. 발굴을 통해 확인된 두동리 가마터가 분청사기, 조질 회청사기, 백자, 흑유와 같은 다양한 자기를 생산했으며 주 생산품이 백자가 아닌 분청사기였다는 점³⁾ 그리고 사촌리 가마터가 태토와 유약의 가시적 특징에 변화가 없으며 전문적으로 백자만 생산했던 가마라는 점⁴⁾에서 일치하는 결과이다.

주성분분석의 분류 결과에서 두동리와 백련리 가마터 일부 도편이 분류되지 않아 17개 미량성분의 함량을 이용하여 판별분석을 실시하였으며 판별분석에 사용된 성분의 기여도와 판별함수의 정준상관계수는 Table 3과 4에 나타내었다. Wilk's Lambda 값이 0에 가까우며 F값이 클수록 집단간의 분산이 커 분별력이 좋음을 의미하므로 Th, Ta, Cr, Ba 성분이 기여도가 큼을 알 수 있다. 판별함수 1과 2는 모두 정준상관계가 0.9 이상이며 Wilk's Lambda 또한 작아 집단간 분산이 좋음을 알 수 있다.

판별분석의 분류 결과는 주성분분석법보다 뛰어난 분별력으로 각 가마터별로 분류되었다(Figure2). 그래프에 표시된 집단중심점으로 각 요지간 거리를 파악하여 분산의 정도를 파악할 수 있으며 계산된 판별함수 1과 2를 통해 두동리, 백련리, 수촌리 가마에서 생산되었을 것으로 추정되는 미지시료의 산지 분류에 효과적으로 사용될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{함수1} &= 0.013\text{Ba}+0.159\text{Ce}+0.023\text{Co}-0.004\text{Cr}-0.276\text{Cs}-0.664\text{Dy}+5.527\text{Eu}+0.963\text{Hf} \\ &-0.005\text{La}-0.891\text{Lu}+0.014\text{Rb}-0.686\text{Sc}-1.911\text{Sm}-1.959\text{Ta}-0.153\text{Th}+0.028\text{V}+0.728\text{Yb} \\ &-4.096 \end{aligned}$$

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

3) 김지태 외, 『鎮海 熊川陶窯址 II』, 2004, 경남발전연구원 역사문화센터

4) 고민정, 2005, 경상남도 요지 출토 경질과 연질백자에 대한 물성 및 원료 분석 -두동리, 백련리, 사촌리를 중심으로-

Table 1. 두동리, 백련리, 사촌리 태토 주성분분석의 고유값, 기여율과 누적기여율

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 2. 두동리, 백련리, 사촌리 태토 주성분분석의 요인적재값과 공통성

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

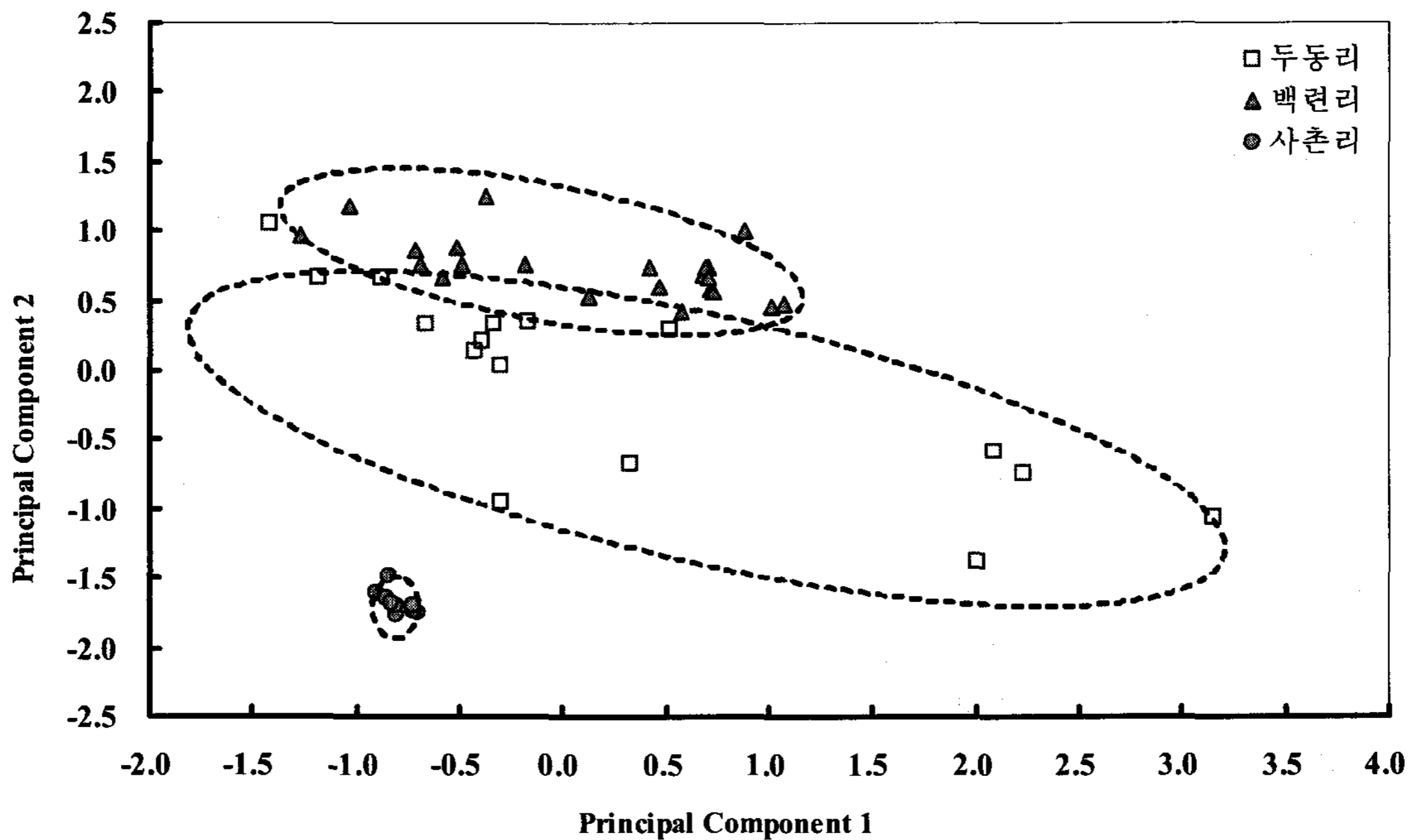


Figure 1. 두동리, 백련리, 사촌리 미량성분의 주성분분석 그래프.

Table 3. 두동리, 백련리, 사촌리 태토 판별분석의 집단 내 동질성

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

Table 4. 두동리, 백련리, 사촌리 태토 판별분석의 정준상관관계

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

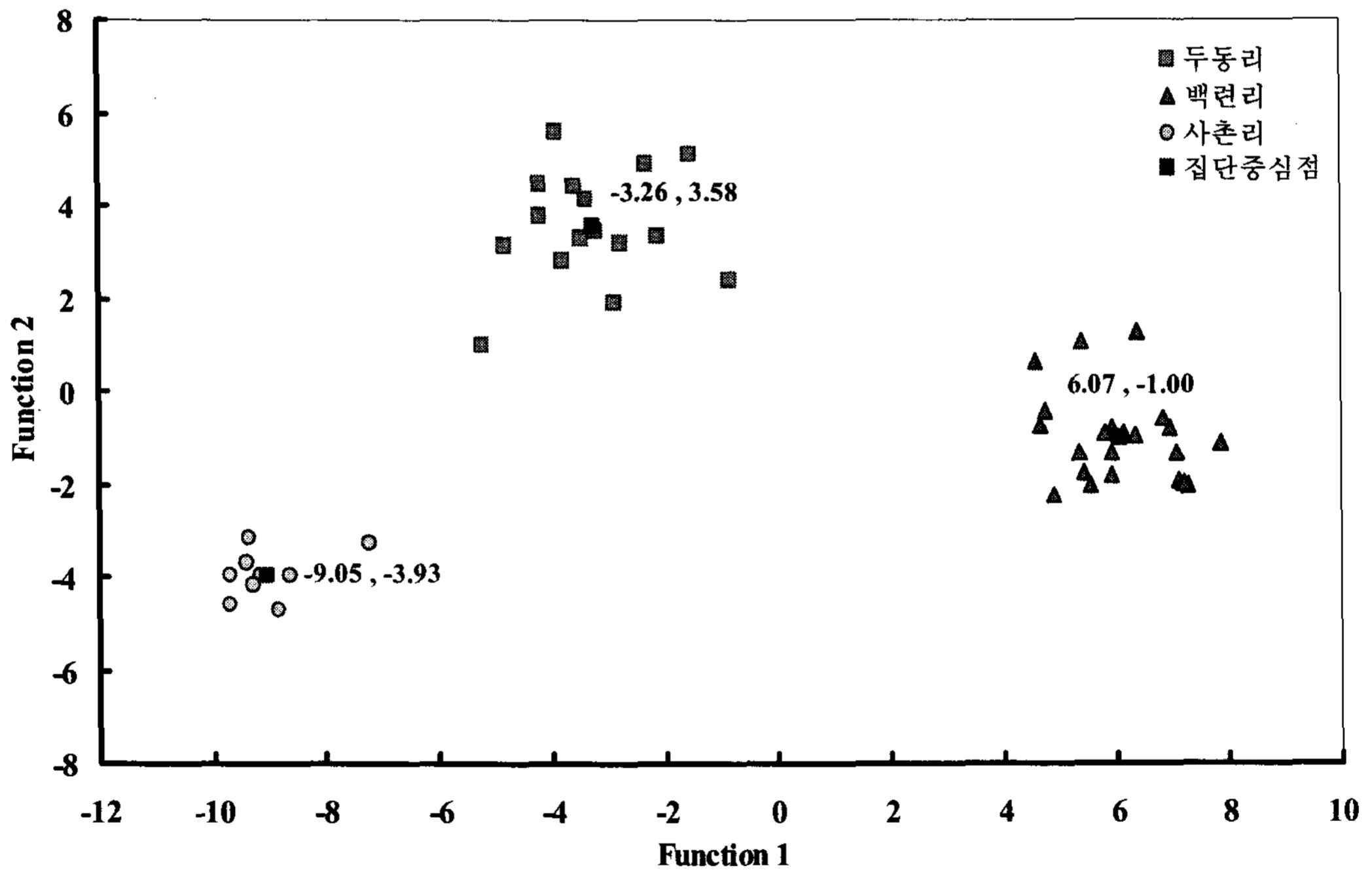
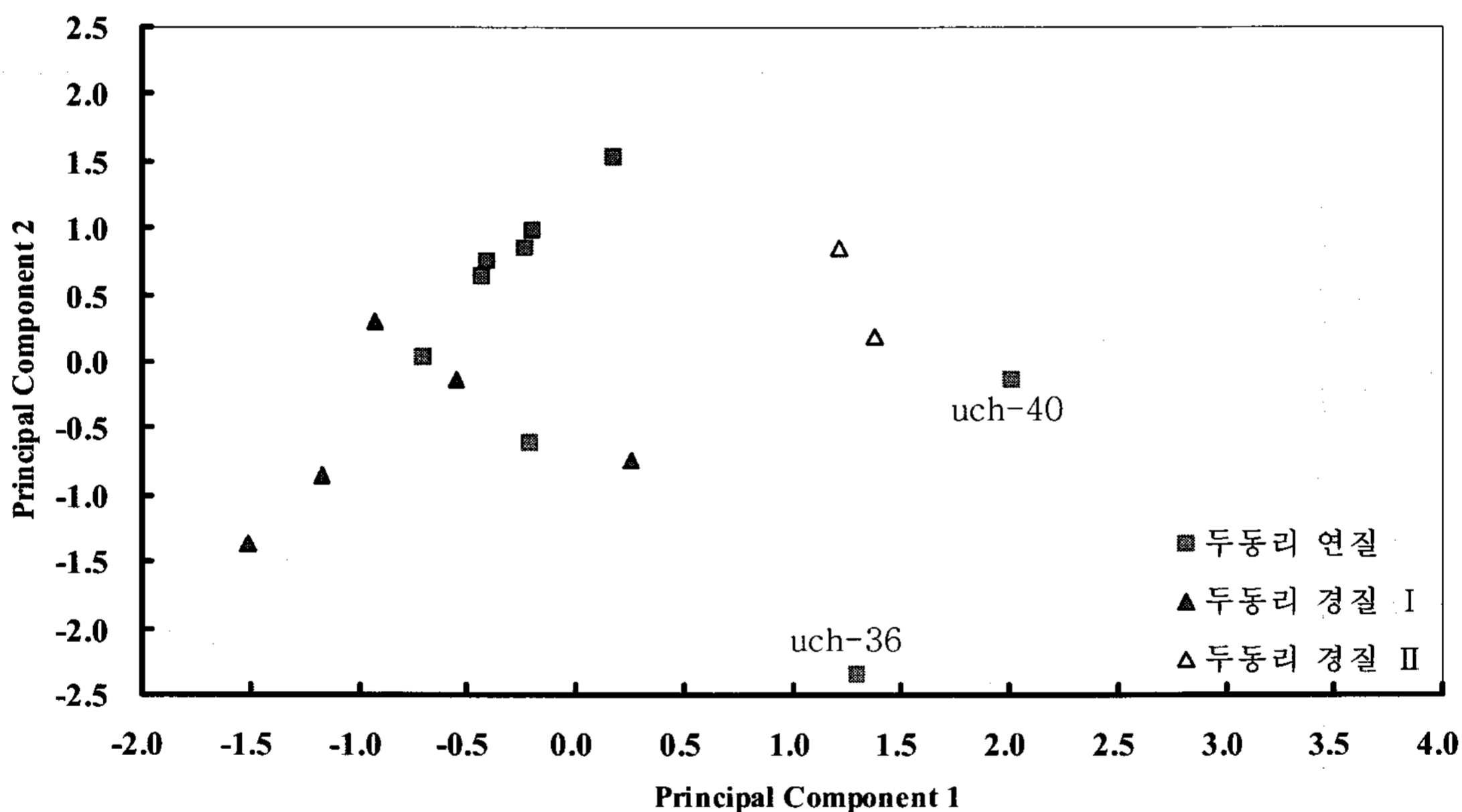


Figure 2. 두동리, 백련리, 사촌리 미량성분의 판별분석 그래프.

가마터별 출토 선정도면에 대한 연질 및 경질, 그리고 양질 및 조질에 대한 특성구분을 위해 각 가마터별로 주성분분석을 실시하여 분류하여 보았다(Figure 3~5). 두동리와 사촌리 가마터는 가시적 특징에 따른 뚜렷한 분류가 확인되지 않았으나 백련리 가마터는 형성된 그룹 간에 분산도의 차이가 있지만 양질과 조질에 특성에 따라 I형과 II형 2개 그룹으로 구분된다.

이 결과에서 가시적 특징에 의해 구분된 연질과 경질의 특성은 사용 원료의 화학조성과 상관관계가 적으나 양질과 조질의 특성은 사용 원료의 화학 조성과 상관관계가 높은 것으로 추정된다.



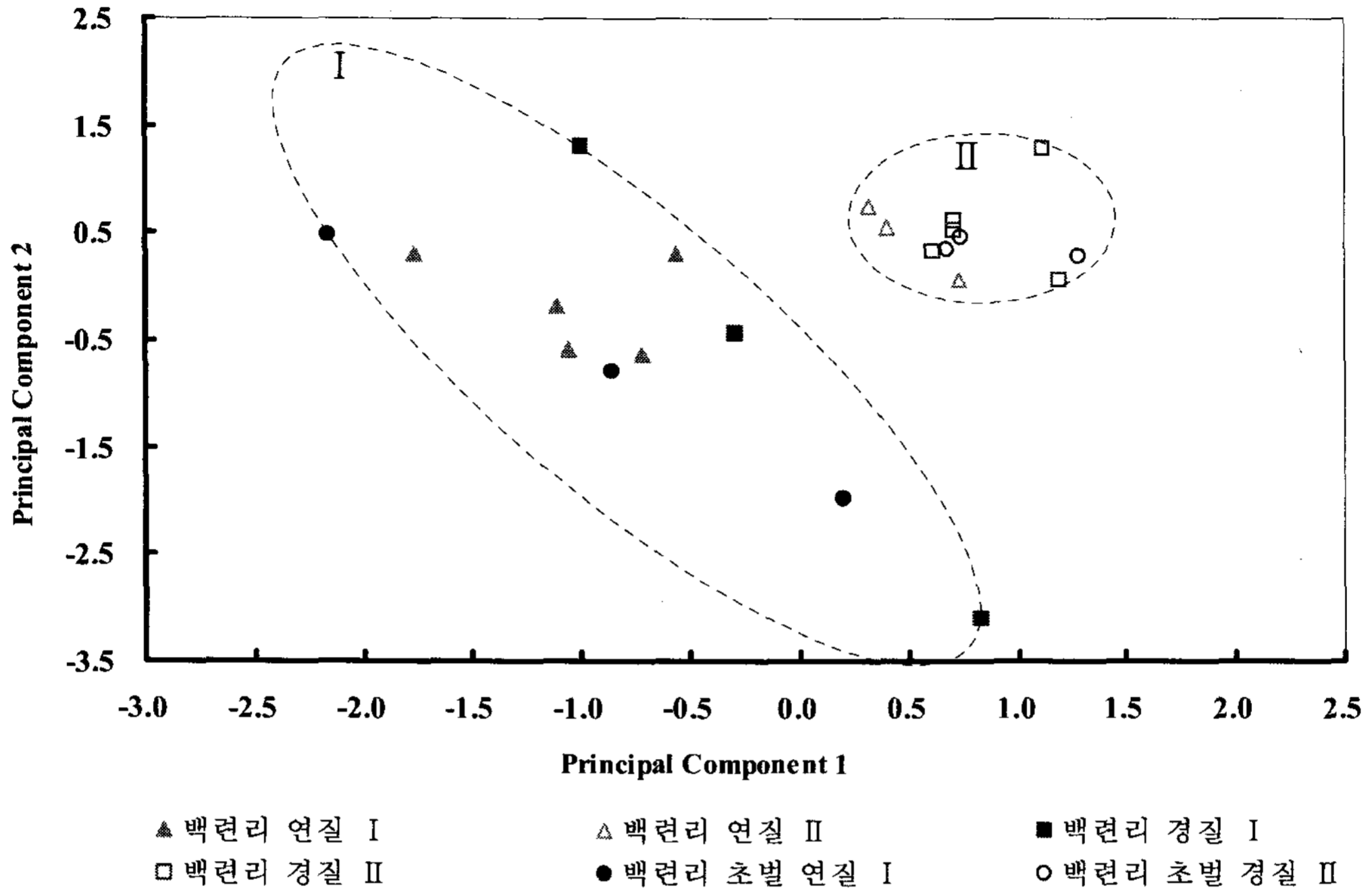


Figure 4. 백련리 태토 미량성분의 주성분분석 그래프.

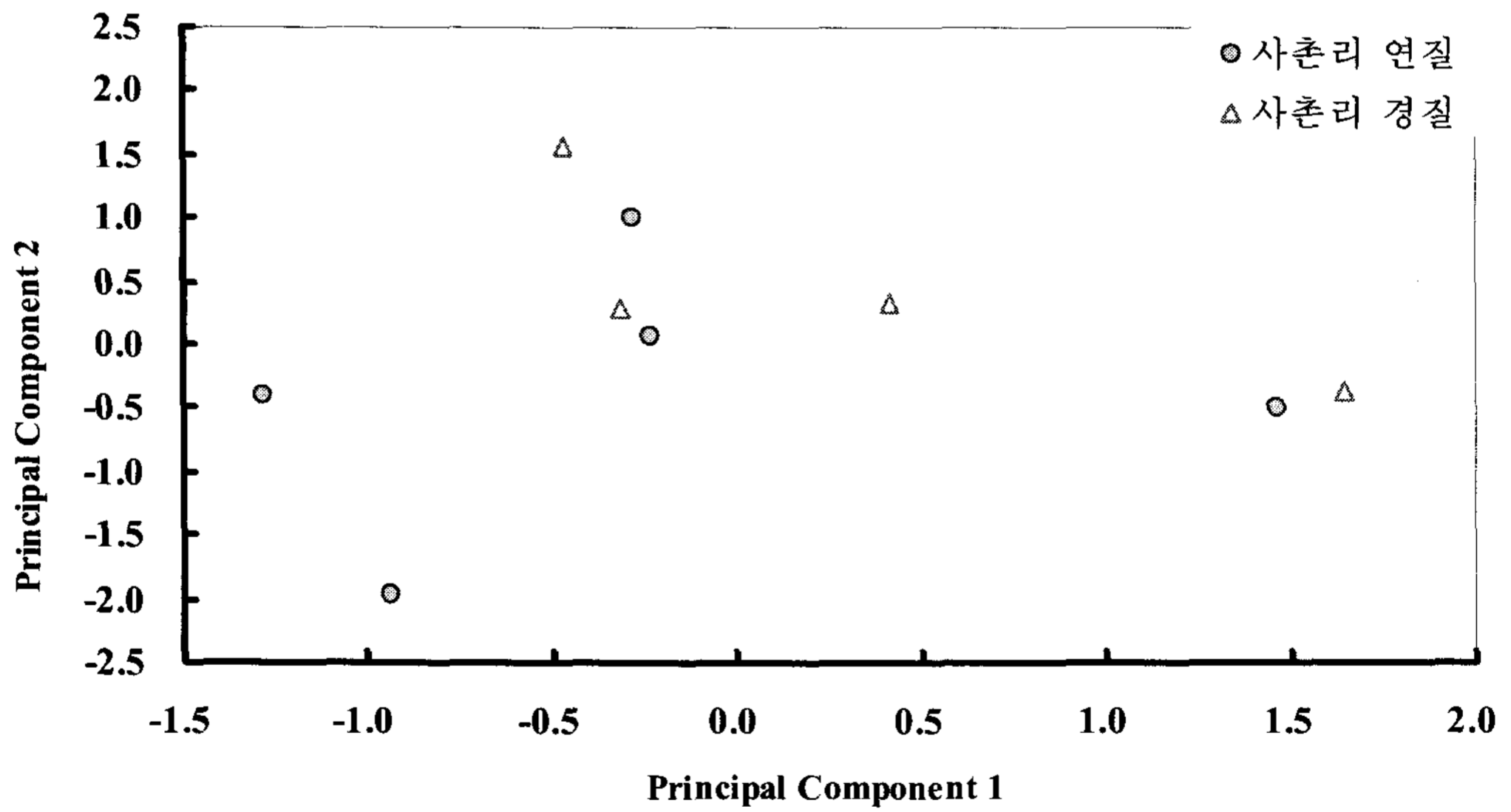


Figure 5. 사촌리 태토 미량성분의 주성분분석 그래프.

4. 결론

중성자방사화분석법으로 측정된 Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Eu, Hf, La, Lu, Rb, Sc, Sm, Ta, Th, V, Yb 총 17개 미량성분의 함량에 의해 두동리, 백련리, 사촌리 가마터에 대하여 주성분분석법과 판별분석을 실시하였다. 그 결과 주성분분석에 의해 두동리, 백련리, 사촌리 가마터가 각 요지별로 분류되었으며 판별분석에 의해 가마터별 산지 분류 기준을 제시할 수 있었다.

태토의 가시적 특징에 따라 구분된 연질 및 경질, 그리고 양질 및 조질에 대한 특성 구분을 위해 각 가마터별로 주성분분석을 실시한 결과, 연질과 경질의 특성은 원료의 화학 조성과 상관관계가 적으나 양질과 조질의 특성은 원료의 화학 조성과 높은 관계가 있는 것으로 판단되었다.