

공주 학봉리 분청에 대한 성분과 미세구조의 분석

이영은, 고경신

중앙대학교 화학과, 서울특별시 동작구 흑석동

Compositional and Microstructural Study of Punchong from Hakbongni, Kongju

Young Eun Lee and Kyongshin Koh

Department of Chemistry, Chung-Ang University, Huksuk-dong, Dongjak-ku, Seoul

초 록 : 15세기 말과 16세기 초에 철화분청을 생산했던 곳으로 잘 알려진 공주 학봉리에서 수습된 12 도편의 분청사기를 과학적으로 분석하였다. 태토와 유약의 성분은 각각 X선 형광분석기와 전자현미분석장치로 분석하였고, 미세구조분석은 광학현미경, 편광현미경, 전자현미분석장치, 그리고 X선 회절분석기를 이용하였다.

태토와 유약의 성분은 학봉리에서 지리적으로 가까운 곳에 위치한 보령 용수리분청과 비교하여 통계분석을 하였으며, SPSS 프로그램을 사용하였다. 태토는 보령 용수리 분청에 비해 실리카와 용융제는 높게 나타났으나, 알루미늄은 낮은 수치를 보였고, 유약은 실리카, 소다, 철산화물은 높은 반면, 알루미늄과 칼슘산화물의 양은 낮게 나타났다. 학봉리 분청 자체도 두 그룹으로 나뉘었다. 유약은 라임계열이었으며, 태토내에는 석영, 돌레가 일부 녹은 큰 장식덩어리, 사장석, 흑운모와 철산화물과 같은 결정들이 많이 남아있음을 관찰할 수 있었다. 이러한 미세구조로 보아 원료의 수비상태가 좋지 않았고, 번조온도도 비교적 낮았음을 예측할 수 있다. 철화안료의 원료는 성분과 X선 회절분석에 의해 Mg/Fe/Al 스피넬로 확인되었다.

ABSTRACT : Twelve Punchong sherds collected in Hakbongni, Kongju where the well known iron-painted on white slip were manufactured from late 15C to early 16C were analyzed for their composition and microstructure. The composition of the body was analyzed by X-ray fluorescence and that of glaze by electron probe micro-analyzer. Microstructure was observed by optical microscope, polarizing microscope, EPMA, and X-ray diffractometer.

The results of composition of body and glaze of Hakbongni were compared with those of Punchong from Yongsuri, Boryong which was close to Hakbongni. The composition of body and glaze of these two areas were compared by principal

component analysis using SPSS program. Hakbongni bodies have higher silica and flux materials but lower alumina and their glaze have higher silica, soda, iron oxide but lower alumina, calcia. Hakbongni punchong itself is divided into two groups. Their glaze is lime type. There are many remnant minerals, such as quartz, large feldspar mass with partially melted surrounding area, albite, biotite, and iron-oxide. From such a microstructure we can assume that preparation of raw material was rather crude and firing temperature quite low. Iron-painted material is identified as Mg/Fe/Al spinel by composition analysis and XRD pattern.

1. 서론

고려청자가 쇠퇴하면서부터 백자가 본격적으로 제작되는 시기까지의 조선초기 약 200여년간 생산되었던 분청사기는 도자기술적인 면에서는 떨어지나, 소박하고 자유분방하며 유머스러운 멋이 담겨 있어 미술사가들에 의해 가장 한국적이면서도 동시에 현대적인 미를 지니고 있는 것으로 평가되고 있다.

또한 문양기법이 다양하고 지방마다 뚜렷한 특색이 나타나는데, 그 중에서도 15세기 후반에서 16세기 전반에 걸쳐 공주 계룡산 일대의 학봉리 분청사기 가마터에서 제작된 철화분청은 백토분장 위에 철화 안료로 그림을 그린 독특한 기법의 분청으로 분청사기의 특징을 잘 보여주고 있다.

본 연구는 학봉리 분청의 3호와 5호가마¹에서 수집된 12편의 분청사기에 대한 성분과 미세구조를 분석하였고, 이러한 과학기술적 고찰을 통해 학봉리 분청의 원료, 제작기법, 그리고 번조상황 등을 추정해보려고 하였다. 분석한 도편의 일부를 Fig. 1에 나타내었다.

2. 가시적 성질

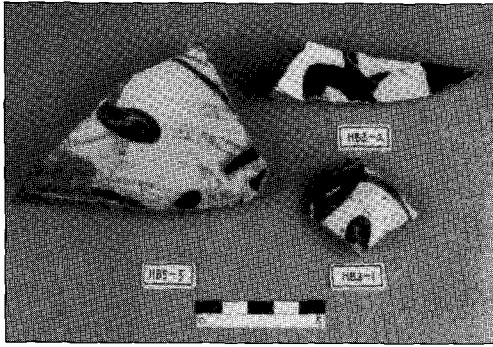
학봉리 분청 12편에 대한 태토의 가시적인 특징과 성분을 Table 1에 나타내었다. 분석한 도편들은 상감된 초벌구이 2점, 백토분장 위에 철화로 그림을 그린 도편 4점, 귀얄자국이 선명한 2점을 포함하여 백토분장된 도편 5점과 무문도편 1점이었다. 분장분청 중에는 기벽이 얇고 단단하며, 정선된 입자로 경질에 속하는 도편 3점(438, 439, 448)이 있었고, 철화가 그려진 것은 기벽이 두터우며 모래 등이 섞여 있었다. 태토의 색은 주로 진회색과 검은 갈색계통이었으며 층이 있는 것도 있었다.

Table 2에는 유약에 대한 잔금의 상대와 색깔, 두께등의 가시적인 특징과 성분을 나타내었다. 유약은 거의 투명하여, 백토나 태토의 색이 그대로 보이는 것들이 있었으며, 안쪽과 바깥쪽 표면의 유약두께 차이가 심하여 각각 분리하여 나타내었다. 대체로 200 μm이하의 얇은 편에 속했다.

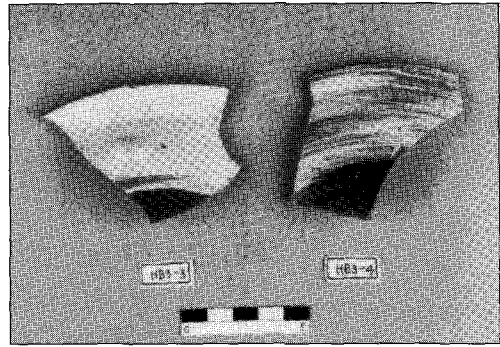
3. 성분분석

3.1. 실험방법

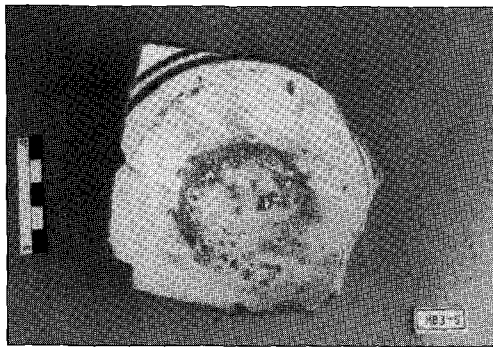
태토의 성분분석은 X-선 형광분석기(XRF, PW1480, X-ray Fluorescence Sequential Spectrometer, Philips Inc.)를 이용하였으



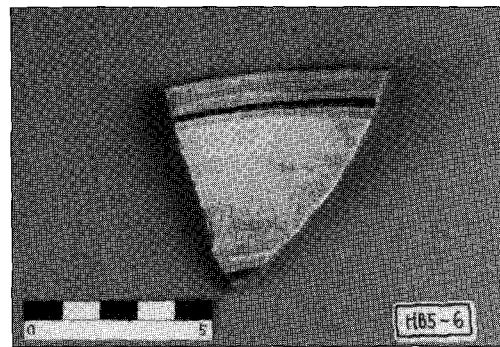
(a)



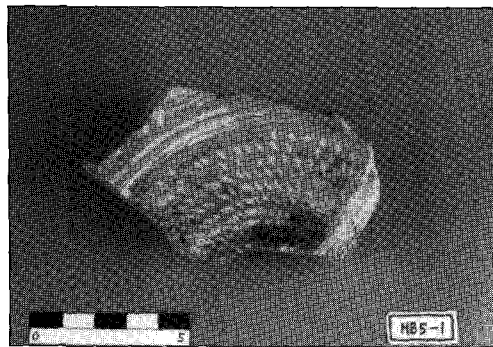
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 1 Pictures of some of the sherds analyzed in this study

- (a) HB5-5, HB3-2, HB3-1(↑) (b) HB3-3, HB3-4
(c) HB3-5 (d) HB5-6
(e) HB5-1 (f) HB5-2

Table 1. Body characteristics and compositions of Kongju Hakbongni(公州 鶴峯里) Punchong

Sample Number	Texture	Decoration	Color	Oxide concentration (wt.%) ¹								Total ⁴	
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ²	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂		L.O.I. ³
436 (HB3-1)	F	IP on WS	BK-GY	67.42	21.72	4.28	1.17	0.47	0.55	3.42	0.75	0.17	100.05
437 (HB3-2)	F	IP on WS	GY	70.93	19.09	3.70	0.76	0.41	0.89	3.37	0.73	0.00	99.95
438 (HB3-3)	F	BWS	BR-GY	67.01	21.00	3.96	0.91	0.77	1.53	2.81	0.78	0.80	99.65
439 (HB3-4)	MF	BWS	BR-GY	71.23	18.39	3.57	0.81	0.59	1.05	3.32	0.78	0.19	100.02
440 (HB3-5)	F	WS	GY	67.46	20.71	4.91	0.89	0.77	1.20	3.32	0.71	0.00	99.97
441 (HB3-6)	C	IP on BWS	BK-BR	68.95	18.94	3.31	1.04	0.63	1.25	3.87	0.73	1.07	99.89
443 (HB5-1)5	F	IL	GY-BR	67.07	17.90	2.55	0.48	0.36	0.98	3.09	0.68	6.79	99.97
				(71.96	19.20	2.74	0.52	0.39	1.05	3.32	0.73		99.97)
444 (HB5-2)5	F	IL	MGY-BR	61.64	17.13	2.77	0.77	0.43	0.94	2.63	0.75	12.34	99.51
			I,O)BK	(70.37	19.56	3.16	0.88	0.49	1.07	3.00	0.86		99.51)
445 (HB5-3)	F	ND	M)WH-GY	67.01	21.36	3.92	0.96	0.64	1.47	3.57	0.71	0.19	99.93
			I,O)BK-BR										
446 (HB5-4)	F	WS	GY	69.29	20.58	3.02	0.87	0.65	1.39	3.29	0.75	0.13	100.05
447 (HB5-5)	F	IP on WS	DBK-BR	69.19	20.35	3.53	1.25	0.67	0.73	3.19	0.80	0.23	100.04
			O)GY										
448 (HB5-6)	F	WS	BK-BR	69.55	19.52	3.23	1.01	0.75	1.49	3.15	0.74	0.35	99.87
<i>Range</i>				67.01	18.39	2.74	0.52	0.39	0.55	3.00	0.71	0.00	99.51
				-71.23	-21.72	-4.91	-1.25	-0.77	-1.53	-3.87	-0.80	-12.34	-100.05
<i>Average</i>				68.06	19.72	3.56	0.91	0.60	1.12	3.25	0.74	1.86	99.91

¹ The powder of only body, whose glaze had been polished off using mortar grinder, was mixed with flux, lithium tetraborate. This mixture was melted in a platinum crucible and made into a bead for XRF measurement.

² Fe₂O₃ : total Fe

³ L.O.I. : Loss of Ignition

⁴ Total : Beside the 8 major oxides shown here, MnO and P₂O₅ are included in the total. However, their values are not reported here, because their concentrations are very low.

⁵ 443, 444 : bisque samples. The value in the second row is normalized XRF total without L.O.I.

Body texture : F: fine MF: medium fine MC: medium coarse C: coarse texture

Decoration : IP on WS: iron painted on white slip WS: white slip, IL: inlay design

BWS: brush-painted white slip ND: no decoration

IP on BWS: iron painted on brush-painted white slip,

Color : BR: brown GY: gray RD: red BK: black

Layer division : I: Innermost layer M: Middle layer O: Outermost layer

Table 2. Glaze characteristics and compositions of Kongju Hakbongni(公州 鶴峯里) Punchong

Sample Number	Crackled state	Color	Thickness (μm)	Oxide concentration (wt.%) ¹										Total
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	
436(HB3-1)	×	CL	I) 35- 60 ● O)115-150 ●	57.23	12.93	5.66	3.41	14.24	0.66	2.32	0.07	0.57	1.6	98.68
37(HB3-2)	×	CL	I)200-215 ▲ O) 50- 95 ●	58.60	13.10	5.87	3.45	12.04	1.00	3.00	0.31	0.63	1.06	99.08
438(HB3-3)	○	L GY-GN	I)125-235 ● O)105-165 ●	60.45	13.10	1.72	2.56	15.47	1.53	2.57	0.00	0.48	1.74	99.60
439(HB3-4)	×	CL	I) 60- 80 ● O) 50-150 ●	64.66	17.76	1.79	1.12	6.34	1.73	4.28	0.06	0.28	0.65	98.68
440(HB3-5)	○	L GY-GN	I) 60-115 ● O) 40- 75 ●	60.75	13.26	3.58	2.67	13.45	1.32	2.41	0.00	0.50	1.32	99.26
441(HB3-6)	○	YL-BR	I)110-335 ● O)150-215 ●	63.14	12.94	1.78	1.81	14.05	1.89	3.15	0.10	0.11	0.90	99.85
445(HB5-3)	×	BR-GN	I)515-670 ■ O)110-120 ●	62.66	12.61	2.67	2.24	12.36	1.84	3.79	0.06	0.18	1.08	99.48
446(HB5-4)	○	L GN	I)315-325 ▲ O)210-215 ▲	56.41	12.20	1.13	2.07	21.67	1.40	2.58	0.06	0.21	1.28	99.01
447(HB5-5)	○	L GY-GN	I)200-225 ▲ O) 50- 85 ●	59.78	13.26	1.68	2.29	18.28	1.24	2.90	0.15	0.10	0.86	100.54
448(HB5-6)	○	CL	I)105-230 ● O) 90-110 ●	60.11	12.87	1.20	1.57	17.47	1.96	3.25	0.00	0.00	0.81	99.24
Range				56.41	12.20	1.13	1.12	6.34	0.66	2.32	0.00	0.00	0.65	99.01
				-64.66	-17.76	-5.87	-3.45	-21.67	-1.96	-4.28	-0.31	-0.63	-1.74	-100.54
Average				60.38	13.40	2.71	2.32	14.54	1.46	3.03	0.08	0.31	1.13	99.34

¹ The cross-section of sherd mounted in epoxy resin was polished for EPMA measurement.

The average of 4 or 6 different measurements is reported for each sample

The size of each measured area ranges from 4x6(μm)² to 67x50(μm)².

Crackled state : ○: finely crackled, △: roughly crackled, ×: not crackled

Color: GN:green, GY:gray, BR:brown YL:yellow CL:colorless L:light

Thickness : ● : thin(average value below 200 m), ▲ : medium(200-400 m),

■ : thick(above 400 m)

I) Inner glaze

O) Outer glaze

며, 다음과 같은 전처리과정을 실시하였다.

우선 태토에서 유약을 제거하여 태토만을 200mesh 이하의 가루로 만들고, 100 ℃에서 충분히 말려 습기를 제거하였다. 다시 950 ℃에서 40분 이상 가열하여 얻은 시료와 용융제(lithium tetraborate)를 1:5로 혼합하고, 이것을 백금도가니에 넣고 완전히 녹여 지름 3.5cm, 두께 0.4cm 정도의 원판형태의 시료를 만든 후 측정하였다.

유약의 화학성분은 에폭시 수지에 정착시킨 도편의 단면을 연마하여 전자현미분석장치(EPMA, Electron Probe Microanalyzer, SEM: JEOL SUPERPROBE JXA-8600SX, EDS: OXFORD PENTAFET_{ATW} detector)로 분석하였다.

3.2. 주성분 분석법을 이용한 성분의 결과분석

주성분분석법은 다변량통계분석법의 하나로써 많은 변수값들의 상호관련성을 고려하여 각 변수들을 선형결합한 소수의 주성분으로 집약하는 방법으로, 가장 많은 변수들이 묶이는 것을 주성분 1, 그 다음으로 큰 것을 주성분 2의 순으로 나타낸다.

이것을 수식으로 표현하면, 시료 n개에 대하여 측정된 산화물성분 m의 값은 데이터 matrix X(NXM)을 형성한다. 각 산화물의 값에 대해 같은 가중치를 갖도록 하기 위해 각 데이터를 평균 0, 단위표준편차를 갖도록 auto-scaling 한다.

$$Z_{nm} = \frac{X_{nm} - \bar{X}_m}{S_m}$$

X_m = 각 시료에 대한 산화물 성분 m값의 평균

S_m = 표준편차

이때 주성분 P는 다음과 같이 표현된다.

$$P_{nk} = \sum_{m=1}^M Z_{nm} \cdot v_{mk}$$

P_{nk} : 시료 n에 대한 k번째 주성분

v_{mk} : 각 변수에 대한 factor score coefficient matrix에서 k번째 고유벡터의 m번째 값

본 연구에서 학봉리 분청만으로는 시료의 수가 너무 작아 통계처리의 의미를 부여하기 어려웠기 때문에, 보령 용수리 분청도편 23편²을 포함하여 모두 35편(초별 4편 포함)의 주성분 8개 원소산화물 성분값에 대해 SPSS (Statistical Package for the Social Science) 프로그램을 사용하여 주성분분석법을 이용한 통계분석을 실시하였다. 다음은 태토에 대한 분석결과로 얻어진 주성분 1(P_{n1})과 2(P_{n2})이다.

$$\begin{aligned} P_{n1} &= 0.336Z_{n1}(\text{SiO}_2) - 0.341Z_{n2}(\text{Al}_2\text{O}_3) \\ &\quad - 0.187Z_{n3}(\text{Fe}_2\text{O}_3) - 0.098Z_{n4}(\text{MgO}) \\ &\quad + 0.169Z_{n5}(\text{CaO}) + 0.210Z_{n6}(\text{Na}_2\text{O}) \\ &\quad + 0.232Z_{n7}(\text{K}_2\text{O}) + 0.071Z_{n8}(\text{TiO}_2) \\ P_{n2} &= -0.122Z_{n1}(\text{SiO}_2) + 0.034Z_{n2}(\text{Al}_2\text{O}_3) \\ &\quad + 0.361Z_{n3}(\text{Fe}_2\text{O}_3) + 0.373Z_{n4}(\text{MgO}) \\ &\quad + 0.198Z_{n5}(\text{CaO}) + 0.219Z_{n6}(\text{Na}_2\text{O}) \\ &\quad - 0.031Z_{n7}(\text{K}_2\text{O}) + 0.285Z_{n8}(\text{TiO}_2) \end{aligned}$$

각 시료의 성분값을 위식에 대입하여 얻은 P_{n1} , P_{n2} 를, 주성분 1(principal component 1, PC1)과 주성분 2(principal component 2, PC2)를 각각 x, y축으로 하는 그래프에 도시하여 Fig. 2a에 나타내었다. Fig. 2b의 factor plot은 PC1과 PC2에 대한 각 원소의 성향을 나타내며 각 원소들의 선형결합으로 이

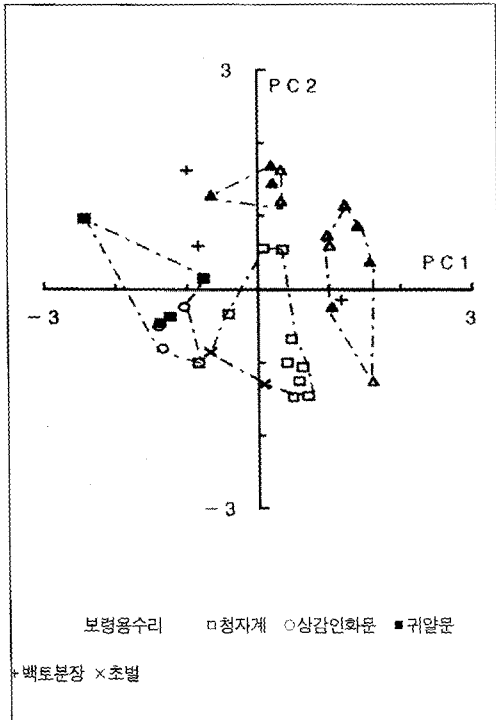


Fig. 2a. Plot of principal components 1 and 2 for body of Hakbongni and Yongsuri

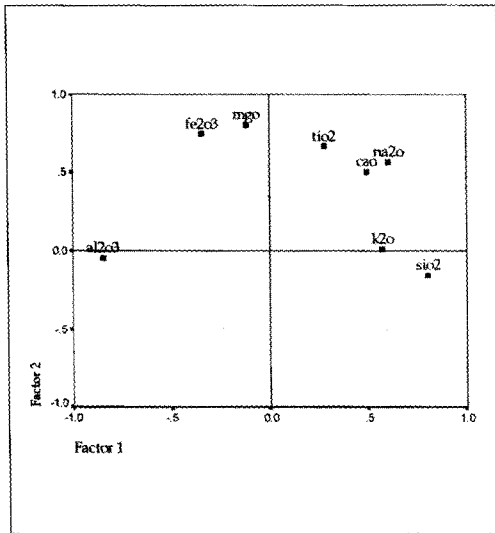


Fig. 2b. Factor plot of principal components 1 and 2 for body of Hakbongni and Yongsuri

루어진 P_{n1} 의 선형계수와 같은 의미를 갖는다. 즉, P_{n1} 에서 계수의 절대값이 가장 큰 SiO_2 와 Al_2O_3 가 가장 큰 영향을 미치며, 부호가 다른 두 성분은 음의 상관관계를 갖는다. 이것은 Fig. 2b에서의 PC1 축에서 +방향에 SiO_2 가 있으며, -방향에 Al_2O_3 가 위치하고 있는 것과 연결된다. 또한 CaO의 경우 P_{n1} 에 대해서는 +0.17, P_{n2} 에 대해서는 +0.20의 값을 가지므로 1사분면에 놓이게 된다. 그러므로 Fig. 2a의 데이터를 해석하는데 Fig. 2b를 연결시켜보면 어느 성분이 많은지 어떤 성분으로 그룹지어지는지를 알 수 있다.

우선 Fig. 2a를 보면 학봉리 분청과 용수리 분청의 태토는 분리가 잘 되며, 학봉리 분청은 용수리 분청에 비해 비교적 SiO_2 는 높고, Al_2O_3 는 낮으며, K_2O , CaO, Na_2O 등의 용융제로 작용하는 성분들과 TiO_2 는 높았다. 학봉리 분청 자체도 K_2O , SiO_2 는 높고, Fe_2O_3 와 MgO는 낮은 그룹과 그 반대의 경향을 보이는 두 그룹으로 분리가 되는데, Fe_2O_3 가 높은 것들의 태토의 색은 대체로 흑회색을 띄는 것들이었다. 전반적으로 자화(vitrification)과정에서 용융제로 쓰이는 칼슘, 나트륨, 칼륨산화물의 양이 비교적 높은 편인 것은, 미세구조 관찰시 장석이 많이 관찰되는 것과 관련이 있으며 이것은 낮은 온도에서도 자화가 잘 일어날 수 있었음을 의미한다.

다음은 유약에 대한 분석 결과로 얻어진 주 성분 1, 2이다.

$$\begin{aligned}
 P_{n1} = & 0.011Z_{n1}(SiO_2) - 0.161Z_{n2}(Al_2O_3) \\
 & + 0.227Z_{n3}(Fe_2O_3) + 0.260Z_{n4}(MgO) \\
 & - 0.065Z_{n5}(CaO) + 0.029Z_{n6}(Na_2O) \\
 & - 0.152Z_{n7}(K_2O) - 0.072Z_{n8}(TiO_2)
 \end{aligned}$$

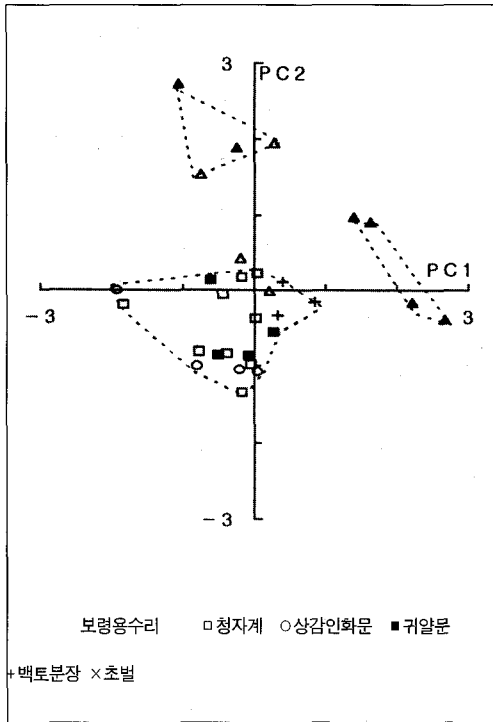


Fig. 3a. Plot of principal components 1 and 2 for glaze of Hakbongni and Yongsuri

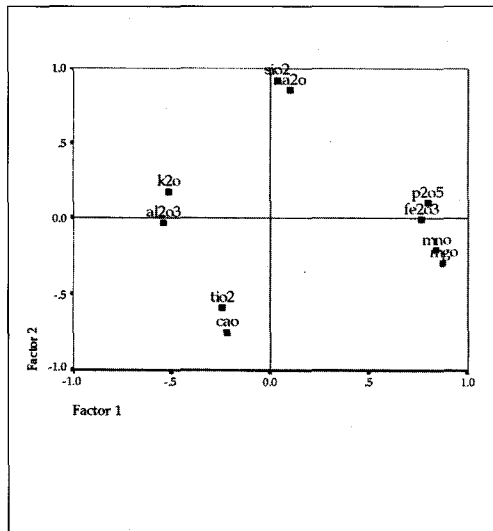


Fig. 3b. Factor plot of principal components 1 and 2 for glaze of Hakbongni and Yongsuri.

$$\begin{aligned}
 &+ 0.249Zn9(MnO) + 0.237Zn10(P_2O_5) \\
 P_{n2} = &0.347Zn1(SiO_2) - 0.010Zn2(Al_2O_3) \\
 &- 0.002Zn3(Fe_2O_3) - 0.109Zn4(MgO) \\
 &- 0.281Zn5(CaO) + 0.323Zn6(Na_2O) \\
 &+ 0.068Zn7(K_2O) - 0.221Zn8(TiO_2) \\
 &- 0.078Zn9(MnO) + 0.040Zn10(P_2O_5)
 \end{aligned}$$

Fig. 3a와 3b는 유약의 경우에도 잘 분리되며, 학봉리 분청이 전반적으로 용수리 분청에 비해 SiO₂, Na₂O, MgO, MnO, Fe₂O₃, P₂O₅ 성분이 높고, Al₂O₃, CaO, TiO₂, K₂O는 낮음을 보여준다. 학봉리 분청유약도 실리카와 주용융제 역할을 하는 칼슘산화물의 양이 적은 그룹과 실리카의 양은 적으나 칼슘산화물의 양이 많은 두 그룹으로 나누어졌다.

이 두 그룹 모두 라임(lime)계열 유약에 속한다. 학봉리 분청의 태토와 유약이 두 그룹으로 나뉘어지는 것은 도편이 수집된 가마와는 일치하지 않았다.

4. 미세구조

전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope)에서의 반사전자상(BEI, Back-scattered Electron Image)은 원자번호가 높을수록 밝게 보이고, 낮을수록 어둡게 보이는 특징이 있어 도자기의 미세구조를 관찰하는데 매우 좋은 상을 제공한다. Fig. 4는 시료 436 태토를 300배 확대한 사진이다. 어두운 회색의 매끈한 표면의 크고 작은 석영결정들 주위에 높은 온도에서 낮은 온도로 내려오면서 수축하여 생긴 테두리가 형성되어 있는 것을 볼 수 있으며, 사진의 왼쪽 아래와 오른쪽 윗부분의 밝은 회색으로 보이는 큰 장석은 주위



Fig. 4. Backscattered electron image (x300) No. 436, body

가 녹아있다.

자화과정을 거치면서 점토, 석영, 장석 등이 함께 섞여 있는 바탕부분(matrix)은 크게 두 부분으로 나누어 볼 수 있다. 상대적으로 약간 밝은 부분은 장석이 녹아서 생긴 곳으로 칼슘 성분을 조금 더 많이 포함하고 있으며(K-rich silicate), 여기서는 크고 긴 형태의 2차 물라이트가 생긴다.

약간 어두운 부분은 점토질이 우세한 부분으로 알루미늄이 약간 많고(Al-rich silicate) 미립질의 1차 물라이트가 생긴다. 이외에 미량광물로는 마름모 모양의 흰 부분은 지르콘(ZrO_2)이며, 그 옆의 가는 실모양의 결정들이 모여있는 것은 흑운모(biotite)와 녹니석(chlorite)이 혼합된 형태이다.

Fig. 5는 백토편장 위에 철화가 있는 부분의 단면의 반사전자상으로, 4층으로 구분되는데 가장 오른쪽부터 태토, 분장, 철화, 유약부분이다. 백토편장부분은 많이 손실되어 검게 보이는데, 이것은 백토성분에는 가열시 용융제로 작용할 성분이 매우 적어 자화되지 않으므로 연마과정을 거치면서 따로따로 떨어져 나가기가 쉽기 때문이다.

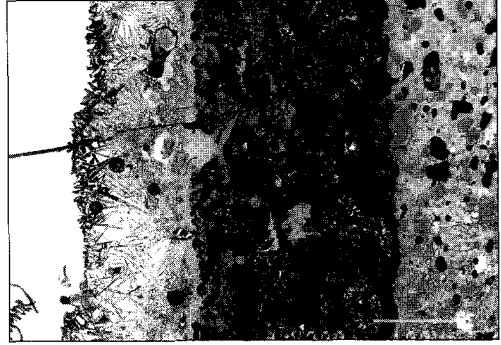


Fig. 5. Backscattered electron image (x200) No. 437, iron-painted on white slip

백토위의 철화안료는 작고 밝은 흰점들로 보이며, 백토와 유약사이에 길게 자라있는 결정은 회장석(anorthite, $CaAl_2SiO_8$)이다. 백토에는 알루미늄성분이 높고 유약에는 칼슘성분이 높아 백토가 없는 부분보다 회장석이 더 잘 생기게 된다.

철화안료를 전자현미분석장치(EPMA)로 분석한 결과 마그네슘과 철, 그리고 알루미늄 성분이 혼합된 성분(Al_2O_3 37%, Fe_2O_3 17%, MgO 8%)으로 검출되었으며, 이 부분을 X선 회절분석기로 분석한 결과(Fig. 7)와 종합하여 볼 때 Mg/Fe/Al 스피넬(spinel)인 것으로 확인되었다.

이 부분에 대한 X선 Mapping 사진(Fig. 6)은 유약과 철화안료, 생성된 회장석에서의 각 원소에 대한 상대적인 분포를 잘 보여준다. 6(a)는 반사전자상이고 (b), (c), (d)는 각각 Al, Fe, Ca에 대한 X선 mapping으로 회색 표시되는 부분이 더 많이 분포하고 있는 것을 의미한다. 그러므로 알루미늄은 백토와 회장석에 더 많이 분포하고 있고 철은 철화안료 부분에 집중되어 있으며, 칼슘은 태토보다는 유약쪽이 월등히 많고 회장석에도 분포하고 있

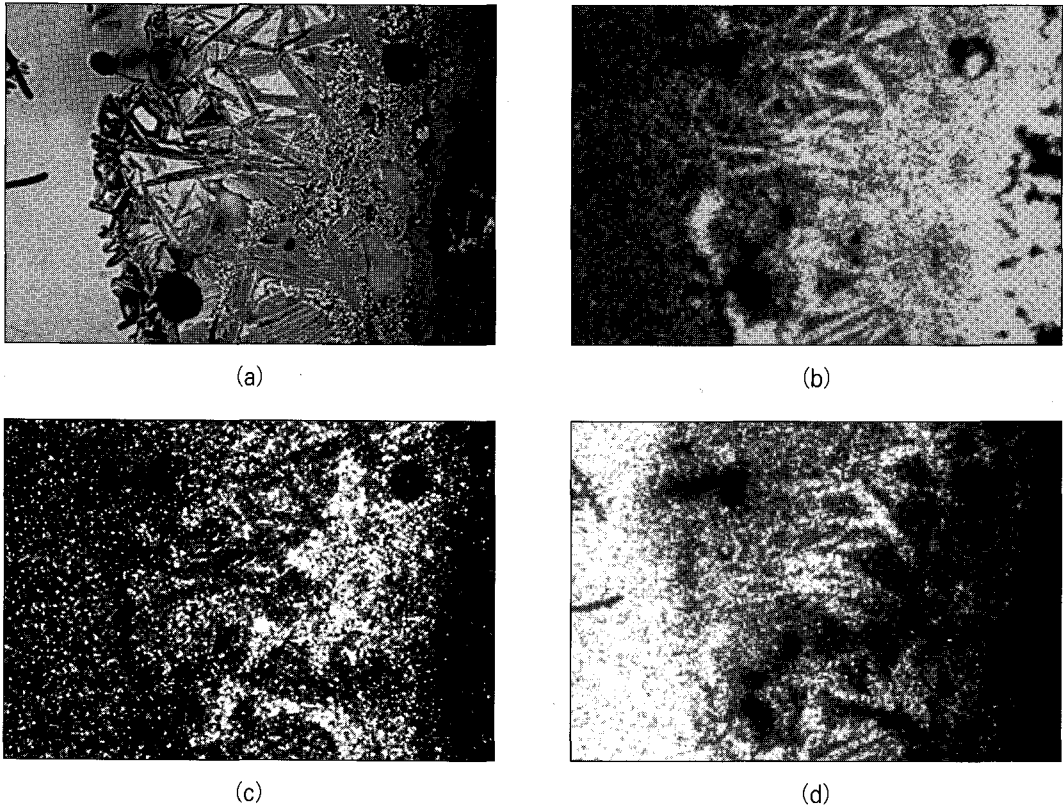


Fig. 6. X-ray mapping images of No. 437 (x400)

(a) backscattered electron image (b) Al
(c) Fe (d) Ca

음을 알 수 있다.

광물학적 특성은 X-선 회절분석기(XRD, X-ray diffractometer, Sintag Inc., XGEN-4000)와 편광현미경(Nicon Labophot 2-Pol)을 이용하여 관찰하였다.

Fig. 7은 학봉리 분청의 초벌, 완벌의 태토, 유약, 분장부분, 그리고 철화안료가 있는 부분에 대한 X-선 회절패턴을 보여준다. 초벌에서는 주광물로 석영, 미사장석(microcline), 정장석(orthoclase), 사장석(albite)의 장석류와 흑운모, 백운모(muscovite)의 운모류의 존재를 확인할 수 있으나 더 높은 온도에서 구워

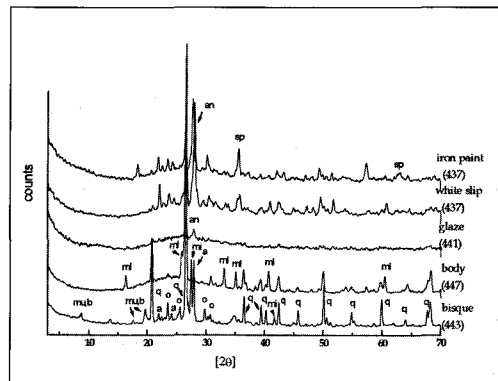


Fig. 7. X-ray diffraction patterns. (q:quartz
mu:muscovite b:biotite a:albite
o:orthoclase mi:microcline ml:mullite
an:anorthite sp:Mg/Fe/Al spinel)

진 완벌의 태토에서는 석영과 물라이트(mullite)만이 감지되었다. 유약에서는 석영과 회장석만이 아주 작은 피크로 나타나는 반면, 백토에서는 석영보다 회장석 피크가 더 크게 보였고, 철화부분은 큰 회장석과 함께 스피넬이 뚜렷하게 확인되었다. 흑운모등의 철산화물이 많이 관찰되는 시료들이 몇 편 있었는데 Fe_2O_3 함량이 높은 것들이었다.

도자기는 고온으로 가열되면서 원료상태의 광물들의 조성성분과 결정구조가 변하였을 가능성이 크기 때문에 편광현미경에 의한 광물감정은 매우 어려우나, X-선 회절분석기에서 확인되는 주광물성분 외에 미량으로 존재하는 광물성분은 편광현미경을 이용한 관찰과 전자현미분석장치로 분석을 병행함으로써 보다 정확하고 많은 해석이 가능하게 된다.

학봉리 분청은 다른 지역의 분청보다 비교적 다양하고 많은 광물이 확인되었는데 Fig. 8은 시료 447의 태토에서 발견된 사장석이다. 작은 크기의 사장석이 남아있음은 이 도편의 변조온도가 그리 높지 않았음을 시사한다.

5. 맺음말

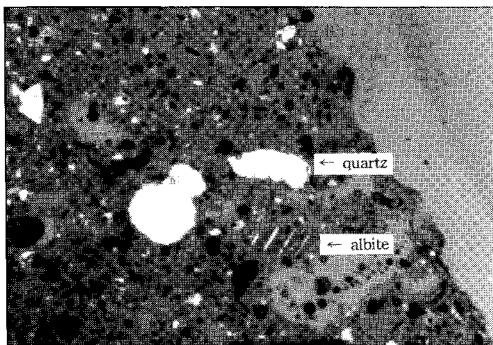


Fig. 8. Polarizing microscope picture (x200) Quartz and albite in thin section of No.447 (crossed polars)

15세기 후반에서 16세기 전반경에 활동했던 것으로 보이는 학봉리 분청사기 가마터 3호와 5호에서 수집된 초벌 2편 재벌 10편에 대한 성분과 미세구조분석을 실시하였다.

성분분석 결과 주로 어두운 갈색이나 흑회색을 띤 태토성분은 대체로 철함유량이 높았는데, 이것은 반사전자상에서 철을 함유한 결정들이 비교적 많이 보이는 것, 편광현미경에서 흑운모나 철산화물을 잘 볼 수 있는 것과 연결되는 결과이다.

용융제의 양이 많아 낮은 온도에서도 자화가 잘 일어날 수 있었지만 큰 장석덩어리들은 녹지 않고 남아 있었으며, 잔여광물들이 많이 남아 있고 유약내의 녹지않은 석영등으로 보아 변조온도는 비교적 낮았을 것으로 추정된다.

철화안료는 성분분석과 반사전자상에서의 광물형태, 그리고 X-선회절패턴의 확인으로 Mg/Fe/Al 스피넬임을 확인할 수 있었다.

감사의 글

태토분석을 위하여 기초과학지원연구소 서울분소의 X-선형광분석기를 사용하였음을 밝히며, 도편을 제공해주신 충북대학교 고고미술사학과 강 경숙 교수께 감사드립니다.

참고문헌

1. 강 경숙, "분청사기연구", 일지사, 서울, 1986.
2. 고 경신·이 영은, "충남 보령군 용수리 가마터 출토 분청사기의 과학기술적 연구", 한국수자원공사·이화여자대학교 박물관, 1996.
3. W. D. Kingery and P. B. Vandiver,

“Ceramic Masterpiece: Art, Structure, Technology”, The Free Press, New York, 1986.

“An Introduction to the Rock-Forming Minerals”, 2nd edition, Longman Scientific & Technical, New York, 1992.

4. W.A.Deer, R.A.Howie, J.Zussman,