

부산 녹산동 조질청자의 고고화학적 분석

남경민 | 김규호*¹

국립해양문화재연구소, *국립공주대학교 문화재보존과학과

An Analysis of Archaeological Chemistry on the Low-grade Celadons Excavated at Noksan dong, Busan in Korea

Kyung Min Nam | Gyu-Ho Kim*¹

National Research Institute of Maritime Cultural Heritage, Mokpo, 58699, Korea

*Department of Cultural Heritage Conservation Science, Kongju National University, Gongju, 32588, Korea

¹Corresponding Author: kimgh@kongju.ac.kr, +82-41-850-8544

초록 부산 녹산동 가마터에서 출토된 12세기 조질청자를 중심으로 가마터 4기에서 출토된 35점을 분석 시료로 선정하고 색도, 비중 및 흡수율, 미세구조 관찰과 태토와 유약의 조성을 분석하였다. 청자의 태토 색도는 가마에 상관없이 모두 비슷했으며 4·5호 가마 출토 선정 도편은 2·3호보다 명도가 어둡고, 채도는 회색계와 갈색계로 구분된다. 유약은 적색과 황색의 기여도가 높은 편이다. 선정된 도편의 기공률은 회색계 8.8%이고 갈색계 16.1%로 태토 색상에 따라 차이를 보인다. 태토와 유약의 주성분은 청자의 전형적인 성분 범주에 속하지만 TiO₂의 함량이 차이가 있다. 2·3호 가마와 4·5호 가마 청자의 가시적 차이는 사용 원료보다 수비 및 번조공정에 따른 것으로 볼 수 있으며 Fe₂O₃와 K₂O의 함량 차이는 공정 과정에서 배합기술의 변화를 시도한 결과로 볼 수 있다. 결론적으로 녹산동 청자는 초벌과정 없이 태토에 유약을 바른 후 한 번에 구웠던 제작 공정으로 인하여 태토가 충분히 자화되지 못했으므로 양질의 청자를 제작하기 위하여 가마별로 공정 차이가 있었을 가능성이 높다고 생각된다.

중심어: 부산 녹산동 청자가마터, 조질청자, 색도, 비중, 화학조성

ABSTRACT The purpose of this study is to analyze the characteristics of low-grade 12th-century celadons, which were excavated from a kiln site in Noksan-dong, Busan. The physical and chemical properties of the body and the glaze are evaluated through scientific analyses. All the selected celadon shards have a similar body color, regardless of the kiln from which they originated. The celadon shards from 2-3 kilns are brighter than those from 4-5 kilns, and there are two saturations, namely gray and brown. The brightness of the glaze shows a high contribution of red and yellow. The porosity of the selected shards is 8.8% in the gray saturation and 16.1% in the brown saturation. The major chemical compositions of the body and glaze are in the typical chemical composition of the celadon, but the TiO₂ flux contents are different. The visible characteristic difference between the 2-3 kilns and the 4-5 kilns can be attributed to the mixing and the firing process rather than the raw materials used. The difference in the Fe₂O₃ and K₂O flux between the 2-3 and 4-5 kilns can be attributed to changes in the ingredient combination during the process. In conclusion, Noksan-dong celadon could not be easier vitrification due to the manufacturing process that primary burning process, It is highly likely that there were process differences in kilns to produce high quality celadon.

Key Words: Celadon kiln site in Noksan dong, Busan, Low-grade celadons, Chromaticity, Bulk Specific gravity, Chemical composition

1. 서론

한반도에서 초기청자를 생산한 가마는 전축요와 토축요라는 두 가지 계열이 존재하는데 중서부지역을 중심으로 시작하여 10세기 2/4분기경 전축요가 축조되기 시작하나 10세기 말에서 11세기 초반경 요업중심지역이 서남부지역으로 서서히 이동하면서 전축요가 사라지고 토축요로 바뀌어 갔으며 그 이후에는 토축요 중심으로 청자가 생산되었다(Chang, 2003; Lee, 2012).

고려 초기부터 양질청자를 생산했던 전남 강진과 고려 중기에 와서 양질청자 생산지로 중요한 역할을 담당했던 전북 부안을 제외하고 대부분의 청자생산지에서는 조질청자를 생산하였다. 조질청자는 생산된 기종과 기형에서 흑유자를 동반 생산한 계통과 품질이 매우 낮은 계통, 그리고 강진의 양질청자를 모방한 계통으로 구분된다(Lee, 2004; Kim, 2006; Kang, 2016). 부산 녹산동 청자가마터는 초벌과정이 생략되고 철화를 시문한 청자가 주로 생산되며 품질이 낮은 청자라는 점을 볼 때, 고려 중기 강진과 부안 지역의 가마로부터 영향을 받아 지방의 수요를 충족하기 위해 조성한 요업단지로 추정된다(Foundation of East-Asia Cultural Properties Institute, 2012).

물, 연료, 원료가 비교적 풍부하고 고려시대 김해부의 외곽지대로 13조창 중 하나인 석두창과의 해상교통이 편리한 곳에 입지한 녹산동 청자가마터는 도기가마 1기, 도기폐기장 1개소, 자기가마 4기, 자기폐기장 5개소, 기와가마 1기 요업시설로 추정되는 수혈 및 주혈군이 함께 조사

되었다. 자기가마 4기의 폐기장에서 출토된 유물의 양식적인 특징 등에 따라 12세기 전엽~중엽으로 넘어가는 과도기적인 시기에 운영된 가마터에 해당된다. 세부적으로 요업의 시기가 2·3호는 고려 전기의 해무리굽완과 공반되는 음각 및 화형청자류와 다수의 소형완이 출토되고 있어 완이 잔으로 대체되고 발의 생산량이 증가하는 4·5호에 비해 앞선 단계로 생산기종의 차이가 있다.

강진과 부안으로 대표되는 양질청자 뿐만 아니라 그 외 지방가마에서 출토된 조질청자 연구는 고려시대 청자제작의 상황을 종합할 수 있는 중요한 자료로써 본 연구에서는 부산 녹산동 조질청자의 제작기술을 과학·기술적인 측면에서 규명하고자 하였으며, 질적 차이를 보이고 있는 원인을 규명하는 것에 그 목적을 두고 있다. 또한 녹산동 2~5호 청자가마터 내 요업시기에 따른 원료에 대한 상호 유사성 및 차별성을 파악하고자한다.

2. 연구대상 및 방법

2.1. 연구대상

선정 도편은 2~5호 가마 폐기소에서 발굴된 도편으로 4개 가마 폐기소에서 출토된 청자 태토와 유약의 색상, 태토 단면의 치밀도, 구성 입자 등을 고려하여 각 층위별 대표성을 갖는 청자 대접 35점을 선정하였다. 소성 상태가 양호한 청자를 기준으로 선택한 녹산동 청자는 태토색이 회색이며 전반적으로 2·3호의 청자보다 4·5호의 청자가 어두



Figure 1. Selected sherds from the kiln site of Noksan dong.

Table 1. Characteristics of selected sherds from the kiln site of Noksan dong

Sample number	Kiln site	Body ^{a)}				Glaze ^{b)}	
		Color	W-Particle	B-Particle	Texture	Color	Crack
mu-08	No. 2	L, GY	○	○	MC	GN	○
mu-09		L, GY	○	○	MC	GN	○
mu-10		L, GY	○	○	MC	GN-BN	○
mu-11		L, GY	○	○	MC	GN-GY	○
mu-12		BN-YE	○	○	MC	BN-RE	○
mu-13		GY	○	○	MC	GN, GY	○
mu-14		GY	○	○	MC	GN	○
mu-15		GY	○	○	MC	GN	○
mu-16		GY	○	○	MC	GN	○
mu-17		D, GY	○	○	C	GN	○
mu-18		GY	○	○	MC	GN-GY	○
mu-19		GY	○	○	MC	GN-YE	○
mu-20		GY	○	○	MC	GN	○
mu-21		GY	○	○	MC	GN	○
mu-22		GY	○	○	MC	GN	○
mu-23		BN	○	○	MC	GN-YE	○
mu-24		GY	○	○	MC	GN	○
mu-25	No. 3	BN-YE	○	○	MC	YE-WH	X
mu-26	BN-YE	○	○	MC	GN-YE	X	
mu-27	BN-WH	○	○	MC	GN-YE	○	
mu-28	L, GY	○	○	MC	L, GN	○	
mu-29	BN	○	○	C	GN-GY	X	
mu-30	GY	○	○	C	GN	X	
mu-31	GY	○	○	C	GN	X	
mu-32	D, GY	○	○	C	GN-BL	○	
mu-33	GY	○	○	MC	GN	○	
mu-34	D, GY	○	○	C	GN-BN	X	
mu-35	No. 4	GY	○	○	C	GN-GY	X
mu-36	GY	○	○	C	GN-GY	X	
mu-37	GY	○	○	C	L, GN	X	
mu-38	GY	○	○	MC	GN	X	
mu-39	GY	○	○	C	GN	X	
mu-40	No. 5	BN-YE	○	○	C	GN-YE	X
mu-41	L, GY	○	○	C	GN-GY	X	
mu-42	BN	○	○	C	GN-GY	X	

^{a)}Color: GY-gray, BN-brown, WH-white, BK-black, YE-yellow, RE-red, GN-green, D-dark, L-light
texture: F-Fine, MF-Medium Fine, MC-Medium Coarse, C-Coarse

^{b)}Color: GY-gray, BN-brown, WH-white, BK-black, YE-yellow, RE-red, GN-green, D-dark, L-light, BL-blue, GN-green, RE-red

은 편이다. 또한 태토 내에 조립질의 광물이 많이 함유되어 있고 조직은 치밀하지 않다. 유색은 녹색이며 부분적으로 유약 멍침 현상이 있거나 불완전하게 시유된 상태이다. 초벌 편이 없고 모든 도편 내저면과 접지면에서 비침의 흔적이 관찰되어 초벌구이를 하지 않은 채 포개구이 한 것으로 생각된다(Table 1, Figure 1).

2.2. 연구방법

본 연구에서는 도편의 물리적 특성과 화학적 특성 그리고 미시적 특성을 확인하기 위하여 다음과 같은 연구방법을 적용하였다.

물리적 특성 중에서 색도 및 반사도는 분광측색계(CM-700d, Minolta, Japan)를 이용하여 표준 광원 D65, 시야각 10, 분석면적은 3 mm로 조건에서 한 시료당 3회씩 측정하여 평균값 L^* , a^* , b^* 로 나타내었다. 부피비중, 흡수율 및 기공률은 비중측정기(GX-13, AND, Japan)와 디지털저울(GR-200, AND, Japan)을 사용하였다. 측정 시편은 동체부에서 채취하였으며, 조성 분석을 위한 태토 전처리 과정에서 색도 측정 후, 시료의 무게가 1.0 g 이상인 것을 선별하였다. 미세구조는 광학현미경(DM 2500M, LEICA, Germany)을 사용하였다. 전처리 과정으로 에폭시 수지에 정착시킨 도편의 단면을 연마하고 HF용액을 증류수(1 : 6)로 희석한 에칭액에 도편을 3초~수 초간 담귀 에칭한 후 반사광(Reflected light)으로 관찰하였다.

화학적 특성인 태토 주성분은 X-선형광분석기(XRF-1700, SHIMADZU, Japan)를 사용하여 Rh target으로 30 kV, 100 mA 조건에서 분석하였다. 시료 전처리하는 도편에서 유약을 제거하고 태토 만을 마노 사발을 이용하여 200 mesh 이하로 분말화 하고, 원판 유리시료(glass bead)로 만들어 분석

하였다.

유약 주성분은 주사전자현미경(MIRA3, TESCAN, Czech)에 부착된 에너지 분산형 분광기(QUANTAX 200, Bruker, USA)를 사용하여 가속전압 20 kV, 측정시간 100초로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 물리적 특성

청자의 태토나 유약층의 색도는 소성과정 중 일어나는 다양한 물리·화학적 작용이 동시에 작용하여 나타나는 것이므로 도자기의 소성과정을 이해하는 중요한 방법의 하나로 판단된다. 그러므로 부산 녹산동 청자의 색상을 객관적인 수치로 제시하기 위하여 색도를 측정하였다(Table 2, Figure 2).

2호 가마 청자 태토는 명도(L^*)가 52.56~81.32이고, 채도(a^* , b^*)는 0.12~3.20, 1.39~17.59 범위를 갖는다. 유약은 명도(L^*)가 41.93~65.05이고, 채도(a^* , b^*)는 -1.13~14.05, 14.93~26.19이다. 측정결과 색도 값의 범위가 넓은 편으로 밝기와 색상이 다양하였던 가시적 관찰 결과와 일치하였다. 소성조건의 차이로 mu-12 도편은 다른 도편보다 채도 b^* 값이 높고 가시적으로 갈색을 띤다. 3호 가마 청자 태토는 명도(L^*)가 50.75~81.61이고, 채도(a^* , b^*)는 0.21~13.42, 2.87~25.08 범위를 갖는다. 유약은 명도(L^*)가 32.45~63.69, 채도(a^* , b^*)는 0.68~9.67, 11.19~32.19로 2호 가마처럼 각 도편간의 색상 편차가 크다. mu-23, 25, 26, 29 도편은 태토 채도 값이 높게 측정되어 차이를 보인다. 4호 가마 태토는 명도(L^*)가 55.99~65.49, 채도(a^* , b^*)는 0.16~1.15, 2.99~8.22 범위를 갖는다. 유약은 명도(L^*)

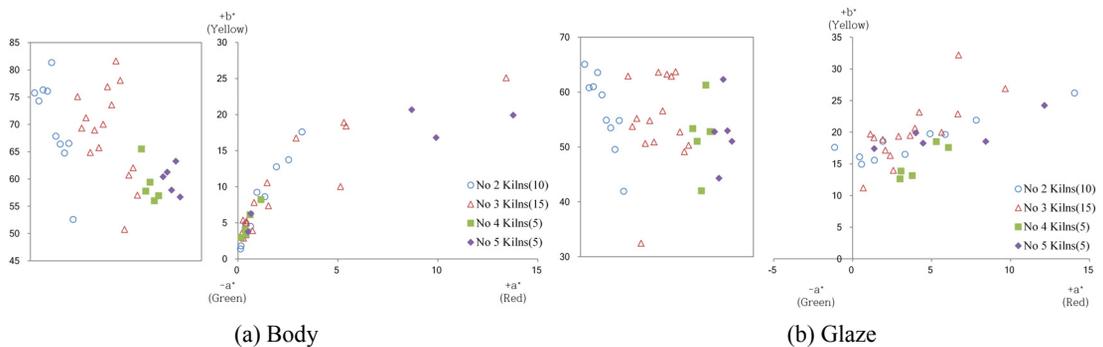


Figure 2. Chromaticity of selected sherds.

Table 2. Chromaticity, specific gravity, absorptivity, porosity of selected sherds

Sample number	Chromaticity						Apparent specific gravity	Bulk specific gravity	Absorptivity (%)	Porosity (%)	Remarks
	Body			Glaze							
	L*	a*	b*	L*	a*	b*					
No. 2 Kilns(10)											
mu-08	75.77	0.38	4.85	65.05	-1.13	17.61	2.28	2.12	3.4	7.1	gray
	0.37	0.07	0.81	0.43	0.40	0.31	0.01	0.02	0.6	1.1	
mu-09	74.29	0.63	4.51	60.79	1.93	18.54	2.28	2.07	4.5	9.4	gray
	0.37	0.03	0.19	0.98	0.44	1.35	0.01	0.02	0.7	1.3	
mu-10	76.32	1.93	12.75	60.97	7.83	21.91	2.33	1.97	7.8	15.3	gray
	0.52	0.22	0.41	0.66	1.23	0.18	0.02	0.01	0.2	0.5	
mu-11	76.09	0.95	9.23	63.55	5.86	19.65	2.28	1.94	7.8	15.1	gray
	0.22	0.06	0.18	0.09	0.30	0.17	0.01	0.01	0.1	0.2	
mu-12	81.32	3.20	17.59	59.49	14.05	26.19	2.39	1.87	11.5	21.6	brown
	0.48	0.02	0.52	0.51	0.36	0.54	0.02	0.01	0.7	1.2	
mu-13	67.83	2.53	13.73	54.88	3.32	16.51	2.28	2.04	5.2	10.5	gray
	0.72	0.30	0.75	0.24	0.30	0.24	0.02	0.03	1.2	2.3	
mu-14	66.39	0.39	4.01	53.48	0.45	16.10	2.30	2.11	3.9	8.2	gray
	0.48	0.05	0.18	0.19	0.33	0.38	0.01	0.02	0.5	1.0	
mu-15	64.75	0.15	1.81	49.54	0.57	14.93	2.25	2.16	1.8	4.0	gray
	0.53	0.02	0.42	0.38	0.56	0.78	0.01	0.01	0.1	0.2	
mu-16	66.51	1.35	8.62	54.79	4.91	19.75	2.28	2.09	3.9	8.1	gray
	0.36	0.16	0.21	0.83	0.49	0.79	0.01	0.02	0.3	0.6	
mu-17	52.56	0.12	1.39	41.93	1.38	15.58	2.29	2.10	3.9	8.2	gray
	0.23	0.11	0.58	0.92	0.23	0.61	0.02	0.01	0.4	0.8	
No. 3 Kilns(15)											
mu-18	75.07	1.46	10.57	62.89	1.13	19.71	2.29	2.00	6.5	13.0	gray
	0.59	0.19	0.47	0.29	0.41	0.45	0.00	0.01	0.3	0.5	
mu-19	69.32	0.43	5.24	53.73	3.95	20.63	2.34	2.14	4.0	8.5	gray
	0.26	0.06	0.31	0.61	0.29	1.18	0.01	0.00	0.2	0.3	
mu-20	71.22	0.42	4.99	55.18	2.92	19.34	2.26	2.07	4.2	8.7	gray
	0.41	0.17	0.45	0.42	0.36	0.92	0.00	0.01	0.2	0.3	
mu-21	64.86	1.52	7.37	32.45	2.58	13.96	2.27	2.14	2.8	6.0	gray
	0.43	0.33	0.38	0.08	0.23	1.30	0.01	0.01	0.3	0.7	
mu-22	68.95	0.28	2.87	50.64	1.91	18.85	2.29	2.19	2.0	4.4	gray
	0.05	0.01	0.31	0.49	0.21	0.90	0.00	0.01	0.2	0.4	
mu-23	65.73	13.42	25.08	54.80	9.67	26.88	2.38	1.92	10.0	19.2	brown
	0.20	0.34	0.78	0.63	0.52	0.36	0.01	0.00	0.1	0.3	
mu-24	70.03	0.21	3.63	50.90	1.36	19.14	2.26	2.19	1.4	3.1	gray
	0.81	0.03	0.43	0.19	0.26	0.49	0.00	0.01	0.2	0.3	
mu-25	76.90	5.30	18.91	63.59	6.66	22.90	2.38	1.87	11.5	21.5	brown
	0.50	0.09	0.42	0.17	0.36	0.63	0.01	0.01	0.2	0.3	
mu-26	73.57	5.41	18.41	56.57	5.64	19.99	2.33	1.96	8.2	16.1	brown
	0.23	0.32	0.62	0.23	0.42	0.32	0.01	0.02	0.6	1.1	
mu-27	81.61	2.91	16.74	63.23	6.71	32.19	2.38	1.93	9.8	18.9	gray
	0.42	0.05	0.41	0.76	0.36	0.76	0.02	0.01	0.3	0.6	
mu-28	78.06	0.81	7.82	62.86	4.22	23.15	2.31	2.02	6.3	12.7	gray
	0.45	0.08	0.36	0.38	0.36	0.32	0.01	0.01	0.2	0.5	
mu-29	50.75	5.13	10.02	63.69	2.38	16.33	2.32	2.06	5.6	11.5	brown
	1.89	1.48	1.76	0.33	0.36	0.54	0.02	0.00	0.4	0.8	
mu-30	60.70	0.26	5.36	52.73	3.65	19.47	2.34	2.03	6.5	13.2	gray
	0.46	0.12	0.20	0.39	0.09	0.30	0.01	0.02	0.8	1.5	
mu-31	62.02	0.41	3.36	49.15	2.08	17.15	2.30	2.12	3.7	7.8	gray
	0.41	0.06	0.31	0.32	0.35	0.17	0.01	0.01	0.4	0.9	
mu-32	57.02	0.73	3.91	50.29	0.68	11.19	2.29	2.09	4.1	8.6	gray
	0.47	0.20	0.47	0.34	0.01	0.50	0.01	0.01	0.3	0.7	

Table 2. Chromaticity, specific gravity, absorptivity, porosity of selected sherds(continued)

Sample number	Chromaticity						Apparent specific gravity	Bulk specific gravity	Absorptivity (%)	Porosity (%)	Remarks
	Body			Glaze							
	L*	a*	b*	L*	a*	b*					
No. 4 Kilns(5)											
mu-33	65.49	0.41	3.43	53.32	5.30	18.50	2.32	2.17	3.1	6.6	gray
	0.34	0.08	0.38	0.63	0.48	0.20	0.01	0.02	0.6	1.2	
mu-34	57.77	0.16	2.99	51.02	6.07	17.58	2.32	2.14	3.6	7.7	gray
	0.49	0.12	0.21	0.84	0.07	0.22	0.01	0.01	0.2	0.5	
mu-35	59.40	0.36	4.03	42.01	3.07	13.85	2.26	2.07	3.9	8.1	gray
	0.34	0.09	0.24	2.89	0.54	0.85	0.01	0.01	0.3	0.6	
mu-36	55.99	1.15	8.22	61.27	3.01	12.62	2.35	2.05	6.2	12.7	gray
	0.78	0.28	0.66	0.44	0.55	0.26	0.01	0.02	0.4	0.7	
mu-37	56.93	0.61	6.12	52.78	3.78	13.14	2.37	1.95	9.2	17.9	gray
	0.31	0.26	0.76	0.31	0.23	0.29	0.01	0.02	0.3	0.5	
No. 5 Kilns(5)											
mu-38	60.40	0.50	3.76	52.75	1.38	17.40	2.35	2.11	4.9	10.3	gray
	0.33	0.07	0.23	0.38	0.41	0.61	0.02	0.07	1.9	3.6	
mu-39	61.25	0.65	6.26	44.30	8.44	18.54	2.31	2.07	5.0	10.3	gray
	1.07	0.12	0.61	2.49	1.55	1.99	0.02	0.04	1.3	2.6	
mu-40	57.96	13.77	19.90	62.29	4.01	19.88	2.34	1.88	10.6	19.9	brown
	0.60	0.45	0.34	0.50	0.46	0.96	0.01	0.03	1.0	1.6	
mu-41	63.25	8.70	20.67	52.93	12.15	24.21	2.35	2.02	7.0	14.1	brown
	0.38	0.17	0.30	0.26	0.28	0.43	0.01	0.02	0.8	1.4	
mu-42	56.69	9.91	16.80	51.01	4.46	18.27	2.36	2.01	7.4	14.8	brown
	0.84	0.73	0.85	0.65	0.03	0.20	0.00	0.02	0.5	0.8	

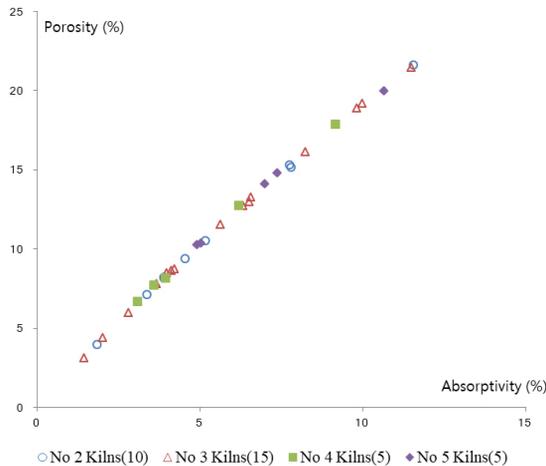


Figure 3. Porosity against specific gravity of selected sherds.

42.01~61.27, 채도(a*,b*) 3.01~6.07, 12.62~18.50으로 각 도편간의 색상이 균일하다. 5호 가마 태토는 명도(L*) 56.69~63.25이고, 채도(a*,b*) 0.50~13.77, 3.76~20.67이다. 유약은 명도(L*) 44.30~62.29, 채도(a*,b*) 1.38~12.15, 17.40~24.21이다. 이 중에서 3점(mu-40, 41, 42)은 덜 소성되어 유약이 완전히 자화되지 않은 도편으로 태토

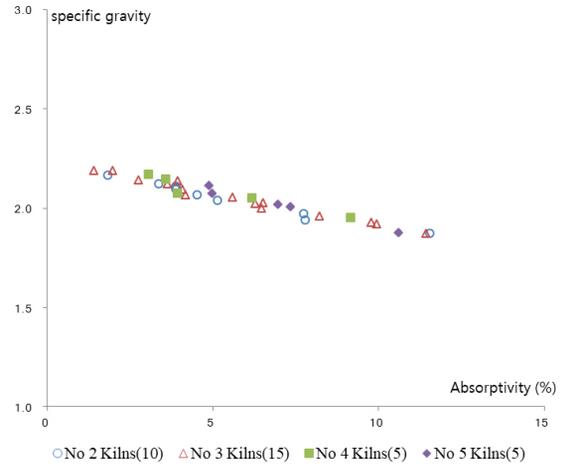


Figure 4. Absorptivity against specific gravity of selected sherds.

채도가 높게 측정되었다. 채도는 환원분위기에서 소성되어 자화가 잘 되면 낮아지는 경향을 보인다. 이는 점토 내 철 이온의 환원 정도에 따른 Fe³⁺와 Fe²⁺의 비와 관계된 것으로(Lee, 1998) 소성정도에 따라 색상의 변화가 있음을 확인시켜준다(Han, 2006).

녹산동 청자의 태토 명도(L*)는 2·3호 보다 4·5호 가마가

낮게 측정되어 4·5호에 어두운 도편이 더 많이 존재한다. 채도(a^* , b^*)는 회색으로 분류한 도편들이 적색-황색 좌표 안에서 0에 가까운 지점에 위치하고 있으며, 이 중 mu-10, 11, 13(2호 가마), 27(3호 가마) 도편은 다른 회색계 도편과 차이를 보인다. 갈색계 도편은 적색-황색 좌표 안에 적색 값이 높게 보이고 있으며 2·3호 가마의 갈색계 도편이 5호 갈색계 도편보다 낮은 a^* 값으로 차이를 보인다. 유약의 채도 색상차이는 태토처럼 뚜렷하지 않다.

비중은 부피에 대한 상대적 질량을 수치로 표현한 값으로 물질이 지닌 가장 기본적인 물리적 특성 중의 하나이다. 도자기의 비중은 소성 과정에서 원료광물인 점토가 변화되고, 이들 변화에서 흡착수나 결정수, 이온수 등의 탈수반응과 유리질화 되는 과정에서 기공률이 감소되고 치밀화되어 비중이 증가하게 된다(Mun and Choi, 2003). 즉, 자화 정도와 치밀도, 사용원료의 특성 등에 따라 달라진다(Table 2, Figure 3, 4).

2호 가마는 부피 비중 1.87~2.16, 흡수율 1.8~11.5%, 기공률은 4.0~21.6%에 분포한다. 갈색 도편(mu-12)은 부피 비중 1.87, 흡수율 11.5%, 기공률 21.6%로 치밀도가 낮은 편이다. 3호 가마는 부피 비중 1.87~2.19, 흡수율 1.4~11.5% 기공률 3.1~21.5%로 넓은 범위에 분포하여 가장 치밀한 도편부터 치밀도가 떨어지는 편까지 다양하다. 4호 가마 mu-33 도편은 부피 비중 2.17, 흡수율 3.1%, 기공률 6.6%로 가장 치밀하다. 그 외 도편은 부피 비중 2.05~2.14, 흡수율 3.6~9.2%, 기공률 7.7~17.9%로 분포한다. 5호 가마는 부피 비중이 1.88~2.11, 흡수율 4.9~10.6%, 기공률 10.3~19.9% 범위로 4기 가마 중 치밀도가 가장 떨어진다. 치밀도가 낮은 편은 대체로 갈색 도편이다.

녹산동 청자는 5% 이하의 흡수율과 기공률을 갖는 치밀한 도편에서 20% 이상 되는 치밀하지 않은 도편까지 치밀도에서 큰 차이를 보인다. 색도 측정결과에서 구분한 색상에 따라 회색은 기공률 14% 이하에 분포하며 색도측정결과 b^* 값이 높게 측정된 회색계 도편(mu-10, 11, 13, 27)은 높은 값을 나타낸다. 4호 가마의 모든 도편은 회색계이나 치밀도가 2·3호 가마 회색 도편보다 떨어진다. 갈색계 도편은 기공률 14% 이상의 범위에 분포하며 이는 물리적 특성 간에 상호 관련성이 있는 것으로 소성과정에서 열량을 많이 받지 못해 자화가 덜 된 것으로 판단된다.

3.2. 미세구조 관찰

도자기는 높은 온도의 소성과정을 거치면서 다양한 물

리·화학적 변화를 겪게 된다. 이러한 변화는 입자의 크기, 화학적 조성, 소성시간, 소성온도 등과 같은 여러 요인들에 의해 영향을 받는다. 여러 변화를 겪으며 형성된 미세구조를 통하여 도편의 자화정도를 비교할 수 있고, 태토 및 유약 그리고 태토와 유약의 경계면에서 일어나는 여러 현상을 통하여 소성조건에 대한 추정이 가능하다(Figure 5)(Lee, 1998).

2호 가마의 청자는 각 도편별로 미세구조의 차이를 보인다. 가장 큰 차이는 태토의 기공형태와 분포 양상으로 이는 소성에 따른 자화정도의 차이에서 온 결과라 할 수 있다. mu-10 도편은 자화되지 않은 도편의 미세구조로 기공의 분포도가 높은 편이다. 잔존하는 석영의 크기가 75~300 μm 로 태토의 수비가 잘 이루어지지 않은 것으로 생각된다. 이 도편의 경우는 유약면이 깨진 상태로 보아 자화가 잘 이루어지지 않아 태토와의 결합력이 약하여 도편의 전처리 과정에서 분리된 것으로 생각된다. 잔존하는 유약은 태토에 비하여 비교적 유리질화가 잘 되어 깨끗한 편이지만 유약 내에 존재하는 기포의 수가 많다. mu-15 도편은 2호 가마의 청자 중에서 가장 소성이 잘된 것에 해당한다. 태토 내의 기공과 입자상태에서 mu-10 도편과는 상이함을 알 수 있다. 미세기공의 분포도가 낮고 치밀한 구조를 갖고 있다. 유약면 또한 잔존하는 광물 없이 유리질화가 잘 이루어졌으며 기포가 일부 존재한다.

3호 가마 청자 태토는 2호와 비슷한 양상의 미세구조를 보인다. 그러나 유약은 다른 특징을 보인다. mu-19 도편은 유리질화 되지 못하고 잔존하는 광물이 없어서 깨끗하고 침상형의 anorthite가 생성되어 있다. 반면 mu-26 도편은 유약 내에 석영이 많이 존재하며 다수의 기포가 존재한다.

4호 가마의 청자는 모두 자화가 잘 이루어지지 않은 양상으로 2·3호 가마의 청자처럼 소성정도에 따른 미세구조 차이를 확인할 수 없다. 이는 앞서 기공률 및 흡수율에서 비슷한 측정값을 보였던 결과와 일치한다. 자화가 덜 이루어져 미세기공이 많이 분포하며 장석이 유리질화 되는 과정에서 생성된 기포가 포획되어 있는 현상이 관찰된다. 유약은 대부분의 도편에서 잔존하는 석영과 150~600 μm 크기의 장석이 소량 관찰된다. 유약이 완전히 유리질화 되지 않았음에도 불구하고 다른 가마의 청자보다 anorthite가 많이 보인다.

5호 가마 청자의 미세구조 또한 4호 가마의 청자와 유사하다. 대부분의 태토는 자화가 덜 이루어진 양상으로 광물들이 완전히 유리질화되지 못하여 치밀하지 않았다. 태토는 일률적으로 덜 소성된 양상을 보이는 반면, 유약은 도편

에 따라 약간의 차이를 나타낸다.

미세구조 관찰 결과에서 녹산동 청자는 태토의 경우 대부분 소성되지 않아 자화도가 좋지 않은 것으로 확인된다. 태토내의 부정형의 기공이 많이 분포하며, 잔존하는 광물이 조립질이고 원마도가 좋지 않으며 유리질화 되지 않은 장석이 관찰되었다. 자화가 잘 되지 않은 미세구조를 갖는

도편의 태토는 채도가 높고 기공률 및 흡수율에서 높은 값을 보여 미세구조와 물리적 특성 간에 상호 관련이 있는 것으로 나타난다. 녹산동 청자는 제작과정에서 초벌과정 없이 태토에 유약을 바른 후 한 번에 구웠던 공정으로 인해 태토가 충분히 자화되기 어려웠을 것으로 짐작되며, 번조할 때 유약의 자화정도를 기준으로 하여 태토가 완전히 자

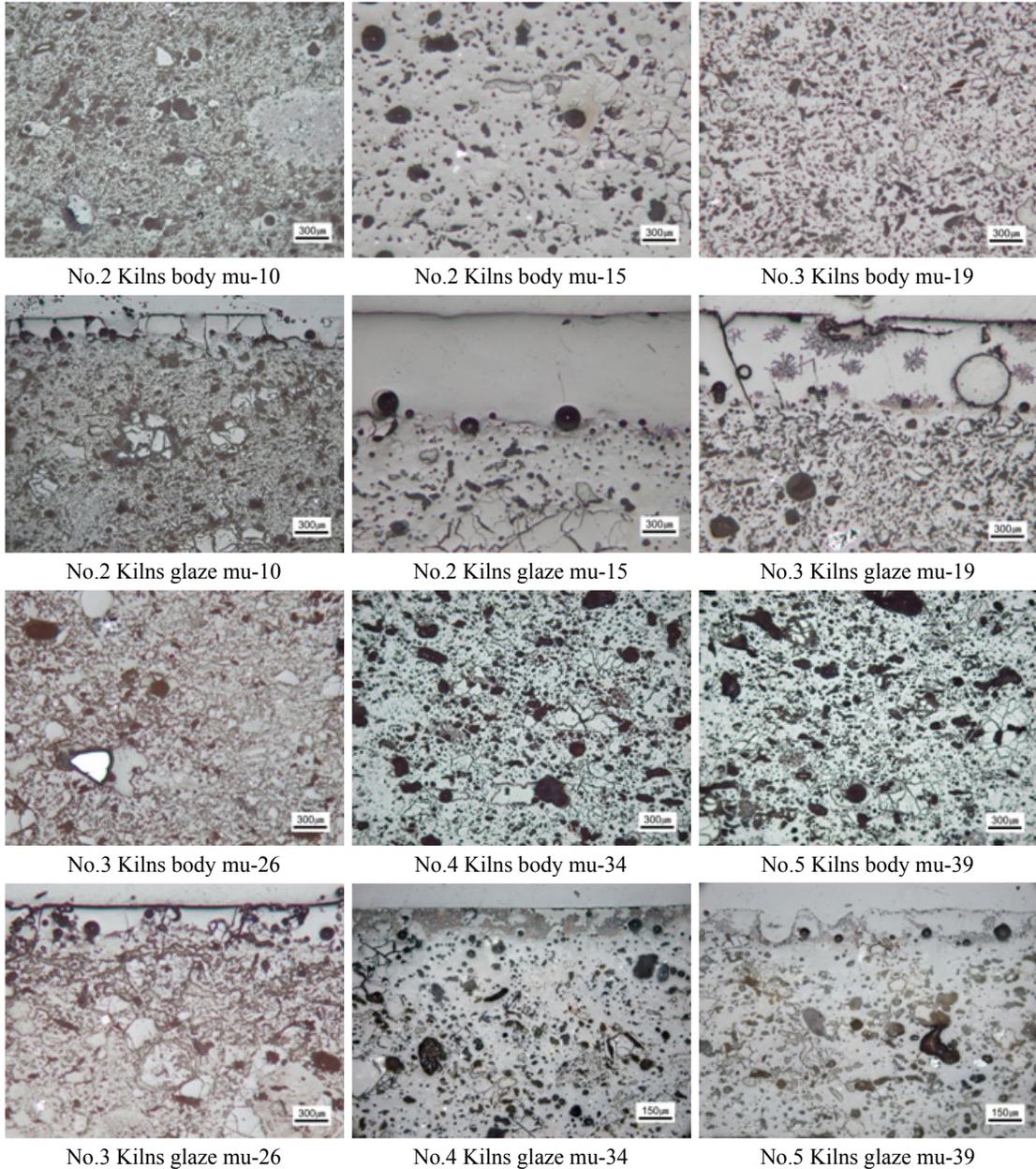
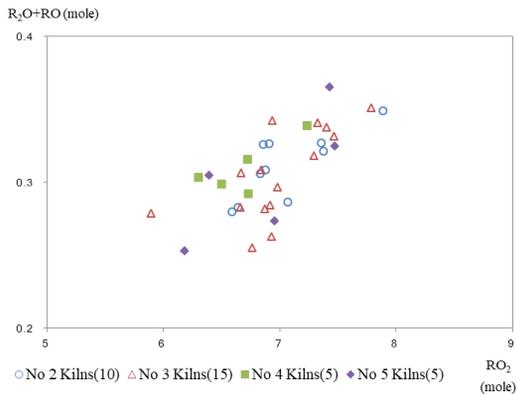


Figure 5. Microstructure of sherds analyzed.

Table 3. Major elements composition of body on selected sherds

Sample number	Oxide concentration (wt.%)											Seger Formula		
	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	L.O.I	Total	RO ₂	R ₂ O+RO
No. 2 Kilns(10)														
mu-08	76.0	16.9	1.0	0.27	0.31	0.17	3.8	0.48	0.05	0.02	0.68	99.8	7.36	0.33
mu-09	75.7	17.4	1.3	0.28	0.30	0.15	3.4	0.52	0.04	0.02	0.74	99.8	7.07	0.29
mu-10	74.7	17.7	1.2	0.30	0.30	0.19	3.7	0.49	0.04	0.02	1.2	99.9	6.88	0.31
mu-11	76.8	16.0	0.86	0.24	0.34	0.22	3.8	0.41	0.04	0.02	1.1	99.9	7.89	0.35
mu-12	74.2	18.2	1.3	0.30	0.23	0.17	3.6	0.51	0.03	0.04	1.2	99.9	6.64	0.28
mu-13	75.9	16.4	1.7	0.28	0.28	0.19	3.7	0.46	0.05	0.02	0.89	99.9	7.38	0.32
mu-14	74.5	18.2	1.7	0.33	0.35	0.16	3.3	0.54	0.04	0.02	0.64	99.9	6.59	0.28
mu-15	75.0	17.6	1.6	0.31	0.50	0.21	3.6	0.51	0.05	0.02	0.35	99.8	6.86	0.33
mu-16	74.9	17.5	1.8	0.36	0.39	0.20	3.4	0.53	0.05	0.02	0.69	99.9	6.84	0.31
mu-17	74.8	16.5	3.0	0.41	0.42	0.23	3.4	0.47	0.06	0.04	0.42	99.9	6.91	0.33
Ave.	75.3	17.3	1.56	0.31	0.34	0.19	3.59	0.49	0.04	0.02	0.79			
Stdve.	0.8	0.7	0.61	0.05	0.08	0.03	0.19	0.04	0.01	0.01	0.31			
No. 3 Kilns(15)														
mu-18	76.0	16.6	1.1	0.31	0.25	0.25	3.7	0.44	0.03	0.02	0.98	99.8	7.47	0.33
mu-19	72.5	20.0	1.5	0.39	0.50	0.19	3.3	0.57	0.04	0.03	0.80	99.8	5.90	0.28
mu-20	75.9	16.9	1.2	0.28	0.41	0.30	3.7	0.47	0.04	0.02	0.70	99.8	7.33	0.34
mu-21	74.8	17.2	1.9	0.36	0.49	0.12	3.9	0.49	0.06	0.02	0.60	99.9	6.94	0.34
mu-22	76.2	16.3	1.9	0.37	0.40	0.13	3.7	0.53	0.04	0.02	0.25	99.9	7.40	0.34
mu-23	74.2	17.1	2.2	0.33	0.32	0.16	3.7	0.54	0.04	0.03	1.2	99.8	6.84	0.31
mu-24	74.7	17.7	2.3	0.45	0.38	0.11	3.5	0.57	0.05	0.03	0.16	99.8	6.67	0.31
mu-25	76.2	15.8	1.3	0.26	0.30	0.19	3.9	0.45	0.05	0.02	1.2	99.8	7.79	0.35
mu-26	75.2	17.7	1.3	0.28	0.21	0.10	3.3	0.52	0.03	0.02	1.2	99.8	6.93	0.26
mu-27	75.0	18.1	1.3	0.28	0.23	0.08	3.2	0.52	0.03	0.02	1.1	99.9	6.76	0.25
mu-28	75.9	17.1	1.0	0.26	0.27	0.11	3.9	0.46	0.04	0.01	0.88	99.9	7.30	0.32
mu-29	74.9	16.5	2.7	0.30	0.32	0.08	3.6	0.49	0.06	0.03	0.76	99.8	6.98	0.30
mu-30	75.1	16.8	2.8	0.32	0.32	0.06	3.4	0.50	0.05	0.03	0.49	99.9	6.87	0.28
mu-31	74.7	17.2	3.0	0.32	0.35	0.07	3.5	0.51	0.05	0.02	0.18	99.8	6.67	0.28
mu-32	75.1	16.7	2.7	0.29	0.33	0.07	3.4	0.50	0.05	0.03	0.55	99.8	6.92	0.28
Ave.	75.1	17.2	1.89	0.32	0.34	0.13	3.58	0.50	0.05	0.02	0.75			
Stdve.	1.0	1.0	0.70	0.05	0.09	0.07	0.23	0.04	0.01	0.01	0.38			
No. 4 Kilns(5)														
mu-33	74.5	17.4	2.3	0.40	0.38	0.11	3.7	0.52	0.06	0.03	0.44	99.8	6.73	0.32
mu-34	74.1	17.3	3.3	0.51	0.50	0.09	3.1	0.55	0.07	0.05	0.27	99.8	6.51	0.30
mu-35	75.5	16.3	2.4	0.44	0.39	0.14	3.6	0.49	0.07	0.03	0.46	99.8	7.24	0.34
mu-36	74.3	16.8	3.1	0.47	0.36	0.07	3.2	0.58	0.06	0.04	0.77	99.8	6.74	0.29
mu-37	73.0	17.9	2.9	0.46	0.34	0.12	3.6	0.54	0.06	0.04	0.86	99.9	6.31	0.30
Ave.	74.3	17.1	2.80	0.45	0.39	0.10	3.44	0.53	0.06	0.04	0.56			
Stdve.	0.9	0.6	0.45	0.04	0.06	0.03	0.27	0.03	0.00	0.01	0.25			
No. 5 Kilns(5)														
mu-38	73.5	18.4	2.9	0.37	0.43	0.04	3.0	0.54	0.05	0.03	0.57	99.8	6.18	0.25
mu-39	73.5	17.6	3.2	0.50	0.37	0.09	3.5	0.59	0.07	0.04	0.42	99.8	6.40	0.30
mu-40	75.8	15.8	2.4	0.36	0.31	0.17	3.5	0.54	0.05	0.02	0.96	99.8	7.47	0.32
mu-41	75.1	16.5	3.0	0.42	0.24	0.07	3.1	0.53	0.05	0.03	0.88	99.8	6.96	0.27
mu-42	75.5	16.0	2.1	0.41	0.44	0.23	3.7	0.48	0.06	0.03	0.93	99.8	7.43	0.36
Ave.	74.7	16.8	2.71	0.41	0.36	0.12	3.36	0.54	0.06	0.03	0.75			
Stdve.	1.1	1.1	0.45	0.06	0.08	0.08	0.29	0.04	0.01	0.01	0.24			

화되기 위한 충분한 온도와 열량에는 이르지 못한 것으로 보인다(Lee *et al.*, 2005). 특히 4·5호 가마 청자의 태토는 모두 자화가 잘 이루어지지 않았으며 2·3호 가마의 청자와 차이를 보인다. 유약은 태토와 달리 대부분의 청자에서 유리 질화가 잘된 것을 관찰할 수 있다. 일반적으로 anorthite는 고온에서 오래 번조하였을 때 생성되는 것으로 알려져 있으며 또한 Ca^{2+} 의 함량이 많은 유약과 Al^{3+} 의 함량이 많은 태토 경계면에 주로 생성되기도 한다(Bang, 1993; Kim, 2006). 고려청자의 유약은 칼슘 함량이 높아 비교적 저온에서도 자화가 잘 될 수 있는 성분상의 특징으로 고려청자에서 anorthite의 부재는 식히는 속도가 빠르게 진행되었다는 것을 의미한다(Lee, 2013). 4·5호 가마의 도편은 2·3호 가마의 도편보다 유약의 자화도가 높은 특징으로 충분한 냉각 시간과 용제 함량의 차이로 인한 결과로 파악된다.



(a) Seger formula

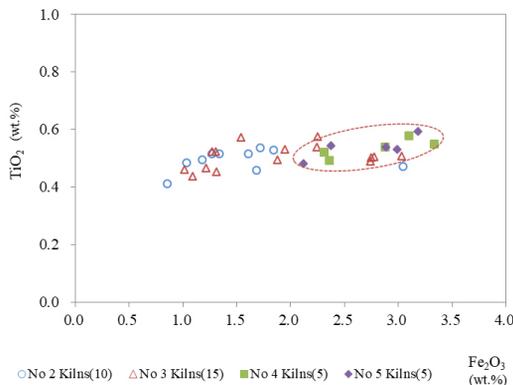
(b) Fe_2O_3 - TiO_2 of selected sherds

Figure 6. Major elements composition of the body on selected sherds.

3.3. 태토 분석

도자기의 주성분은 자기의 색상과 자화정도, 점력 등의 특성을 이해하기 위한 요소로서 점토의 주성분인 SiO_2 와 Al_2O_3 와 자화되는 과정에서 용융제역할을 하는 장석은 K_2O , Na_2O , CaO , MgO 을 포함하며 종류에 따라 화학성분과 역할이 약간씩 다르다. 태토의 주성분은 이외에도 착색 산화물인 Fe_2O_3 , TiO_2 , MnO 와 P_2O_5 를 포함한 모두 10가지 원소산화물을 측정하게 된다(Gyeonggi Provincial Museum, 2008). 부산 녹산동 조질청자 태토의 주성분을 분석하고 제계르 식으로 통계처리한 결과를 기초로 출토 가마에 따른 특성을 평가하였다(Table 3, Figure 6).

2호 가마 태토의 주성분은 SiO_2 74.2~76.8 wt.%와 Al_2O_3 16.0~18.2 wt.%정도로 약 92.6 wt.%를 함유하고 있다. 그 외에 발색산화물 2.1 wt.%이며 Fe_2O_3 이 0.9~3.0 wt.% 함량을 보여 주요 발색산화물로 작용하였다. 용제는 4.4 wt.%의 함량 비를 갖으며 K_2O 가 3.3~3.8 wt.%로 용제의 대부분이다. 3호 가마 태토의 주성분은 SiO_2 72.48~76.25 wt.%와 Al_2O_3 15.83~19.98 wt.%정도로 약 92.3 wt.%를 함유하고 있다. 그 외에 발색산화물 합 2.4 wt.%, 용제 합 4.4 wt.%로 2호 가마의 청자와 성분이 유사하다. 색도측정 결과에서 동일 가마 청자보다 명도(L^*)가 10~20 정도 낮은 mu-17(2호 가마), 29, 30, 31, 32(3호 가마) 도편은 Fe_2O_3 가 다른 도편보다 2배 이상 높다. 4·5호 가마 청자는 SiO_2 와 Al_2O_3 그리고 용제성분에서 앞의 2·3호 가마의 청자와 비슷한 값으로 측정되었다. Fe_2O_3 과 TiO_2 성분의 함량관계를 도식화한 결과 대체적으로 4·5호 가마의 청자의 Fe_2O_3 값이 앞의 두 가마보다 1 wt.% 이상 높아 발색산화물 함량에서 차이가 있다(Figure 6b). 이는 태토 명도(L^*)에서 4·5호 가마의 청자가 더 낮게 측정된 결과와 연관성이 있다.

청자 태토를 구성하고 있는 화학 성분에서 색상에 가장 많은 영향을 주는 성분으로 Fe_2O_3 의 함량 변화에 영향을 받으며, Fe_2O_3 과 같이 함유된 TiO_2 는 적은 함량으로도 Fe_2O_3 의 색상에 강한 발색보조제 역할을 한다(Prudence, 1987). 실제로 초기 청자태토에는 2.5~3 wt.% 이상의 Fe_2O_3 가 포함되어 있는데 12세기에 제작된 청자에서는 지역과 축요 방식에 따른 가마구조에 관계없이 Fe_2O_3 1.8~3 wt.%, TiO_2 0.6~1.1 wt.%가 함유된 2차점토를 주원료로 사용하였다(Kang, 2010). 일반적으로 Fe_2O_3 와 TiO_2 의 함량은 비례한다(Lee, 2013). 하지만 녹산동 청자의 Fe_2O_3 함량은 일반적인 청자 성분과 함량의 뚜렷한 차이가 없는 반면 TiO_2 의

Table 4. Major elements composition of glaze on selected sherds in this study

Sample number	Oxide concentration (wt.%)											Seeger formula	
	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	Total	RO ₂	R ₂ O ₃
No. 2 Kilns(10)													
mu-08	57.0	13.9	1.4	2.4	20.4	0.39	2.6	0.46	0.55	0.87	100.0	2.06	0.31
mu-09	57.1	14.7	1.6	2.7	19.0	0.37	2.4	0.46	0.48	1.2	100.0	2.18	0.35
mu-10	53.6	14.4	1.3	3.2	22.0	0.42	2.6	0.51	0.70	1.2	100.0	1.75	0.29
mu-11	57.5	15.6	1.4	2.3	18.0	0.39	3.0	0.43	0.29	1.2	100.0	2.32	0.38
mu-12	53.4	14.9	1.4	3.0	22.3	0.37	2.3	0.48	0.77	1.2	100.0	1.76	0.30
mu-13	59.3	15.5	1.8	2.5	15.1	0.45	3.7	0.48	0.54	0.81	100.0	2.60	0.42
mu-14	57.1	15.1	1.7	2.9	18.1	0.39	2.3	0.50	0.71	1.2	100.0	2.21	0.36
mu-15	57.3	15.9	1.8	2.9	17.1	0.45	2.5	0.50	0.49	1.1	100.0	2.32	0.40
mu-16	57.9	15.5	1.7	3.0	16.6	0.42	2.5	0.52	0.67	1.2	100.0	2.36	0.39
mu-17	57.2	15.3	3.6	2.5	16.6	0.34	2.3	0.49	0.41	1.2	100.0	2.46	0.44
Ave.	56.8	15.1	1.8	2.7	18.5	0.40	2.6	0.48	0.56	1.1			
Stdve.	1.8	0.6	0.7	0.3	2.4	0.04	0.4	0.03	0.15	0.1			
No. 3 Kilns(15)													
mu-18	56.5	16.3	1.5	3.1	16.4	0.46	2.9	0.55	0.84	1.5	100.0	2.29	0.40
mu-19	56.7	16.9	1.7	2.9	16.8	0.39	2.5	0.49	0.51	1.1	100.0	2.32	0.43
mu-20	58.3	16.5	1.7	2.7	15.2	0.51	2.9	0.51	0.73	1.0	100.0	2.54	0.45
mu-21	56.2	15.9	1.6	1.9	20.2	0.42	2.2	0.49	0.43	0.55	100.0	2.13	0.37
mu-22	57.8	14.9	2.1	2.6	17.5	0.46	2.5	0.52	0.68	0.94	100.0	2.32	0.38
mu-23	54.6	14.4	1.7	3.3	20.7	0.47	2.5	0.45	0.64	1.2	100.0	1.87	0.31
mu-24	57.4	15.4	2.6	2.0	18.1	0.36	2.3	0.55	0.48	0.85	100.0	2.37	0.41
mu-25	57.2	14.1	1.4	2.6	19.4	0.43	2.7	0.50	0.40	1.3	100.0	2.14	0.33
mu-26	54.4	14.6	1.3	1.9	23.0	0.42	2.5	0.42	0.65	0.77	100.0	1.83	0.30
mu-27	53.9	15.1	1.5	3.2	21.4	0.39	2.2	0.44	0.64	1.2	100.0	1.82	0.32
mu-28	58.7	15.2	1.8	2.9	15.9	0.39	2.7	0.72	0.58	1.1	100.0	2.49	0.40
mu-29	55.8	15.0	3.3	1.9	19.6	0.31	2.3	0.50	0.49	0.78	100.0	2.17	0.39
mu-30	56.1	13.8	3.2	2.4	19.5	0.34	2.2	0.50	0.80	1.0	100.0	2.11	0.35
mu-31	58.7	19.4	3.7	2.1	10.6	0.47	3.1	0.56	0.42	0.84	100.0	3.44	0.75
mu-32	55.2	13.7	3.7	3.3	17.8	0.47	2.8	0.59	1.10	1.2	100.0	2.06	0.35
Ave.	56.5	15.4	2.2	2.6	18.1	0.42	2.6	0.52	0.63	1.0			
Stdve.	1.5	1.5	0.9	0.5	3.0	0.06	0.3	0.07	0.19	0.2			
No. 4 Kilns(4)													
mu-33	53.4	14.8	2.2	2.9	21.6	0.27	2.4	0.52	0.61	1.3	100.0	1.83	0.32
mu-34	59.4	15.3	3.7	2.1	14.3	0.28	3.2	0.58	0.41	0.68	100.0	2.85	0.49
mu-35	56.7	14.2	2.5	2.5	18.1	0.38	3.6	0.50	0.69	0.84	100.0	2.18	0.36
mu-37	59.9	16.4	2.8	2.1	13.8	0.42	3.2	0.45	0.43	0.53	100.0	2.93	0.52
Ave.	57.3	15.2	2.8	2.4	17.0	0.34	3.1	0.5	0.54	0.85			
Stdve.	3.0	0.9	0.7	0.4	3.6	0.07	0.5	0.1	0.14	0.36			
No. 5 Kilns(5)													
mu-38	59.1	11.4	2.2	2.9	19.6	0.33	1.7	0.59	0.63	1.4	100.0	2.20	0.28
mu-39	55.8	15.3	3.8	2.9	15.6	0.53	3.4	0.58	0.83	1.3	100.0	2.33	0.43
mu-40	57.3	12.7	2.7	2.4	19.2	0.48	2.2	0.65	0.87	1.4	100.0	2.18	0.32
mu-41	58.0	14.6	2.3	2.1	16.0	0.56	4.7	0.48	0.61	0.71	100.0	2.41	0.39
mu-42	58.8	15.8	3.0	2.4	13.9	0.35	3.6	0.57	0.60	0.99	100.0	2.76	0.48
Ave.	57.8	14.0	2.8	2.5	16.9	0.45	3.1	0.6	0.71	1.17			
Stdve.	1.3	1.8	0.6	0.3	2.5	0.10	1.2	0.1	0.13	0.31			

0.44~0.59 wt.%의 함량 범위에 놓여있어 차이를 보인다.

제계르식은 산소와의 결합 형태에 따라 R_2O+RO , R_2O_3 , RO_2 의 세 가지 산화물을 기본 형식으로 하여 몰(mole)비를 비교하는 방법으로, 염기산화물(the basic oxide)은 R_2O+RO 로 표시되며, 주로 용제로 작용하는 산화물들이다. 중성산화물(the neutral oxide)은 R_2O_3 로 표시되고 가소성을 높이는 역할을 한다. 그리고 RO_2 로 표현되는 성분들은 산성산화물(the acid oxide)로 분류한다. 태토에서 중요한 역할을 하는 중성산화물을 기준으로 도식화한 그림에서 RO_2 5.02~7.79, R_2O+RO 0.21~0.38의 범위에 출토위치 구분 없이 분포하는 점으로 보아 같은 성분함량을 갖는 것으로 판단된다(Figure 6a). 태토 미세구조 관찰 결과 자화가 덜 이루어진 4,5호 가마는 2,3호 가마보다 수비기술이 부족해 치밀화 되기가 어려웠을 것으로 판단된다.

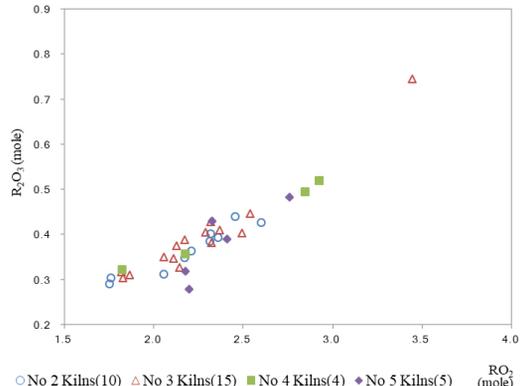
3.4. 유약 분석

유약 성분에서 실리카는 유리질 생성의 필수적인 광물이며, 점토에 함유된 알루미늄이나 유약의 점도를 높여 쉽게 흘러내리지 않도록 하는 역할을 한다. 라임, 마그네시아, 소다, 포타쉬 등은 용제로 작용하며 각 성분에 맞추어 다른 조성 조건이 요구된다. 이에 따라 녹산동 청자 유약 주성분을 분석한 결과를 기초로 출토위치별 차이점과 유사점을 확인하였다(Table 4, Figure 7).

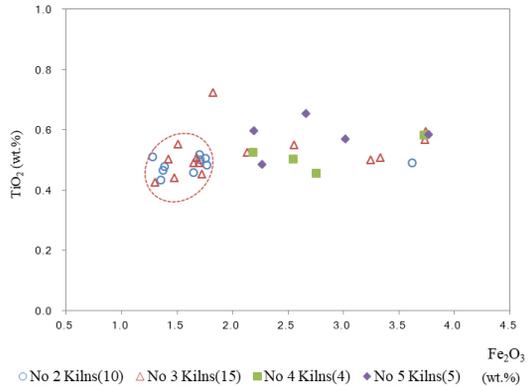
2호 가마 청자는 SiO_2 53.4~59.3 wt.%, Al_2O_3 13.9~15.9 wt.%, 주요 발색산화물로 작용하는 Fe_2O_3 1.3~3.6 wt.%, TiO_2 0.43~0.52 wt.%, 용제 성분의 합 21.6~28.3 wt.%로 주요용제 CaO 15.1~22.3 wt.%, K_2O 2.3~3.7 wt.%이다. 태토 주성분 측정 결과에서 철산화물이 높게 측정된 mu-17도편은 유약 주성분 분석 결과 동일 가마 도편보다 철산화물이 높게 확인된다. 3호 가마는 SiO_2 53.9~58.7 wt.%, Al_2O_3 13.7~19.4 wt.%, 발색산화물 Fe_2O_3 1.3~3.7 wt.%, TiO_2 0.42~0.72 wt.%, 용제 성분은 16.29~27.84 wt.%로 대부분의 성분이 2호와 비슷하다. mu-31은 Al_2O_3 함량이 높고, 용제 합 16.29%로 동일 가마 도편과 차이를 보이며 색도측정 결과 명도(L*)값이 낮아 차이를 보인다. 4,5호 가마 청자는 SiO_2 , Al_2O_3 성분에서 앞의 두 가마 청자와 유사하지만 Fe_2O_3 가 높아 전체적인 발색산화물 함량이 2,3호의 청자보다 높다(Figure 7b).

지금까지 고려청자를 대상으로 한 분석연구 결과를 살펴보면 용용제의 함량이 19~26 wt.%의 범위를 보이고 있으며, 전형적인 성분 범주에 속한다. 용제성분인 K_2O 성분

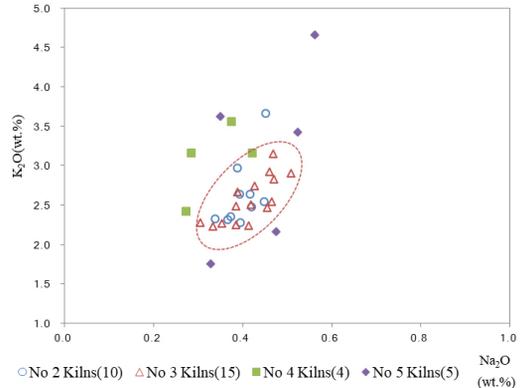
의 함량관계를 도식화한 결과 4,5호 가마는 용용제의 비율과 미량 함유된 성분이 2,3호 가마와 차이를 보인다(Figure 7c). 특히 칼슘과 알칼리 성분인 포타쉬 성분은 4,5호 가마 도편과 2,3호 가마 도편보다 높은 함량이다. 이는 미세구조



(a) Seger formula



(b) Fe_2O_3 - TiO_2 of selected sherds



(c) Na_2O - K_2O of selected sherds

Figure 7. Major elements composition of the glaze on selected sherds.

관찰 결과 4,5호 가마의 유약 자화도가 높았던 요인으로 보인다.

유약의 발색에 영향을 미치는 산화물은 앞서 언급한 것과 마찬가지로 Fe_2O_3 , TiO_2 , MnO 가 있다. 이 중 TiO_2 는 Fe_2O_3 와 결합하여 유약에 황색빛을 더해 녹색, 회녹색, 녹색으로 변화시키는 발색작용을 한다(Wood, 1999). 실제로 초기 청자유약에는 Fe_2O_3 약 2.0 wt.%, TiO_2 약 0.5 wt.% 함량이 포함되어있는데 강진지역 청자의 경우 Fe_2O_3 1.3 wt.% 내외, TiO_2 0.2~0.3 wt.%로 조금 낮은 편이다(Bang, 1993; Lee, 1998). 녹산동 청자의 Fe_2O_3 1.3~3.8 wt.% 내외, TiO_2 0.4~0.7 wt.%로 차이를 보인다.

계제르 식을 도식화한 결과 녹산동 청자는 RO_2 1.75~3.45, R_2O_3 0.28~0.75 범위에 위치하며 출토위치, 색상별 구분 없이 혼재하여 분포하고 있다(Figure 7a). 이는 한국 도자기 유약의 원료인 RO_2 가 약 2~3(mole), R_2O_3 가 약 0.3~0.5(mole)에 해당되며 성분의 함량비로 보아 대부분 라임 계열의 유약에 해당된다(Kang, 2010; Lee, 2001).

4. 결 론

고려중기 조질청자의 질적 차이를 보이고 있는 원인을 규명하고자 부산 녹산동 가마별로 구분하여 35점을 대표 시료로 선정하여 그 특성을 확인하였다.

물리적 특성에서 태토의 명도(L^*)는 2·3호 보다 4·5호 가마의 도편이 어두운 것을 확인하였으며 유약의 채도는 태토색이 유약의 녹색빛을 상쇄하는 역할을 하고 유약 자체도 완벽히 환원상태에서 소성되지 않아 갈색요소를 함유한 것을 확인하였다. 비중, 흡수율 및 기공률 측정 결과 4·5호 가마 조질청자는 2·3호 가마 조질청자보다 치밀도가 상대적으로 낮은편이다. 미세구조 관찰에서 4·5호 가마의 청자 태토는 모두 자화가 잘 이루어지지 않은 양상으로 2·3호 가마의 청자 태토와 차이를 보인다. 하지만 태토와는 달리 유약의 자화도가 높은 특징으로 깨끗한 편으로 초벌과정 없이 태토에 유약을 바른 후 한 번에 구웠던 공정으로 인해 태토가 충분히 자화되기 어려웠을 것으로 보인다.

화학적 특성인 태토의 주성분은 SiO_2 가 72.5~76.8 wt.%이고 Al_2O_3 가 15.8~20.0 wt.%를 차지한다. 착색제인 Fe_2O_3 는 0.9~3.3 wt.% TiO_2 은 0.4~0.6 wt.% , 용제는 5 wt.% 이하의 함량을 보인다. 유약은 SiO_2 가 53.4~59.9 wt.%이고 Al_2O_3 는 11.4~19.4 wt.%이다. Fe_2O_3 과 TiO_2 은 각각 1.3~3.8 wt.%, 0.4~0.73 wt.% 정도의 조성비를 나

타내고 용제는 16.3~28.3 wt.%의 함량을 보인다.

지금까지의 결과를 정리하면 2·3호 가마와 4·5호 가마 청자의 가시적 차이는 원료의 차이라기보다 수비과정 및 번조공정에 따른 차이라고 볼 수 있다. 다만 4·5호 가마와 2·3호 가마의 Fe_2O_3 , K_2O 함량의 차이는 인위적인 성분 조절이었던지 아닌지는 판단하기 어려우나 제조에 있어 원료 배합기술의 변화를 시도했다는 것을 보여주는 증거라 할 수 있다. 이는 지방가마에서 많은 양의 자기를 제작해야 했기 때문에 상대적으로 수비과정이 관요적 성격을 가진 강진, 부안청자에 비해 정교하게 하지는 못 하였을 것이며 양질의 청자를 만들기 위해 다양한 시도를 하였을 것으로 판단된다.

다른 지역보다 조성에서 TiO_2 의 함량이 차이는 색상과 관련이 있을 수 있으나 유색은 발색성분 이외에도 소성조건이 주요 변화요인으로 작용하므로 종합적으로 검토할 필요가 있으며 부산 녹산동 만을 대상으로 조질청자의 특성으로 보기에는 무리가 따른다. 앞으로 지방가마의 조질청자에 대한 실험이 행해져 양질청자와의 본격적인 기술적 비교가 이루어지길 기대한다.

REFERENCES

- Bang, B.S., 1993, A technic historical study on the Koryo Celadon. KOREAN Journal of Art History, 5-21. (in Korean)
- Chang, N.W., 2003, Study of mid Koryo celadons. Doctor's thesis, Ewha Womans University, Seoul. (in Korean with English abstract)
- Foundation of East-Asia Cultural Properties Institute, 2012, The excavation report of cultural relics in the Noksan-dong kiln site of celadon in Busan. (in Korean with English abstract)
- Gyeonggi Provincial Museum, 2008, Analytical of the royal kiln complex at Gwangju in Gyeonggi province.
- Han, M.S., 2006, A scientific provenance study for Goryeo celadon excavated from seabed. Doctor's thesis, Chung-Ang University, Seoul. (in Korean with English abstract)
- Kang, K.I., 2010, A study on the change of the kiln structure and color of Goryeo celadon. 12th Koryo celadon Academic Seminar, Gangjin, August 16. (in Korean)
- Kang, K.I., 2016. Recent technological change of Goryeo

- celadon in Gangjin area. Study of ceramic art, 25. (in Korean)
- Kim, J.A., 2006, A scientific analysis study on Koryo Celadon in the 11~12C. Master's thesis, Chung-Ang University, Seoul. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.M., 2004, The system and dating of low-grade Celadons in the 11th to 12th Centuries AD. Art History, 18, 149-17. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.M., 2012, Distribution and character of production kiln sites in early Goryeo celadon. History and Discourse : Journal of Historical Review, 63, 151-184. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.E., 1998, Compositional and microstructural study of Choson Punchong. Doctor's thesis, Chung-ang University, Seoul, 44-91. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.E., 2013, The color of the Goryeo celadon: composition and microstructure of pi-saek celadon. Information Art, 83. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.E., Kim, G.H. and Koh, K.S., 2005, A scientific study of early Koryo and whiteware. The Korean History of Science Society, 27(1). (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.S., 2001, Analytical and statistical study on the raw materials of Korean traditional ceramics. Master's thesis, Chung-Ang University, Seoul. (in Korean with English abstract)
- Mun, C.S. and Choi, T.H., 2003, Ceramic engineering 1 -Basic-. Dooyangsa, Seoul. (in Korean)
- Prudence, M.R., 1987, Pottery analysis. The University of Chicago Press/Chicago and London, Chicago.
- Wood, N., 1999, Chinese glazes -Their origins, chemistry and recreation. The University of Pennsylvania Press, Philadelphia, 27-45.
-