

강원 원주지역 조선백자의 재료학적 특성 비교연구

이병훈 | 소명기*¹

(재)강원문화재연구소, *강원대학교 나노응용공학과

Comparative Study on Material Characteristics of Joseon White Wares Excavated from Gangwon Wonju Province

Byeong Hoon Lee | Myoung-Gi So*¹

Kangwon Research Institute of Cultural Heritage, Chuncheon, 24227, Korea

*Department of Nano Applied Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 24341, Korea

¹Corresponding Author: mgso@kangwon.ac.kr, +82-33-250-6265

초록 본 연구에서는 강원 원주 지역의 귀래 1리 3호 가마와 손곡 3리 2호 가마에서 제작된 백자의 화학적 성질 및 생산 기술을 연구하고자 하였다. 그리고 수습된 백자의 제작 기술 및 사용 원료의 특징을 통하여 분석대상 백자 원료의 연관성을 규명해 보고자 하였다. 강원 원주 지역의 백자를 분석한 결과는 다음과 같다. Seger식을 사용하여 백자 태토를 분석한 결과 RO_2 4.33~5.82, $RO+R_2O$ 0.32~0.43로 확인되었으며, 유약은 유사한 영역에서 군집하여 분포하였다. 또한, 희토류 원소 분석 결과에 따르면, 분석 대상 백자는 동일한 지질 산지의 모암으로 제작되었음을 알 수 있었다. XRD 방법을 통하여 백자 태토의 결정상을 분석한 결과, 모든 백자에서 석영 및 물라이트가 검출되었고, 검출 비율은 서로 유사한 결과로 확인되었다. 각 백자 시편의 소성 온도는 다르지만 대부분 1,200°C 이하에서 소성되었으며, 일부 백자는 1,000±20°C의 저온에서 소성되었음을 알 수 있었다.

중심어: 원주, 백자, 화학조성, 결정상, 소성온도

ABSTRACT This study aimed to investigate the chemical properties and production techniques for white wares from the Gwiraе-1ri 3rd, Songok-3ri 2nd kiln sites in Kangwon Wonju regions. Further, another aim was to determine the correlation among the materials used to produce the white wares. The analysis of white wares in Kangwon Wonju regions produced the following results. The excavated white wares were analyzed using the Seger formula, and all the samples showed similar clay sources (RO_2 :4.33-5.82, $RO+R_2O$:0.32-0.43) and glaze sources. Moreover, the white wares were made of host rocks of the same geological origin, according to the results of the rare earth elements analysis. When the crystalline phases of the white wares were investigated via the XRD analysis, quartz and mullite were found in all the samples, and their proportions were similar to each other. Although the firing temperatures for the samples were different, most were fired at a temperature below 1,200°C, with some being fired at temperatures as low as 1,000±20°C.

Key Words: Wonju, White wares, Chemical composition, Crystalline phase, Firing temperature

1. 서론

강원 영서지역 조선시대 백자에 대한 연구는 양구지역과 원주지역 백자를 대상으로 진행된 바 있으며, 양구와 원주는 중앙 관요인 광주 분원으로 백토를 공급했던 지역으로 조선시대 백자 생산에 중요한 역할을 했던 곳이었다.

강원 영서지역에서 발굴된 백자가마터는 2001년 이화여자대학교 박물관에서 발굴한 양구 방산지역 가마터와 (Ewha Womans University and Yanggu-gun, 2001) 2002년 한림대학교 박물관에서 조사한 원주 귀래2리 백자가마터 1호, 2호(Hallym University Museum, 2004), 2008~2009년 국립춘천박물관에서 발굴한 양구군 칠전리 1호, 2호 가마터(Chuncheon National Museum, 2013)이다. 최근에는 강원 춘천시 지방도 403호선 지내-고성 간 도로확포장 공사구간 내 유적 중 고성리 백자가마터가 발굴되었다 (Gangwon Research Institute of Archeological and Cultural Properties, 2016). 또한 발굴조사는 아니지만 1990년대 이후 지표조사 등을 통해 『세종실록지리지(世宗實錄地理志)』와 『세계도자전집(世界陶磁全集)』에 기록되어 있는 가마

터가 일부 확인되었고, 이전에 알려지지 않았던 새로운 가마터가 여러 곳에서 확인되고 있다(Kim, 2002). 지표조사를 통하여 현재까지 확인된 백자가마터로는 원주 귀래1리·부론면 손곡1리·손곡2리·손곡3리·법천리·단강리 사기막 백자가마터와 문막읍 비두리 및 반계리 백자가마터·지정면 판대리 백자가마터 등이 있다(Hallym University Museum, 2004).

분석 대상으로 선정한 귀래1리 가마터는 귀래2리에서 발굴 조사된 가마터에서 서쪽으로 약 2.5 km 거리에 위치해 있으며, 백자와 도지미, 요벽편 등이 확인되었다(Hallym University Museum, 2004). 수습된 유물은 중품(中品)백자와 하품(下品)백자 모두 정선된 태토를 사용하였고, 유약 면은 청백과 회청색의 유약을 시유하여 광택이 있으며, 기종은 대접, 접시, 완 등 생활용기가 주류를 이루고 있다 (Hallym University Museum, 2004). 원주시 부론면 손곡3리 가마터는 법천리에서 문막읍으로 가는 도로에서 손곡3리로 들어간 후 작은 길을 따라가면 백자 등이 확인되는데 유물은 비교적 정선된 회청색 백토에 담청색을 띠는 투명 유약을 시유하였으며, 유문에는 회청색 광택이 있다. 기종



Figure 1. Map of Gwirae-1ri 3rd kiln and Songok-3ri 2nd kiln and Gwirae-2ri kiln(Lee, 2015).

은 대접, 제기, 발, 완, 접시, 잔 등 생활용기가 대부분이며 가마의 운영 시기는 조선후기로 확인되었다(Hallym University Museum, 2004). 귀래1리 가마터와 손곡3리 가마터의 육로 거리는 약 12~13 km 정도이고, 귀래1리와 귀래2리 가마터 사이에는 궁천천으로 물길이 이어져 있으며, 손곡3리 가마터와는 물길이 이어지지 않았으나, 주변에 범천천과 공천천이 흐르고 있다(Figure 1).

본 연구에서는 강원 원주지역에서 출토된 조선시대 백자 태토의 주성분, 미량성분, 결정상, 소성온도 등을 측정하여 제작기법 및 재료학적 특성을 살펴보았으며, 유약의 주성분을 비교하여 제작기법을 알아보고자 하였다. 분석대상으로는 귀래1리 3호 가마터, 손곡3리 2호 가마터에서 수습한 백자를 선별하였고, 총 13개 백자를 대상으로 연구를 진행하였다. 또한 분석대상 백자와 함께 이미 연구되었던 원주 귀래2리 1호 및 2호 가마터 출토 백자의 분석결과(Lee and So, 2014; Lee, 2015)를 참고하여 강원 원주지역 백자의 재료학적 특성을 살펴보고자 하였다.

2. 분석방법

2.1. 분석 방법

2.1.1. 주성분 분석

분석대상 백자의 태토 주성분 분석을 위하여 엑스선형 광분석기(XRF; X-Ray Fluorescence Spectrometer, ZSX100e,

Rigaku, Japan)를 이용하였으며, X선 선원은 Rh target을 사용하였다. 태토는 유약 부분을 제거한 후 Agate mortar에서 약 30 μ m로 분쇄하였고, 분쇄된 시료를 \varnothing 30 mm 펠렛 형태로 성형하여 분석용 시편으로 사용하였으며 성형 압력은 20 ton/cm²으로 하였다. 유약의 주성분 분석을 위하여 에너지분산형분석기(EDS; Energy Dispersive Spectrometer, E-MAX, HORIBA, Japan)가 부착된 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM; Field Emission Scanning Electron Microscope, S-4300, HITACHI, Japan)을 이용하였다.

2.1.2. 미량성분 분석

백자 태토의 미량성분 분석은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS; Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, X5, Thermo Elemental, United Kingdom)와 유도결합플라즈마 원자방출분광기(ICP-AES; Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer, Optima 4300DV, Perkin Elmer, USA)로 분석하였으며, 시료는 고온 건조 후 미세하게 분말화하여 왕수와 HF48% 용액에 용해한 후 분석하였다.

2.1.3. 결정상 분석

결정상 조사를 위하여 고분해능엑스선회절분석기(HR-XRD; High Resolution X-Ray Diffractometer, D/MAX-2500V/PC, Rigaku, Japan)를 이용하여 분석하였다. 이때 분석조건은 scan range; 5~80°, scan speed; 0.6°/min, scan step; 0.01°,

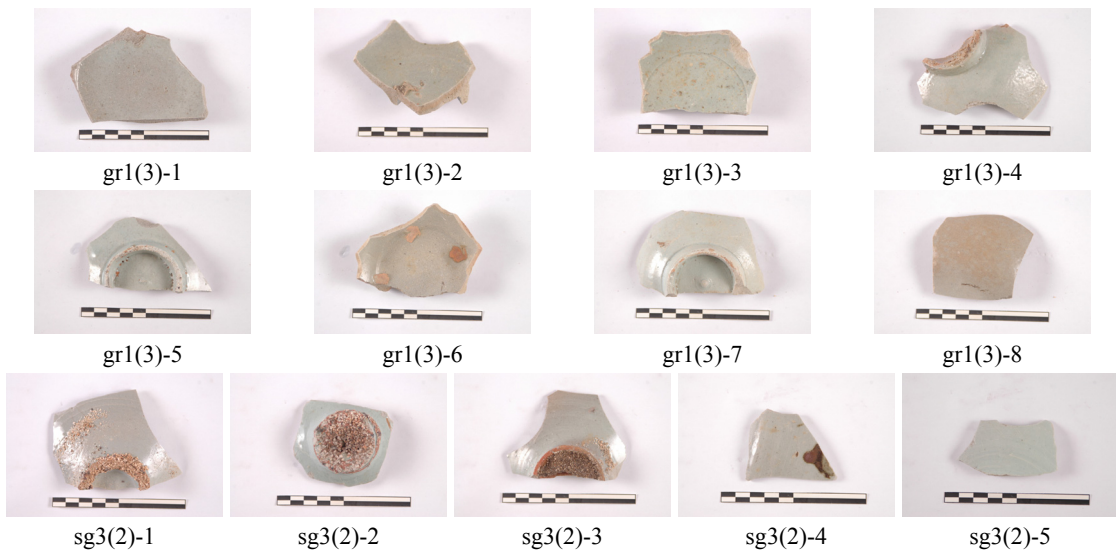


Figure 2. Pictures of specimen of white wares selected in this study.

Table 1. Characteristics of white wares selected in this study

Sample number	Type	Color*		Design	
		Body	Glaze	Inscription	Crackled state
Gwirae-1ri 3rd kiln					
gr1(3)-1	low-grade	GY-GN	GY-GN	×	○
gr1(3)-2	low-grade	GY-GN	GY-GN	×	○
gr1(3)-3	low-grade	BE-GY	BE-GY	×	○
gr1(3)-4	low-grade	BE-GY	BE-GY	×	○
gr1(3)-5	low-grade	BE-GY	GY-GN	×	○
gr1(3)-6	low-grade	BE-GY	BE-GY	×	○
gr1(3)-7	low-grade	BE-GY	BE-GY	×	○
gr1(3)-8	low-grade	BE-GY	W-BE	×	○
Songok-3ri 2nd kiln					
sg3(2)-1	low-grade	BE-GY	GY-GN	×	○
sg3(2)-2	low-grade	BE-GY	BE-GN	×	○
sg3(2)-3	low-grade	BE-GY	BE-GY	×	○
sg3(2)-4	low-grade	BE-GY	BE-GY	×	○
sg3(2)-5	low-grade	BE-GY	W-GY	×	○

*Color: W-white, GY-gray, GN-green, BE-beige.

acceleration voltage; 40 kV, 200 mA, target; Cu로 하였다. 시료는 유약을 제거한 백자 태토로부터 미세절단기를 이용하여 적당량을 절단한 후, 약 30 μm 이하로 분쇄하여 사용하였다.

2.1.4. 열팽창수축 측정

분석대상 백자의 소성온도를 알아보기 위하여 열팽창계수 측정기(Dilatometer, DIL402C, NETZSCH, Germany)를 사용하여 열팽창수축을 조사하였다. 유약을 제거하고 태토 부분을 3×3×10 mm의 크기로 하여 시편을 제작하였다. 표준시료로 Al₂O₃을 사용하였으며, N₂ 가스 분위기 하에서 10°C/min의 승온 속도로 1300°C까지 측정하였다.

2.2. 분석대상 백자 편

본 연구에 사용된 백자 편은 귀래1리 3호 가마터 수습 백자 8개, 손곡3리 2호 가마터 수습 백자 5개 등 총 13개이며(Figure 2), 분석대상으로 사용된 시편의 특징을 표로 나타내었다(Table 1).

귀래1리 3호 가마터에서 수습하여 분석에 사용된 백자 편 개수는 8개이다. 비교적 정선된 백토에 담청 빛 유약을

시유하였으며, 유약 면에 광택이 있다. 굽 부분에는 유약이 시유되지 않았으며, 굽의 접지면에 태토비집을 받치고 여러 점을 포개서 소성했음을 알 수 있다. 분석대상 백자 편은 대접, 접시 등의 굽 받침을 포함한 저부를 중심으로 하였고 8번 백자 편만 구연부이다.

손곡3리 2호 가마터에서는 발, 접시 등 생활용기가 다량 수습되었으며, 본 연구에서는 굽 받침을 포함한 저부 편 세 개와 구연부 두 개 편을 대상으로 분석을 진행하였다. 분석대상 시편은 유약 면에 광택이 있고 회청색을 띠며 굽의 접지면과 내저면에 굽은 모래를 받쳐 포개서 소성한 흔적이 확인되었다.

분석대상 시편의 선정은 시유상태가 좋고 치밀하게 소성된 부분을 선정하여 분석하였으며, 측면에 일부 유약이 흘러내린 부분이나 소성상태가 좋지 않은 부분은 데이터에 오차가 발생할 수 있기 때문에 배제하였다.

분석대상 백자는 편의상 귀래1리 3호 가마터 gr1(3), 손곡3리 2호 가마터 sg3(2)로 표기 하였으며, 분석대상 백자 편 번호는 표기된 가마터 명칭 뒤에 ‘-’와 해당 백자 편 번호(숫자)를 나타내었다. 예를 들면, 귀래1리 3호 가마터 출토된 분석대상 백자 5번은 gr1(3)-5, 손곡3리 2호 가마터 3번 백자는 sg3(2)-3으로 표기하였다.

Table 2. Chemical composition for body of white wares analyzed by XRF

Sample number	Oxide concentration (wt.%)										
	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
Group 1. Gwiraе-1ri 3rd kiln											
gr1(3)-1	68.9	21.0	2.34	0.50	0.36	0.04	6.32	0.28	0.08	0.08	99.90
gr1(3)-2	72.4	18.3	2.32	0.40	0.34	0.05	5.60	0.27	0.09	0.04	99.81
gr1(3)-3	66.9	22.6	2.33	0.38	0.29	0.03	6.95	0.24	0.08	0.04	99.84
gr1(3)-4	71.1	20.1	1.92	0.28	0.28	0.05	5.86	0.16	0.09	0.03	99.87
gr1(3)-5	64.8	23.4	2.33	0.40	0.45	0.04	7.99	0.30	0.06	0.07	99.84
gr1(3)-6	64.6	24.0	2.18	0.40	0.28	0.05	8.00	0.26	0.06	0.09	99.92
gr1(3)-7	67.5	21.7	2.31	0.51	0.28	0.03	7.17	0.29	0.07	0.06	99.92
gr1(3)-8	67.0	22.3	2.42	0.37	0.33	0.03	7.04	0.24	0.08	0.05	99.86
Average	67.90	21.68	2.27	0.41	0.33	0.04	6.87	0.26	0.08	0.06	99.86
Standard deviation	2.78	1.85	0.16	0.07	0.06	0.01	0.89	0.04	0.01	0.02	-
Group 2. Songok-3ri 2nd kiln											
sg3(2)-1	68.1	21.6	2.35	0.47	0.28	0.10	6.62	0.21	0.09	0.03	99.85
sg3(2)-2	66.3	22.3	2.91	0.54	0.21	0.05	7.26	0.24	0.05	0.03	99.89
sg3(2)-3	67.9	21.7	2.61	0.57	0.24	0.07	6.45	0.29	0.03	0.04	99.90
sg3(2)-4	69.3	20.6	2.00	0.44	0.56	0.10	6.53	0.17	0.07	0.03	99.80
sg3(2)-5	68.6	21.2	2.01	0.38	0.29	0.08	7.03	0.17	0.09	0.02	99.87
Average	68.04	21.48	2.38	0.48	0.32	0.08	6.78	0.22	0.07	0.03	99.85
Standard deviation	1.11	0.63	0.39	0.08	0.14	0.02	0.35	0.05	0.03	0.01	-

3. 결과 및 고찰

3.1. 태토의 주성분 분석

백자 편 의 특성 및 제작기법을 파악하기 위하여 분석대상 백자 편 태토의 주성분을 분석하였으며, 총 10가지 원소 산화물을 측정하였다. 일반적으로 점토(clay)의 주성분은 실리카(SiO₂)와 알루미늄(Al₂O₃)이며, 점성을 유지시키고 성형을 용이하게 한다. 도자기 태토 주원료 중 하나인 석영은 용점이 높으며, 도자기 형태를 유지할 수 있도록 한다. 또한 태토의 주원료 중 하나인 장석은 도자기 소성 과정에서 용제(flux) 역할을 하며, 장석의 함유량에 따라 태토 및 유약의 점도와 소성온도가 달라진다. 장석은 K₂O, Na₂O, CaO, MgO 등을 포함하며, 미사장석(Microcline, K(AlSi₃)O₈)과 사장석(Albite, Na(AlSi₃)O₈)으로 구분된다. 종류에 따라 화학성분과 역할이 다르나 대체로 장석이 많으면 낮은 온도에서도 자화가 이루어 질 수 있게 하지만, 높은 온도에서

서는 점성이 약해진다(Allen, 1986).

태토의 주성분 분석에 대한 결과를 표로 정리하였다(Table 2). 귀래1리 3호 가마터 수습 백자는 평균함량 SiO₂ 67.90 wt.%, Al₂O₃ 21.68 wt.%으로 확인되었으며, gr1(3)-2와 gr1(3)-4는 높은 SiO₂의 함량과 낮은 용제 함량으로 다른 귀래1리 3호 가마터 백자 편과 구분되었다. 손곡3리 2호 가마터 수습 백자는 평균함량 SiO₂ 68.04 wt.%, Al₂O₃ 21.48 wt.%로 귀래1리 3호 수습 백자와 비슷한 함량이었다. 또한 귀래1리 3호 가마터 백자의 발색 산화물은 Fe₂O₃ 1.92~2.42 wt.%, TiO₂ 0.16~0.30 wt.%, MnO 0.06~0.09 wt.%로 일반적인 백자의 발색제 함량보다는 많은 편으로, 회색 또는 회청색에 가까운 색을 띠고 있었다. 손곡3리 2호 가마터 수습 백자의 발색산화물은 Fe₂O₃ 2.00~2.91 wt.%, TiO₂ 0.17~0.29 wt.%, MnO 0.03~0.09 wt.%로 귀래1리 3호 가마터 수습 백자와 유사하였다. 용제는 K₂O가 6.45~7.60 wt.%로 가장 많이 함유되었으며, 용제의 평균적인 함량은 7.33~8.06 wt.%로 귀래1리 3호 가마

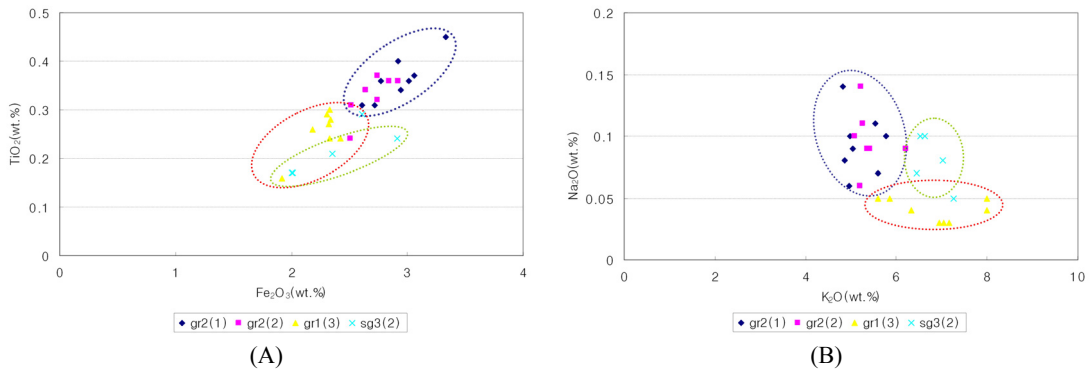


Figure 3. Distribution diagram of Fe_2O_3 - TiO_2 (A), K_2O - Na_2O (B) of white wares body from Guyre-Iri 3st kiln and Songkok-3ri 2nd kiln and Gwirae-2ri kiln(Lee and So, 2014; Lee, 2015).

터 수습 백자와 거의 유사한 조성으로 확인되었다.

발색 성분인 Fe_2O_3 와 TiO_2 에 대한 함량의 분포도를 나타냈다(Figure 3A). 분포도에서 볼 수 있듯이 발색 성분은 유사한 영역에서 비례관계를 나타내고 있다. 귀래1리 3호 가마터와 손곡3리 2호 가마터 수습 백자는 이미 연구되었던 귀래2리 가마터 출토 백자(Lee and So, 2014)에 비하여 비교적 소량의 발색 성분을 함유하고 있다.

백자의 소성온도에 중요한 역할을 하는 용제의 화학적 조성에 대한 분포도를 살펴보면, 손곡3리 2호 가마터 수습 백자 K_2O 성분이 귀래2리 백자(Lee and So, 2014)보다 높은 함량이었다. 귀래1리 3호 가마터 수습 백자는 K_2O 가 비교적 광범위한 영역에 분포되었으며, Na_2O 는 다른 가마터 백자에 비해 소량 함유되었다(Figure 3B).

귀래1리 3호 가마터와 손곡3리 2호 가마터에서 수습한 백자의 태토 주성분을 제계르식으로 분류하였다(Figure 4). 귀래1리 3호 가마터 수습 백자와 손곡3리 2호 가마터에서 수습한 백자는 거의 유사한 영역에서 군집하였다.

또한 강원 원주지역의 백자를 비교하기 위하여 이미 연구되었던 원주 귀래2리 가마터 출토 백자(Lee and So, 2014)와 비교하여 경향성을 살펴보았다. 태토의 화학적 조성 과 제계르식을 비교했을 때, 분석대상 백자 시편 중 gr1(3)-2를 제외하고 출토 및 수습 장소에 상관없이 RO_2 4.33~5.82, $\text{RO}+\text{R}_2\text{O}$ 0.32~0.43 영역에서 분포하였다. 귀래2리 가마터 출토 백자는 1호, 2호에 상관없이 거의 유사한 조성으로 확인되었으며, 귀래1리 3호 가마터 수습 백자와 손곡3리 2호 가마터 수습 백자 역시 조성에 거의 차이가 없었다. 귀래2리 가마터 출토 백자 시편과 비교 결과, 귀래1리 3호 가마터 수습 백자와 손곡3리 2호 가마터 수습

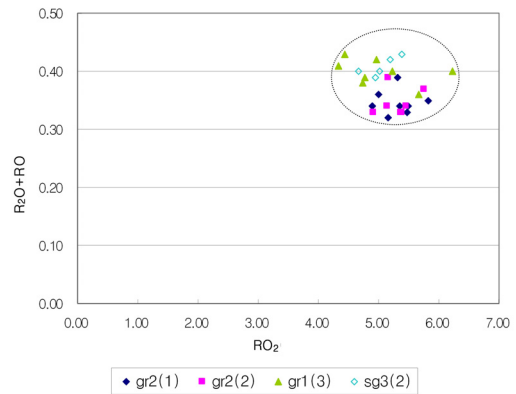


Figure 4. Distribution diagram of bodies composition according to seger formula of white ware bodies from Gwirae-Iri 3rd kiln, Songkok-3ri 2nd kiln, Gwirae-2ri kiln(Lee and So, 2014; Lee, 2015).

백자 시편은 주성분 함량 중 발색산화물인 Fe_2O_3 및 용제의 성분에서 미미한 차이가 확인되지만 제계르 그래프에서 각 가마터마다 확연히 구분되지는 않았다.

3.2. 유약 주성분 분석

강원 원주지역 백자 태토 주성분의 제계르식을 통해서 가마터에 구분 없이 유사한 분포를 나타내었다. 따라서 태토 원료의 유사성과 더불어 유약 원료의 연관성을 검토해보고자 하였다. 유약 원료의 성분 분석 결과를 가마터 별로 정리하였으며(Table 3), 제계르식으로 그래프화하여 분포 결과를 조사하였다. 유약의 제계르식은 염기성 성분($\text{RO}+\text{R}_2\text{O}$)을 1 mol 기준으로 하여, 중성 성분(R_2O_3)과 산

Table 3. Glaze compositions of Gwiraе-1ri 3rd kiln and Songok-3ri 2nd kiln white wares measured by EDS

Sample number	Oxide concentration (wt.%)										
	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
Group 3. Gwiraе-1ri 3rd kiln											
gr1(3)-1	62.5	17.3	1.14	0.31	12.16	1.18	5.19	-	-	0.18	99.96
gr1(3)-2	63.6	14.2	1.2	0.9	14.79	1.18	3.55	0.54	-	-	99.96
gr1(3)-3	66.3	14.9	1.35	-	10.75	0.79	5.57	0.34	-	-	100
gr1(3)-4	64.9	14.7	1.34	0.27	13.28	1.07	4.38	-	-	-	99.94
gr1(3)-5	68.6	15.7	0.94	0.31	8.32	0.47	5.6	-	-	-	99.94
gr1(3)-6	63.2	14.2	1.16	-	12.21	0.98	6.65	-	0.18	1.37	99.95
gr1(3)-7	69.9	12.6	1.25	0.07	9.52	0.72	5.53	0.04	0.17	0.16	99.96
gr1(3)-8	68.5	16.2	1.21	-	6.4	0.72	6.63	0.22	-	0.05	99.93
Average	65.94	14.98	1.20	0.37	10.93	0.89	5.39	0.29	0.18	0.44	99.96
Standard deviation	2.81	1.43	0.13	0.31	2.75	0.25	1.05	0.21	0.01	0.62	-
Group 4. Songok-3ri 2nd kiln											
sg3(2)-1	65.4	16.1	1.33	0.07	10.48	1.93	3.83	0.42	0.28	0.16	100
sg3(2)-2	68.9	12.6	0.76	0.79	9.64	1.14	4.54	0.75	0.42	0.42	99.96
sg3(2)-3	68.5	14.1	0.56	0.35	8.57	1.16	5.47	0.76	-	0.48	99.95
sg3(2)-4	64.9	14.6	1.77	0.4	12.34	0.78	3.6	1.3	-	0.23	99.92
sg3(2)-5	70.5	13	0.75	0.17	9.84	1.5	3.08	0.24	-	0.91	99.99
Average	67.64	14.08	1.03	0.36	10.17	1.30	4.10	0.69	0.35	0.44	99.96
Standard deviation	2.40	1.39	0.50	0.28	1.39	0.43	0.93	0.40	0.10	0.29	-

성 성분(RO₂)을 그래프로 나타냈다(Figure 5).

귀래1리 3호 가마터 백자 유약은 SiO₂ 평균 65.94 wt.%, Al₂O₃ 평균 14.98 wt.%이며, Fe₂O₃가 1.20 wt.%로 확인되었다. 용제 성분은 17.58 wt.%로 확인되었으며, 손곡3리 1호 가마터 백자보다 소량 높게 함유되었지만 큰 차이를 보이지 않았다. 용제 성분 중 CaO 성분은 백자 편마다 함량 차이가 확인된다.

손곡3리 1호 가마터 백자 유약은 SiO₂ 평균 67.64 wt.%, Al₂O₃ 평균 14.08 wt.%이며, Fe₂O₃가 1.03 wt.%로 귀래1리 3호 가마터 백자 유약과 거의 유사한 함량이며, 용제 성분에서 소량 차이가 확인될 뿐 다른 유약 조성은 큰 차이가 확인되지 않는다.

강원 원주 지역 백자 유약의 화학적 특성을 살펴보기 위해 이미 연구되었던 귀래2리 1호, 2호 가마터 출토 백자 (Lee and So, 2014)를 참고로 하여 비교하였다. 제계르식을 통해 살펴본 결과, 귀래2리 1호 가마터 백자 유약은 RO₂ 3.63~4.92, R₂O₃ 0.55~0.72 범위에서 위치하였으

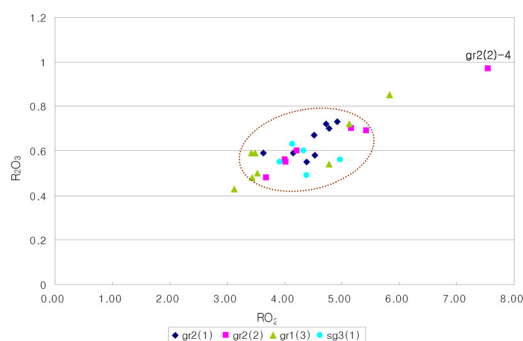


Figure 5. Distribution diagram of compositions according to seger formula of white ware glazes from Gwiraе-1ri 3rd kiln, Songok-3ri 2nd kiln, Gwiraе-2ri kiln(Lee and So, 2014; Lee, 2015).

며, 귀래2리 2호 가마터 백자 유약은 gr2(2)-4를 제외하고, 귀래2리 1호 가마터 백자 유약과 유사하였다. 귀래1리 3호 가마터 백자 유약은 대체로 RO₂의 비율이 낮지만 그 차이는 미미하였다. 손곡3리 1호 가마터 백자 유약은 귀래2리

Table 4. Trace elements compositions of white ware bodies from Gwirae-1ri 3rd kiln

Elements (ppm)	Sample number							
	gr1(3)-1	gr1(3)-2	gr1(3)-3	gr1(3)-4	gr1(3)-5	gr1(3)-6	gr1(3)-7	gr1(3)-8
Rb	337.6	282.2	234.7	318.3	324.8	390.6	327.6	407.8
Y	40.06	35.52	39.23	39.11	39.22	39.72	31.37	33.30
Mo	0.83	2.18	0.83	0.86	0.46	0.40	0.80	1.14
Sn	7.90	6.74	7.56	6.72	8.74	8.92	7.78	7.96
Sb	0.86	0.90	0.42	0.46	0.53	0.40	0.88	0.93
Cs	73.89	46.39	36.66	85.46	52.67	33.14	107.95	95.72
La	28.57	34.45	31.68	32.29	36.14	32.80	34.51	33.41
Ce	62.69	62.77	63.46	59.51	75.18	63.17	73.45	66.12
Pr	6.48	7.92	7.40	7.44	8.16	7.65	7.30	7.64
Nd	22.85	28.02	26.71	26.51	29.33	27.61	25.72	27.24
Sm	5.18	6.57	6.31	6.29	6.67	6.73	5.04	6.13
Eu	0.65	0.70	0.62	0.59	0.59	0.59	0.69	0.64
Gd	5.60	5.97	6.12	5.79	5.94	6.16	4.70	5.38
Tb	1.14	1.04	1.12	1.06	1.15	1.10	0.90	0.93
Dy	7.01	6.28	6.80	6.51	6.82	6.84	5.51	5.62
Ho	1.29	1.14	1.27	1.20	1.25	1.25	0.99	1.04
Er	3.58	3.17	3.49	3.32	3.44	3.48	2.67	2.94
Tm	0.51	0.44	0.49	0.49	0.49	0.47	0.38	0.41
Yb	3.09	2.73	3.17	3.02	3.07	3.11	2.36	2.68
Lu	0.40	0.36	0.42	0.41	0.41	0.41	0.31	0.36
Pb	40.22	51.45	80.09	44.22	44.05	36.58	31.47	228.23
Th	14.20	14.06	17.90	18.0	18.57	16.86	16.17	17.39
U	3.11	3.54	3.02	3.97	4.88	3.97	3.60	4.23
Ba	433.8	299.9	368.8	241.1	471.1	367.7	431.5	384.3
Mn	401.9	561.3	468.6	528.9	329.7	342.2	417.2	426.9
Sr	42.28	42.77	36.62	42.25	56.56	43.81	38.31	50.43
Co	32.61	21.21	24.83	22.48	23.64	17.65	16.28	20.12
Cr	8.07	9.84	6.39	4.78	6.21	5.90	7.42	5.85
Cu	5.20	2.72	4.66	2.99	3.74	23.01	2.66	9.38
Ga	37.42	29.11	34.88	28.65	34.78	34.09	40.20	33.24
Li	57.75	91.55	53.43	45.48	38.94	34.51	74.48	52.49
Ni	4.04	4.46	3.92	3.58	2.99	2.60	3.11	2.66
P	233.8	173.9	176.3	109.2	314.5	354.5	262.3	234.5
Sc	8.09	7.26	8.99	8.65	8.04	8.42	7.86	8.58
V	19.40	19.31	16.57	9.85	16.65	15.26	19.07	15.53
Zn	106.7	88.3	637.2	95.7	120.7	172.9	120.7	422.1
Zr	73.01	59.59	72.78	54.67	79.83	58.76	52.11	57.21

가마터 백자와 거의 유사한 영역에서 군집하여 나타났다.

강원 원주지역 가마터 백자 유약 주성분을 살펴본 결과, 제계르 그래프 군집 영역에서 벗어난 일부 백자 편은 유약 원료 배합에 따른 결과로 확인되었다.

3.3. 미량성분 원소 분석

태토의 10가지 주원소 산화물을 제외한 다른 미량성분 원소는 광물이나 암석 속에 미량으로 함유되어 있는 원소로 암석의 진화 과정에서 비교적 체계적인 거동을 하기 때문에

Table 5. Trace elements compositions of white ware bodies from Songok-3ri 2nd kiln

Elements (ppm)	Sample number				
	sg3(2)-1	sg3(2)-2	sg3(2)-3	sg3(2)-4	sg3(2)-5
Rb	313.8	272.7	285.3	313.4	363.1
Y	26.92	18.16	12.73	27.86	24.65
Mo	1.11	0.83	0.61	1.07	0.91
Sn	8.26	4.81	4.52	7.64	7.72
Sb	0.26	0.29	0.29	0.25	0.18
Cs	16.24	50.57	11.29	26.76	17.63
La	42.29	38.36	32.31	34.98	35.38
Ce	76.54	73.85	59.30	62.13	61.41
Pr	9.36	8.48	6.75	7.75	8.24
Nd	32.23	29.91	22.80	26.99	28.49
Sm	6.49	5.36	4.08	5.98	6.09
Eu	0.67	0.75	0.57	0.52	0.50
Gd	4.96	3.79	2.95	5.13	4.64
Tb	0.86	0.62	0.42	0.91	0.81
Dy	4.89	3.28	2.36	5.28	4.64
Ho	0.87	0.63	0.41	0.89	0.83
Er	2.50	1.73	1.17	2.53	2.28
Tm	0.39	0.28	0.17	0.38	0.36
Yb	2.57	1.58	1.03	2.58	2.40
Lu	0.36	0.22	0.14	0.37	0.31
Pb	56.73	100.89	53.04	32.42	29.41
Th	17.31	20.29	10.93	15.79	14.93
U	5.34	4.04	2.54	5.23	4.85
Ba	302.0	428.1	698.6	358.2	390.0
Mn	509.0	268.8	147.7	445.0	509.1
Sr	29.77	41.85	38.06	68.25	44.54
Co	22.58	12.14	24.47	36.02	28.12
Cr	5.66	9.62	14.25	5.00	3.60
Cu	4.30	5.09	7.25	2.74	2.78
Ga	33.98	35.01	32.87	31.64	32.77
Li	43.04	23.84	31.72	28.32	26.55
Ni	3.26	7.13	4.79	2.81	2.15
P	129.8	126.3	156.1	160.2	96.6
Sc	5.50	4.71	4.33	5.16	5.12
V	16.35	22.93	24.24	11.43	11.17
Zn	121.3	150.7	88.2	86.8	53.4
Zr	47.43	63.48	29.28	67.26	36.31

암석의 성인(成因)론적 연구에 많이 활용된다(Henderson, 1984). 도자기 태토의 미량원소와 희토류원소의 함량은 산지 추정 연구에 매우 유용한 방법으로 분석 결과에서 증명되고 있다. 희토류원소는 외적 요인에 의한 변성 및 풍화

작용의 영향을 덜 받으며, 상호간 물리화학적 성질이 유사하여 지구환경에서 발생된 모든 환경에 규칙적으로 거동하므로, 모암의 희토류 분포패턴 특성을 그대로 가지고 있다(Mason and Moore, 1982).

본 연구에서는 총 37개 미량원소 성분에 대한 분석을 실시하였으며, 분석 결과를 표로 정리하였다(Table 4, 5). 귀래1리 3호 가마터 백자와 손곡3리 2호 가마터 백자는 이미 연구되었던 귀래2리 가마터 출토 백자(Lee and So, 2014) 보다 비교적 낮은 Fe_2O_3 의 함량과 비례하여 Cr, V, Ni 모두 낮은 함량으로 확인되었다(Figure 6). Ba와 Sr은 알칼리장석에 풍부하게 존재하는 것으로 알려진 원소들로서, 장석과 운모성분이 포함된 자기원료의 특징을 조금 더 세밀하게 분류할 수 있는 특징적인 원소이다(Henderson, 1984).

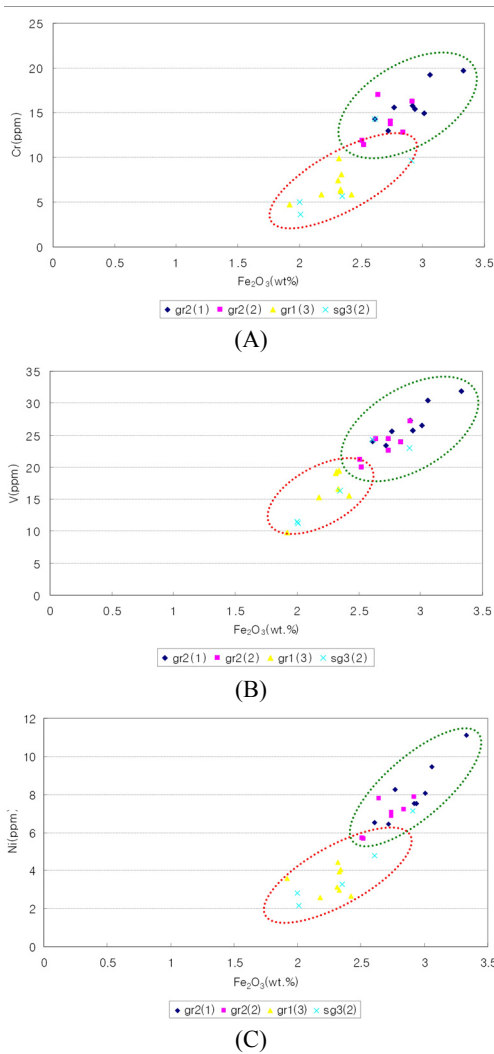


Figure 6. Distribution diagram of Fe_2O_3 -Cr(A), Fe_2O_3 -V(B), Fe_2O_3 -Ni(C) of white ware bodies from Gwiraе-1ri 3rd kiln, Songok-3ri 2nd kiln, Gwiraе-2ri kiln(Lee and So, 2014; Lee, 2015).

미량원소 Sr은 이온반경(1.27\AA)이 크기 때문에 Ca광물($Ca^{2+}:1.06\text{\AA}$)에는 허용되고, K광물(1.33\AA)에는 높은 전하로 포획되므로, Sr은 대부분이 사장석과 K-장석에 들어 있으며, 특정광물에서 농도가 결정화작용이 진행됨에 따라 증가한다(Mason and Moore, 1982). Rb는 K-장석, 각섬석, 흑운모와 같은 K^+ 광물의 K^+ 에 치환되기 때문에 농집되어 함량이 증가하게 된다(Mason and Moore, 1982). 따라서 각각 주성분원소 Ca, K와 비례관계를 가질 것으로 예상된다. CaO와 Sr의 함량 분포에서 귀래1리 3호 가마터와 손곡3리 2호 가마터 수습 백자는 귀래2리 가마터 출토 백자(Lee and So, 2014)보다 약간 낮은 함량을 나타내었다(Figure 7A). 또한 K_2O 와 Rb의 함량은 CaO와 Sr의 함량 분포에서 확인된 결과와 반비례 관계를 형성하고 있는데 즉, 귀래1리 3호 가마터와 손곡3리 2호 가마터 수습 백자 편이 귀래2리 1호와 2호 가마터 출토 백자보다 많은 함량으로 확인되었다(Figure 7B).

Sr과 Rb 및 Ba와 Rb의 함량 분석을 통해서 강원 원주지역 백자 태토의 비교 관계를 확인할 수 있었다. Ba와 Rb의 분포는 관계 그래프 영역에서 크게 벗어나지 않으며, Sr과

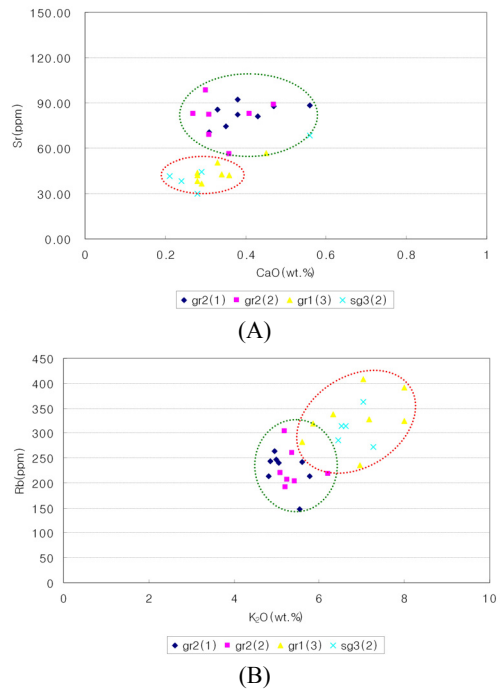


Figure 7. Distribution diagram of CaO-Sr(A), K_2O -Rb(B) of white ware bodies from Gwiraе-1ri 3rd kiln, Songok-3ri 2nd kiln, Gwiraе-2ri kiln(Lee and So, 2014; Lee, 2015).

Rb의 반비례관계는 장석 및 점토의 광물학적 성질과 일치하였다(Figure 8).

분석대상 백자 태토를 구성하는 미량원소 중 호정 및 불호정성 원소에 대한 함량을 Pearce(1983)가 제시한 화강암의 평균 미량원소 함량을 기준으로 표준화하여 나타냈다

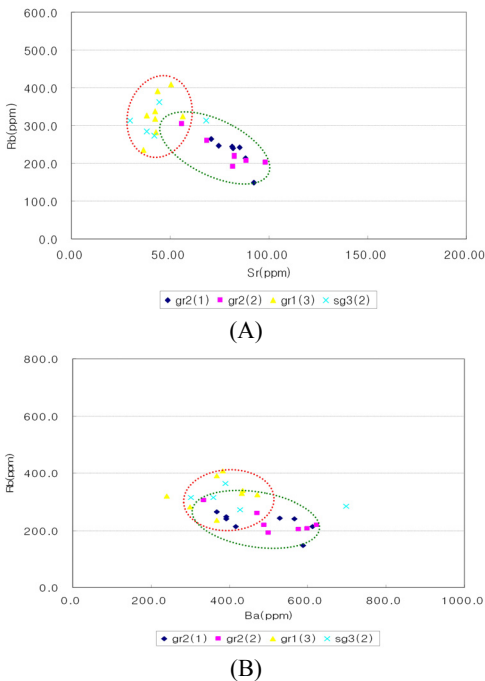


Figure 8. Distribution diagram of Sr-Rb(A), Ba-Rb(B) of white white ware bodies from Gwirae-1ri 3rd kiln, Songok-3ri 2nd kiln, Gwirae-2ri 1st kiln and 2nd kiln(Lee and So, 2014; Lee, 2015).

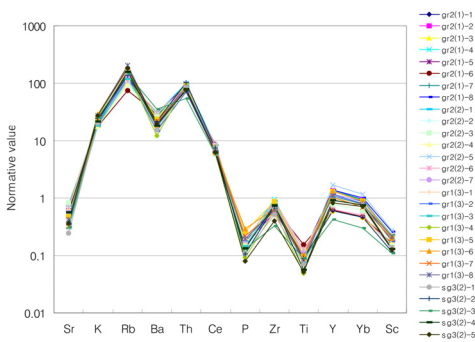


Figure 9. Normalized variation diagram showing compatible and incompatible pattern of white ware bodies from Gwirae-1ri 3rd kiln, Songok-3ri 2nd kiln, Gwirae-2ri kiln(Lee and So, 2014; Lee, 2015).

(Figure 9). 미량원소는 주성분원소를 치환하는 특징을 갖는데, 이런 특성은 미량원소의 원자가와 이온반경에 의해 결정되며 원소의 호정성과 불호정성을 결정한다(Rollinson, 1993). 본 연구에서 대상으로 한 가마터별 백자의 호정 및 불호정성 미량원소 함량은 Sr, K, Rb, Ba, Th, Ce, P, Zr, Ti, Y, Yb, Sc 등 12개 원소를 대상으로 비교하였다. 귀래1리 3호, 손곡3리 2호 가마터 분석대상 백자 및 귀래2리 가마터 출토 백자(Lee and So, 2014)의 호정 및 불호정성 미량원소 함량은 모두 동일한 패턴을 나타내었다(Figure 9).

희토류원소는 유사한 물리적, 화학적 성질로 인해 자연계에서 규칙성이 매우 강하기 때문에 암석, 해수와 같은 지구 구성물질 및 지구 외 물질의 생성 시 환경 및 현재의 환경 변화를 해석하는데 매우 중요한 도구로 사용되고 있다(Henderson, 1984). 분석대상 백자의 희토류 함량을 운석의 초생치로 표준화하여 도시화 하였으며(Taylor and McLennan, 1985), 희토류원소 La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu 등 8개 원소를 대상으로 각 가마터별 함량 분포 패턴을 확인하였다(Figure 10).

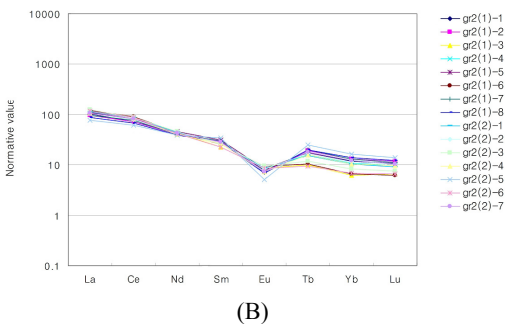
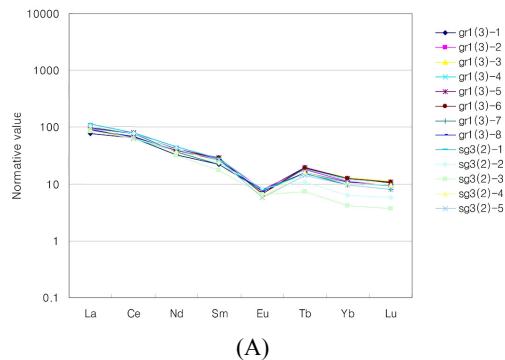


Figure 10. Normalized variation diagram showing rare earth elements pattern of white ware bodies from Gwirae-1ri 3rd kiln and Songok-3ri 2nd kiln(A), Gwirae-2ri kiln(B)(Lee and So, 2014; Lee, 2015).

Table 6. Mineral compositions and rates of detected minerals(quartz : mullite) of white ware bodies from Gwiraе-1ri 3rd and Songok-3ri 2nd kiln

Site	Sample number	Detected minerals	Rates of detected minerals [quartz : mullite (wt.%)]
Gwiraе-1ri 3rd kiln	gr1(3)-1	quartz, mullite	64.1 : 35.9
	gr1(3)-2	quartz, mullite	72.8 : 27.2
	gr1(3)-3	quartz, mullite	61.5 : 38.5
	gr1(3)-4	quartz, mullite	68.5 : 31.5
	gr1(3)-5	quartz, mullite	58.4 : 41.6
	gr1(3)-6	quartz, mullite	68.5 : 31.5
	gr1(3)-7	quartz, mullite	67.6 : 32.4
	gr1(3)-8	quartz, mullite	64.9 : 35.1
Songok-3ri 2nd kiln	sg3(2)-1	quartz, mullite	61.1 : 38.9
	sg3(2)-2	quartz, mullite	49.7 : 50.3
	sg3(2)-3	quartz, mullite	61.5 : 38.5
	sg3(2)-4	quartz, mullite	56.8 : 43.2
	sg3(2)-5	quartz, mullite	64.6 : 35.4

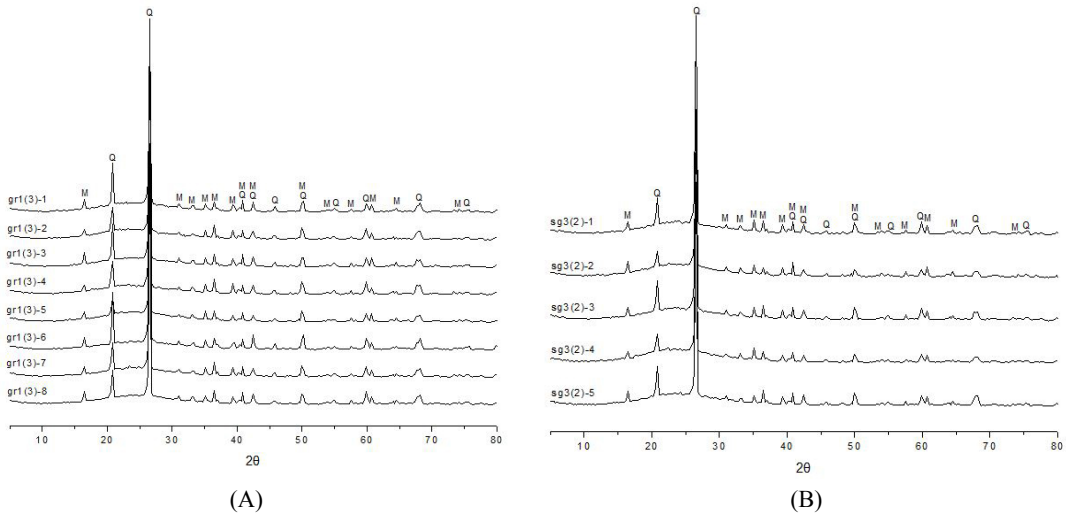


Figure 11. X-ray diffraction pattern of white ware bodies from Gwiraе-1ri 3rd kiln(A), Songok-3ri 2nd kiln(B)(Lee, 2015). Q; quartz, M; mullite.

희토류원소의 분포 패턴은 경(輕)희토류에서 중(重)희토류 원소로 갈수록 표준치가 감소하고, Eu(-)이상이 있는 특성으로 각 가마터별로 동일하게 나타난다. 분석대상 백자 태토는 모두 유사한 분포 패턴을 보이고 있으며, 이를 통하여 본 연구에서 분석된 백자는 모두 지질학적 성인이 동일한 모암을 사용하여 제작되었음을 알 수 있었다.

3.4. 결정상 분석

XRD에 의한 결정상 분석은 도자기의 소성온도, 분위기, 소성시간 등에 대한 추정이 가능하며, 이는 도자기를 구성하는 광물 종류 및 비율의 차이에 따른다. 광물 종류의 차이는 도자기의 제작 태토 원료에 함유되어 있는 광물이

소성 과정에서 열변화에 따른 소실 또는 새로운 광물이 생성되는 결과를 반영한다(Kang, 1997).

본 연구에서는 XRD 분석에서 검출된 결정상을 통한 광물의 열 변화와 열팽창수축 측정(Dilatometer) 결과를 비교하여 백자 태토의 소성온도를 추정하고, 결정상의 검출 비율을 통하여 소성온도, 소성시간, 소성분위기 등에 대해서 접근해 보고자 하였다.

귀래1리 3호 가마터에서 수습한 백자 태토의 결정상 분석 결과 quartz와 mullite가 검출되었다. gr1(3)-2, gr1(3)-4, gr1(3)-6 백자에서는 quartz의 검출비율이 높고, mullite의 비율은 낮은 것으로 확인되었다(Table 6). XRD 분석 결과는 주성분 분석(Table 2)에서 gr1(3)-2, gr1(3)-4의 Al₂O₃ 성분이 다른 백자보다 소량 함유되었고, 열팽창수축 분석 결과(Figure 12) gr1(3)-6 백자가 다른 백자보다 비교적 낮은 온도에서 소성된 결과와 일치하였다.

손곡3리 2호 가마터에서 지표 수습한 백자 태토 역시 quartz와 mullite가 검출되었으며, 결정상 검출비율에서 귀래1리 3호 가마터 백자와 큰 차이를 보이지 않았다. sg3(2)-2 백자의 quartz가 소량 검출되었고 mullite가 많이 검출된 것은 비교적 많은 Al₂O₃ 및 용제의 함량과 소성조건에 따른 결과로 확인되었다(Table 6).

위와 같이 XRD를 통한 결정상 분석 결과 귀래1리 3호 가마터와 손곡3리 2호 가마터 지표수습 백자는 모두 유사한 패턴으로 나타났으며, 일부 백자 태토에서 quartz와 mullite 함량이 미소하게 차이가 난 이유는 소성온도와 소성시간 등 소성 조건에 따른 결과로 확인되었다. 따라서 강원 원주지역 백자는 모두 유사한 소성조건으로 백자를 제

작했음을 알 수 있었다(Figure 11).

3.5. 열팽창수축 측정

귀래1리 3호 및 손곡3리 2호 가마터에서 지표수습한 백자의 소성온도를 추정하기 위해 dilatometer를 이용하여 열팽창수축 결과를 나타냈다(Figure 12).

백자의 열팽창수축 관계를 이용하여 소성온도의 추정이 가능하다. 즉, 백자의 팽창특성 중 원래의 소성온도를 지나면 팽창곡선에서 급격히 수축되는 변곡점이 발생하는데 이 구간의 온도가 백자의 추정 소성온도이며 오차 범위는 ±20°C이다. 또한, 도자편의 흡수율이 0%가 되는 온도와 용융 또는 변화하는 온도가 근접할 경우에는 소결온도에서 온도를 조금만 상승시켜도 발포현상이 발생하는데(The Ceramic Society of Japan, 1989), 그래프 상에 수축 패턴이 아닌 팽창하는 패턴으로 나타난다.

귀래1리 3호 가마터 지표수습 백자는 모두 1,200°C 이하의 온도에서 소성되었다. gr1(3)-6는 변곡점이 1,000°C ±20°C 부근에서 확인되어 낮은 소성온도로 제작되었음을 알 수 있다. gr1(3)-3, gr1(3)-5, gr1(3)-7, gr1(3)-8 은 1,100°C ±20°C 온도에서 수축현상이 벌어지지 않고 팽창하는 패턴이 확인되었다(Figure 12A).

손곡3리 2호 가마터 지표수습 백자 중 sg3(2)-1과 sg3(2)-3은 1,150±20°C에서 소성되었고, sg3(2)-2, sg3(2)-4, sg3(2)-5는 1,100±20°C에서 소성되었다. sg3(2)-5에서는 급격한 팽창 패턴이 확인되었다. 결정상 검출비율과 열팽창수축 결과를 통해서 sg3(2)-2, sg3(2)-4이 sg3(2)-1,

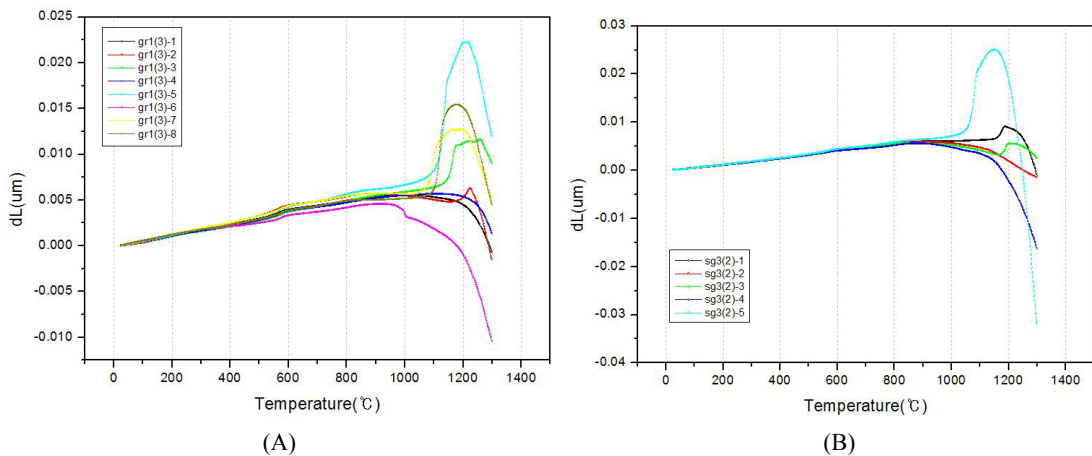


Figure 12. Shrinkage curves of white ware bodies from Gwiraе-2ri 1st kiln(A), Gwiraе-2ri 2nd kiln(B)(Lee, 2015).

sg3(2)-3에 비해 낮은 소성온도로 제작되었지만 mullite 비율이 높게 나타났음을 알 수 있었다(Table 6). sg3(2)-2은 높은 용제 함량이 소성온도에 영향을 미친 것으로 보이며, sg3(2)-4은 용제 함량 외에도 소성시간이나 가마 내 위치 등 소성 분위기의 영향을 많이 받은 것으로 확인되었다(Figure 12B).

4. 결론

강원도 원주지역에서 발굴된 귀래1리 3호 가마터와 손곡3리 2호 가마터에서 출토된 백자의 제작기술 및 사용원료의 특징을 살펴보기 위하여 주성분 분석, 미량성분 분석, 결정상 분석, 열팽창수축 측정 등 재료 과학적 분석을 진행하였다. 또한 이미 연구되었던 귀래2리 1호와 2호 가마터 백자의 분석결과(Lee and So, 2014; Lee, 2015)를 비교하여 강원 원주지역 백자의 특성을 살펴보고자 하였고, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

gr1(3)-2와 gr1(3)-4를 제외한 귀래1리 3호 가마터 백자는 귀래2리 가마터 출토 백자보다 발색산화물이 미량이며, 용제를 많이 사용하였으나, 그 차이는 미미하였다. 손곡3리 2호 가마터 수습 백자는 귀래1리 3호 가마터 백자와 거의 유사한 화학적 조성으로 확인되었다. 제계르식을 통한 백자의 유약 주성분 분석 결과, 가마터마다 큰 차이가 확인되지 않았다.

분석대상 백자의 미량원소는 유사한 함량의 패턴으로 나타났다. 희토류원소의 분포 패턴은 경희토류에서 중희토류원소로 갈수록 Normative value가 줄어들고, Eu(-)이상이 있는 동일한 특성으로 확인되었다. 호정 및 불호정성 미량원소 역시 마찬가지로 동일한 함량 패턴을 나타내었다. 미량 성분 원소 분석 결과를 통하여 분석대상 백자 모두 지질학적 성인이 동일한 모암을 사용하여 제작되었음을 알 수 있었다.

분석대상 백자 태토의 XRD 분석 결과 quartz와 mullite가 검출되었으며, quartz와 mullite 검출비율이 유사하게 확인되었다. 일부 편에서 quartz와 mullite 검출비율의 미세한 차이는 Al₂O₃의 함량과 소성온도, 소성시간 등 여러 요인에 의한 결과로 확인되었다.

열팽창수축 결과 귀래1리 3호 가마터 백자는 대부분 1,100±20℃의 온도에서 소성되었으며, gr1(3)-6는 낮은 온도에서 소성되어 자화가 덜 되었음을 알 수 있었다. 손곡3리 2호 가마터 지표수습 백자 중 sg3(2)-2, sg3(2)-4,

sg3(2)-5는 1,100±20℃에서 소성되었으며, sg3(2)-1과 sg3(2)-3은 1,150±20℃에서 소성되었다.

재료학적 분석결과 분석대상 백자는 기 분석된 귀래2리 출토 백자 편과 원료 및 제작기법에서 유사성이 확인되었으며, 조선시대 강원 원주지역 지방백자의 특성을 확인할 수 있었다.

사 사

본 연구는 2015도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였으며(과제번호-520150033), 연구를 위해서 백자를 제공해 주신 한림대학교 박물관에 진심으로 감사드린다.

REFERENCES

- Allen, D., 1986, Pottery science: materials, processes and products. Ellis Horwood Ltd., London, 44-47.
- Chuncheon National Museum, 2013, The excavation report of kiln site of Chiljeon-ri, Yanggu. (in Korean)
- Ewha Womans University and Yanggu-gun, 2001, Kiln site of Bangsan, Yanggu. 234-236. (in Korean)
- Gangwon Research Institute of Archeological and Cultural Properties, 2016, Excavation survey within the area of 403-provincial highway road(Jinae-Goseong). (in Korean)
- Hallym University Museum, 2004, The excavation report of the white porcelain kiln site, Guyre-2ri Wonju, Kangwondo, Korea. Archaeological Research Report of the Hallym University Museum, 29, 275-314. (in Korean)
- Henderson, P., 1984, Rare earth element geochemistry, Developments in Geochemistry 2, Elsevier, Amsterdam, 510.
- Kang, K.I., 1997, The scientific study on ancient earthenware and pottery in Chonnam area. Ph. D. dissertation, Chonnam National University, Gwangju, 77, 79-82. (in Korean with English abstract)
- Kim, K.J., 2002, Research of white porcelain kiln site of Kangwondo. Master's thesis, Hallym University, Chuncheon, 7, 25-27. (in Korean with English abstract)
- Lee, B.H. and So, M.G., 2014, A study on chemical composition and firing temperature of white wares from

- the Guyre-2ri kiln sites, Wonju. *Journal of Conservation Science*, 30(3), 249-261. (in Korean with English abstract)
- Lee, B.H., 2015, (A) Study on materials scientific characteristics of potteries in Kangwon province. Ph. D. dissertation, Kangwon National University, Chuncheon. (in Korean with English abstract)
- Mason, B., and Moore, C.B., 1982, *Principles of Geochemistry* (4ed). John Wiley & Sons, New York, 344.
- Pearce, J.A., 1983, Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. in Hawkesworth, C.J. and Norry, M.J.(eds.), *Continental basalts and mantle xenoliths*. Shiva Publishing Ltd., 230-249.
- Rollinson, H.R, 1993, *Using geochemical data*. Longman Scientific and Technical, 102-150.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, *The continental crust; Its composition and evolution*. Blackwell, Oxford, 312.
- The Ceramic Society of Japan, 1989, *Ceramic technology handbook*. Gihodo Publication, 1485.
-