

강원 영동지역 백자의 재료과학적 특성 연구: 강릉 남양리 백자가마터와 동해 발한동2(사문동) 가마터를 중심으로

이병훈 | 소명기*¹

(재)강원문화재연구소, *강원대학교 나노응용공학과

Material Characteristics of White Wares from Yeongdong Province, Gangwon-do: Gangneung and Donghae Kiln Sites

Byeong Hoon Lee | Myoung-Gi So*¹

Kangwon Research Institute of Cultural Heritage, Chuncheon, 200-150, Korea

*Department of Nano Applied Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea

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

초록 강원도 영동 강릉지역인 남양리 백자가마터와 동해지역 발한동2(사문동) 가마터 백자 12개 시편을 대상으로 제작기술 및 태토 사용원료의 특성을 살펴보고자 하였다. 각각 화학 조성과 결정상, 소성온도, 미량원소 및 희토류원소 등을 분석하였으며, X-선 형광분석기(XRF)와 X-선 회절분석(XRD), 열팽창계수 측정(Dilatometer), 유도결합 플라즈마 질량 분석법(ICP-MS) 및 유도결합 플라즈마 방출 분광법(ICP-AES)을 이용하였다. 우선, XRD를 통한 결정상 분석에서는 강릉 남양리 가마터, 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자 모두 quartz와 mullite만 검출되었다. 소성온도를 추정하기 위한 열팽창수축 측정 결과, 시편마다 각각 차이가 있지만, 대부분 1200°C 이하에서 소성되었다. 제계르식을 통한 주성분 분석 결과, 강릉 남양리 가마터 출토 백자의 주성분이 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자와 화학적 조성에 차이가 있었으며, 강릉 남양리 가마터 백자의 RO₂와 RO+R₂O가 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자보다 높은 함량이었다. 희토류원소 분석 결과는 강릉 남양리 가마터 백자와 동해지역 발한동2(사문동) 가마터 백자가 지질학적 기원이 상이한 모양으로 제작되었음을 알 수 있었다.

중심어: 백자, 화학조성, 결정상, 소성온도, 희토류 원소

ABSTRACT This study aims to examine production technique of twelve white wares from the Gangneung Namyang-ri and Donghae Balhan-dong2(Samun-dong) kiln sites, Kangwon Province and characteristics of the used materials, and to find a correlation among materials of the excavated white wares. X-ray fluorescence sequential spectroscopy(XRF), X-ray diffraction(XRD), Dilatometer and Inductively coupled plasma mass spectrometry(ICP-MS), Inductively coupled plasma atomic emission spectrometer(ICP-AES) were applied to determine the chemical composition, crystalline phase of samples, firing temperatures, trace elements and rare earth elements. When analyzing body crystalline phases of the white wares using the XRD method, quartz and mullite were extracted from all the samples. Though firing temperature of each sample was different, they were mostly fired at a temperature below 1200°C. Analyzing the excavated white wares using the Seger formula, compositional properties of white wares in Gangneung Namyang-ri kiln showed differently

from the Donghae Balhan-dong2(Samun-dong) kiln. The body of white wares from Gangneung Namyang-ri kiln have higher ratio of RO_2 and $RO+R_2O$ than of white wares from Donghae Balhan-dong2(Samun-dong) kiln site. The white wares from Gangneung Namyang-ri kiln and Donghae Balhan-dong2(Samun-dong) kiln were made of host rocks of the different geological origin, according to the result of rare earth elements analysis.

Key Words: White wares, chemical composition, crystalline phase, firing temperature, rare earth elements

1. 서 론

강원지역 백자가마터에 대한 연구는 활발히 진행되지 않은 실정이며, 특히 강원 영동지역 백자의 과학적 연구는 거의 발표된 바 없다. 강원지역 백자에 대한 과학적 연구가 진행되지 않은 데에는 가마터 발굴이 이루어지지 않은 이유가 가장 크다. 최근에는 발굴 및 지표 조사를 통해서 수습된 강원 영서지역과 영동지역의 지방백자에 대한 재료 과학적 분석이 진행된 바 있다(Lee, 2015). 강원 영동지역 백자가마터의 자연적 조건을 살펴보면, 남북으로 길게 뻗은 태백산맥 일대의 높은 산맥으로 둘러 쌓여 있다. 또한, 영동지역 백자가마터에서 출토된 백자의 원료는 고품도, 양구토와 같이 양질의 백토가 아닌 비교적 저급의 도토로 제작되었다. 본 연구에서 분석대상으로 선택한 강릉 남양리 가마터, 동해 발한동2(사문동) 가마터 역시 발굴은 이루어지지 않았으며, 지표조사에서 수습한 백자 편을 대상으로 분석을 진행하였다.

강릉 남양리 가마터는 철탑부지 NO. 213 진입로 및 기존도로확장부지와 맞닿아 있는 곳으로 중심지역은 현재 경작지로 이용되고 있으며, 인근에 위치한 구릉하단부의 골짜기와 홍수로 인하여 절토된 하천변(남양천)에 이르기까지 다량의 유물이 노출된 상태로 방치되고 있다. 즉, 방치골의 좌측 구릉 말단부에 해당하는 경작지대에서는 백자 편과 도지미, 소토(燒土) 잔해가 확인되었으며, 비교적 넓은 충적대지(경작지대)에 해당하는 아래턱골 일대에서는 상당량의 백자 편이 지표면에 노출되어 있다. 그 밖에 경작지의 가장자리에는 농경지 정리 시 수습된 것으로 추정되는 폐자기 더미가 형성되어 있기도 하다(Kwandong University museum, 2003). 남양리 백자요지에서 수습된 백자편들은 주로 19세기에 만들어진 것으로 추정되어 영동지방의 조선 후기 백자 제작 형태를 미루어 볼 수 있다.

동해 발한동2(사문동) 백자가마터는 동해시 발한동 산 45번지 일원으로 발한동 큰발한의 성황당이 위치하고 있는 구릉 일대이다. 구릉의 북쪽에서 남쪽으로 뻗어내린 능

선 상에 가마가 위치하고 있는 것으로 추정된다. 가마터의 앞으로는 소하천이 흐르고 있으며, 지표면에서는 백자 편과 소토편이 일부 확인되고 있다(Donghae City and Kwandong University museum, 2004).

본 연구의 분석대상 가마터 외에 강원 영동지역에서 지표조사에 의해 확인된 백자가마터는 강릉 사기마리 백자가마터, 동해 만우동 백자가마터, 동해 발한동1 백자가마터, 동해 신흥동1 백자가마터, 동해 신흥동2 백자가마터, 동해 비천동 백자가마터 등이 있다(Kwandong University museum, 2003). 대부분 가마터는 논밭 등으로 사용되고 있으며, 강릉 사기마리 백자가마터 중 일부는 저수지 공사에 의해 수몰되고 남아 있지 않다. 또한 동해 비천동 가마터의 경우 수해에 의해 가마터 유구가 훼손되었다.

이제까지 수행된 강원 영동지역 도자기에 대한 과학적 연구는 강릉 보광리 분청사기 가마터에서 지표수습된 분청사기를 대상으로 화학적 성분과 미세구조를 연구하였으며(Kim *et al.*, 1999), 그 외에 청자 및 백자, 분청사기에 대한 과학적 연구는 진행되지 않았다. 따라서 발굴조사 뿐만 아니라 시굴조사 및 지표조사에서 수습된 도자기 편에 대한 과학적 연구는 점차적으로 진행되어야 한다고 생각된다.

본 연구에서는 강원 영동지역 백자가마터 중 강릉 남양리 백자가마터와 동해 발한동2(사문동)백자가마터에서 수습한 백자를 대상으로 주성분, 희토류 및 미량원소, 결정상, 소성온도 등을 통하여 제작기법 및 태토 원료의 특성을 알아보고, 강릉 및 동해지역 백자의 특성을 비교하였다.

2. 분석대상 및 분석방법

2.1. 분석 대상

분석대상 백자는 강릉 남양리 백자가마터 수습 백자 6개, 동해 발한동2(사문동) 백자가마터 수습 백자 6개 등 총 12개 편을 대상으로 분석을 진행하였다. 분석대상 백자 편 사진을 나타내었고(Figure 1), 각각의 자세한 특성을 알아

보기 쉽게 표기하였다(Table 1).

본 연구에서 분석에 사용된 대상 시편은 편의상 강릉 남양리 가마터는 gn, 동해 발한동2(사문동) 백자가마터는 ds로 표기 하였으며 분석 대상 백자 번호는 표기된 가마터 명칭 뒤에 '-'와 해당 도편 번호(숫자)를 나타내었다.

2.2. 분석 방법

2.2.1 태토 주성분 분석

분석대상 백자의 태토 주성분 분석을 위하여 엑스선형광분석기(XRF ; ZSX100e, Rigaku, Japan)를 이용하였으

며, X선 선원은 Rh target을 사용하였다. 태토는 유약 부분을 제거한 후 agate mortar에서 약 30μm로 분쇄하였고, 분쇄된 시료를 Ø 30mm 펠렛 형태로 성형하여 분석용 시편으로 사용하였으며 성형 압력은 20ton/cm²으로 하였다.

제게르식(Seger formula)을 이용하여 태토 주성분의 지역적 특성을 알아보고자 하였다. 일반적으로 도자기 원료는 산화물 또는 몇 개의 산화물이 결합된 화합물로 구성되어 있으며, 이들 산화물은 염기성에 속하는 금속산화물과 산성에 속하는 비금속산화물, 산성과 염기성의 중간인 중성산화물로 분류할 수 있다. 이 중에서 중성산화물은 산성과 염기성 산화물이 공존할 경우 쉽게 반응하여 생성됨으

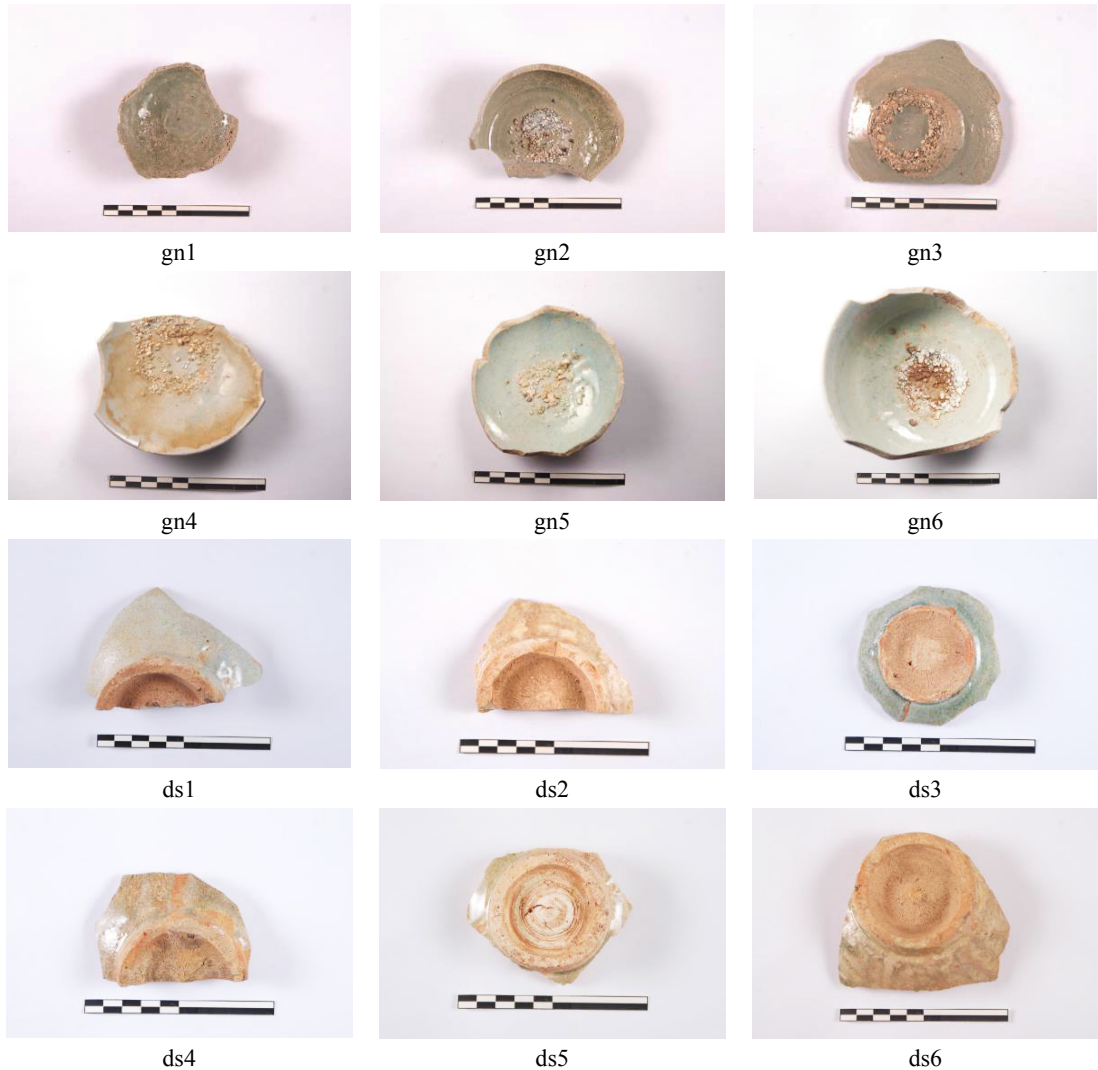


Figure 1. Picture of white wares from Namyang-ri kiln and Balhan-dong kiln analyzed on this study.

Table 1. Characteristics of Namyang-ri kiln and Balhan-dong kiln white wares.

sample number	type	color ^a		design	
		body	glaze	inscription	crackled state
Namyang-ri kiln					
gn1	low-grade	GY-GN	GY-GN	×	○
gn2	low-grade	GY-GN	GY-GN	×	○
gn3	low-grade	BE-GY	BE-GY	×	○
gn4	low-grade	BE-GY	BE-GY	×	○
gn5	low-grade	BE-GY	GY-GN	×	○
gn6	low-grade	BE-GY	BE-GY	×	○
Balhan-dong kiln					
ds1	low-grade	BE-GY	BE-GY	×	○
ds2	low-grade	WT-BE	BE	×	○
ds3	low-grade	BE-GY	GY-GN	×	○
ds4	low-grade	BE-GY	BE-GY	×	○
ds5	low-grade	BE	BE-GN	×	○
ds6	low-grade	BE-GY	BE-GN	×	○

Abbreviation

color^a: WT-white, GY-gray, GN-green, BE-beige, L-light**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
Namyang-ri kiln											
gn1	67.1	21.7	2.01	0.53	0.93	0.04	6.87	0.28	0.03	0.19	99.7
gn2	66.6	22.3	2.09	0.56	0.70	0.05	6.98	0.29	0.05	0.19	99.8
gn3	66.7	22.2	2.06	0.54	0.80	0.05	6.95	0.30	0.03	0.19	99.8
gn4	67.8	22.0	1.70	0.46	0.70	0.03	6.75	0.15	0.03	0.18	99.8
gn5	70.2	20.2	1.59	0.50	1.10	0.05	5.88	0.11	0.03	0.18	99.8
gn6	70.0	20.3	1.59	0.51	1.16	0.05	5.87	0.12	0.03	0.18	99.8
average	68.1	21.5	1.84	0.52	0.90	0.05	6.55	0.21	0.03	0.18	99.8
standard deviation	1.63	0.95	0.24	0.03	0.20	0.01	0.53	0.09	0.01	0.01	
Balhan-dong kiln											
ds1	66.9	25.4	1.63	0.69	0.14	0.01	4.86	0.08	0.01	0.04	99.8
ds2	57.4	35.3	0.69	0.48	0.68	0.21	4.87	0.07	0.03	0.03	99.8
ds3	61.1	30.3	2.11	0.52	0.20	0.23	5.38	0.08	0.02	0.04	99.9
ds4	59.3	31.0	2.24	0.37	0.11	0.01	6.53	0.11	0.04	0.04	99.7
ds5	55.8	36.5	1.29	0.54	0.52	0.12	4.46	0.39	0.07	0.02	99.7
ds6	57.4	33.2	2.16	0.34	0.19	0.04	6.20	0.09	0.03	0.04	99.7
average	59.7	31.9	1.69	0.49	0.31	0.10	5.38	0.14	0.03	0.04	99.8
standard deviation	3.99	4.00	0.61	0.13	0.24	0.10	0.82	0.12	0.02	0.01	

로 원료의 분류를 이용한 비교분석에서는 크게 산성과 염기성으로 분류된다(Oh, 1998).

2.2.2. 미량성분 분석

백자 태토의 미량성분 분석은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS ; X5, Thermo Elemental, UK)와 유도결합플라즈마 원자방출 분광기(ICP-AES ; Optima 4300DV, Perkin Elmer, USA)로 분석하였으며, 시료는 고온 건조 후 미세하게 분말화 하여 왕수와 HF48% 용액에 용해한 후 분석하였다.

2.2.3. 결정상 분석

결정상 조사를 위하여 고분해능엑스선회절분석기(HR-XRD; D/MAX 2500V/PC, Rigaku, Japan)를 이용하여 분석하였다. 이때 분석조건은 scan range; 5~80°, scan speed ; 0.6°/min, scan step ; 0.01°, acceleration voltage; 40kV, 200mA, target ; Cu로 하였다. 시료는 유약을 제거한 백자 태토로부터 미세절단기를 이용하여 적당량을 절단한 후, 약 30 μ m 이하로 분쇄하여 사용하였다.

2.2.4. 열팽창수축 측정

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

3. 결과 및 고찰

3.1. 태토의 주성분 분석

분석대상 백자 편 태토의 총 10가지 주성분을 측정하였으며, 분석에 대한 결과를 표로 나타내었다(Table 2). 또한 강릉 남양리 가마터와 동해 발한동2(사문동)가마터의 주성분을 토대로 제게르식에 적용시켜 그래프로 나타냈다(Figure 2).

강릉 남양리 가마터 백자는 SiO₂ 66.6~70.2wt.%, Al₂O₃ 20.2~22.3wt.% 이며, 착색 산화물인 Fe₂O₃는 1.59~2.09wt.%, TiO₂는 0.11~0.30wt.%, MnO는 0.03~0.05wt.% 함유되었다. 용제인 장석은 K₂O 5.87~6.98wt.%로 가장 많이 함유되었으며, 용제의 함은 7.53~8.37wt.%로 높은 함유량을

나타내었다.

동해 발한동2(사문동) 가마터 수습 백자는 평균함량 SiO₂ 59.7wt.%, Al₂O₃ 31.9wt.%로 강릉 남양리 가마터 수습 백자보다 낮은 SiO₂ 함량이고, Al₂O₃는 이와 반비례하여 높은 함량이었다. 또한 착색 산화물은 Fe₂O₃ 평균 1.69wt.%, TiO₂는 0.14wt.%로 강릉 남양리 가마터와 비교하여 낮은 함량이었다. K₂O는 평균 5.38wt.%로 강릉 남양리 가마터 수습 백자보다 1.2wt.% 낮았다. MgO, Na₂O는 강릉 남양리 가마터 백자의 함량과 차이가 없지만, CaO는 평균 0.31wt.%로 강릉 남양리 백자의 함량보다 0.6wt.%정도 낮게 나타났다. 위의 결과에 따라서, 용제의 함은 5.64~7.02wt.%로 강릉 남양리 가마터 백자 용제보다 낮은 함량으로 확인되었다.

백자 태토의 화학적 특성을 제게르식으로 확인해 본 결과 강릉 남양리 가마터 수습 백자는 RO₂ 4.80~5.63, RO+R₂O 0.43~0.46 영역에 분포하였으며, 동해 발한동2(사문동) 가마터 수습 백자보다 RO₂, RO+R₂O의 함량이 많았다.

동해 발한동2(사문동) 가마터 수습 백자는 ds1을 제외하고 RO₂ 2.55~3.28몰, RO+R₂O 0.2~0.26몰 영역에 분포하며, ds1은 RO₂가 4.3몰로 군집 영역에서 조금 벗어났다. 하지만 동해 발한동2(사문동) 가마터 수습 백자는 대체로 강릉 남양리 가마터 수습 백자에 비해 RO₂, RO+R₂O가 가장 적은 영역에서 군집하였으며, 산성 및 염기성 성분원소가 비교적 적게 함유되었다.

위 결과에서 알 수 있듯이 강원 영동지역 백자가마터인 강릉 남양리 가마터 동해 발한동2(사문동) 가마터 수습 백자는 가마터 별로 각각 군집하여 분포하며, 산성 및 염기성 성분 함량에 차이가 있음을 알 수 있었다. 또한 RO₂와

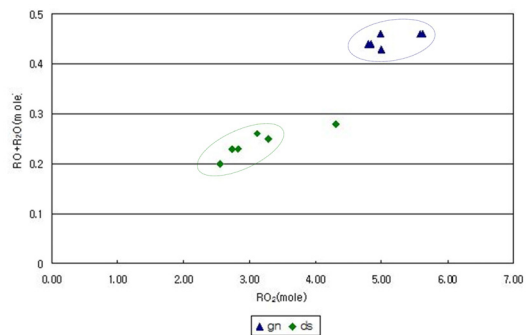


Figure 2. Distribution diagram of composition according to seger formula of white wares body from Namyang-ri kiln and Balhan-dong kiln.

Table 3. Trace elements compositions of white ware bodies from Namyang-ri kiln.

단위 (ppm)	gn1	gn2	gn3	gn4	gn5	gn6
Rb	303.1	310.6	299.0	297.6	239.7	239.0
Y	9.75	9.74	8.96	15.09	8.36	8.37
Mo	0.37	0.34	0.28	0.44	0.31	0.38
Sn	3.36	3.32	3.16	3.59	2.52	2.55
Sb	0.86	1.10	1.07	1.13	0.83	0.79
Cs	7.98	8.29	7.81	9.26	5.88	6.22
La	27.70	32.46	30.52	17.02	10.94	10.70
Ce	58.78	67.93	65.12	28.41	18.80	18.61
Pr	7.42	8.76	8.33	4.20	2.45	2.38
Nd	28.18	32.91	31.60	15.89	9.27	8.96
Sm	5.28	6.20	5.84	3.49	2.05	2.00
Eu	0.53	0.57	0.61	0.75	0.45	0.45
Gd	3.22	3.46	3.21	3.19	1.74	1.56
Tb	0.39	0.39	0.42	0.51	0.25	0.24
Dy	2.09	2.11	2.03	2.80	1.56	1.52
Ho	0.35	0.34	0.32	0.50	0.28	0.28
Er	0.88	0.87	0.79	1.28	0.76	0.75
Tm	0.12	0.12	0.12	0.16	0.11	0.11
Yb	0.78	0.75	0.75	1.13	0.77	0.73
Lu	0.11	0.10	0.10	0.15	0.11	0.10
Pb	13.67	15.26	14.60	13.59	17.40	16.63
Th	17.02	21.29	20.09	7.53	2.87	3.40
U	8.92	10.32	10.23	9.25	7.39	7.31
Ba	316.7	323.3	333.3	224.4	249.6	250.0
Mn	111.9	120.6	122.8	162.7	137.0	137.8
Sr	70.3	71.0	70.4	48.2	63.7	64.5
Co	36.03	24.69	25.85	22.25	25.34	24.08
Cr	12.60	12.34	11.80	6.15	3.98	3.91
Cu	3.09	2.91	3.04	2.46	1.68	4.53
Ga	25.67	26.37	26.03	22.83	20.82	20.76
Li	18.28	18.45	18.16	20.08	17.54	16.74
Ni	6.79	5.99	5.84	7.28	5.10	3.46
P	1208.33	1229.45	1197.01	1108.79	1150.88	1109.30
Sc	3.95	3.64	2.46	4.00	3.16	3.36
V	14.07	14.14	13.87	8.19	6.72	7.14
Zn	16.02	15.75	15.51	16.48	18.06	16.96
Zr	52.01	53.79	46.50	26.35	24.27	26.26

Table 4. Trace elements compositions of white ware bodies from Balhan-dong kiln.

단위 (ppm)	ds1	ds2	ds3	ds4	ds5	ds6
Rb	148.9	264.1	130.8	289.2	228.3	251.2
Y	18.73	7.99	11.42	23.06	16.99	16.86
Mo	0.13	0.10	0.22	0.14	0.13	0.11
Sn	5.18	1.49	5.31	3.87	4.03	5.06
Sb	0.44	0.19	0.74	0.45	0.21	0.28
Cs	2.76	3.07	2.36	2.66	4.47	2.22
La	10.97	6.61	7.27	21.91	10.46	16.47
Ce	24.51	19.82	9.18	38.73	26.98	31.18
Pr	3.75	1.79	2.37	5.22	2.86	4.13
Nd	15.56	6.78	10.70	19.82	11.50	16.30
Sm	4.64	1.83	3.08	5.14	3.52	3.85
Eu	0.90	0.28	0.66	0.93	0.64	0.79
Gd	4.48	1.80	3.17	4.83	3.85	3.64
Tb	0.74	0.32	0.56	0.79	0.69	0.61
Dy	4.60	1.84	3.67	4.81	4.00	3.59
Ho	0.80	0.30	0.72	0.83	0.73	0.60
Er	2.17	0.72	2.03	2.14	1.82	1.67
Tm	0.31	0.10	0.31	0.30	0.26	0.22
Yb	1.96	0.62	2.11	1.92	1.71	1.48
Lu	0.26	0.08	0.31	0.25	0.22	0.19
Pb	31.89	12.70	43.64	69.56	14.27	57.65
Th	2.91	4.65	1.25	5.70	5.66	5.21
U	0.85	2.09	1.17	1.56	5.43	1.53
Ba	113.8	95.8	105.4	191.9	108.6	156.6
Mn	47.8	139.1	100.3	171.9	255.6	112.3
Sr	26.0	115.8	29.6	35.6	73.0	34.7
Co	28.93	24.20	31.22	30.05	24.40	31.79
Cr	2.85	3.56	5.25	4.68	13.82	5.17
Cu	6.51	6.18	5.69	15.91	6.39	16.51
Ga	29.61	51.92	33.98	35.13	54.71	42.93
Li	14.21	20.15	14.95	9.62	23.02	9.51
Ni	2.86	6.86	8.12	7.43	4.61	5.22
P	275.90	223.18	320.01	273.96	208.08	286.28
Sc	4.49	1.68	2.27	3.84	2.81	2.80
V	4.74	7.12	7.18	7.23	14.40	8.08
Zn	24.95	17.48	29.95	28.78	30.11	20.52
Zr	23.01	25.51	21.19	23.87	34.92	23.04

RO+R₂O의 분포 관계는 각 가마터에 상관없이 RO₂의 함량에 따라 용제가 비례하여 증가하는 함량 패턴으로 확인되었다.

3.2. 미량성분 원소 분석

총 37개의 미량성분에 대한 분석 결과를 표로 나타내었다(Table 3, 4). 미량원소 Sr은 이온반경(1.27Å)이 크기 때문에 Ca광물(Ca²⁺:1.06Å)에는 허용되고, K광물(1.33Å)에는 높은 전하로 포획되므로, Sr은 대부분이 사장석과 K-장석에 들어있으며, 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(Kang, 2003). 단, Sr과 K-장석의 관계보다 Sr과 사장석이 분별작용에 더 크게 관여하였으므로, CaO와 Sr의 함량 분포, K₂O와 Rb의 함량 분포를 그래프로 나타냈다(Figure 3).

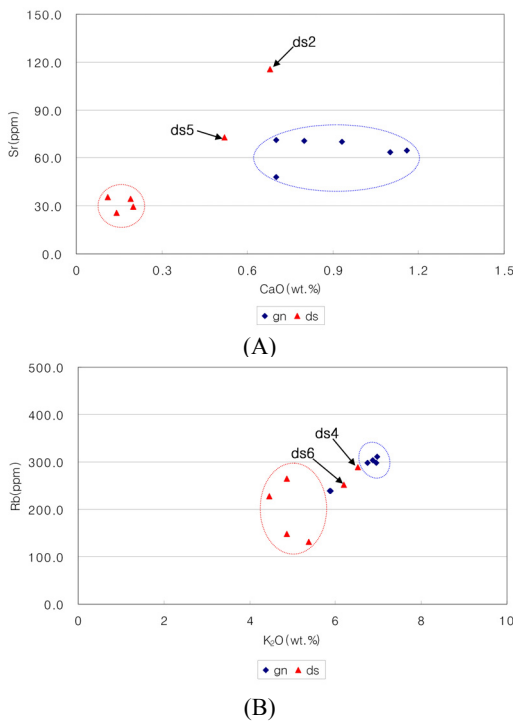


Figure 3. Distribution diagram of CaO-Sr(A), K₂O-Rb(B) of white wares body from Namyang-ri kiln and Balhan-dong kiln.

강릉 남양리 가마터 백자는 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자보다 CaO와 Sr 함량이 많이 함유되었으며, 넓은 영역에서 분산된 분포를 나타내었다. 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자 중 ds2와 ds5를 제외한 나머지 백자는 강릉 남양리 가마터 백자보다 CaO와 Sr의 함량이 낮다. 강릉 영동지역 백자의 CaO 성분은 소량 함유되었고, 시편마다 다양한 함량으로 확인되어 주된 용제로 사용되지 않았음을 알 수 있었다(Figure 3A).

K₂O와 Rb의 함량 분포는 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자 중 ds4와 ds6을 제외한 나머지 편들이 강릉 남양리 가마터 백자보다 낮게 나타났다. 또한 K₂O와 Rb의 함량 분포 그래프를 통하여 강릉 영동지역 백자 태토 원료의 주된 용제로서 K₂O가 사용되었음을 알 수 있었다(Figure 3B).

희토류원소는 광물 내에서 쉽게 치환되지 않기 때문에 암석의 유전자와 같은 역할을 하여 산지 추정에 적합한 원소로 이용되고 있으며(Mason and Moore, 1982), 희토류원소의 존재도 변화가 고고학의 영역까지 널리 사용될 수 있는 것은 다른 원소들의 지구화학적 특성과 비교해 볼 때, 희토류원소가 풍화 혹은 변질 작용과 같은 지질학적 현상

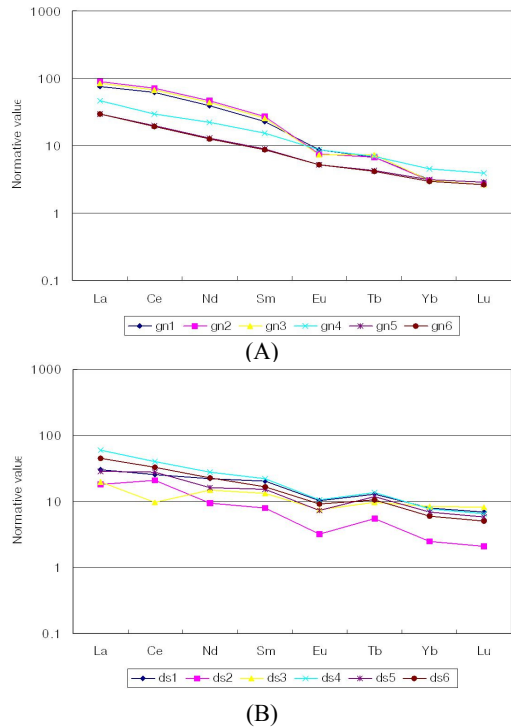


Figure 4. Normalized variation diagram showing rare earth elements pattern of white wares body from Namyang-ri kiln(A), Balhan-dong kiln(B).

Table 5. Mineral compositions and rates of detected minerals(quartz : mullite) of white ware bodies.

site	sample number	detected minerals	rates of detected minerals quartz : mullite (wt.%)
Namyang-ri kiln	gn1	quartz, mullite	54.2 : 45.8
	gn2	quartz, mullite	55.8 : 44.2
	gn3	quartz, mullite	57.1 : 42.9
	gn4	quartz, mullite	58.2 : 41.8
	gn5	quartz, mullite	67.6 : 32.4
	gn6	quartz, mullite	68.0 : 32.0
Balhan-dong kiln	ds1	quartz, mullite	48.4 : 51.6
	ds2	quartz, mullite	9.3 : 90.7
	ds3	quartz, mullite	23.6 : 76.4
	ds4	quartz, mullite	19.4 : 80.6
	ds5	quartz, mullite	10.0 : 90.0
	ds6	quartz, mullite	14.2 : 85.8

의 변화에 대해서도 일정한 특성을 가지고 분화되기 때문이다(Aubert *et al.*, 2001; Ding *et al.*, 2006; Liang *et al.*, 2008).

각 가마터별 희토류원소 함량 분포는 La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu 등 8개 원소를 운석의 초생치로 표준화(Taylor and McLennan, 1985)하여 나타냈다(Figure 4).

강릉 남양리 가마터 백자의 경우 대부분 경희토류에서 중희토류원소로 갈수록 Normative value가 감소하는 특성을 나타내었다. gn1, gn2, gn3 은 La, Ce, Nd, Sm에서 Normative value가 완만히 감소하다가 Eu(-)이상이 있는 특성이 확인되고, gn4, gn5, gn6 그룹은 La부터 Lu까지 큰 폭 없이 완만히 감소하는 패턴으로 Eu에 미미한 차이를 보이지만 전체적인 그래프 패턴 영역에서 태토 원료 모암의 유사성이 확인되었다(Figure 4A).

동해 발한동2(사문동) 가마터 백자는 ds3이 Ce의 부(-)의 이상을 보인 부분만 제외하면, 모두 희토류 함량 패턴이 동일한 규칙성을 보였다. La부터 Lu까지 점차 감소하는 함량 패턴이며 Eu(-)이상이 있는 특성을 나타내었다. ds2는 Ce의 함량이 미소하게 높게 나타나지만 Ce 외에 다른 희토류원소의 함량패턴과 기울기는 매우 유사하게 확인되었다. 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자는 La부터 Lu의 함량 분포 특성 및 기울기는 비교적 완만한 형태를 나타내었다(Figure 4B).

위의 결과를 통해서 강원 영동지역 가마터 백자 태토 원료 모암의 특성을 살펴본 결과, 강릉 남양리 가마터 백자는

동해 발한동2(사문동) 가마터 백자의 희토류 함량 패턴과 다르게 나타났다.

3.3 결정상 분석

XRD 분석에서 검출된 결정상의 검출비율을 통해 소성 조건을 알아보려고 하였다. 이와 더불어 열팽창-수축 분석 결과와 종합하여 소성온도, 소성시간, 소성분위기 등을 추정해보았다. 검출된 상의 종류와 검출비율에 대한 결과를 표로 나타냈으며(Table 5), 백자 태토 결정상의 XRD 패턴을 확인하였다(Figure 5).

강릉 남양리 가마터에서 수습한 백자 태토의 XRD 분석 결과, quartz와 mullite가 검출되었으며, 결정상의 검출비율은 gn1~gn4의 quartz는 54.2~58.2wt.%인데 비해 gn5와 gn6은 67.6wt.%, 68.0wt%로 높게 나타났다. 결정상 검출비율의 원인 분석을 위해 주성분 함량을 살펴본 결과 gn5와 gn6의 SiO₂ 함량이 다소 높았으며, 용제의 합이 7.53wt.%, 7.59wt.%로 gn1~gn4의 용제 합 7.94~8.37wt%보다 낮은 함량으로 확인되었다. gn5와 gn6의 quartz는 비교적 많이 검출되었고, mullite가 gn1~gn4보다 소량 검출되었다.

동해 발한동2(사문동) 가마터 분석대상 백자 중 ds2, ds4, ds5, ds6가 80.6~90.7wt.%의 매우 높은 mullite 검출비율을 나타내고 있었다. ds3은 조금 낮지만 76.4wt.% mullite가 검출되었고, ds1은 51.6wt.%로 가장 낮은 검출

비율로 확인되었다. ds2, ds3, ds4, ds5, ds6의 mullite 검출 비율은 30.3~36.5wt.%의 높은 Al₂O₃의 함량에 기인한 것으로 보이며, mullite가 가장 적게 검출된 ds1은 Al₂O₃가 25.4wt.%로 가장 낮은 함량이었다. 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자는 장석류가 검출되지 않았으며, mullite의 높은 검출비율은 Al₂O₃ 함량에 의한 결과로 확인되었다.

위와 같이 강릉 남양리 가마터와 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자의 XRD를 통한 결정상 분석 패턴과 검출된 결정상의 검출비율을 확인해 보았다. 강릉 남양리 가마터와 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자 모두 quartz와 mullite만 검출되었으며, 장석류는 확인되지 않았다. 동해 발한동2(사문동) 백자 태토에서 mullite 결정상이 가장 많이 검출

되었으며, 이는 높은 Al₂O₃ 함량에 의한 결과임을 알 수 있었다(Table 5). 강릉 남양리 가마터 백자 태토의 결정상 검출비율은 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자 태토와 달리 mullite보다 quartz가 많이 확인되었다.

3.4. 열팽창수축 측정

강원 영동지역인 강릉 남양리 가마터와 동해 발한동2(사문동) 가마터에서 수습한 백자의 소성온도 추정을 위하여 dilatometer 장비를 통한 열팽창수축 결과를 도출하였으며, 그래프로 나타내었다(Figure 6).

열팽창수축 결과는 그래프 상에 변곡점으로 소성온도

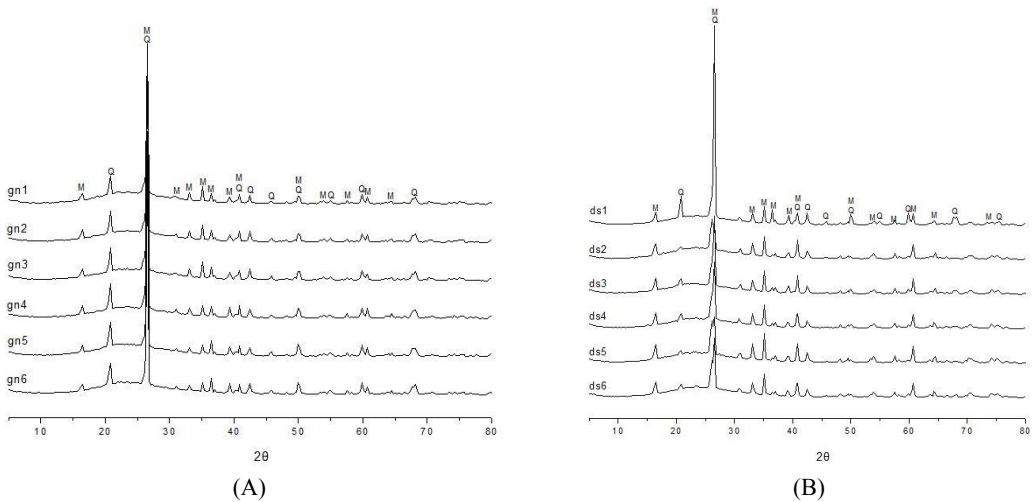


Figure 5. X-ray diffraction pattern of white wares body from Namyang-ri kiln(A), Balhan-dong kiln(B). Abbreviation: Q; quartz, M; mullite.

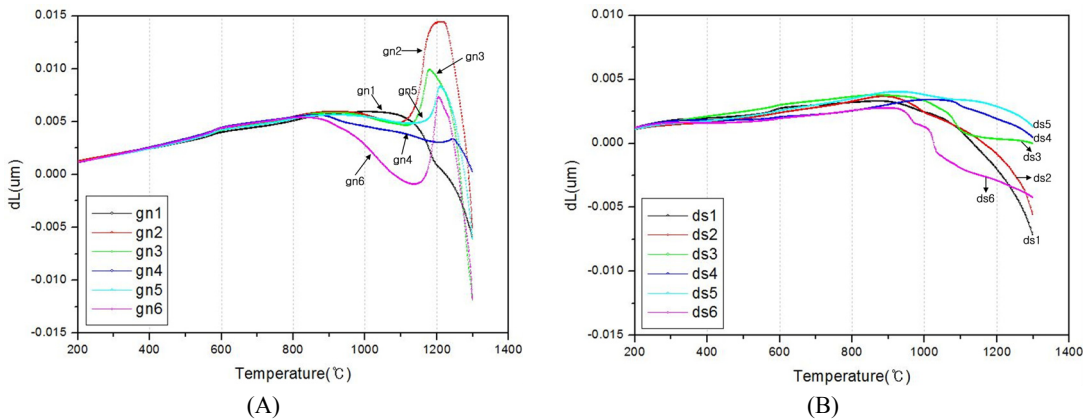


Figure 6. Shrinkage curves of white wares body from Namyang-ri kiln(A), Balhan-dong kiln(B).

를 추정한다. 완만하게 팽창하는 곡선을 나타내다가 급격히 수축하는 패턴을 보이는 열화점(softening point)을 도자가가 경험한 소성온도라고 볼 수 있다. 이와는 반대로, 소결온도에서 온도를 조금만 상승시켜도 발포현상(The Ceramic Society of Japan, 1989)이 나타나기도 하는데, 이러한 경우 열팽창수축 그래프 상에 완만한 팽창현상 이후 급격한 팽창 패턴을 보인다(Kang and Jung, 1997). 도자기 소성온도 추정에 따르는 열팽창·수축 그래프의 오차범위는 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 이다.

강릉 남양리 가마터의 분석대상 백자 편 중 gn1은 $1100\pm 20^{\circ}\text{C}$ 부근에서 수축하는 패턴을 보였다. gn4는 $1000\pm 20^{\circ}\text{C}$ 부터 서서히 수축하다가 $1200\pm 20^{\circ}\text{C}$ 에서 급격히 수축하는 패턴을 나타내었다. gn2, gn3, gn5는 $1100\pm 20^{\circ}\text{C}$ 에서 팽창이 진행되다가 $1200\pm 20^{\circ}\text{C}$ 에서 급격히 수축하는 패턴을 보였다. gn6은 1000°C 이하에서 서서히 수축이 진행되다가 $1150\pm 20^{\circ}\text{C}$ 에서 팽창하였다. 팽창패턴을 주성분 분석결과와 종합하여 살펴본 결과, 낮은 Al_2O_3 함량과 높은 용제 함량으로 낮은 소성온도에도 치밀화가 이루어질 수 있었으나(Table 2), 그 이상의 온도까지 소성이 진행되어 발포현상이 발생한 것으로 확인되었다(Figure 6A).

동해 발한동2(사문동) 가마터 분석대상 백자 시편 중 ds1, ds2, ds3, ds6은 $1000\pm 20^{\circ}\text{C}$ 에서 수축이 완만히 진행되었으나, 급격한 수축 및 팽창 패턴이 확인되지 않았다. ds4, ds5는 급격한 수축 및 팽창 패턴이 확인되지 않았으나, $1100\pm 20^{\circ}\text{C}$ 에서 수축이 서서히 진행되었다(Figure 6B). 따라서 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자는 비교적 높은 온도까지 소성되었으며, 이는 높은 Al_2O_3 함량과 낮은 용제 함량의 영향으로 확인되었다(Table 2).

열팽창수축 패턴결과 강릉 남양리 가마터 백자 시편 중 일부는 치밀화 온도 이상에서 소성되어 발포현상이 발생했으며, 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자는 주성분 함량에 따른 안정된 소성온도와 소성조건에 의해 치밀화가 잘 이루어진 것으로 확인되었다. 이는 동해지역 백자 시편의 XRD를 통해 검출된 높은 mullite 비율과 밀접한 관계임을 알 수 있었다.

4. 결론

강원 영동 강릉지역인 남양리 백자가마터와 동해지역 발한동2(사문동) 가마터에서 수습된 백자의 제작기술 및 사용원료의 특징을 살펴보았다. 과학적 분석방법은 주성분 분석, 미량성분 분석, 결정상 분석, 열팽창수축 측정 등

을 진행 하였으며, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

강원 영동지역 백자가마터인 강릉 남양리 가마터, 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자의 태토 주성분 분석 결과 가마터에 상관없이 RO_2 의 함량에 따라 용제가 비례하여 증가하였다. 강릉 남양리 가마터 백자는 RO_2 와 $\text{RO}+\text{R}_2\text{O}$ 가 높은 함량이었고, 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자는 산성과 염기성 성분 모두 가장 낮았다. 따라서 강원 영동지역 분석대상 백자는 가마터별로 태토 원료에 차이가 확인되었다.

미량성분 분석 결과 강릉 남양리 가마터 백자의 경우 대부분 희토류에서 중희토류원소로 갈수록 Normative value가 감소하는 패턴이었다. 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자는 ds3이 Ce의 부(-)의 이상을 보인 부분만 제외하면, 모두 희토류 함량 패턴이 동일하였다. 강릉과 동해 지역별로 태토원료 모암에 차이가 있음을 알 수 있었다.

강릉 남양리 가마터, 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자의 결정상 분석 패턴과 검출된 결정상의 검출비율을 확인한 결과 강릉 남양리 가마터와 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자 모두 quartz와 mullite만 검출되었으며, 장석류는 확인되지 않았다. 검출비율은 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자 태토에서 mullite 결정상이 많이 검출되었으며, 이는 높은 Al_2O_3 에 의한 결과로 확인되었다.

백자의 소성온도 측정 결과, 강릉 남양리 가마터 백자 편 중 일부 편에서 발포현상이 나타났다. 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자는 높은 Al_2O_3 함량과 낮은 용제 함량의 원인으로 비교적 높은 온도까지 소성되었으며, 높은 mullite 검출비율을 통해 확인할 수 있었다.

강원 영동지역 백자 태토의 화학적 특성을 살펴보기 위해 이미 연구되었던 영서지역 백자와 비교해본 결과 강릉 남양리 가마터 백자는 강원 영서지역(Lee and So, 2014) 백자와 산성 성분이 유사하게 검출되었지만, 용제는 다소 높은 함량을 나타내었다. 특히 동해 발한동2(사문동) 가마터 백자는 바닷가에 접한 위치적 조건에도 불구하고 강원 영서지역의 백자보다도 SiO_2 함량이 적게 검출된 특징이 확인되었으며, 용제는 더욱 낮게 검출되었다.

사 사

본 연구는 2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구되었으며(과제번호-120140127), 연구를 위해서 백자를 제공해 주신 가톨릭관동대학교 박물관에 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Aubert, D., Stilile, P., Probst, A., 2001, REE fractionation during granite weathering and removal of waters and suspended loads: Sr and Nd isotope evidence, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65, 387-406.
- Ding, S-M., Liang, T., Zhang, C-S., Wang, L-J., Sun, Q., 2006, Accumulation and Fractionation of Rare Earth Elements in a Soil-Wheat System, *Pedosphere*, 16(1), 82-90.
- Donghae City and Kwandong University museum, 2004, the Distribution Map of Cultural Heritage, Hakyoun, 86, 226.
- Kang, K.I., 2003, Whiteware from the official kiln of Choseon Dynasty Period in Beoncheon-ri, Gwangju, *Journal of Conservation Science*, 12, 1-4. (in Korean with English abstract)
- Kang, K.I., Jung, C.J., 1997, Body composition and Firing Temperature of Ancient Pottery Excavated in Chonnam Province, *Journal of Conservation Science*, 6(1), 15-30. (in Korean with English abstract)
- Kim, K.N. and Han, S.M. and Shin, D.Y., 1999, Composition and microstructure of Punch'ong sherds from Bokwang-ri, Kangnung, *Journal of Conservation Science*, 8, 10-15. (in Korean with English abstract)
- Kwandong University museum, 2003, Academic Series of Kwandong University museum (33), 58-60, 86, 114.
- Lee, B.H., 2015, (A) Study on Materials Scientific Characteristics of Potteries in Kangwon Province Ph. D. Dissertation, Kwandong University. (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)
- Liang, T., Ding, S., Song, W., Chong, Z., Zhang, C., Li, H., 2008, A review of fractionation of rare earth elements in plants, *Journal of Rare Earths*, 26, 7-15.
- Mason, B., and Moore, C.B., 1982, *Principles of Geochemistry* (4ed). John Wiley & sons, New York, 72-90, 344.
- Oh, Y.W., 1998, Analyses and calculations in ceramics, Kyungnam University, 33-174. (in Korean)
- 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.
-