유천리 고려백자의 조성 및 미세구조를 통한 과학적 연구

이태진 | 고민정 | 임수경 | 윤은영 | 황현성¹
국립중앙박물관 보존과학부

A Scientific Study on the Composition Analysis and Microstructure of the Yucheon-ri Goryeo Whiteware

Taejin Lee | Minjeong Koh | Sookyung Lim | Eunyoung Yun | Hyunsung Hwang¹
Conservation Science Department, National Museum of Korea, Seoul, 140-026, Korea

¹Corresponding Author: hshwang7@korea.kr, +82-2-2077-9426

초록 본 연구는 고려 중기 가마터인 유천리 고려백자의 조성 및 미세구조 분석 결과를 기초로 기 연구된 서리, 중암리, 방산동 그리고 법천사지 출토 백자와 비교하여 고려백자의 원료적 특징을 확인한 것이다. 유천리 고려백자는 태토가 고려 전기 백자에 비해 실리카가 높고 용제 함량이 낮은 반면 유약은 이 반대의 특징을 보인다. 또한 철산화물에 비해 티타늄 산화물의 함량이 높게 나타나는 경향을 보이는데 이는 고려청자의 티타늄 산화물 함량과 비슷한 수치이다. 전기 고려백자는 각 가마별 함량의 차이를 보이나 이것이 시기에 따른 일정한 변화로 나타나지는 않았으며 중기 고려백자인 유천리 도편과 비교해 보아도 비슷한 양상이다. 또한 소비유적 출토인 법천사지 고려백자는 도편별 함량 차이를 보여 동일하지 않은 지역에서 제작, 수급되었을 가능성이 있다. 이로 보아 각 가마별 함량의 특징 및 차이점은 고려백자의 시기적 흐름에 따른 변화라기보다 제작 환경이나 재료 수급의 차이 등에 따른 각 지역적인 특성으로 판단된다.

중심어: 고려백자, 유천리, 화학조성, 미세구조

ABSTRACT This study examined the chemical characteristics and the microstructure of Goryeo whiteware which was excavated in the kiln site Yucheon-ri, Gangwon-do, the southern part of South Korea. this area is considered to be used in the middle of the time of Goryeo Dynasty. We analyzed the chemical characteristics comparing Goryeo Whiteware from Seo-ri, Jungam-ri, Bangsan-dong and The temple site of Beopcheon. Based on the analysis, we confirmed the properties of raw material for making pottery. It is featured that body composition of Goryeo Whiteware from Yucheon-ri contains high silica and low solvent. However, the contents of the glaze are vice versa. Goryeo whiteware tends to contain larger part of oxide than that of titanium oxide, which applies to Goryeo Celadon. the whitewares during the early days of Goryeo Dynasty varies in components depending on kilns, whereas it does not mean that chronological changes happened in components. The whiteware shards from Yuchoen-ri have a similar aspect. The whiteware shard from the temple of Beopchen differ in composition, Thus they are estimated to have been produces and shipped from various sites. In conclusion, we judged that the component difference among Goryeo whitewares stems from production environment and origin of raw materials rather than chronological changers.

Key Words: Goryeo Whiteware, Yucheon-ri, chemical composition, microstructure

1. 서론

유천리 가마터는 전라북도 부안군에 위치한 고려시대 유적으로 청자를 주로 제작하였으나 일부 백자가 함께 출토되어 고려시대 백자의 생산 기술을 가늠해 볼 수 있다. 본 연구대상인 유천리 고려백자는 12호 가마에서 출토된 도편으로 1966년 국립중앙박물관이 재 발굴 할 당시 퇴적층이 교란되어 정확한 층위를 알 수 없었으므로 도편의 제작 시기가 명확하지 않다. 그러나 도편의 제작기법, 기형의 특징, 상감기법의 발생 시기 등을 고려할 때 고려 중기인 12세기 후반 ~ 13세기 전반에 생산되었을 것이라 추정된다(Kang, 1989).

고려시대의 백자는 10세기 이후 청자와 더불어 생산되었으나 제작 수량 및 문헌기록이 적어 청자에 비하여 미술사학적 및 과학적 분석연구가 미흡한 편이다. 고려백자의 과학기술적 연구를 살펴보면 용인 서리, 시흥 방산동 및 여주 중암리 가마터와 원주 법천사지 출토 백자에 대한 연구가 수행되었다(Lee *et al.*, 2005). 그러나 이 가마터 출토 백자들은 고려 전기에 해당하고 지역적으로도 중부권에 위치하고 있는 등 유천리 고려 백자와 세부적 차이를 보인다.

따라서 본 연구에서는 유천리 출토 백자편을 분석하여 태토와 유약의 주 함량을 확인하고 미세구조를 관찰함으로써 화학적 및 번조 특성을 확인하였다. 또한 이 결과를 기 발표된 고려백자와 비교하여 유천리를 비롯한 각 가마터별 원료의 유사성 및 차별성을 검토하였다. 이를 종합하여 지금까지 연구된 고려시대 백자의 시기와 지역에 따른 화학적 특성을 파악하고자 한다.

2. 연구대상 및 방법

2.1. 연구대상

발굴된 유천리 고려백자 중 장식기법에 따라 무문백자 4점, 음각백자 2점, 상감백자 4점 등 총 10점을 선정하였다. 이 중 상감백자 한편은 다른 백자편과 달리 유약색이 푸른빛을 띠고 있어 청자유료 추정된다.

분석을 위하여 선정한 도편의 가시적 특징을 살펴보면 YC 3-1, 3-2, 3-3, 3-6은 무문이고 모든 도편에 빙렬이 있다. YC 3-4와 3-5는 음각 백자로 YC 3-4는 외벽에, YC 3-5는 내벽에 음각되어있다. 도편 중에서 YC 3-3, 3-4, 3-5에서는 유약의 박락현상이 관찰되는데 YC3-5의 경우 외

벽에서만 박락이 일어났다.

YC 3-7, 3-8, 3-9, 3-10은 상감백자로 YC 3-7과 YC 3-10은 일반적인 흑상감에 비해 색이 옅고 푸른빛을 띤다. YC 3-7은 이 중 유일하게 유약에 빙렬이 없으며 다른 편들에 비해 푸른기가 적은 백색을 나타내고 있다. YC 3-10의 유약은 청자와 같은 푸른색이며 빙렬 또한 조밀하여 가시적으로는 백자보다 청자에 가까운 양상을 보인다.

Figure 1. Photograph of Goryeo whiteware shards selected for this study.

Table 1. Archaeological information on the analyzed shards and their composition of body from Yucheon-ri.

Sample number	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	Sege formula	
													RO ₂	RO+R ₂ O
YC 3-1	76.00	17.34	0.83	0.29	0.15	0.00	4.24	0.14	0.01	0.02	0.84	99.86	7.23	0.31
YC 3-2	76.93	17.01	0.85	0.32	0.19	0.00	4.20	0.13	0.01	0.02	0.08	99.74	7.45	0.33
YC 3-3	76.25	16.98	0.82	0.29	0.12	0.00	3.94	0.13	0.01	0.02	1.22	99.78	7.40	0.30
YC 3-4	75.89	17.57	0.88	0.31	0.11	0.00	4.36	0.14	0.01	0.02	0.30	99.59	7.11	0.32
YC 3-5	75.83	18.22	0.86	0.32	0.11	0.00	4.26	0.11	0.01	0.01	0.94	100.67	6.87	0.30
YC 3-6	75.91	17.53	0.82	0.27	0.12	0.00	4.10	0.13	0.01	0.02	0.54	99.45	7.15	0.30
YC 3-7	75.62	17.94	0.94	0.18	0.12	0.00	3.59	0.07	0.02	0.01	0.04	98.53	6.93	0.25
YC 3-8	75.12	17.65	0.96	0.32	0.15	0.00	4.24	0.07	0.02	0.02	1.13	99.68	6.99	0.31
YC 3-9	75.88	17.80	0.98	0.36	0.16	0.00	4.26	0.09	0.02	0.01	0.16	99.72	7.00	0.32
YC 3-10	75.75	17.87	0.93	0.23	0.13	0.00	3.42	0.07	0.02	0.01	1.11	99.54	6.97	0.25
Average	75.92	17.59	0.89	0.29	0.14	0.00	4.06	0.11	0.01	0.02	0.64	99.66	7.11	0.30
STDEV	0.46	0.40	0.06	0.05	0.03	0.00	0.32	0.03	0.01	0.01	0.47	0.52	0.20	0.03

2.2. 분석방법

2.2.1. 태토의 주 함량

태토의 주 함량을 알아보기 위하여 X선 형광 분석기(SHIMADZU, XRF-1700)를 사용하였다. 분석을 위하여 태토를 200 mesh 이하로 분쇄한 뒤 유리시료로 제작하여 실시하였다.

2.2.2. 유약의 주 함량 및 미세구조

에너지 분산형 분석기(EDS, Kevex Super Dry)를 사용하여 상대적 함량을 분석하였다. 분석조건은 전압 20kV와 측정거리 15.0mm이며 분석시간은 1회 150초로 설정하였다. 유약과 태토의 단면의 구조를 알아보기 위해 광학현미경(Optical microscope, Leica Microsystems, Wetzlar GmbH DM LM)으로 관찰하였으며, 미세결정은 주사전자현미경(SEM, Hitachi, S-3500N) 반사전자상(BEI, Back scattered Electron Image)과 이차전자상(SEI, Secondary Electron Image)으로 관찰하였다.

3. 유천리 가마 출토 백자

3.1. 화학조성

3.1.1. 태토

태토의 주 함량 분석 결과는 Table 1에 나타내었다. 유천리 백자 태토 함량의 대부분을 차지하는 SiO₂의 평균 함

량은 75.92wt.% 이고 Al₂O₃는 17.59wt.%로 10개의 시편 모두 함량 편차가 작으며 제제르 범위는 RO₂ 6.87~7.45, R₂O+RO 0.25~0.33로 매우 유사한 양상을 보인다. 이를 조선 전기와 중기의 관요백자 함량과 비교해 보면 그 범위가 일부 중첩되나 RO₂가 높고 R₂O+RO가 낮은 편이다.(Gyeonggi provincial museum, 2008; Lee, 2005) 즉, 이는 SiO₂의 함량은 높고 용제 함량이 적다는 것을 의미하는 것으로 함량 상 관요백자에 비해 자화되기 어려울 수 있다는 것을 알 수 있다.

발색 산화물의 함량을 살펴보면, YC 3-1~6 백자의 철과 망간 산화물은 각각 0.82~0.88wt.%와 0.01wt.%로 미량이지만 상감백자 YC 3-7~10에 비해 낮은 값을 나타낸다. 하지만 티타늄 함량은 YC 3-1~6가 0.11~0.14wt.%, 상감백자가 0.07~0.09wt.%로 다른 발색산화물들과 달리 상감백자가 낮게 나타난다.

3.1.2. 유약

유약 주 함량 분석 결과는 Table 2에 나타냈으며 유약 함량 중 YC 3-7은 다른 백자들에 비해 편차가 심해 평균과 표준편차의 값에서 제외하였다. 대부분의 유천리 백자들의 함량을 살펴보면, SiO₂는 55.05~58.55wt.%, Al₂O₃와 CaO는 각각 11.85~15.40wt.%와 14.72~19.94wt.%로 태토에 비해 도편별 함량 차이가 큰 편이다. 그러나 태토와 달리 조선 관요 백자와 비교해 보면 전, 후기를 포함하여 유사한 범위 안에 위치하고 있다(Figure 2b).

앞서 연구대상에서 언급한 것처럼 유천리 백자에서는 유약 박락현상이 많이 관찰된다(National museum of Korea, 2011).

이러한 박락현상의 원인이 함량 배합에서 기인한 것인지를 확인하기 위하여 박락되지 않은 도편과 비교하였다. 이 결과 일부 박락현상이 나타난 도편에서 용제 함량이 적은 양상이 보이지만 대부분 유사한 조성을 갖고 있음을 알 수 있다. 즉 박락현상은 함량 배합의 결함보다 당시 청자제작에 맞추어진 온도 및 환경 등 번조기술에 따른 영향으로 생각된다.

YC 3-7은 10편 중 빙렬이 없고 번조상태가 양호한 상감 백자로 다른 도편에 비해 실리카와 알루미늄 함량이 높고

칼슘산화물이 6.00~10.00wt.% 가량 낮아 전체적인 용제 함량이 낮다. 이 백자편은 장고로 추정되는 편으로 장고는 대접 등에 비해 크기도 크며 기형도 특수하기 때문에 제작할 때 번조가 잘 이루어 질 수 있도록 일반 기형과 달리 원료의 배합 등 번조공정을 다르게 조절하였을 가능성이 있다.

YC 3-10은 푸른 빛을 띠고 있어 청자유를 사용하지 않았을까 추정했던 도편이다. 발색 함량인 철산화물의 함량이 1.21wt.%로 백자 철산화물 평균 1.15wt.%에 비해 높고

Table 2. Archaeological information on the analyzed shards and their composition of glaze from Yucheon-ri.

Sample number	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	Sege formula	
												RO ₂	R ₂ O ₃
YC 3-1	56.40	12.02	1.11	3.04	19.17	0.94	3.80	0.81	0.41	2.30	99.99	2.02	0.26
YC 3-2	57.30	11.85	0.93	2.58	19.88	0.98	3.33	0.62	0.24	2.28	100.00	2.07	0.26
YC 3-3	58.55	13.94	1.38	2.79	14.72	1.01	4.27	0.64	0.20	2.51	100.00	2.53	0.37
YC 3-4	56.03	13.48	0.92	3.22	18.46	1.07	3.37	0.73	0.44	2.27	99.99	2.04	0.29
YC 3-5	55.05	13.38	0.88	3.40	19.26	1.14	3.65	0.63	0.35	2.26	100.00	1.92	0.28
YC 3-6	57.42	15.40	1.14	2.62	14.76	1.05	4.58	0.59	0.19	2.25	100.00	2.47	0.40
*YC3-7	62.58	17.19	1.45	2.02	8.20	0.99	4.87	0.60	0.15	1.94	100.01	3.99	0.67
YC 3-8	55.38	14.18	1.80	2.56	18.34	1.13	3.52	0.59	0.12	2.37	99.99	2.11	0.34
YC 3-9	56.22	12.93	0.72	2.88	19.94	1.21	3.25	0.39	0.13	2.33	100.00	1.98	0.27
YC 3-10	57.21	15.11	1.21	3.09	16.84	1.16	2.83	0.44	0.43	1.69	100.00	2.25	0.36
Average	56.62	13.59	1.12	2.91	17.93	1.08	3.62	0.61	0.28	2.25	100.00	2.15	0.31
STDEV	1.11	1.23	0.32	0.30	2.04	0.09	0.53	0.13	0.13	0.23	0.00	0.22	0.05

(a) Body

(b) Glaze

Figure 2. Distribution of body and glaze compositions according to Seger formula.

유천리 청자의 평균 1.29wt.%와 유사한 것으로 나타났다. 하지만 유천리 백자 내에서도 YC 3-10보다 철산화물 함량이 높은 백자가 있으므로 함량만으로 청자유라고 단정 짓기는 어려우며, 미세구조 등 다른 분석 결과를 참고하여 종합적으로 살펴봐야 할 것이다.

3.2. 미세구조 분석

3.2.1. 태토

유천리 백자의 태토는 전체적으로 번조가 덜 된 모습을 보인다. 덜 녹은 광물이 많으며 부정형의 미세 기공이 많아

Figure 3. Optical images of body; (a) YC 3-7, (b) YC 3-10.

Figure 4. Optical images of Goryeo inlaid whiteware; (a) YC 3-7, (b) YC 3-8, (c) YC 3-10, (d) YC 3-8 (#9).

Table 3. Compositions of microcrystals of the Goryeo whiteware with inlay in Yucheon-ri.

Sample number	Point	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
YC 3-7	1	65.49	18.34	4.66	1.80	1.48	0.90	5.03	0.78	0.11	1.41	100.00
	2	68.73	16.56	3.86	1.61	0.59	0.96	5.32	0.92	0.09	1.36	100.00
	3	66.78	18.55	3.62	1.61	0.72	0.93	5.44	0.87	0.09	1.39	100.00
YC 3-8	4	51.55	19.06	8.08	2.61	10.29	1.21	4.14	0.79	0.11	2.15	99.99
	5	51.94	22.14	7.72	2.22	3.44	1.23	7.48	1.08	0.13	2.62	100.00
	6	53.67	14.69	12.27	3.11	2.92	1.49	7.97	1.87	0.19	1.81	99.99
	8	18.90	22.07	49.74	3.60	0.44	1.18	2.55	0.53	0.16	0.82	99.99
	9	48.73	27.13	3.09	1.97	13.16	1.51	2.52	0.47	0.06	1.36	100.00
YC 3-10	7	71.36	19.52	1.17	1.28	0.40	0.92	4.04	0.20	0.00	1.11	100.00

Table 4. The mean value of the shards in Yucheon-ri.

Sample number	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	Seger formula	
												RO ₂	R ₂ O ₃
Goryeo whiteware													
Average	75.92	17.59	0.89	0.29	0.14	0.00	4.06	0.11	0.01	0.02	99.66	7.10	0.30
STDEV	0.46	0.40	0.06	0.05	0.03	0.00	0.32	0.03	0.01	0.01			
Goryeo celadon (Hwang, 2011)													
Average	73.93	18.36	1.97	0.60	0.37	0.63	2.73	0.98	0.02	0.02	99.65	6.45	0.32
STDEV	19.67	4.86	0.60	0.17	0.11	0.27	0.78	0.34	0.01	0.01			
Inlay of Goryeo whiteware (3-7,3-10)													
Average	68.09	18.24	3.33	1.58	0.80	0.93	4.96	0.69	0.07	1.32	100.00	5.71	0.61
STDEV	2.55	1.23	1.51	0.22	0.47	0.03	0.64	0.33	0.05	0.14			
Inlay of Goryeo whiteware (3-8)													
Average	52.39	18.63	9.36	2.65	5.55	1.31	6.53	1.25	0.14	2.19	99.99	3.68	1.06
STDEV	1.13	3.74	2.53	0.45	4.11	0.16	2.08	0.56	0.04	0.41			

태토가 치밀하지 않다(Figure 3). 이는 백자 전용가마에서 번조된 조선 백자와 달리 유천리 백자는 청자 전용가마에서 번조되었다는 것을 고려해 볼 필요가 있다. 대체로 청자보다 백자의 태토 함량에 알루미늄이 많아 자화되는데 더 오랜 시간과 더 높은 온도와 열을 필요로 하기 때문에 백자를 청자와 함께 청자 전용가마에서 번조 할 경우 전체적으로 자화가 덜 이루어지는 현상이 일어날 수밖에 없다(Lee *et al.*, 2005).

YC 3-7과 YC 3-10는 제게르 그래프에서 유사한 위치를 나타내는 도편으로 함량이 거의 비슷하다. 그럼에도 불구하고 태토의 미세구조를 살펴보면 YC 3-10은 YC 3-7에 비해 녹지 않은 광물입자가 눈에 띄며 기공이 많고 치밀화 과정이 원활하게 이루어지지 않았다는 것을 볼 수 있다(Figure 3). 태토의 번조에 있어서 번조 환경, 특히 번조 온도의 조절은 번조 정도를 결정짓는 가장 큰 원인 중의 하나

라는 것을 알 수 있다.

3.2.2. 상감

상감백자는 상감토의 색과 함량 그리고 단면의 모양을 기준으로 YC 3-8, 3-7, 3-10을 선정하여 관찰하였다. YC 3-8은 백자상감초문편으로 표면을 관찰했을 때 상감토와 유약과의 열팽창 계수의 차이로 인해 상감부분 주위로 유약의 수축이 이루어져 자토가 표면에 부분적으로 노출이 되어있는 것을 볼 수 있었다. 광학현미경 관찰 결과 상감의 깊이가 500 μ m 이하로 YC 3-7이나 3-10에 비해 얕으며 백자 태토의 번조 양상과 달리 유약과 태토면의 경계를 구분하기 어려울 정도로 유리질화가 진행된 것을 알 수 있다(Figure 4b).

상감의 함량을 알아보기 위하여 SEM-EDS로 정량분석하였으며 소성이 비교적 균일하게 이루어진 부분을 면 분

석 하여 이 결과를 Table 3에 나타내었다.

함량 분석 결과 철산화물의 평균 함량이 8wt.% 이상으로 나타났는데, 이는 유천리 백자 태토의 평균 철산화물 함량 1.15wt.%와 비교해 매우 높았다. 또한 발색에 관여하는 철산화물, 티타늄 산화물, 산화 망간의 함량이 전체의 약 10wt.%를 차지하고 있는 것으로 보아 일반적으로 자토(赭土)라 부르는 철산화물이 주원료로 이용된 것을 알 수 있다. YC 3-8의 흑상감의 또 다른 특징은 용제가 매우 높다는 점이다. Figure 2의 제계르식을 참고해 보면 실리카 함량인 RO₂는 적은 함량을 보인 반면 용제 함량인 R₂O+RO는 백자태토에 비해 3배 이상 높은 것을 알 수 있다(Table 4).

흑상감의 미세구조를 살펴보면 태토와 유약의 경계면에 다량의 긴 침상형의 회장석이 집중적으로 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 회장석은 고온에서 오래 번조하였을 때 생성되는 것으로 알려져 있으며 또한 Ca²⁺의 함량이 많은 유약과 Al³⁺의 함량이 많은 태토 경계면에 주로 생성되기도 한다(Kim, 2006). YC 3-8 상감의 알루미늄 함량은 약 20wt.% 이상이며 유약내의 칼슘산화물은 18.34wt.%로 함량 적으로도 회장석을 형성하기에 적절한 조건을 가지고 있다. 하지만 이와 유사한 YC 3-7과 3-10 상감백자의 경우 YC 3-8과 달리 함량은 유사하나 YC 3-8과 유사한 현상은 나타나지 않았다. 이는 앞서 언급한 번조 환경의 조건을 충족시키지 못했기 때문에 이같은 차이를 보이지 않았을까 추측해 본다. 침상형 구조의 EDS 함량 분석 결과는 Figure 4d와 Table 3과 같다.

상감토 내부에는 부분적으로 빛나는 흰색 물질이 여러 곳에 집중되어 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. 주사전자현미경 관찰결과 사각형 형태의 입자를 확인 하였고, 이를 함량 분석 한 결과 산화철이 높은 것을 확인 할 수 있었다

(Table 3, Figure 5).

YC 3-7과 3-10의 광학현미경 사진을 보면 YC 3-8과 다르게 태토에 V자 홈을 파 상감토를 넣어 소성한 것으로 보이며 깊이도 약 1mm로 나타난다(Figure 3). 상감토의 번조 정도를 살펴보더라도 YC 3-8의 흑상감과는 달리 바탕질이 조밀하며 타원형의 기공이 형성되어 있는 것으로 보아 자화가 잘된 것으로 판단된다. 함량 분석 결과 YC 3-7과 10의 상감토는 YC 3-8의 상감토와 비교해 알루미늄 함량은 비슷하였으나 실리카 함량이 높고 용제 함량은 낮은 것으로 나타나 사용 원료가 달랐을 것으로 추정되며 이러한 차이가 자화정도에 영향을 준 것이라 생각된다(Table 4).

또한 상감토의 가시적 색상이 YC 3-8의 흑상감과 비교해 회색을 띠어 유천리 청자 태토 원료와 유사성을 의심해 보았으나 발색 함량인 철산화물과 티타늄산화물의 값이 약 1.5배 정도 높았으며 망간산화물 값도 높은 편이었다. 또한 같은 원료라고 추정하기에는 인산화물이 1.32wt.%로 청자태토 평균인 0.02wt.%와는 확연한 차이를 보였다.

3.2.3. 유약

박락이 일어나지 않은 유천리 백자의 유약은 전체적으로 YC 3-6과 같이 유약내부가 투명하고 덜 녹은 광물 없이 깨끗한 편이다(Figure 6b). 부분적으로 빙결로 보이는 크랙이 있으며 기공은 태토 경계면을 중심으로 형성되어 있다.

일반적으로 유약의 박락은 태토와 유약의 열팽창계수의 차에 의해 일어난다고 알려져 있다(Hwang, 2011). Figure 6a를 보면 유약 표면의 박락 뿐 만 아니라 태토와 인접한 부분까지 박락이 진행되고 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 태토와의 융착 정도의 문제만이 아니라 유약 자체의 강도도 박락에 영향을 미친다는 것을 의미한다.

Figure 5. SEM images of analyzed shards; (a) YC 3-8, (b) enlarged image of the mark(#8) on the image (a).

YC 3-7은 다른 도편들에 비해 실리카와 알루미늄이 높고 산화칼슘이 매우 낮았던 도편이다. 번조 조건이 다른 도편들과 달라 번조할 때 어려움이 있었을 것이라 예상하였지만 유약 내 덜 녹은 광물이 적고 원형의 기공이 형성되는 등 유약의 번조상태는 양호하였다.

청자유로 추정되는 YC 3-10의 미세구조를 살펴보면 유약의 두께가 약 300 μ m로 백자에 비해 두껍고, 태토의 표면 경계를 따라 유천리 백자에서는 잘 보이지 않는 회장석이 발달되어 있었으며 유약 내부에도 원형의 회장석이 보인다. 이는 백자의 미세구조 양상 보다는 일반적인 청자의 유약 미세구조와 유사한 경향을 보인다.

4. 고려시대 백자와의 비교

4.1. 태토

유천리 백자와 함께 서리, 중암리, 방산동, 법천사지 출토 도편들의 함량들을 상호 비교하여 각 지역별 주 함량 결

과를 Table 5에 나타내었다(Lee *et al.*, 2005). 서리, 중암리, 방산동의 경우 기존의 분석 데이터를 참고 하여 각 층위별 평균값을 표시하였으며 소비지역 출토품인 법천사지 도편은 각각 5점의 함량 값을 기록하였다. 이를 앞에서 분석한 유천리 백자도편과 비교하여 서술하고자 한다.

Figure 7(a)를 보면 법천사지 도편을 제외한 서리, 중암리, 방산동, 유천리는 각 가마별로 구분된다. RO₂는 서리, 중암리, 방산동이 5.64~6.73로 유사한 양상을 보였으며 유천리는 6.87~7.45로 다른 백자들에 비해 실리카 함량이 높은 것으로 나타났다. 이에 비해 RO+R₂O는 중암리가 0.40~0.48로 가장 높고 서리와 방산동이 0.31~0.40으로 유사했으며 유천리가 0.25~0.33으로 가장 낮았다. 법천사지는 RO₂와 RO+R₂O 모두 일정한 범위를 나타내지 않았으며 도편에 따라 함량의 차가 확연하게 들어나는 것을 볼 수 있다. 법천사지 도편은 소비유적 출토품으로 인해 제조된 지역의 정보가 확실하지 않다. 백자의 기형이나 지역, 제작시기 등을 고려하여 여주 중암리 백자와의 수급관계에 대한 이야기가 언급되고는 있으나 이번 연구에 참고한 법천사

Figure 6. Optical images of Goryeo whiteware glaze; (a) YC 3-5, (b) YC 3-6, (c) YC 3-7, (d) YC 3-10.

Table 5. Archaeological information on the analyzed shards and their compositon of body of Goryeo whiteware. Characteristics : P-proto halo shaped foot, K-Korean style halo shaped foot, C-Chinese style doughnut shaped foot, T-transformed halo shaped foot

Site	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
Seo-ri, Yongin (Average values of each period layer)												
I	70.64	21.22	1.41	0.37	0.10	0.59	4.47	0.02	0.02	0.02		99.91
(P)	0.89	0.28	0.03	0.02	0.03	0.34	0.26	0.00	0.00	0.00		0.06
II	73.22	18.31	1.40	0.27	0.12	1.21	4.98	0.03	0.03	0.02		99.92
(P)	0.33	0.50	0.05	0.05	0.02	0.16	0.10	0.02	0.01	0.00		0.10
II	72.84	18.53	1.38	0.38	0.08	0.51	5.13	0.05	0.02	0.02		99.96
(C)	0.07	0.37	0.06	0.08	0.02	0.12	0.17	0.03	0.00	0.00		0.06
IV	74.26	17.95	1.53	0.44	0.26	0.29	4.98	0.11	0.02	0.04		100.00
(K)	0.37	0.29	0.07	0.04	0.02	0.12	0.09	0.01	0.00	0.00		0.07
V	73.90	17.41	1.64	0.50	0.30	0.29	4.61	0.11	0.02	0.05		99.64
(T)	1.07	0.39	0.11	0.03	0.02	0.05	0.44	0.00	0.01	0.01		0.43
Bangsan-dong, Siheung (Average values of each period layer)												
S1E1	73.38	18.04	1.04	0.26	0.16	0.63	5.11	0.01	0.03	0.04		100.04
	0.88	0.52	0.08	0.02	0.03	0.21	0.05	0.00	0.00	0.00		0.02
N1E3	72.57	19.61	1.27	0.40	0.12	0.67	4.33	0.01	0.02	0.02		99.99
(middle layer)	0.27	0.19	0.18	0.01	0.05	0.31	0.19	0.00	0.00	0.00		0.08
N1E3	73.25	19.18	1.13	0.36	0.14	0.74	4.22	0.03	0.02	0.02		99.98
(bottom layer)	1.52	1.09	0.31	0.10	0.03	0.17	0.08	0.09	0.00	0.00		0.08
N1E1	72.52	20.05	1.37	0.38	0.09	0.72	4.30	0.01	0.02	0.00		100.06
(middle layer)	0.05	0.02	0.07	0.02	0.01	0.08	0.07	0.00	0.00	0.00		0.03
Jungam-ri, Yeosu (Average values of each period layer)												
I	72.61	18.68	1.40	0.43	0.12	0.76	5.07	0.18	0.04	0.04		100.04
	1.39	0.61	0.16	0.08	0.03	0.51	0.21	0.05	0.01	0.01		
II	72.92	18.01	1.39	0.43	0.20	1.22	4.86	0.17	0.03	0.04		100.04
	0.83	1.13	0.08	0.04	0.06	0.64	0.20	0.04	0.01	0.02		
III	73.05	18.60	1.35	0.40	0.13	0.68	4.87	0.13	0.04	0.03		100.04
	1.28	0.66	0.08	0.07	0.04	0.33	0.36	0.02	0.01	0.01		
IV	72.92	18.01	1.39	0.43	0.20	1.22	4.86	0.17	0.03	0.04		100.04
	0.83	1.13	0.08	0.04	0.06	0.64	0.20	0.04	0.01	0.02		
V	72.61	18.68	1.40	0.43	0.12	0.76	5.07	0.18	0.04	0.04		100.04
	1.39	0.61	0.16	0.08	0.03	0.51	0.21	0.05	0.01	0.01		
Temple site of Bupchun in Buronmun, Wonju-si												
BC-6	75.05	18.96	0.92	0.52	0.53	0.20	2.80	0.12	0.01	0.05	0.47	99.63
BC-7	75.48	17.38	1.42	0.69	0.14	0.40	3.68	0.26	0.20	0.02	0.03	99.70
BC-8	74.78	16.61	1.26	0.30	0.13	0.22	4.82	0.11	0.02	0.03	1.20	99.48
BC-9	75.15	16.01	1.38	0.65	0.12	0.18	5.10	0.20	0.02	0.03	0.58	99.42
BC-10	71.89	20.00	1.50	0.43	0.13	0.83	3.35	0.84	0.02	0.03	0.24	99.26
	74.47	17.79	1.30	0.52	0.21	0.37	3.95	0.31	0.05	0.03	0.50	99.50
	1.46	1.66	0.23	0.16	0.18	0.27	0.98	0.30	0.08	0.01		

지 백자에서는 이와 같은 연관성을 찾을 수 없었다. 또한 이같은 함량 차이로 보아 5편의 각 편이 동일하지 않은 지역에서 제작 및 수급되었을 가능성이 크다는 것을 알 수 있다.

법천사지 도편의 미세구조를 살펴보면 함량과 상관없이 태토의 소성 상태가 전체적으로 양호하지 않았다. Figure 8의 사진을 보면 용융되지 않은 결정형 광물과 흰색으로 빛나는 유색광물이 눈에 띄게 관찰된다. 이런 유색광물의 대다수가 철산화물을 많이 함유하고 있는 광물로써 소성이 이루어지면 태토의 백색도에 영향을 주는 것이다(Table 6).

유천리 백자는 다른 지역의 백자에 비해 점토의 기본이 되는 실리카 함량이 높고 그에 비해 용제가 낮은 편이다. 이것이 유천리 백자만의 특성인지 아니면 초기에서 중기로 넘어가는 시대별 특성인지는 현 데이터 만으로는 알 수 없다. 하지만 유천리 백자와 같이 실리카가 높고 용제가 낮으면 소성에 더 높은 온도와 시간이 요구되는 등 발전된 번조 기술을 필요로 하는 문제임은 틀림없다. 이는 차후 고려

중, 후기 백자의 연구가 진행된다면 해결 할 수 있을 것이라 생각된다.

4.2. 유약

고려 백자 유약은 태토와 달리 각 지역에 따라 구분되지 않으며 앞의 유천리 유약분석에서 언급된 YC 3-7을 제외하고는 RO_2 1.92~2.88, R_2O_3 0.26~0.46의 범위 안에 위치하고 있다. 하지만 그 중에서도 중암리 도편이 용제가 가장 높은 편이며 유천리가 가장 낮다. 그 외 서리, 방산동, 법천사지는 거의 유사하다(Figure 7).

고려 백자 유약의 철산화물 함량은 약 0.7~1.8wt.%로 지역에 따라 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만 철산화물과 함께 유약의 발색에 영향을 주는 티타늄산화물의 함량을 비교해 보면 크게 두 그룹으로 나누어지는 것을 볼 수 있다. 서리, 중암리, 방산동 도편의 경우 대부분의 도편이 티

Table 6. Compositions of microcrystals of the whiteware body from the temple site of Bupchun.

Sample number	Point	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
BC 8	10	39.18	16.13	36.57	1.35	0.49	0.87	3.89	0.11	0.39	1.03	100.01
	11	42.16	22.51	27.09	1.55	0.49	0.90	3.75	0.23	0.37	0.95	100.00

Figure 7. Distribution of body and glaze compositions according to Seger formula.

Figure 8. Optical images of body; (a)BC-6, (b)BC-9, (c) BC-8 (d) enlarged image of the mark(#10) on the image ©.

Figure 9. Distribution of F_2O_3 and TiO_2 composition of glaze.

Table 7. Archaeological information on the analyzed shards and their composition of glaze. Characteristics : P-proto halo shaped foot, K-Korean style halo shaped foot, C-Chinese style doughnut shaped foot, T-transformed halo shaped foot

Site	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
Seo-ri, Yongin (Average values of each period layer)											
I	57.11	14.42	0.75	1.71	20.99	0.96	2.84	0.14	0.26	0.86	100.03
(P)	1.68	0.37	0.22	0.30	1.10	0.37	0.31	0.02	0.38	0.13	
II	57.50	15.02	1.26	2.58	16.06	1.66	3.32	0.12	0.40	1.64	99.57
(P)	1.12	0.43	0.13	0.22	2.25	0.23	0.20	0.02	0.14	0.26	
II	58.13	13.73	1.25	2.93	17.22	0.80	3.40	0.11	0.57	1.75	99.88
(C)	0.45	0.19	0.14	0.26	1.30	0.18	0.33	0.01	0.06	0.11	
IV	60.08	14.96	1.57	2.66	13.55	0.53	3.80	0.11	0.54	2.10	99.90
(K)	0.26	0.77	0.08	0.11	1.03	0.15	0.20	0.02	0.07	0.11	
V	58.54	14.65	1.35	2.76	15.71	0.52	3.41	0.15	0.59	2.14	99.83
(T)	1.70	1.33	0.15	0.37	2.18	0.14	0.13	0.02	0.10	0.43	
Bangsan-dong, Siheung (Average values of each period layer)											
SIE1	58.04	13.39	1.06	2.35	18.87	0.81	3.31	0.22	0.50	1.51	100.05
	1.15	0.86	0.25	0.30	2.35	0.18	0.44	0.09	0.17	0.16	
NIE3	61.07	16.28	1.23	1.16	15.83	1.09	3.15	0.18	0.61	0.49	101.09
(middle layer)	1.23	1.54	0.06	0.20	2.93	0.20	0.57	0.06	0.25	0.10	
NIE3	59.24	14.67	1.05	1.17	18.73	0.95	2.61	0.18	0.62	0.53	99.75
(bottom layer)	0.77	0.46	0.19	0.15	0.98	0.16	0.15	0.03	0.17	0.08	
NIE1	59.48	14.35	1.31	1.12	18.32	1.07	2.72	0.20	0.49	0.73	99.79
(middle layer)	0.51	0.76	0.12	0.04	0.67	0.09	0.06	0.03	0.01	0.01	
Jungam-ri, Yeosu (Average values of each period layer)											
I	59.60	14.37	1.23	2.18	16.41	1.24	3.06	0.19	0.49	1.13	99.91
	0.90	0.63	0.21	0.21	1.53	0.44	0.40	0.07	0.06	0.12	
II	58.29	14.89	1.33	2.27	17.66	0.77	2.93	0.12	0.48	1.22	99.97
	1.09	0.94	0.24	0.33	1.48	0.33	0.33	0.01	0.13	0.18	
III	58.94	15.39	1.19	2.05	17.89	0.62	2.87	0.10	0.40	1.11	100.57
	0.67	0.56	0.24	0.14	1.50	0.28	0.22	0.04	0.12	0.07	
IV	60.60	15.42	1.52	2.13	13.50	1.28	3.58	0.15	0.39	1.32	99.88
	1.49	1.14	0.29	0.29	2.93	0.59	0.49	0.11	0.08	0.57	
V	59.74	15.39	1.68	1.85	16.01	0.89	3.45	0.15	0.43	1.14	100.72
	0.68	0.78	0.60	0.20	1.32	0.55	0.50	0.04	0.11	0.23	
temple site of Bupchun in Buronmun, Wonju-si											
BC-6	58.14	16.72	0.73	2.42	17.29	0.61	2.98	0.00	0.09	1.19	100.17
BC-7	58.66	12.24	1.76	3.17	15.71	0.82	3.50	0.00	0.67	2.22	98.75
BC-8	58.84	14.54	1.50	3.13	13.20	0.43	4.59	0.08	0.61	2.23	99.15
BC-9	60.47	13.28	1.63	2.95	14.43	0.74	2.12	0.76	0.39	1.51	98.28
BC-10	58.90	11.34	1.75	3.23	18.48	1.01	1.29	0.81	0.46	1.97	99.24
	59.00	13.62	1.47	2.98	15.82	0.72	2.90	0.33	0.44	1.82	99.12
	0.87	2.10	0.43	0.33	2.12	0.22	1.27	0.42	0.23	0.46	

타늄산화물 함량이 0.2wt.% 이하로 유사한 범위 안에 위치하고 있는 반면 유천리 백자 도편은 약 0.4~0.8wt.%로 매우 높은 편이다.

높은 티타늄 산화물의 함량이 유천리 유약만의 특징인

지를 알아보기 위하여 본 연구에서 분석한 유천리 12호 청자 3편과 기존에 분석되어진 유천리 12호 도편 10편(이화여자대학교)과 유천리 7구역(28,29)호 청자 11편(Kim, 2006), 방산동, 서리의 데이터(Lee *et al.*, 2005)를 상호 비교하였

다(Figure 9, Table.7).

서리, 방산동 백자의 경우 티타늄 산화물의 값은 0.0~0.2wt.%로 청자의 약 0.6~1.2wt.% 과 비교하여 현저히 낮은 값을 나타낸다. 하지만 유천리 백자는 약 0.4~ 0.8wt.%로 약 0.2~1.0wt.%인 청자의 범위 안에 중첩되어 비슷한 값을 나타내었다.

일반적으로 철과 티타늄 산화물의 값은 비례해서 증가, 감소하는 경향을 보인다. 다른 고려 백자를 보더라도 청자에 비해 철산화물이 낮고, 그에 따라 티타늄 산화물의 값도 낮게 나타나지만 유천리 백자유약의 경우 다른 백자유약과 달리 함유된 철 산화물에 비해 높은 티타늄산화물을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

고려 백자의 조성과 변조양상을 알아보고자 고려중기 백자인 유천리 백자를 중심으로 서리, 중암리, 방산동, 법천사지 백자와 비교하여 그 특성을 확인하였다.

유천리 백자는 태토의 조성이 미량이지만 상감백자에서 다른 무문 및 음각백자에 비해 발색산화물인 철산화물이 높고 티타늄산화물이 낮게 나타나는 경향을 보인다. 그러나 이외의 조성은 모두 유사한 것으로 확인되어 제작 기법에 상관없이 동일한 원료배합을 갖는 것으로 생각된다. 유천리 고려 백자를 조선 관요백자의 태토의 조성과 비교한 결과 관요백자의 범위에서 크게 벗어나지 않으나 실리카가 높고 용제가 낮은 편에 속한다. 반면에 유약은 실리카 함량이 낮고 용제가 높은 편이며 이 또한 관요백자 범위 안에 속한다.

미세구조 관찰결과 태토는 용융되지 않은 광물이 많고 부정형의 미세기공 또한 많아 태토가 치밀하지 않은 부분이 많았다. 하지만 유약은 태토와 달리 유리질화가 잘 이루어져 덜 녹은 광물 없이 내부가 투명하고 깨끗한 편이다.

이를 서리, 중암리, 방산동, 법천사지 출토 고려백자와 원료의 화학적 특성을 비교해 보면 태토는 소비지 성격이 지닌 법천사지를 제외한 다른 가마터 출토 백자편은 각 가마터 별로 원료배합에 차이가 있음을 알 수 있다. 여주 중암리 백자가 실리카가 낮고 용제의 함량이 높으며 이와 반대로 유천리 백자는 실리카가 높고 용제가 적은 것으로 나타났다. 조성만을 고려한다면 중암리에 비하여 용제가 적은 유천리 백자는 자화되기 어려운 함량을 갖고 있음을 의미한다. 고려 백자 유약은 지역에 따라 함량 범위가 형성되지만 중첩되는 부분이 많아 태토에 비해 지역별 함량 특성의 차이가 두드러지지 않는다. 하지만 가마별 함량 분포를 살

펴보면 중암리 백자가 유약내 실리카가 가장 높았으며 유천리 백자가 가장 낮은 경향을 보인다. 이는 태토의 함량 분포와 반대되는 결과로 유천리 백자가 상대적으로 용제 함량이 높고 중암리가 낮은 편이라는 것을 의미한다. 이러한 반대 경향이 태토와 유약간의 열팽창계수의 차이를 만들어 상호간의 용착이 잘 이루어지지 않아 박락을 일으켰을 가능성이 있다. 또한 유천리 유약은 다른 백자들과 철산화물의 함량은 유사하나 티타늄산화물이 매우 높은 특징을 보인다. 같은 지역의 고려 백자와 고려청자의 철과 티타늄의 상관관계를 살펴본 결과 유천리를 제외한 다른 백자들은 청자에 비해 철과 티타늄 산화물의 함량이 낮은 반면 유천리 백자는 두 함량 모두 유사한 경향을 보인다. 따라서 다른 고려 백자들은 의도적으로 백자유와 청자유를 구분하여 제조 및 사용하였다는 것으로 보이나 유천리의 경우 함량만으로는 이러한 점을 확인하기 어려움이 있다. 하지만 함량이 유사하다고 하여 유천리 백자와 청자가 동일한 유약을 사용했다고 생각하지는 않는다. 백자유에 청자유와 유사한 높은 티타늄산화물 값이 나왔다고는 하나 철산화물의 양이 일반적인 백자유와 유사하며 오히려 유천리 청자유가 다른 고려청자에 비해 철 산화물 함량이 낮은 편이다.

고려백자의 분석 결과 초기에서 중기로 이어지는 시기의 흐름에 따른 원료의 함량 변화를 찾아 볼 수 없으며 후대로 갈수록 양질의 백자를 제작하려한 의도 또한 찾아볼 수 없다. 따라서 서리, 중암리, 방산동 가마터 등 고려 초기 백자와 고려 중기에 해당하는 유천리 백자의 함량 차이는 중부와 남부지방이라는 지역에 따른 제작 환경, 재료 수급의 차이 등을 반영한 결과로 판단된다. 향후 남부지역에 위치한 사당리에서 출토된 고려백자에 대한 연구가 이루어진다면 지역적 특성과 더불어 시기적인 변화도 심도 있게 연구되리라 생각한다.

REFERENCES

- Gyeonggi provincial Museum, 2008, Analytical Report of the Royal kiln complex at Gwangji in gyeonggi province, 75-76, 140, 209. (in Korean)
- Hwang, H.S., and Koh, K.S., 2009, The excavation report of Beopcheon temple site 1 in Wonju, Gangwon Research Institute of Cultural Heritage, 646-647. (in Korean)
- Hwang, H.S., 2011, Scientific Analysis of Yucheon-ri Ceramics, Report on the excavation of Yucheon-ri kiln site in Buan-gun, National museum of Korea, 220. (in Korean)

Kang, K.S., 1989, Korea history of ceramics, 239, Iijisa. (in Korean)

Kiln site of Yongin Seo-ri, Siheung Bangsan-don and Yeosu Jungam-ri, The Korean Journal for the History of Science, 71-73, 81. (in Korean with English abstract)

Kim, J.A., 2006, Scientific Analysis Study on koryo Celadon in the 11~12C, 34. (in Korean with English abstract)

Lee, B.H., 2005, Create your own glaze 2, yekyoung, 130-227. (in Korean)

Lee, Y.E., Kim, K.H., and Koh, K.S., 2005, Scientific Study of Early Goryeo Whiteware: National museum of Korea., 2011, Report on the excavation of Yucheon-ri kiln site in Buan-gun, 27, 237. (in Korean)