장흥 풍길리 청자요지 출토 도자기들의 소성특성 및 재료학적 상관성 비교 연구

Scientific Comparison Study on Characteristics of Firing and Making Materials for Sherds Excavated from Celadon Kiln Site of Punggil-ri, Jangheung

한민수^{1,*}, 이장준²

¹한국전통문화대학교 문화유산전문대학원 문화재수리기술학과, ²하이문화재케어

Min Su Han^{1,*}, Jang Jon Lee²

¹Dept. of Heritage Conservation and Restoration, Graduate School of Cultural Heritage, Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo 33115, Korea

²High Heritage Care, Daejeon 34013, Korea

Received March 21, 2020
Revised March 31, 2020
Accepted April 3, 2020

*Corresponding author
E-mail: dormer@nuch.ac.kr
Phone: +82-41-830-7381

Journal of Conservation Science
2020;36(2):112-122
<https://doi.org/10.12654/JCS.2020.36.2.05>

pISSN: 1225-5459, eISSN: 2287-9781

© The Korean Society of
Conservation Science for Cultural
Heritage

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록 본 연구는 장흥 풍길리 출토 도자기들의 소성특성 등 제작기술과 재료학적 비교 분석을 통해 상관성을 밝혀내고자 하였다. 색차 분석결과 넓은 영역에서 분포하였으며, 유약층과 태토층의 단면 미세조직에서도 청자와 백자, 흑유자기, 도기편들이 서로 특징적인 차이를 보이지 않았다. 구성광물과 열분석을 통해 소성온도를 추정한 결과, 대부분 1100℃에서 소성된 도편과 일부는 1200℃ 이상의 고온 소성된 도편들도 있었다. 태토의 주요성분 함량에서도 청자와 백자의 명확한 구분이 어려웠으며, 통계분석에서도 유약은 도자기의 종류에 따라 3개의 그룹으로 분류할 수 있으나 태토는 청자와 백자, 흑유자가 유사한 1개의 그룹으로 분류된다. 이는 원재료의 차이라기 보다는 수비와 같은 정선 과정에서 일부 성분이 제거되거나 첨가되었을 가능성이 높다. 따라서 다양한 도자기를 제작하고자 하는 기술적인 시도가 있었고, 도자기의 제작 기술과 재료가 안정화되지 않은 초기 단계였음을 과학적 분석을 통해 알 수 있었다.

중심어 풍길리, 청자, 백자, 소성온도, 상관성

ABSTRACT The purpose of this study was to find out the correlation through comparative analysis of used materials and manufacturing techniques such as firing characteristics for sherds excavated from celadon kiln site in Punggil-ri, Jangheung. The color difference of the sherds was very wide, and even in the microstructure of the cross section of the glaze layer and the body layer, the celadons, whitewares, blackware, and stonewares could not be characterized because they did not show distinct differences from each other. As a result of estimating the firing temperature through the analysis of constituent minerals and thermal analysis, most of them were estimated to have been fired at 1000℃, but some were fired at high temperatures above 1200℃. It was difficult to clearly distinguish between celadon and whiteware even in the major compositional content of bodies. In the statistical analysis, glaze could be classified three group according to the type of sherds, but the bodies of celadons, whitewares, and blackware classified into one similar group. It is considered that it is not more likely differences in raw materials but some ingredients were removed or added during the purification process. Conclusively, in this kiln site was found through scientific analysis that there were technical attempts to produce various ceramics, and that the manufacturing techniques and materials of ceramics were in an early stage that was not stabilized.

Key Words Punggil-ri, Celadon, Whiteware, Firing temperature, Correlation

1. 서론

점토를 이용한 용기의 제작은 소성기술의 발달과 더불어 급격하게 발전하였으며, 고고유적에서 발굴되는 많은 유물 중에서 도자기는 가장 많은 부분을 차지한다.

한반도에서 도자기의 생산은 도기를 걸쳐 통일신라말 기에는 자기가 출현하였고, 이후로 고려시대로 넘어오면서 1200~1400℃ 정도의 매우 높은 온도에서 소성하여 태토의 유리질화가 촉진된 고강도의 청자가 제작·번성하였다(Kang, 1989). 또한 청자의 출현 이후에 나타난 백자는 보통 15세기에는 유백색 계통이며, 16세기가 되면 설백색, 17세기에는 회백색, 18~19세기에는 푸른기가 약간 도는 청백색으로 볼 수 있다(Seo, 2011). 흑유자기는 표면의 유약층 내 발색 물질이 흑색으로 발현한 것을 지칭하며, 중국 뿐만 아니라 일본에서도 만들어져 사용되어 왔다. 우리나라에서는 초기에 전라도 일대의 가마에서 초기 청자와 함께 생산되었고, 이후 조선시대에는 분청사기나 백자 등 다른 도자기와 함께 생산되었다(Kim, 2013).

장흥 풍길리 가마터는 도기에서 자기생산으로의 전환과 더불어 청자생산을 본격적으로 시작하는 시기에 있으며, 지표조사와 시굴조사를 통해 초기 청자가 다수 발굴되었고, 소량의 백자와 흑유, 도기 등 다양한 종류의 도자가 확인되었다(Naju National Research Institute of Cultural Heritage, 2016). 본 유적에서 출토된 도자기 유물에서도 알 수 있듯이 주변 장흥지역은 고려 말에서 조선 초에 해안지역의 도요지들이 산악지역으로 이동하면서 나타난 16C 중반 이후의 백자 도요지가 분포하고 있다(Choi, 2012). 이러한 특성을 가진 전라도 지역의 도요지 출토 도자기에 대한 과학적 분석 연구는 담양 용연리 백자 가마터에서 출토된 백자와 흑유자기에 대한 분석(Choi and Han, 2019)과 진안 봉곡 도요지 출토 흑유자기의 재료학적 특성 분석(Park and Chung, 2016)이 있으며, 타지역의 경우에는 경기도 포천시 길명리 출토 흑유자기와 백자에 대한 특성 분석(Koh and Kim, 2008) 등이 있다. 하지만 실제 장흥 지역 주변에서 출토된 초기 도자기에 대한 자연과학적 연구는 부족한 실정이다.

본 연구는 이와 같은 다양한 도편이 발굴된 풍길리 가마터를 대상으로 물리화학적 분석 연구를 실시하여 제작에 사용된 재료의 특성과 상관성, 소성온도를 추정하고, 제작 기술적 측면도 비교하고자 하였다. 향후 이러한 연구결과는 고려시대 대표적인 강진 일대 청자요지와와의 비교연구 뿐만아니라 초기 흑유자기 그리고, 용문리와 월송리, 우산리 등과 같은 백자 도요지와와의 상관관계를 파악하는데 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구대상 및 방법

2.1. 연구대상

전라남도 장흥군 풍길리 산130번지에 위치한 청자요지는 국립나주문화재연구소에서 2014년 기초학술조사를 실시하였다. 이곳에서 출토된 도자기 11점(청자와 백자, 흑유자기)과 이들과 재료적인 유사성을 비교하기 위하여 도기편 2점, 갑발 받침 1점, 가마 벽체편 1점을 추가하여 총 15점을 대상으로 하였으며, 시료의 세부사항은 Table 1과 Figure 1에 제시하였다.

2.2. 연구방법

색차는 유약층과 태토면에 대해 각각 3회 반복 측정하였으며, 적분구 방식의 색도색차계(SP62, X-Rite, USA)를 이용하였다. 분석 시간은 2초 이상, 기구부 측정 면적은 8 mm, Light Source는 Gas-filled tungsten lamp, Detector(Receiver)는 Blue-enhanced silicon photodiodes이다. 비중은 자기의 재질적 특성에 따른 물리적 성질을 비교하기 위해 KS L 4001에 준하여 측정하였으며, 정밀전자저울(Weighing machine)(202A, Precisa, CHE)과 비중측정용 키트(Density kit)를 이용해 실시하였다. 표면의 유약층을 제거하고 100±5℃에서 2일간 완전 건조시킨 무게(W_1)와 증류수 속에서 2일간 침적시킨 후 표면의 물기를 닦아낸 무게(W_2), 수중 무게(W_3)를 각각 측정한 다음 아래와 같은 식으로 비중(겉보기, 부피)과 흡수율, 겉기공률을 구하였다. 그러나 시료가 너무 작아 색차와 비중 측정이 불가능한 흑유자기와 백자편, 벽체편 등은 제외하였다. 단면의 조직 관찰은 도편을 에폭시 수지에 고착시켜 연마기(Rotopol-11, Struers, DNK)와 연마지, 연마액을 사용하여 경면과 같이 가공한 후 광학현미경(Optical microscope)(Axiotech 100HD, Zeiss, DEU)과 주사전자현미경(Scanning electron microscope)(JSM-IT300LV, JEOL, JPN)을 이용하여 내부에 존재하는 광물의 상태 등 미세조직 특성을 관찰하였다. 또한 태토와 유약층의 성분분석은 주사전자현미경에 부착된 에너지분산형분광기(Energy dispersive spectrometer)(X-MAX 7, Oxford, GBR)를 이용하였으며, 분석조건은 15 kV, 68 μ A, spot size 60으로 총 6곳을 면분석하여 평균 값을 사용하였으며, 각 원소에 대한 함량을 산화물 형태로 환산하였다. 또한 이들 성분함량을 이용하여 태토와 유약층에 대한 통계분석을 실시하였으며, 주성분분석(PCA)을 실시 후, 선형판별분석(SLDA)으로 서로 다른 종류의 도자기들을 서로 비교하였고, 10개 산화물

Table 1. Sample list excavated from the site of Punggil-ri

Sample No.	Quantity					Wall fragment of kiln
	Celadon	Blackware	Whiteware	Stoneware	Gabbal	
	14JP-1 ~ 14JP-8	14JP-9	14JP-10, 14JP-11	14JP-12_Hard, 14JP-12_Soft	14JP-13	14JP-14

Figure 1. Selected samples excavated from the site of Punggil-ri.

(SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , MnO , MgO , P_2O_5)의 성분조성을 변수로 사용하였다. 태토의 주요 구성 광물과 이를 이용한 소성온도 추정은 X-선 회절 분석기(X-ray diffraction spectrometer, XRD)(EMPYREAN, PANalytical, NLD)을 이용하여 확인하였으며, 측정조건은 고분해능 Pixel 3D(256CH) Detector를 사용하여 45 kV, 40 mA, $6^\circ \sim 70^\circ$, $0.02^\circ/150 \text{ sec}$ 의 조건으로 분말화한 시료를 Spinner로 분석하였다. 분석 후 X'Pert HighScore Plus 소프트웨어를 이용하여 광물을 확인하였다. 열분석은 소성온도와 태토 원료의 물리·화학적 변화를 간접적으로 추정하기 위하여 유약층을 제거한 태토를 분말화한 후 약 20 mg을 계량하여 온도변화에 따른 열량변화(Differential thermal)와 열중량변화(Thermogravimetry)를 측정하였다. 사용된 분석기기는 동시열분석기(Simultaneous thermal analyzer)(SDT 2960, TA Instrument, GBR)이며, 측정조건은 N_2 gas 분위기에서 $0^\circ\text{C} \sim 1400^\circ\text{C}$ 까지 $20^\circ\text{C}/\text{min}$ 으로 승온시켰다.

3. 분석결과

3.1. 색 차

측정된 값은 한국산업표준(KS)에서 색을 표시하는 방법 중 KS A 0067에 해당하는 a^* (초록 - 빨강) b^* (노랑 - 파랑), L^* (명도)로 표시하는 CIE LAB 색공간을 이용해 도시하였다. 청자를 비롯하여 자기는 사용원료에 따라 색상이 달라지며, 같은 원료로 만들어진 동종의 도자기라 할지라도 소성온도와 환경이 색상변화에 영향을 준다. 이는 소성 과정에서의 환경 차이가 다양한 반응을 유도하고, 태토를 구성하고 있는 화학 성분의 차이와 소성 온도에 따라 광물 결정의 차이가 나타남으로 곧 외관을 통한 자기 분류의 핵심이 된다(Piero and Patrizia, 2004).

풍길리 출토 청자와 도기, 갑발에 대한 유약층과 태토층의 색도를 Figure 2와 Figure 3에 도시하였다. 먼저 유약층에 대한 색도측정 결과, 명도(L^*)가 대부분의 청자편에서 도기나 갑발에 비해 높은 경향성을 보인다. 다만, 육안관찰에서 태토의 색상이 황갈색의 초벌편인 14JP-4변

Figure 2. Color coordinates of glaze composition celadons, stonewares and Gabbal.

도편과 황색인 14JP-6번 도편은 명도가 다른 청자편에 비해 높게 나타났다. 적색도(a값)와 황색도(b값)가 갑발받침(14JP-13)을 제외하고 정(正)의 상관관계를 나타내고 있다. 특히 도기편(14JP-12_Hard)은 적색도와 황색도가 가장 낮다. 태토층의 색도 또한 유약층에서와 마찬가지로 명도는 대부분의 청자편에서 높은 경향성을 보인다. 반면, 14JP-4번 도편과 14JP-6번 도편의 명도가 다른 청자편에 비해 매우 낮은 값을 나타냈다. 적색도와 황색도는 모든 도편에서 정(正)의 상관관계를 가지고 있으며, 14JP-3번과 14JP-7번 도편이 가장 낮은 값을 보이고, 14JP-4번 도편이 가장 높은 값을 나타냈다. 이러한 일정하지 않은 색차 변화 특성은 초기청자 연구결과들에 비추어볼 때, 일반적인 특징이다.

3.2. 비중, 흡수율 및 겔보기기공률

각 도편의 비중과 흡수율, 겔보기기공률을 측정 값을 Figure 4에 도시하여 비교하였다.

겔보기 비중과 부피비중은 대부분의 도편이 거의 유사한 것을 알 수 있으며, 백자편(14JP-11번)은 상대적으로 낮은 값을 가진다. 흡수율과 겔보기 기공률은 매우 다양한 값을 가지며, 이러한 현상은 같은 청자편에서도 나타난다. 특히, 비중은 거의 유사하나 흡수율과 기공률이 4배 이상 차이가 나는 14JP-4번과 같은 도편이 있으며, 흡수율이 17.3%, 기공률이 31.0%로 거의 도기편(14JP-12_Soft)이나 갑발 받침과 유사한 값을 가진다. 또한 청자편 중에서도 14JP-6번은 흡수율과 기공률이 다른 청자편(14JP-4번 제외)에 비해 상당히 높으며, 이는 구연부편으로 유약층이 거의 없으며, 태토가 황갈색으로 초벌 소성편일 가능성이 높아 이러한 특성이 나타나는 것으로 판단된다. 또한 갑발을 제외하고 백자의 흡수율과 겔보기 기공률은 청자에 비해 상대적으로 낮는데 이는 태토의 재료와 소성 온도에 차이가 있어 유리질화 정도인 조직특성이 달라져

Figure 3. Color coordinates of body composition celadons, stonewares and Gabbal.

Figure 4. Graph of apparent specific, bulk specific, absorption rate and apparent porosity for sherds.

나타나는 현상으로 추정된다. 따라서 도편의 종류에 따른 특징과 초기청자의 제작기술, 소성 환경적인 요인이 매우 다양했음을 알 수 있다.

3.3. 단면조직

단면관찰을 통해 기포의 양과 모양, 형태 등 도편의 조직적 특성을 비교하였다. 또한 원로 광물과 2차적으로 생성된 광물의 존재 유무와 분포상태, 종류를 판단하기 위하여 주사전자현미경을 사용하여 고배율에서 관찰하였다(Figure 5, 6).

청자 도편의 미세조직 특성을 살펴보면, 유약층에는 기포가 존재하지 않으며, 층위가 두껍고 유리질화가 잘 진행된 도편(14JP-1, 14JP-2, 14JP-6, 14JP-7, 14JP-8)과 크고 작은 기포가 다량 존재하면서 유리질화가 잘 진행되지 않고, 층위가 얇은 도편(14JP-3, 14JP-5)으로 구분된다. 또한 14JP-4번과 같이 유약층이 거의 형성되지 않은 도편도 있다. 백자편은 유약층에 빙렬과 기포가 존재하며, 상태는 청자 도편의 유약층과 유사한 형태를 보인다. 흑유자 기편은 유약층에 기포가 거의 없으며, 유리질화가 잘 진행되어 있다. 또한 흑색의 발색에 영향을 미치는 것으로

Figure 5. Microstructure images of body and glaze for the sherds observed by optical microscope.

Figure 6. Microstructure images of body and glaze for sherds observed by scanning electron microscope(SEM).

추정되는 콜로이드상의 물질이 층위를 형성하며 뿌옇게 존재하며, 색상은 회황색이 점진적인 형태로 나타난다. 그러나 전자현미경 관찰에서 이 층위가 구분되어 존재하지는 않는다. 도기편은 모두 유약층이 존재하지 않으며, 태토의 유리질화도 거의 진행되지 않는 상태이다. 또한 14JP-12_Hard번 도편은 14JP-12_Soft번 도편에 비해 바깥 부분이 일부 유리질화되어 있다. 감발받침은 유약층이 존재하지 않으나 바깥쪽은 자연유를 일부 관찰할 수 있다.

태토의 조직관찰 결과, 청자와 백자, 흑유자기에서는 종류에 관계없이 유약층이 잘 형성되어 있는 도편들에서 태토의 유리질화도 대부분 잘 형성된 것을 볼 수 있다. 특히 이들 도편은 기공의 모양과 형태, 크기 등이 유리질화가 잘 진행되지 않은 도편들에 비해 상대적으로 일정한 미세조직을 보인다. 또한 일부 큰 석영입자들이 존재하기는 하나 기공의 모양이 불규칙하고 매우 큰 기공이 존재하는 도기편들에 비해 정제된 원료를 사용하였다는 것을 알 수 있다. 이로 인해 태토의 색상이 일정하게 유지되며, 기공들의 결합이 상대적으로 적어진 것으로 판단된다. 하지만, 청자에는 티탄철석(ilmenite; FeTiO_3)이나 철산화물로 추정되는 검은색의 입자가 많이 존재하고 있으며, 백자에는 태토 내 이러한 물질이 거의 없어 사용재료에서 차이가 있음을 알 수 있다. 특히 14JP-4번은 태토의 유리질화가 많이 진행되지 않는 특징을 보여 다른 청자편들과 차이가 있다. 그러나 도기편들과 비교했을 때 태토의 정선도나 백색도는 상대적으로 높다. 감발받침의 태토 심부는 일부만이 유리질화가 진행되었으나, 바깥쪽은 거의 도자기와 같은 상태의 유리질화가 진행된 것을 관찰할 수 있다.

3.4. 구성광물

X-선회절분석법을 이용하여 광물을 동정하고, 변조온도를 추정하는 기법은 고대 토기에 대한 현미경 추정기법 이후 1980년대 부터 활발하게 이루어졌다(Choi *et al.*, 1996). 이러한 방법은 점토로 제작되어 소성된 기물들을 연구하는데 매우 효과적이라는 것이 일반적인 견해이며, 풍길리 출토 도편들의 분석결과를 Figure 7~11에 제시하였다.

구성광물을 확인한 결과, 청자편들은 석영(Quartz)과 물라이트(Mullite)가 모두 확인되었으나 14JP-2번과 14JP-7번, 14JP-8번 도편에서는 크리스토파라이트(Cristobalite)가 존재했다. 즉, 청자는 기존 연구들을 바탕으로 판단해볼 때, 모두 1100℃ 이상에서 소성되었고, 3점의 청자는 1200℃ 이상의 고온에서 소성되었을 것으로 추정된다. 이러한 고온 소성은 전자현미경 상에서도 태토나 유약의 자화도가 높은 것과 상관성이 있는 것으로 판단된다. 반면,

Figure 7. X-ray diffraction patterns of celadons and Gabbal(X axis; 2θ, Y axis; intensity).

Figure 8. X-ray diffraction pattern of blackware(X axis; 2θ, Y axis; intensity).

Figure 9. X-ray diffraction patterns of whitewares(X axis; 2θ, Y axis; intensity).

Figure 10. X-ray diffraction patterns of stonewares(X axis; 2θ, Y axis; intensity).

Figure 11. X-ray diffraction pattern of wall fragment in kiln(X axis; 2θ, Y axis; intensity).

흑유자기는 석영과 물라이트만이 확인되었고, 점토광물들은 모두 소멸되어 1100℃이상에서 소성되었을 것으로 추정된다. 백자편들은 흑유자기와 같은 광물이 확인되어 유사한 온도에서 소성되었음을 알 수 있다. 도자기의 소성에 이용된 것으로 알려진 감발받침은 청자편들의 피크 패턴과 비교했을 때, 비결정질의 피크가 상대적으로 많이 나타내고 있으며, 크리스토파라이트가 많이 생성되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 감발의 특성 상 고온의 환경을 겪었을 가능성과 재사용 등에 의해 유리질화가 보다 많이 진행되어 크리스토파라이트의 생성에 영향을 주었을 것으로 추정된다.

도기편들 중에서 태토가 경질로 보이는 14JP-12_Hard는 흑유자거나 청자편과 마찬가지로 석영과 물라이트가 모두 확인되어 다른 청자와 마찬가지로 고온 소성되었을 것으로 판단된다. 그러나 연질로 보이는 14JP-12_Soft는 석영과 점토광물인 미사장석(Microcline)이 동정되어 상대적으로 매우 낮은 온도에서 소성되었을 가능성이 있다. 또한 가마의 벽체편에서는 석영과 점토광물인 미사장석만이 확인되어 도기편중에서 14JP-12_Soft와 같은 분석결과를 보여 원로나 소성온도에 대한 연관성을 추정할 수 있다.

3.5. 열분석

다양한 광물들로 구성된 도자기는 온도와 압력 조건이 변화함에 따라 각 광물이 지닌 물리화학적 특성에 따라 단일 혹은 복합적으로 열적 거동을 보이게 되며, 이를 통해 소성특성을 추정할 수 있다.

Figure 12는 출토 도편과 감발받침, 벽체편들에 대한 열분석 그래프이다. 700℃까지는 열적변화 패턴의 거의 유사하다. 200℃이하에서 나타나는 흡열피크는 시료의 표면에 흡착된 물리적 흡착수(physical attach water)의 수분 증발에 의한 것이며, 700~900℃에 존재하여 흡열피크는 규석(SiO_2)의 일부와 다른 주요성분이 반응하여 녹기 시작하며, 일부는 분해 등에 의한 발열피크도 관찰되고 있다. 특히 1100~1250℃에서 광범위하게 나타나는 흡열피크는 석영의 등의 용융으로 태토가 유리질화 되면서 나타나는 것이다. 즉, 대부분의 도편들이 이 온도 이하에서 소성되었을 것으로 판단된다. 특이하게 육안관찰에서 소성이 덜 된 것으로 판단되는 벽체편(14JP-14)은 다른 도편들에 비해 흡열피크 영역이 큰 것을 알 수 있으며, 이는 상대적으로 낮은 온도에서 피열을 받았음을 알 수 있다. 그러나 감발은 고온에서의 열적 변화가 적어 높은 온도에서 피열되었을 것으로 추정된다.

Figure 12. Differential scanning calorimetry analysis graphs for body of sherds.

3.6. 주요성분 및 통계분석

3.6.1. 유약층 및 태토층의 성분특성

출토 도편과 감발받침, 도기의 성분함량을 Table 2에 제시하였다. 유약층의 주요 성분함량을 살펴보면, 청자와 흑유자기는 SiO_2 가 47~52 wt%, Al_2O_3 는 22~27 wt%, Fe_2O_3 가 0.6~2 wt%, K_2O 가 3~5 wt%대의 분포범위를 가지고 있으나, 백자편은 CaO 와 Al_2O_3 가 청자편에 비해서 1 wt%정도 높은 특징을 보였다. 그러나 일부 14JP-4번과 같이 Al_2O_3 의 함량이 40 wt%정도로 높고 CaO 가 0.34 wt%로 매우 낮은 청자편도 있다. 특이한 것은 일반적으로 흑

유자기를 만들 때 사용하는 것으로 알려진 철(Fe) 성분이 청자나 백자의 유약층에 비해 높게 나타나지 않았다는 것이다. 즉, 흑유 발색물질로 철분이 사용되지 않았을 가능성도 있다고 판단된다. 또한 일부 청자편(14JP-4)과 과백자편(14JP-5, 14JP-6)들에서 CaO나 MnO, MgO의 성분 함량이 모두 유사한 패턴을 나타낸다. 이는 도자기의 제조에 사용된 원료의 유사성과도 관련이 있을 것으로 추정된다.

태토의 주요 성분함량은 청자편과 흑유자기에서 유사하지만, 백자 태토에서는 Al_2O_3 의 함량이 흑유자기나 청자에 비해서 높은 특징을 보인다. 그러나 14JP-4편은 특이하게 백자편보다 Al_2O_3 의 함량이 더 높게 나타났다. 도기나 갑발받침은 청자나 흑유자기, 백자편에 비해 SiO_2 의 함량이 낮고 Al_2O_3 의 함량이 높으며, 특히 Fe_2O_3 의 함량이

4~6 wt%로 매우 높다. 또한 K_2O 나, MnO, P_2O_5 등 소량으로 들어있는 성분은 유사하고, 청자나 백자를 만들기 위해 철분을 제거하는 등의 별도의 공정을 시행하였다고 가정한다면 재료적인 상관성을 논할 수 있을 것이다.

3.6.2. 통계분석

주성분분석법은 무수히 많은 변수를 가진 데이터를 변수 간 상호관련성을 고려하여 주성분으로 압축하는 분석법이다. 즉, 다차원 데이터의 정보 손실을 최소화하여 저차원 공간에 표현하는 것을 의미한다(Son, 2018). 판별분석법은 기존의 자료를 이용하여 개체들을 몇 개의 집단으로 분류하고자 하는 경우에 판별분석(discriminant analysis)을 사용하며, 이 분석은 등간척도나 비율척도로 이루어진 독립변수를 이용하여 여러 개의 집단으로 분류(classification)

Table 2. Major composition of glaze and body for sherds

Sample No.		Concentration (wt%)									
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na ₂ O	K_2O	TiO_2	MnO	P_2O_5
14JP-1	glaze	51.17	24.23	0.92	2.45	14.98	0.48	3.42	0.29	0.50	1.57
	body	62.23	31.00	1.39	0.47	0.10	0.35	3.66	0.72	0.02	0.06
14JP-2	glaze	52.47	23.90	0.98	1.91	15.54	0.41	2.78	0.28	0.38	1.34
	body	63.34	30.63	1.29	0.47	0.19	0.18	3.34	0.50	0.02	0.04
14JP-3	glaze	49.85	25.50	1.45	1.55	14.90	0.71	4.11	0.32	0.21	1.39
	body	60.29	31.84	1.52	0.47	0.10	0.41	4.85	0.41	0.07	0.04
14JP-4	glaze	51.33	40.33	1.53	0.42	0.34	0.31	5.03	0.66	0.03	0.02
	body	51.12	38.15	1.49	0.69	2.83	0.31	4.62	0.57	0.11	0.12
14JP-5	glaze	50.60	23.16	1.18	2.26	17.03	0.55	3.08	0.19	0.48	1.45
	body	57.06	34.27	1.63	0.46	0.18	0.55	5.30	0.45	0.02	0.07
14JP-6	glaze	49.14	23.06	0.95	2.12	19.02	0.46	3.30	0.21	0.43	1.32
	body	59.32	33.21	1.19	0.45	0.10	0.47	4.83	0.35	0.03	0.03
14JP-7	glaze	49.42	22.97	0.78	2.33	18.79	0.37	3.04	0.22	0.52	1.56
	body	64.28	28.25	1.30	0.41	0.11	0.44	4.60	0.58	0.03	0.00
14JP-8	glaze	47.95	26.51	1.14	2.29	17.74	0.46	2.34	0.25	0.42	0.89
	body	66.84	26.27	1.13	0.46	0.11	0.40	4.12	0.62	0.04	0.00
14JP-9	glaze	48.97	27.06	0.65	2.23	16.17	0.49	3.03	0.32	0.44	0.63
	body	58.65	32.60	1.63	0.52	0.24	0.41	5.35	0.59	0.02	0.01
14JP-10	glaze	50.23	27.25	1.32	1.26	18.11	0.63	3.51	0.43	0.09	1.39
	body	56.14	36.09	1.51	0.48	0.24	0.35	4.38	0.78	0.03	0.01
14JP-11	glaze	47.37	24.44	0.97	2.26	18.11	0.81	4.24	0.38	0.44	0.98
	body	58.74	33.35	1.44	0.48	0.09	0.43	4.60	0.79	0.05	0.04
14JP-12_Hard	body	49.88	36.67	5.72	1.03	0.37	1.30	4.29	0.61	0.05	0.08
14JP-12_Soft	body	48.83	37.56	4.83	0.86	0.41	2.60	4.23	0.53	0.07	0.07
14JP-13	body	52.08	35.35	4.33	0.85	0.42	1.55	4.67	0.67	0.07	0.02

Figure 13. Canonical discriminant functions of glazes composition among 3 other species.

Figure 14. Canonical discriminant functions of bodies composition among 5 other species.

하는 방법이다(Kang and Kim, 1998).

유약과 태토의 주요 성분 함량을 이용하여 판별분석을 실시하고, 정준판별함수를 도출하여 그래프로 도시하였다. 유약의 성분은 Figure 13에서와 같이 흑유자기와 백자편들은 집단중심점의 거리가 상대적으로 가깝지만, 청자편들과는 명확히 구분됨을 알 수 있다. 이는 각각의 도자기 제작에 사용된 유약이 동일하지 않았음을 알 수 있다. 그러나 Figure 14에서와 같이 태토 성분은 청자와 흑유자기, 백자는 유사한 그룹으로 분류되는 반면, 도기나 갑발과는 서로 그룹이 분리된다. 이는 이들 도편들의 제작에 사용된 태토는 서로 차이가 있음을 알 수 있다. 물론 원재료를 정제하여 사용하는 과정을 걸쳤거나 풍화에 의한 영향일 가능성도 배제할 수 없다.

4. 고찰 및 결론

출토 도편들에 대한 분석결과를 바탕으로 제작기술적 특징과 재료적인 상관성을 고찰해 보았다. 먼저, 색도가 청자편들에서 넓은 영역으로 분포하고 있는데, 이는 일반적으로 12세기 전성기 비색청자에서 보여주는 회청색의 색도 영역과 차이가 있으며, 태토의 색상과 질이 다르기 때문으로 판단된다. 태토의 단면관찰에서도 회청색보다는 상대적으로 회색~회청색의 넓은 범위의 색상을 보이고 있다. 그러나 광물분석 결과, 일부 도편에서 크리스탈라이트와 같은 고온성 지시광물이 확인되지 않아 상대적으로 낮은 온도에서 소성된 도편도 있기 때문에 소성온도의 차이가 태토의 색상 발현에 많은 영향을 미쳤다는 것을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급한 사용 원료의 차이점으로 볼 수 있으나 오히려 수비에 의한 정선도와 관계가 더 클 것으로 추정된다. 즉, 소성온도와 태토 제작 재료의 차이가 복합적으로 작용하여 색상차를 가지게 된 것이며, 이는 강진 용운리 63호나 십이동파도 인양 해저 청자편들의 색차 측정결과(Han, 2006)들과 비교했을 때 일반적인 현상이다. 또한 도기편들을 청자편들과 비교했을 때, 태토의 정선도나 백색도가 일반적인 도기와 같지 않고 청자에 가깝고, 흑유자기편도 청자와 유사한 특징을 보인다. 백자도편은 색도 측정이 불가능하여 직접적인 비교는 어렵지만, 일반적인 백자의 태토보다는 미황색에 가까운 점이 특이하며, 광학현미경 관찰에서도 알 수 있듯이 청자편들에 비해 상대적으로 입자가 작고, 정선도가 높으며, 검은색 입자는 거의 존재하지 않아 백색도도 높다. 그러므로 이들 출토 도편들이 기물의 종류에 따라 명확히 다른 원료를 가지고 제작했을 가능성은 낮은 것으로 판단된다. 왜냐하면, 성분분석에서도 알 수 있듯이 백자의 유약층에서 CaO 와 Al_2O_3 가 청자편에 비해서 높았으나 일부 도편은 Al_2O_3 의 함량이 백자편에 비해 10 wt%정도 높고, CaO 는 1 wt% 이하로 매우 낮은 청자편도 있다. 또한 태토의 함량은 거의 유사하여 특정할 수 없다. 또한 태토의 성분함량은 일부 청자편과 도기편, 백자편에서 Al_2O_3 의 함량이 유사하거나 약간의 차이만이 있어 재료적인 면에서 완전히 분리된 원료와 제작방식을 사용했을 가능성은 낮고, 이는 태토의 미세조직 관찰한 결과에서도 유사한 경향성을 보인다. 통계적으로 살펴보면, 유약의 성분에서 청자편들과 흑유자기, 백자들의 집단중심점이 명확히 구분되어 각각의 도자기 제작에 사용된 유약이 서로 달랐음을 알 수 있으나 태토 성분은 청자와 흑유자기, 백자가 하나의 유사한 그룹으로 분류되고, 도기나 갑발과는 서로 그룹이 분리된다. 이는 이들 도편들의 제작에 사

용된 태토가 서로 차이가 있지만 원재료 자체가 달랐을 가능성은 낮고, 수비과정 등을 걸쳐 정제하여 사용하였을 가능성이 높다. 물론 통계적으로 보다 정확한 결과를 도출하기 위해서는 큰 숫자의 표본집단을 필요로 하며, 주변 요지에서 출토된 같은 종류의 청자, 흑유자기, 백자와의 비교가 추가적으로 필요하다.

제작기술적인 측면에서 청자나 백자, 흑유자기, 도기, 갑발받침 등은 유사한 점과 차이점을 보인다. 먼저, 이들 도편들의 태토 조직이 전자현미경에서 보는 바와 같이 조직의 치밀도나 입자의 유리질화도가 일정하지 않고, 비교적 소성온도가 낮았음을 알 수 있다. 이는 X-선회절분석 결과에서도 알 수 있으며, 대부분의 도편에서 공통적으로 물라이트가 검출되고 일부 도편에서 크리스토팔라이트가 확인된다. 물라이트는 약 1000℃에서 1차 물라이트(primary mullite)가 생성되기 시작하여 약 1250℃ 부근에서 2차 물라이트(secondary mullite)가 생성되면서 나타난다(Koh, 1992). 이러한 고온성 지시광물들의 존재 유무와 피크의 상대적 강도를 통해 소성특성을 추정할 수 있으며, 풍길리 청자와 백자편은 상대적으로 낮은 온도에서 소성되었다고 판단된다. 특징적으로 14JP-4번과 같이 태토의 유리질화도 많이 진행되지 못하고, 실제로 유약이 시유되지 않은 도편들은 고온에서 재벌소성되지 않은 도편일 가능성이 높다. 반면, 갑발받침은 내부의 일부만 유리질화가 진행되었고, 바깥쪽은 거의 도자기와 같은 상태의 유리질화가 진행된 것을 관찰할 수 있어 고온에서 장시간 노출된 것을 알 수 있다. 열분석을 통한 열적특성을 살펴보면, 대부분의 도편들에서 유사한 패턴을 보이고 있으며, 소성된 온도가 약 1100℃이하로 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 이는 재료적인 부분에서는 일부 차이를 보이지만 피열특성은 유사하며, 소성에 이용한 가마의 특성이 동일하거나 유사했을 가능성이 있다. 도자기 가마에서 소량만이 발견되는 흑유자기는 청자나 백자, 도기와 다른 특징을 보인다. 특히 유약층의 흑색은 내부에 미세결정이 존재하지 않고, 층위가 분리되지 않는 특징을 갖는다. 이는 유약층 내 철 함량과 관계가 있다. 일반적으로 흑유자기의 유약층 내 미세결정은 주사전자현미경에서 침상조직, 수지상조직, 철산화물의 응집형태로 확인할 수 있고, 이러한 것은 산화철과 착색제의 성분함유비율 등에 따라서 차이가 날 수 있다(Choi and Han, 2019). 이와 같은 특징들을 종합해 볼 때, 다양한 도자기를 제작하고자 하는 기술적인 시도가 있었음을 알 수 있다.

결론적으로 풍길리 청자요지에서 발굴된 도자기들은 사용 원료에서 일부 상관성이 있는 것으로 판단되며, 다만 태토의 정선도나 소성온도 등에 있어서 동종의 도자기

내에서도 다양한 형상의 도편이 존재함을 알 수 있다. 이는 결국 청자나 백자의 제작에 있어 그 기술과 재료가 안정화되지 않은 초기 단계의 요지임을 과학적인 분석 결과를 통해 알 수 있다.

사 사

이 논문은 2016년도 『長興 豊吉里 靑瓷窯址』에 수록된 저자의 「장흥 풍길리 청자요지 출토 도자기의 과학적 분석」 보고서를 바탕으로 추가 분석하여 심층 해석한 내용을 밝히며, 도편을 제공해 주신 국립나주문화재연구소에 감사드립니다.

REFERENCES

- Choi, J.W. and Han, M.S., 2019, Study of scientific comparison for the characteristics of black ware excavated from white porcelain kiln of Yongyeon-ri, Damyang and those of other regions. *Journal of Conservation Science*, 35(4), 331-343.
- Choi, M.R., Shin, S.J. and Lee, D.M., 1996, Archeology and natural science-earthenware edition, Seoul National University Press, Seoul, 14-20. (in Korean)
- Choi, Y.S., 2012, A study on the white porcelain in Jeonnam area: Focusing on Jangheung region. Master's thesis, Mokpo National University, Mokpo, 85-87. (in Korean with English abstract)
- Han, M.S., 2006, Scientific provenance study for Goryeo celadon excavated from seabed. Ph. D. thesis, Chung-Ang University, Seoul, 49-52. (in Korean with English abstract)
- Kang, B.S. and Kim, G.S., 1998, SPSSWIN for statistical analysis. Gyeonggi, 256. (in Korean)
- Kang, K.S., 1989, Korean ceramic history, Iljisa, Paju, 1-2. (in Korean)
- Kim, T.H., 2013, Production period of black-glazed porcelains in middle · latter period of Joseon dynasty. *Journal of The Hoseo Archaeological Society*, 29, 182-209. (in Korean with English abstract)
- Koh, K.S., 1992, A scientific and technological study of Korean traditional ceramics. *Journal of The Korean History of Science Society*, 14(1), 23-61. (in Korean with English abstract)
- Koh, M.J. and Kim, G.H., 2008, Characteristics analysis of on blackware and whiteware at excavated kiln in Gilmyeong-ri Pocheon-si Gyeonggi-do, Korea. *Journal of Conservation Science*, 22, 43-60. (in Korean with English abstract)

- Naju National Research Institute of Cultural Heritage, 2016, Excavation report on the celadon kiln site of Punggil-ri, Jangheung. 22-63. (in Korean with English abstract)
- Park, M.S. and Chung, K.Y., 2016, Analysis of material characteristics for blackwares at excavated from the Bonggok kiln site Jinan-gun. Journal of Conservation Science, 32(4), 549-560. (in Korean with English abstract)
- Piero, M. and Patizia, D., 2004, New developments in the study of ancient pottery by colour measurement. Journal Of Archaeological Science, 31(6), 741-751.
- Seo, H., 2011, A scientific study on white porcelain of Darjeon-ri. Master's thesis, Chung Ang University, Seoul, 1. (in Korean with English abstract)
- Son, M.K., 2018, Mathematics that supports data analysis. Wikibooks, Paju, 109-157. (in Korean)