

한국 자기 발생기의 청자와 백자에 대한 과학기술적 연구:

용인 서리, 시흥 방산동, 여주 중암리 요지를 중심으로*

이영은

경기도박물관

김규호

공주대학교

고경신

중앙대학교

A Scientific Study of Early Koryeo Celadon and Whiteware:
Kiln Sites of Yongin Seo-ri, Siheung Bangsan-dong and Yeoju
Jungam-ri

LEE Young Eun

Gyeonggi Provincial Museum

KIM Gyu Ho

Kongju National University

KOH Kyongshin

Chung-Ang University

Abstract

Celadon and whiteware shards excavated from three sites of the earliest origin, Yongin Seo-ri Jungdeok Village, Siheung Bangsan-dong, Yeoju Jungam-ri, are analyzed for their composition and microstructural characteristics. Several scientific and technological parameters were obtained about the ceramic wares produced during the founding stage of the porcelain industry. Except a slightly

* 이 글은 지난 2004년 한국과학사학회 가을학술대회에서 발표된 내용을 수정·보완한 것이다.

higher proportion of flux content, the chemical composition of body and glaze are similar to the representative composition of Korean ceramics in general, which are made chiefly with porcelain stone. These early wares appear so diverse in quality and their glaze color that it is often difficult to categorize them as celadon or whiteware. However, the composition difference was clear; although the main oxides were basically present in the same amount, the oxides of Fe_2O_3 and TiO_2 that are responsible for glaze color were present in much smaller amount in whiteware. Celadon and whiteware were most likely fired together in same kilns to the temperature of $1050\pm 50^\circ\text{C}$. While celadon sherds were vitrified either properly or slightly under-fired, many whiteware sherds were inadequately vitrified, some severely so. Therefore, ideal firing temperature may be considered as $1150\pm 50^\circ\text{C}$. The crystals of diamond and acicular shapes that are uniquely observed in many of the shards from all three kiln sites contain unusually high amount of P_2O_5 and MgO .

Key Words: Early Koryeo Ceramics, Koryeo Dynasty, Scientific Study, Chemical Composition, Microstructure

1. 들어가는 말

1980년대 중반 이후 전국적으로 이루어진 가마유구와 퇴적층에 대한 체계적인 발굴 조사는 가마규모와 축요(築窯)방식, 생산기종 등 한국에서 자기가 처음 만들어지기 시작하는 시기의 제작상황에 대한 다양하고 풍부한 정보를 제공하였다. 자기 발생 초기의 가마들은 축요방식에 따라 크게 한반도 중서부지역을 중심으로 한 전축요(塹築窯)와 남서부지역의 토축요(土築窯)로 구분되는 것으로 파악되었다. 선후(先後)관계가 명확한 층위구분에 따른 유물의 출토상황, 특히 출토유물 중 과반수이상을 차지하는 완(碗)의 형식변화를 비교하는 도자사적(陶磁史的) 접근 방법을 통하여 한국에서의 자기발생시기와 관련된 여러 다양한 견해가 제시되어 왔다.¹⁾ 최근에는 당시

1) 이러한 논의의 초점은 완(碗)의 형식으로, 접지면의 넓이와 접지면과 굽폭의 비율에 따라 ‘선(先)해무리굽완’, ‘해무리굽완’, ‘한국식해무리굽완’, ‘변형해무리굽완’으로 분류하고, 이것의 선후관계와 그 당시 생산된 중국완의 형식과 비교하여 절대적 편년을 시도하였다. 金載悅, “高麗白磁의 發生과 編年”, 『考古美術』 177(韓國美術史學會, 1988), 3-41쪽; 정양모, “羅末・麗初 靑磁 및 白磁研究의 諸問題”, 『韓國 磁器 發生에 관한 諸問題』 제1회 東垣기념 학술대회 발표요지 (韓國考古美術研究所, 1990), 5-19쪽; 최건, “고려청자 언제 어떻게 만들어졌나”, 『韓國美術史論壇』 창간호 (한국미술연구소, 1995), 284-293쪽; 李喜寬, “韓國 初期靑磁에 있어서 해무리

국내외 정치·경제적인 상황과 도자생산체제에 대한 종합적인 고찰, 가마운영주체와 소비유적에 대한 논의 등 보다 다각적인 연구가 시도되고 있다.²⁾

본 연구는 과학기술적인 방법을 통하여 한국에서 청자와 백자가 발생하는 초기 단계의 원료 특성과 제작기술을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 중서부지역의 전축요 중에서 고고학적 발굴이 이루어진 대표적인 유적으로 꼽히는 용인시 서리 중덕마을, 시흥시 방산동, 여주군 중암리 가마터 등의 세 지역에서 출토된 청자와 백자를 연구 대상으로 선정하였다. 분석도편은 완을 위주로 층위와 굵의 양식변화를 기준으로 하여 선택하였고, 태토와 유약 성분을 분석하고 미세구조를 관찰하는 한편, 번조온도를 추정하기 위한 재번조실험 등의 다각적인 분석방법을 시도하였다. 분석 결과에 대한 종합적인 검토를 통하여 한 가마터의 시기에 따른 청자와 백자의 원료적인 특성과 번조공정의 기술적 변화를 고찰함과 동시에 세 지역의 특징을 상호 비교함으로써 초기 고려 청자와 백자의 전반적인 제작 기술수준과 기술 교류의 연관성을 살필 수 있는 기초 자료를 제시하고자 하였다.³⁾

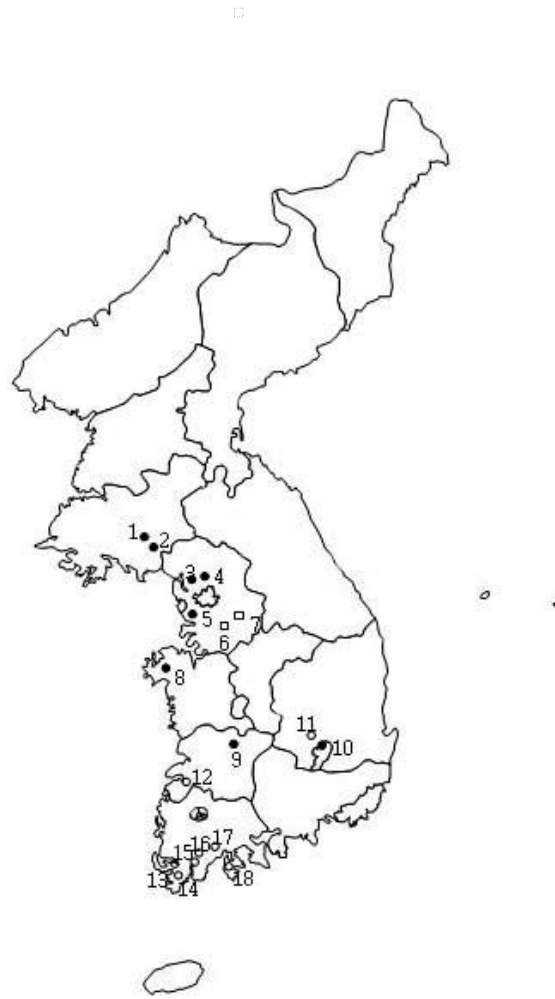
2. 유적과 출토품의 특징

자기 발생 초기에 해당하는 요지를 <그림 1>에 나타내었으며, 본 연구에서 다루는 세 요지에 대한 가마의 특징과 생산도편들의 특징에 대해서는 <표 1>에 정리하였다.

굽碗 問題의 再檢討: 韓國 靑磁 制作의 開始時期 問題의 解決을 위하여”, 『美術史學研究』 237(韓國美術史學會, 2003), 5-48쪽.

2) 용인시 용인문화원 용인시사편찬위원회, 『용인 서리 고려백자요지의 재조명』 (2001); 이종민, 『한국의 초기청자연구』 (홍익대학교 대학원 박사학위청구논문, 2002).

3) 본 연구의 대상이된 세 가마터 각각에 대한 자세한 분석결과는 이미 발표된 바 있다. C. K. Koh Choo, Y. E. Lee, I. W. Shim, W. K. Choo, G. H. Kim, W. Y. Huh and S. C. Chun, “Compositional and Microstructural Study of Koryŏ Celadon and Whiteware Excavated from Sŏri Kiln in Kyŏnggi Province,” *Archaeometry* 46(2004), pp. 247-265; 김규호 · 이영은 · 이승은 · 이연숙 · 고경신, “시흥 방산동 가마터에서 출토된 청자와 백자에 대한 과학기술적 연구”, 『海剛陶磁美術館·京畿道始興市, 2001), 345-380쪽; 이영은 · 김규호 · 고경신, “여주 중암리 고려백자요지 출토도편에 대한 과학기술적 연구”, 『여주 중암리 고려백자요지 발굴보고서』 (경기도박물관·여주군, 2004), 397-435쪽.



<그림 1> 초기 청자와 백자 가마터의 분포지도.

- 전축요 1. 황해도 봉천군 봉암리 2. 황해도 봉천군 원산리 3. 경기도 고양시 원흥동
4. 경기도 양주군 부곡리 5. 경기도 시흥시 방산동 8. 충남 서산시 오사리
9. 전북 진안군 도통리 10. 대구시 동구 진인동
- 전축요→토축요 6. 경기도 용인시 서리 7. 경기도 여주군 중암리
- 토축요 11. 경북 칠곡군 창평리 12. 전북 고창군 용계리 13. 전남 해남군 신덕리
14. 전남 해남군 진산리 15. 전남 강진군 용운리 16. 전남 강진군 삼흥리
17. 전남 장흥군 풍길리 18. 전남 고흥군 운대리

(이 논문에서 검토한 도요지는 진하게 표시한 5번, 6번, 그리고 7번이다.)

이종민, “發掘窯蹟을 통해 본 塼築窯의 運營時期 考察”, 『용인서리 고려백자요지의 재조명』 (용

인시 용인문화원 용인시사편찬위원회, 2001), 55쪽; 장기훈, “初期靑磁 가마의 調査現況과 關聯年表”, 『벽돌가마와 초기청자』 (해강도자미술관, 2000), 29-30쪽 참고

용인서리 가마터: 경기도 용인시 이동면 서리 중덕마을에 위치한 백자요지는 1980년대 중반부터 3차에 걸쳐 호암미술관에 의하여 발굴되었다. 그 과정에서 4개의 자연층위가 확인되었고, 벽돌로 만든 전축요(塼築窯)의 존재가 최초로 밝혀지는 한편, 그 위에 진흙으로 만든 토축요(土築窯)가 운영되었던 사실 등이 밝혀지면서 한국 자기발생과 초기제작상황에 대한 획기적인 단서를 제공해주고 있으며, 이후 발굴된 다른 가마터의 상대적인 시기구분에 대한 기준이 되고 있다. 특히 이 시기의 문헌자료나 절대편년 자료가 거의 없는 상황에서 ‘해무리굽완’은 한국 청자 발생에 영향을 준 중국 월주요(越州窯) 자기와의 비교로 시기를 정하는데 있어서 기준이 되는 유물로 해무리굽완의 제작시기와 변화과정에 대한 논의는 지금까지 계속되고 있다.⁴⁾

보고서에 따르면 9세기 전반의 늦은 시기부터 11세기 초까지 계속 활동했던 요지이다. 최하층에 해당하는 I기층은 전축요에서 생산된 선(先)해무리굽완의 청자와 백자가 동반 출토되나 청자가 우세하며 잡물이 없는 치밀질의 태토이다. II기층은 백자가 압도적으로 많아 이 시기부터는 백자전용가마로 바뀌었던 것으로 추정된다. 선해무리굽과 해무리굽이 동반출토되며, 기종의 형태와 크기가 다양해진다. III기층에서는 거의 백자가 출토된다. 기형은 직선화 경향이 뚜렷해지고, 안바닥이 오목해져 내저원각이 있는 해무리굽완, 소위 한국식 해무리굽완 양식으로 바뀌며, 전체적인 크기가 작아진다. 최상층인 IV기층에서는 백자만이 출토되며, 전체적으로 세부 다듬새가 거칠다. 기형과 굽형태의 여운만이 남아있는 변형 해무리굽완으로 바뀐다.⁵⁾

분석도편은 층위와 굽모양을 기준으로 하여 각각 3편씩 선정하여 청자 총 9편, 백자 15편을 선정하였다. <그림 2>는 서리 III기층 해무리굽 백자완과 중국 월주요에서 제작한 해무리굽 청자완 사진이다.

4) 서리의 중덕 가마터는 이후 발굴된 전축요들의 상대적인 선후관계를 논하는데 있어서 기준이 되고 있다. 최근 해무리굽 전 시기에 해당하는 선해무리굽에 대한 해석과 초기 자기 가마터에서 공통적으로 출토되는 화형접시와 갑발의 형태변화 등 논의의 초점이 다양해지고 있다. 최근에 선(先)해무리굽이 중국 오대(五代)의 양식을 받아들인 것으로 보아 최초 활동시기를 10세기 전반으로 보는 견해가 나타나고 있다. 또한 현재 발굴이 진행 중인 용인 서리의 또 다른 도요지인 상반지역에서 출토되고 있는 도편들과 중덕가마터의 도편들에 대한 자연과학적 분석도 이루어진 바 있다. 용인시·용인문화원·여주대학, 『용인 서리 고려백자요지 도편분석 연구보고서』 (2003), 37-41쪽.

5) 호암미술관, 『용인서리고려백자요지 II』 (2003); 전승창, “용인 서리요지 출토유물 검토”, 『용인 서리 고려백자요지의 재조명』 (2001), 15-32쪽.

〈표 1〉 분석대상 요지의 출토도편 특징

	용인 서리	시흥 방산동	여주 중암리
주소지	경기도 용인시 이동면 서리 중덕마을	경기도 시흥시 방산동	경기도 여주군 북내면 중암리
발굴시기	1984, 1987, 1988년	1997년, 1998년	2002년, 2003년
발굴기관	호암미술관	해강도자미술관	경기도박물관
가마운용시기	9세기전반의 늦은시기 - 11세기 초	9세기 후반 - 10세기 후반 중심시기 10세기전반	10세기 후반
요지특성	청자와 백자 공반출토에서 점차 백자전용가마로 바뀜. (전체청자: 백자 생산비율 4:96)	주로 청자 생산(95%)	백자전용가마
가마축조형태	벽돌가마[塼築窯] → 진흙 가마[土築窯] 최하층의 벽돌가마 길이 40m, 폭 1.8m, 그 위에 보수한 진 흙가마는 길이 83.3m, 폭 1.2-1.5m임.	벽돌가마[塼築窯], 2회의 대 대적인 개축 길이: 39.1m → 35.8m 폭: 225cm → 95cm	벽돌가마 → 진흙가마, 5회이상 수·개축 길이: 20.4m, 변조실 내부공 간: 100-170cm
출토도편	Ⅳ 기층: 진흙가마, 모두 백 자, 변형해무리굽완 Ⅲ 기층: 백자만 출토, 중국식, 한국식 해무리굽완 Ⅱ 기층: 압도적으로 백자가 많음. 선해무리굽, 중 국식해무리굽완 Ⅰ 기층(최하층): 벽돌가마, 先 해무리굽완, 청자와 백 자 동반출토	Ⅲ 기층: 청자 질이 떨어짐. 선해무리굽과 해무리 굽의 중간단계 Ⅱ 기층: 청자 외에 질이 좋 은 백자생산 시작 Ⅰ 기층(최하층): 극소량의 백 자, 황록색(올리브그린) 의 청자, 선해무리굽완	Ⅰ 층: 내저원각, 한국식해무 리굽완 Ⅱ 층: 한국식 해무리굽완 Ⅲ 층: 본격적인 진흙가마 단계 Ⅳ 층: 내저곡면완 중국식 한 국식이 공반됨 Ⅴ 층(최하층): 벽돌가마, 최상 질 자기, 내저곡면, 선해 무리굽 완이 주류
분석시편	청자 9점, 백자 15점	청자 18점, 백자 12점	백자 25점
비고		유적 중심부 최하층에 토기 가마 확인	공방지와 아궁이 보호시설 확인
변조방법	갑발(匣鉢)변조/내화토비집 각종 자기받침 (원통형, 원판형, 고리형)	3-6개 내화토비집받침/갑발 변조. 일부 고급자기는 고리 형받침[執環]	접지면에 내화토를 받쳐 갑 발변조



(a)



(b)

〈그림 2〉 (a) 서리 III기층 출토 한국식 해무리굽 백자완
(b) 중국 월주요 해무리굽청자완

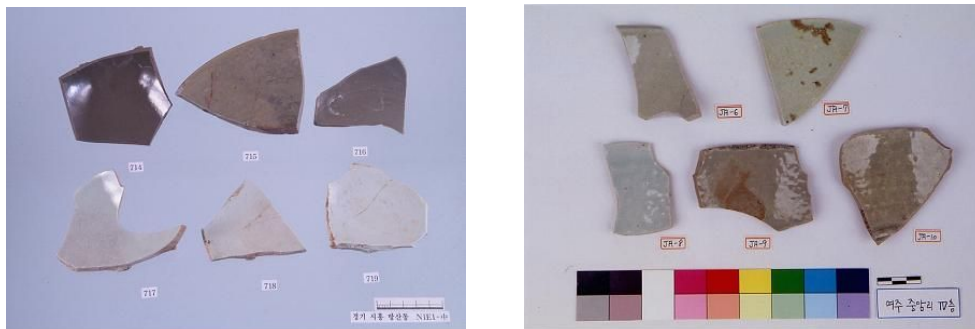
시흥 방산동 가마터: 경기도 시흥시 방산동에 위치한 가마터로 1997년과 1998년 해강도자미술관에서 발굴하였다. 전체 요업기간 동안 벽돌가마가 운영되었으며, 두 차례에 걸친 개축과정이 있었다. 1차가마의 길이는 39.1m, 폭 2.22m에 이르는 큰 규모였으며, 3차가마의 번조실은 약 30m로 축소된다. 출토유물의 특징을 살펴보면, 청자와 백자의 수량은 95:5로 청자가 다수를 차지하며 소량의 백자를 같이 구웠다. 모두 갑번하였으며, 초벌구이는 한 점도 발견되지 않았다고 한다. 퇴적층의 상대적인 편년에 따라 세 시기로 구분하였는데, 제일 빠른 시기의 I기층은 선해무리굽완 중심으로 기벽이 얇고 청자 유색은 전형적인 올리브그린이다. II, III기층으로 늦어질수록 굽깎음새와 성형상태가 조잡해지고, 암갈색이나 녹갈색으로 바뀌어 질이 떨어지며, 선해무리굽과 해무리굽 중간단계의 완의 비율이 많아진다. 생산활동의 중심시기는 10세기 전반경으로, 상한은 9세기 후반, 하한은 10세기 말기로 보고있다.⁶⁾

6) 해강도자미술관·경기도 시흥시, 『방산대요』 (2001); 이종민, “發掘窯蹟을 통해 본 博築窯의 運營時期 考察 — 始興 芳山洞과 龍仁 西里 窯蹟을 中心으로”, 『용인 서리 고려백자요지의 재

각 기층별로 구분하여 3편씩, 청자는 모두 18편, 백자는 12편을 선정하여 분석하였다.

여주 중암리 가마터: 2002년과 2003년에 경기도박물관에서 발굴한 가마터로 경기도 여주군 북내면 중암리에 위치한다. 벽돌가마에서 나중에는 진흙가마로 변화하였으며, 용인 서리와 시흥 방산동 가마에 비해 작은 규모의 가마로 길이 약 20.4m, 내벽폭 100-170cm이다. 극히 소량의 청자가 발견되나, 대부분 백자를 구웠던 백자전용가마로써, 이른 시기에 제작된 것일수록 기벽이 얇고 태토와 유약이 정선되었으며, 담갈색과 담청색 유조로 광택이 강하게 나는 것이 많은 반면, 시기가 늦어질수록 태토가 거칠고 시유상태가 고르지 못하다. 전체 5개의 층위로 나뉘며, 가장 이른시기에 제작된 V층에서는 벽돌가마에서 제작된 내저곡면이 있는 선해무리굽완이 출토되며, IV층에서는 해무리굽완이 나온다. III층부터는 진흙가마에서 생산된 것으로 보이는 한국식 해무리굽완과 중국식 해무리굽완이 섞여 나온다. II층에서는 내저원각의 해무리굽완, I층에서는 내저원각의 변형해무리굽완이 출토된다.⁷⁾

고고학적 층위구분에 따라 보편적인 특징을 보이는 도편 중 완을 중심으로 5편씩 모두 25편을 분석하였다. <그림 3>은 분석도편 일부의 사진이다.



(a)

(b)

<그림 3> 분석한 도편의 일부 사진

(a) 방산동 N1E1-中 청자와 백자 (b) 중암리 IV층의 백자

조명』(2001), 33-61쪽.

7) 백종오·이헌재·김병희, “여주 중암리 고려백자 요지 발굴의 성과와 의의”, 『경기도박물관 연보』 5 (경기도박물관, 2001), 21-55쪽; 경기도박물관·여주군, 『여주 중암리 고려백자요지』(2004), 162-166쪽.

3. 분석방법

1) 주성분 분석

태토의 주성분은 엑스선 형광 분석기(XRF, X-ray Fluorescence Sequential Spectrometer, Philips Inc. PW2404)를 이용하여 40kV와 30mA의 조건으로 분석하였다. 측정을 위한 시료의 전처리과정은 다음과 같다. 먼저 유약을 제거한 태토를 200 mesh이하의 가루로 만들고 100°C에서 충분히 말려 습기를 제거한 후, 다시 950°C에서 40분 이상 연소시킨다. 이후, 연소된 시료와 용융제(di-lithium tetraborate, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, spectromelt A1000, Merck)를 1:5로 혼합하여 백금도가니에 넣고 자동시료제작기(automatic bead machine)로 약 1200°C에서 완전히 용융시켜 지름 3.5cm, 두께 0.4cm정도의 원판형태의 유리시료(glass bead)를 만들어 측정한다. 유약의 주성분 분석은 전자 현미 분석장치(EPMA, Electron Probe Microanalyzer, SEM: JEOL SUPERPROBE JXA-8600SX, EDS: OXFORD PENTAFETATW detector)를 이용하여 분석하였으며, 조건은 15kV, 5nA였다. 분석시료는 에폭시수지에 정착시킨 도편의 단면을 연마하여 사용하였다.

2) 미세구조

유약 주성분 분석에 사용한 에폭시수지에 정착시킨 도편을 20% HF용액으로 5초에서 15초 정도 에칭한 후 도편 표면을 광학현미경(Optical Microscope, Nikon metaphot)으로 관찰하였다. 태토와 유약에 존재하는 기공이나 기포, 석영과 장식등의 결정의 크기와 분포양상을 조사하였으며, 또한 두께와 함께 태토와 유약사이의 반응층과 그 경계면에서 생기는 결정이 있는지 등을 조사하였다.

광학 및 편광현미경에서 관찰되는 특징적인 결정이나 미세부분들의 성분과 구조를 분석하기 위하여 전자 현미 분석기의 반사전자상(BEI, Backscattered Electron Image)으로 상을 관찰하면서 에너지 분산 분석기(EDS, Energy Dispersive X-ray Spectrometer)로 성분을 분석하였다.

도편과 원료의 광물성분 조사는 엑스선 회절분석기(D/NAX-RC, Scintag Inc.)를 사용하였다. 태토는 유약을 갈아낸 후 분말시료로 만들어 20kV, 40mA의 조건에서 측정하였다.

3) 통계 분석

성분 분석결과는 SPSS (Statistical Package for Social Science) 프로그램을 이용한 주성분분석법(principal component analysis)으로 통계분석을 하여 도편들의 특징과 상호 관계성을 파악하고자 하였다. 주성분분석법은 다변량통계분석법(multivariable statistical analysis)의 하나로써 많은 변수값들의 상호관련성을 고려하여 각 변수들을 선형결합한 소수의 주성분으로 집약하는 방법으로, 가장 많은 변수들이 묶이는 것을 주성분 1(PC1, principal component 1), 그 다음으로 큰 것을 주성분 2(PC2, principal component 2)의 순으로 나타낸다.

시료 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 에 대하여 변수(측정된 산화물 성분) $j(j=1, 2, \dots, m)$ 의 값 x_{ij} 는 데이터 행렬 $X(N \times M)$ 을 형성한다. 각 산화물의 값에 대해 같은 가중치를 갖도록 하기 위해 표준화(autoscaling)과정을 거쳐 각 데이터를 평균 0, 단위표준편차를 갖는 새로운 변수 z_{ij} 로 변환시킨다.

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (1)$$

$\bar{x}_j$ = 각 시료에 대한 산화물 성분값의 평균

s_j = 각 시료에 대한 산화물 성분값의 표준편차

시료 i 에 대한 k 번째 주성분 P_{ik} 는 z_{ij} 와 각 변수에 대한 요인점수계수행렬(factor score coefficient matrix)에서 k 번째 고유벡터의 j 번째 값 v_{jk} 로 다음과 같이 표현된다.

$$P_{ik} = \sum_{j=1}^m z_{ij} \cdot v_{jk} \quad (2)$$

변수인 산화물성분과 요인(factor)인 주성분(principal component)들 사이의 상관도는 요인적재값(factor loading score)으로 표현되며, 공통성(communality)은 주성분 1과 2에 의해 설명되는 한 변수의 분산양으로 각 변수에 담겨진 정보를 얼마나 표현할 수 있는가를 의미한다.

4. 분석 결과 및 고찰

1) 청자와 백자의 성분 비교

자기 발생시기에 관련된 가마터들에서 나타나는 도편들의 다양한 태토색과 유색은 청자와 백자의 구분을 어렵게 하는 요인 중 하나이다. 또한 초기청자와 백자는 비색(翡色)의 고려

청자와 순백색의 조선시대 백자와는 매우 다르기 때문에, 기존에 알려진 어떤 범주에도 정확하게 잘 맞지 않는 것이 대부분이다. 따라서 성분분석결과를 통하여 가시적인 분류방법과 일치하는가를 확인하는 과정은 초기 청자와 백자의 특성을 규명하는 중요한 작업이라 할 수 있다.

청자와 백자도편들의 태토성분을 각각 <표 2a>와 <표 2b>에 나타내고, 유약성분은 <표 3a>와 <표 3b>에 나타내었다.⁸⁾ 이 결과를 체계적으로 비교하기 위하여 다변량 통계 분석인 주성분분석법과 함께 제게르식(Seeger formula)을 이용하였다.⁹⁾ <그림 4a>와 <그림 4b>, <그림 5a>와 <그림 5b>는 주성분분석법에 의한 통계결과를 나타낸 것으로 한 가마터에서 출토된 청자와 백자를 비교하여 특징을 살필 수 있게 하였다. <그림 4a>와 <그림 5a>의 결과를 각각 <그림 4b>와 <그림 5b>에 나타낸 요인 적재값과 연결하여 관찰하면, 그룹들 사이에 나타나는 차이의 원인을 규명할 수 있다.

분석결과는 서리와 방산동에서 출토된 청자와 백자의 성분이 태토는 물론, 유약에서도 뚜렷하게 다른 그룹으로 구분되어 원료성분이 다른 것이었음을 알 수 있었다. 용인 서리에서 생산된 청자와 백자의 경우, 태토와 유약에서 가장 큰 차이를 보이는 성분은 착색산화물인 Fe_2O_3 와 TiO_2 함량이었다. 반면, 시흥 방산동에서는 이러한 착색산화물과 함께 태토성분 중 내화도(耐火度)를 결정짓는 Al_2O_3 성분이 큰 차이를 보이는 것이 특징적이다. 따라서 가시적으로 청자와 백자를 구분하기 어려울 정도로 다양하게 나타나는 태토와 유약의 색조는 원료성분, 번조공정 등의 복잡한 생산공정이 얹혀있는 문제이기는 하나, 성분에 의해서라기보다는 번조시의 분위기조절의 미숙에서 기인한 것으로 추정할 수 있다.

8) 각각의 성분표에는 각 요지의 출토도편을 기층 혹은 층위별로 구분하고, 이에 대한 평균값과 표준편차만을 정리하였다. 도편 각각에 대한 정확한 성분결과값은 다음의 보고서를 참고할 것. C. K. Koh Choo, Y. E. Lee, I. W. Shim, W. K. Choo, G. H. Kim, W. Y. Huh and S. C. Chun, op. cit. pp. 251-255; 김규호 · 이영은 · 이승은 · 이연숙 · 고경신, 앞의 논문, 355-358쪽; 이영은 · 김규호 · 고경신, 앞의 논문, 412-416쪽.

9) 다변량 통계분석법을 사용할 때는 분석하는 도편을 어떻게 선택하는가에 따라 선택된 도편들의 상대적인 성분특성을 알 수 있으나, 제게르식은 성분의 몰(mole)비를 비교하는 것으로 절대적인 함량을 비교할 수 있다.

〈표 2a〉 초기 청자 태토의 성분

출토요지 (분석도편수)	산화물 성분함량 (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
용인 서리											
I 기층, 선해무리굽(3)											
<i>Average</i>	72.53	18.40	2.89	0.98	0.34	0.91	2.61	1.07	0.02	0.03	99.85
<i>STDEV</i>	0.35	0.36	0.03	0.01	0.00	0.08	0.02	0.02	0.00	0.00	0.07
II 기층, 선해무리굽(3)											
<i>Average</i>	73.20	17.77	2.69	0.73	0.31	1.08	3.23	0.72	0.02	0.02	99.65
<i>STDEV</i>	0.27	0.53	0.17	0.14	0.09	0.04	0.34	0.20	0.00	0.00	0.46
II 기층, 중국식 해무리굽(3)											
<i>Average</i>	74.12	17.03	2.61	0.77	0.31	1.12	3.21	0.77	0.02	0.03	99.93
<i>STDEV</i>	0.16	0.10	0.09	0.02	0.02	0.07	0.20	0.03	0.00	0.00	0.03
시흥 방산동											
I 기층, N1E1下(3)											
<i>Average</i>	76.22	15.41	2.11	0.83	0.57	0.87	2.75	0.91	0.02	0.04	99.96
<i>STDEV</i>	1.56	1.05	0.28	0.06	1.10	0.07	0.04	0.01		0.01	0.02
I 기층, N1E3下(3)											
<i>Average</i>	75.08	16.49	2.25	0.75	0.61	1.10	2.73	0.78	0.02	0.03	99.99
<i>STDEV</i>	1.52	1.09	0.31	0.10	0.03	0.17	0.08	0.09	0.00	0.00	0.08
II 기층, N1E1中(3)											
<i>Average</i>	75.55	16.05	2.12	0.80	0.56	0.99	3.03	0.78	0.02	0.03	100.01
<i>STDEV</i>	0.48	0.65	0.14	0.07	0.09	0.19	0.25	0.13	0.00	0.00	0.05
II 기층, N1E3中(3)											
<i>Average</i>	76.54	14.87	2.00	0.81	0.66	1.26	2.78	0.88	0.02	0.03	99.98
<i>STDEV</i>	0.78	0.64	0.15	0.07	0.03	0.03	0.02	0.04	0.00	0.00	0.07
II 기층, S1E1(3)											
<i>Average</i>	76.17	15.47	1.84	0.71	0.58	0.95	3.13	0.70	0.02	0.04	100.00
<i>STDEV</i>	0.81	0.55	0.03	0.06	0.08	0.10	0.49	0.14	0.01	0.01	0.10
III 기층, N1E3上(3)											
<i>Average</i>	74.80	16.55	2.54	0.86	0.36	0.83	3.02	0.82	0.02	0.04	100.10
<i>STDEV</i>	0.73	0.43	0.16	0.02	0.02	0.05	0.11	0.03	0.00	0.01	0.10

〈표 2b〉 초기 백자 태토의 성분

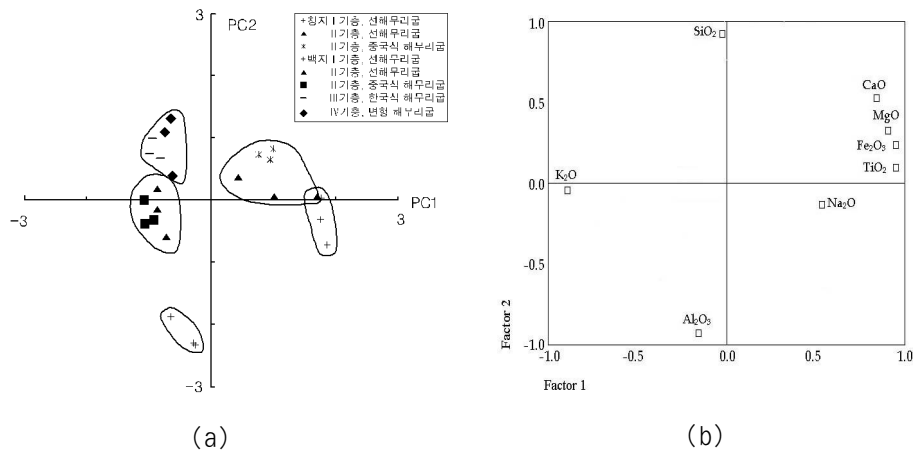
출토요지 (분석도편수)	산화물 성분합량(wt.%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Total
용인 서리											
I 기층, 선해무리굽 (3)											
<i>Average</i>	70.64	21.22	1.41	0.37	0.10	0.59	4.47	0.02	0.02	0.02	99.91
<i>STDEV</i>	0.89	0.28	0.03	0.02	0.03	0.34	0.26	0.00	0.00	0.00	0.06
II 기층, 선해무리굽 (3)											
<i>Average</i>	73.22	18.31	1.40	0.27	0.12	1.21	4.98	0.03	0.03	0.02	99.92
<i>STDEV</i>	0.33	0.50	0.05	0.05	0.02	0.16	0.10	0.02	0.01	0.00	0.10
II 기층, 중국식 해무리굽 (3)											
<i>Average</i>	72.84	18.53	1.38	0.38	0.08	0.51	5.13	0.05	0.02	0.02	99.96
<i>STDEV</i>	0.07	0.37	0.06	0.08	0.02	0.12	0.17	0.03	0.00	0.00	0.06
III 기층, 한국식 해무리굽 (3)											
<i>Average</i>	74.26	17.95	1.53	0.44	0.26	0.29	4.98	0.11	0.02	0.04	100.00
<i>STDEV</i>	0.37	0.29	0.07	0.04	0.02	0.12	0.09	0.01	0.00	0.00	0.07
IV 기층, 변형 해무리굽 (3)											
<i>Average</i>	73.90	17.41	1.64	0.50	0.30	0.29	4.61	0.11	0.02	0.05	99.64
<i>STDEV</i>	1.07	0.39	0.11	0.03	0.02	0.05	0.44	0.00	0.01	0.01	0.43
시흥 방산동											
I 기층, N1E3 下(3)											
<i>Average</i>	73.25	19.18	1.13	0.36	0.14	0.74	4.22	0.03	0.02	0.02	99.98
<i>STDEV</i>	1.52	1.09	0.31	0.10	0.03	0.17	0.08	0.09	0.00	0.00	0.08
II 기층, N1E1 中(3)											
<i>Average</i>	72.52	20.05	1.37	0.38	0.09	0.72	4.30	0.01	0.02	0.00	100.06
<i>STDEV</i>	0.05	0.02	0.07	0.02	0.01	0.08	0.07	0.00	0.00	0.00	0.03
II 기층, N1E3 中 (3)											
<i>Average</i>	72.57	19.61	1.27	0.40	0.12	0.67	4.33	0.01	0.02	0.02	99.99
<i>STDEV</i>	0.27	0.19	0.18	0.01	0.05	0.31	0.19	0.00	0.00	0.00	0.08
II 기층, S1E1 (3)											
<i>Average</i>	73.38	18.04	1.04	0.26	0.16	0.63	5.11	0.01	0.03	0.04	100.04
<i>STDEV</i>	0.88	0.52	0.08	0.02	0.03	0.21	0.05	0.00	0.00	0.00	0.02
여주 중암리											
V 층, 최하층 (5)											
<i>Average</i>	72.59	18.08	1.35	0.45	0.17	1.31	5.04	0.13	0.04	0.03	100.04
<i>STDEV</i>	1.36	1.52	0.13	0.06	0.06	0.52	0.32	0.02	0.00	0.01	
IV 층 (5)											
<i>Average</i>	73.06	18.28	1.40	0.48	0.15	0.82	4.99	0.14	0.04	0.03	100.04
<i>STDEV</i>	0.82	0.47	0.13	0.06	0.05	0.42	0.21	0.02	0.00	0.01	
III 층 (5)											
<i>Average</i>	73.05	18.60	1.35	0.40	0.13	0.68	4.87	0.13	0.04	0.03	100.04
<i>STDEV</i>	1.28	0.66	0.08	0.07	0.04	0.33	0.36	0.02	0.01	0.01	
II 층 (5)											
<i>Average</i>	72.92	18.01	1.39	0.43	0.20	1.22	4.86	0.17	0.03	0.04	100.04
<i>STDEV</i>	0.83	1.13	0.08	0.04	0.06	0.64	0.20	0.04	0.01	0.02	
I 층, 최상층 (5)											
<i>Average</i>	72.61	18.68	1.40	0.43	0.12	0.76	5.07	0.18	0.04	0.04	100.04
<i>STDEV</i>	1.39	0.61	0.16	0.08	0.03	0.51	0.21	0.05	0.01	0.01	

〈표 3a〉 초기 청자 유약의 성분

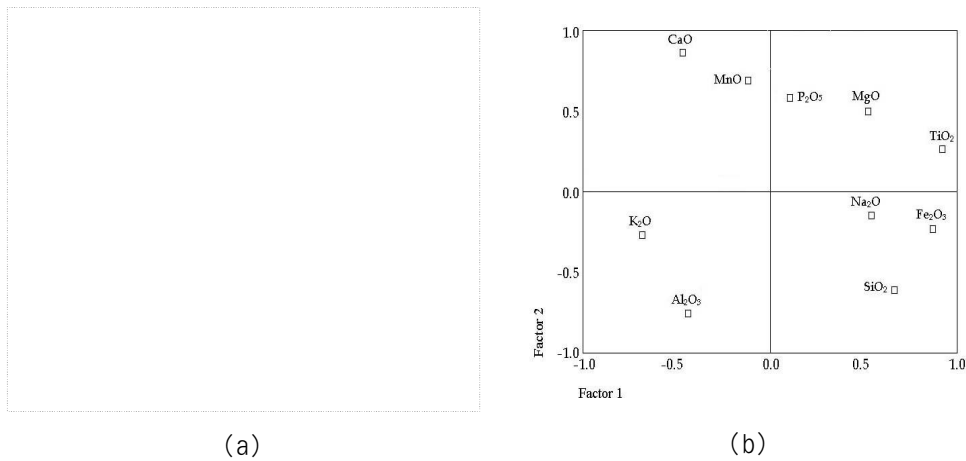
출토요지 (분석도편수)	산화물 성분함량 (wt.%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Total
용인 서리											
I 기층, 선해무리굽(3)											
<i>Average</i>	61.00	13.82	2.24	1.85	15.73	1.15	1.68	0.95	0.40	0.74	99.56
<i>STDEV</i>	3.60	1.79	0.25	0.30	5.44	0.11	0.30	0.07	0.12	0.24	0.12
II 기층, 선해무리굽(3)											
<i>Average</i>	59.52	14.20	3.04	3.98	12.78	1.28	1.93	0.82	0.43	1.81	99.81
<i>STDEV</i>	0.48	1.23	0.13	0.44	0.68	0.20	0.28	0.05	0.11	0.09	0.19
II 기층, 중국식 해무리굽(3)											
<i>Average</i>	58.60	13.94	2.41	3.36	15.38	1.37	1.98	0.71	0.50	1.93	100.18
<i>STDEV</i>	2.05	0.52	0.17	0.32	1.73	0.06	0.20	0.08	0.09	0.15	0.62
시흥 방산동											
I 기층, N1E1下(3)											
<i>Average</i>	60.64	12.90	2.01	1.98	17.23	1.08	1.64	0.95	0.50	0.93	99.86
<i>STDEV</i>	1.77	0.59	0.07	0.10	2.55	0.06	0.18	0.06	0.07	0.09	0.11
I 기층, N1E3下(3)											
<i>Average</i>	62.27	13.64	2.21	1.64	15.44	1.12	1.94	0.86	0.57	0.67	100.35
<i>STDEV</i>	0.71	0.90	0.27	0.13	1.77	0.14	0.20	0.02	0.03	0.07	0.32
II 기층, N1E1中(3)											
<i>Average</i>	60.36	12.93	2.29	1.84	16.89	1.11	1.70	0.86	0.66	0.81	99.45
<i>STDEV</i>	1.81	1.78	0.70	0.36	3.23	0.02	0.29	0.06	0.16	0.28	0.49
II 기층, N1E3中(3)											
<i>Average</i>	60.79	12.36	1.75	1.53	19.41	1.22	1.43	0.81	0.69	0.65	100.64
<i>STDEV</i>	0.50	0.12	0.08	0.04	1.07	0.05	0.04	0.06	0.05	0.04	0.61
II 기층, S1E1(3)											
<i>Average</i>	60.02	13.66	2.25	1.58	16.97	1.09	1.78	0.89	0.66	0.84	99.75
<i>STDEV</i>	1.37	1.35	0.01	0.07	2.61	0.09	0.22	0.12	0.15	0.06	0.20
III 기층, N1E3上(3)											
<i>Average</i>	60.91	14.29	2.72	2.56	13.11	1.15	2.36	0.88	0.39	1.31	99.69
<i>STDEV</i>	2.94	0.88	0.12	0.27	2.78	0.12	0.57	0.06	0.16	0.25	0.27

〈표 3b〉 초기 백자 유약의 성분

출토도편 (분석도편수)	산화물 성분함량(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
용인 서리											
I 기층, 선해무리굽(3)											
<i>Average</i>	57.11	14.42	0.75	1.71	20.99	0.95	2.84	0.14	0.26	0.85	100.03
<i>STDEV</i>	1.68	0.36	0.22	0.29	1.10	0.37	0.31	0.02	0.37	0.13	0.67
II 기층, 선해무리굽(3)											
<i>Average</i>	57.50	15.02	1.26	2.58	16.06	1.66	3.32	0.12	0.40	1.64	99.57
<i>STDEV</i>	1.12	0.43	0.12	0.22	2.25	0.23	0.19	0.02	0.13	0.26	0.82
II 기층, 중국식 해무리굽(3)											
<i>Average</i>	58.13	13.73	1.25	2.93	17.22	0.80	3.40	0.11	0.57	1.75	99.88
<i>STDEV</i>	0.45	0.18	0.14	0.26	1.30	0.18	0.33	0.01	0.06	0.11	0.69
III 기층, 한국식 해무리굽(3)											
<i>Average</i>	60.08	14.96	1.57	2.65	13.55	0.53	3.80	0.11	0.54	2.10	99.89
<i>STDEV</i>	0.70	0.10	0.02	0.06	0.49	0.02	0.09	0.01	0.04	0.03	0.18
IV 기층, 변형 해무리굽(3)											
<i>Average</i>	58.54	14.65	1.35	2.76	15.71	0.53	3.41	0.15	0.58	2.14	99.83
<i>STDEV</i>	0.54	0.93	0.02	0.09	0.28	0.04	0.13	0.02	0.01	0.01	0.07
시흥 방산동											
I 기층, N1E3-下(3)											
<i>Average</i>	59.24	14.67	1.05	1.17	18.73	0.95	2.61	0.18	0.62	0.53	99.75
<i>STDEV</i>	0.77	0.46	0.19	0.15	0.98	0.15	0.15	0.04	0.17	0.08	0.02
II 기층, N1E1-中(3)											
<i>Average</i>	59.48	14.35	1.31	1.12	18.32	1.07	2.72	0.20	0.49	0.73	99.79
<i>STDEV</i>	0.51	0.76	0.12	0.04	0.66	0.09	0.06	0.03	0.01	0.01	0.33
II 기층, N1E3-中(3)											
<i>Average</i>	61.07	16.28	1.23	1.16	15.83	1.09	3.15	0.17	0.61	0.49	101.08
<i>STDEV</i>	1.23	1.54	0.06	0.19	2.94	0.20	0.57	0.06	0.25	0.10	0.35
II 기층, S1E1(3)											
<i>Average</i>	58.04	13.39	1.06	2.35	18.87	0.82	3.31	0.22	0.50	1.51	100.05
<i>STDEV</i>	1.15	0.86	0.25	0.30	2.35	0.18	0.44	0.09	0.17	0.16	0.49
여주 중암리											
V 층, 최하층(5)											
<i>Average</i>	59.60	14.37	1.23	2.18	16.41	1.24	3.06	0.20	0.49	1.13	99.90
<i>STDEV</i>	0.90	0.64	0.21	0.22	1.53	0.44	0.40	0.07	0.06	0.12	0.19
IV 층(5)											
<i>Average</i>	58.29	14.90	1.33	2.26	17.68	0.77	2.93	0.12	0.48	1.22	99.97
<i>STDEV</i>	1.09	0.94	0.24	0.33	1.51	0.33	0.33	0.01	0.13	0.18	0.68
III 층(5)											
<i>Average</i>	58.94	15.39	1.19	2.05	17.89	0.62	2.87	0.10	0.40	1.11	100.56
<i>STDEV</i>	0.67	0.56	0.24	0.15	1.50	0.28	0.22	0.04	0.12	0.07	0.25
II 층(5)											
<i>Average</i>	60.60	15.40	1.53	2.13	13.50	1.28	3.58	0.15	0.39	1.32	99.87
<i>STDEV</i>	1.50	1.15	0.29	0.29	2.93	0.59	0.49	0.11	0.08	0.57	0.88
I 층, 최상층(5)											
<i>Average</i>	59.74	15.39	1.68	1.85	16.01	0.89	3.46	0.15	0.44	1.14	100.73
<i>STDEV</i>	0.68	0.77	0.60	0.20	1.32	0.55	0.49	0.04	0.11	0.23	0.32



〈그림 4〉 (a) 서리 출토 청자와 백자 태토의 주성분분석법에 의한 통계결과
(b) 요인적재값 도표



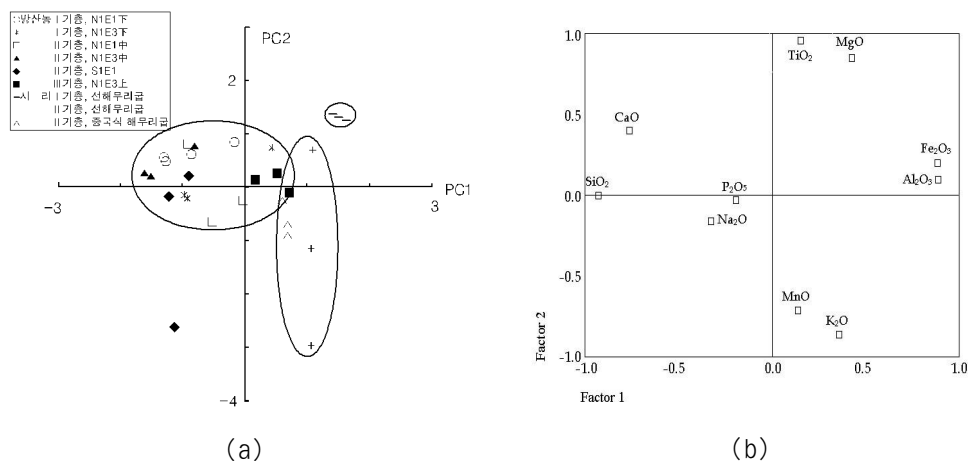
〈그림 5〉 (a) 방산동 출토 청자와 백자 유약의 주성분분석법에 의한 통계결과
(b) 요인적재값 도표

2) 초기청자의 성분

태토: 제게르식에 의하여 구한 서리 청자 도편들의 태토성분은 RO₂: 6.0–6.8mol, RO+R₂O: 0.36–0.42mol, 방산동의 경우 RO₂: 6.5–8.5mol, RO+R₂O: 0.39–0.53mol로 지금까지 분석된 한국의 청자, 분청, 백자등과 비교해볼 때 RO₂와

RO+R₂O의 값이 높은 영역에 위치한다.¹⁰⁾ 초기청자에서 공통적으로 나타나는 이러한 현상은 내화도를 높이는 알루미나 성분의 비율이 상대적으로 낮고 용융제의 성분이 많음을 의미하는 것으로 좀 더 낮은 온도에서도 자화될 수 있는 조건이 된다.

유약: 서리와 방산동의 청자 모두 CaO성분을 주 용융제로 하는 ‘라임 계열’(lime type glaze)로 구분된다.¹¹⁾ 유약성분은 서리의 경우 RO₂: 2.4–2.8mole, R₂O₃: 0.37–0.42mole, 시흥 방산동은 RO₂: 2.4–3.0mole, R₂O₃: 0.35–0.41mole로 두 요지가 차이가 없으며, 한국의 전형적인 청자유약과 비슷하다.¹²⁾



<그림 6> (a)서리와 방산동 출토 청자 태토성분에 대한 주성분분석법 통계결과
(b) 요인 적재값 도표

서리 청자유약에서 주목되는 성분은 MgO와 P₂O₅이다. I기층에 비해 II기층의 선해무리굽완과 해무리굽완 모두에서 MgO는 3.0–4.3%, P₂O₅는 1.7–2.1%로 일반적인 청자유약과 비교할 때 높은 수치이다. 이러한 결과는 굽모양에 따른 완의 형식적인 변화보다는 고고학적으로 구분된 층위에 따라 뚜렷한 성분상의 차이가 있음을 의미하는 것으로, 지금까지 분석된 결과를 놓고 볼 때 전남 강진 등을 중심으로 한 남서부지역의 토축요에서 생산된 청자와는 차이를 보이는 특징으로 간주된다. <표 3b>에 정리된 유약의 성분을 보면, MgO와 P₂O₅성분이 높은 서리 II기층의 특징은 방산

10) 이연숙, “한국 전통도자기의 원료에 대한 통계분석연구” (중앙대학교 석사학위논문 2001), 12-41쪽

11) Nigel Wood의 중국 고화도자기의 유약 분류방법을 기준으로 하였다. 자세한 것은 Nigel Wood, *Iron in the Fire — The Chinese Potters' Exploration of Iron Oxide Glazes; an exhibition held at the Ashmolean Museum, Oxford* (The Oriental Ceramic Society, 1988), pp. 9-15.

12) 이연숙, 앞의 논문, 41-66쪽

동의 맨 마지막 시기에 해당하는 III기층의 N1E3상층에서도 관찰된다. <그림 6a>와 <그림 6b>에 나타난 통계의 결과에서도 방산동 청자 중 N1E3상층이 오른쪽에 위치한 서리 청자와 가장 근접하게 위치하는 것으로 나타난다. 특정기층에서 관찰되는 이러한 공통된 성분특징은 원료의 유사성은 물론 가마를 운영한 장인집단의 이동까지도 유추해 볼 수 있는 중요한 단서가 된다.¹³⁾

3) 초기백자의 성분

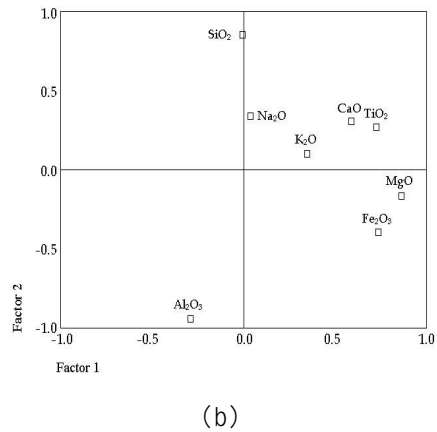
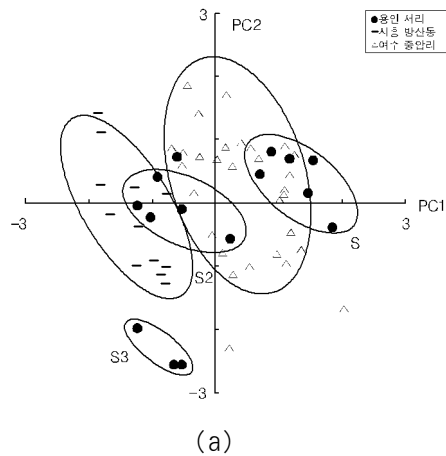
태토: 세 요지의 초기 고려백자 도편들의 태토성분은 RO_2 : 6-7mole, $RO+R_2O$ 는 0.3-0.5mole의 매우 비슷한 영역대에 분포하고 있다. 이러한 분포위치는 지금까지 분석된 한국의 청자, 분청, 그리고 백자의 태토성분들과 비교해서 거의 겹쳐지거나 $RO+R_2O$ 가 약간 높은 영역으로 볼 수 있다. 대체로 전형적인 태토의 성분인데, 여기에 용융제 함량이 조금 더 많이 포함되어 있음을 의미한다.

<그림 7a>와 <그림 7b>는 주성분분석법에 의한 통계처리 결과로써 세 지역의 태토가 MgO 와 Fe_2O_3 , TiO_2 의 성분에 의하여 구분되며, 이 성분들이 상대적으로 많은 중암리는 오른쪽에, 적게 함유된 방산동은 왼쪽에 분포하고 있음을 보여준다. 서리는 세 그룹으로 나뉘어져 일부는 중암리 도편과 겹치거나(S1;III, IV기층), 중암리와 방산동 사이에 위치하며(S2;II기층), 그리고 서리 최하층(I기층)은 알루미늄성분이 특히 높아 가장 아래쪽에 위치한다(S3).

이러한 두 가지 방법에 의한 분석결과를 종합하여 볼 때 세 요지의 백자태토성분은 주성분 함량은 거의 비슷하나, 1-2% 가량 미량으로 함유된 성분들 중 MgO , Fe_2O_3 , TiO_2 성분에서 조금씩 차이가 나는 것으로 볼 수 있다. 서리는 층위별로 조금씩 차이를 보이거나, 중암리는 전 제작시기에 걸쳐 일관된 성분을 유지하고 있다.¹⁴⁾

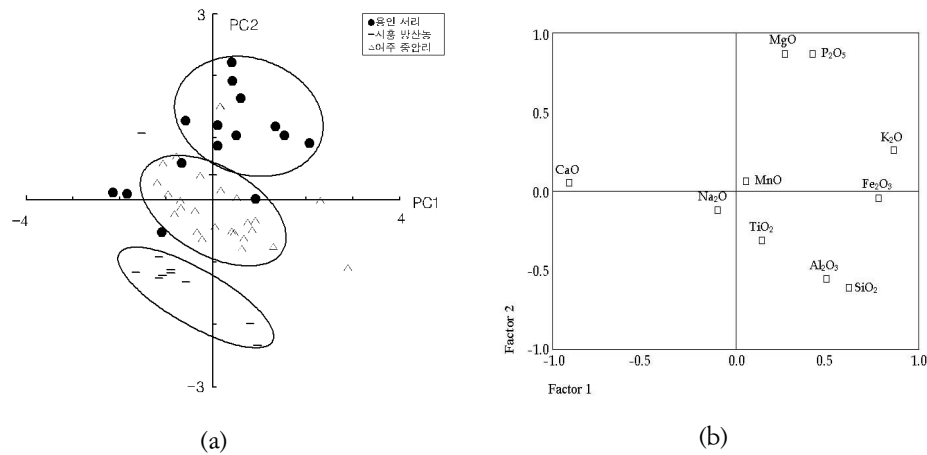
13) 이종민은 초기 청자의 도자생산체제가 처음부터 일정하게 계획된 것으로 판단하고 있다. 가마의 규모, 축요방식, 운영시스템, 생산기종 등에서 전축요간에 별 차이가 없이 일목요연하게 진행되고 있는 것은 국가적 차원의 일정한 관리체제가 있었기 때문에 가능했기 때문으로 파악하고 있다. 이종민, 앞의 논문 (2002), 182-187쪽.

14) 이러한 점은 각 가마터의 가마운영시기와도 관련이 있을 것으로 보인다. 서리의 경우 100년 이상을 보고 있으나 중암리는 서리의 II,III기층에 해당하는 비교적 짧은 기간 운영되었으므로, 원료의 성분을 일정하게 유지시킬 수 있었을 것으로 보인다. 이에 대한 논의는 이영은·김규호·고경신, 앞의 글, 397-435쪽을 참조할 것.



〈그림 7〉 (a) 서리, 방산동, 중암리 출토 백자 태토성분에 대한 주성분분석법 통계결과
(b) 요인 적재값 도표

유약: 제계르식에 의한 결과는 세 지역의 주 구성성분에는 거의 차이가 없는 것으로 조사되었다. 고려백자가 분포하는 RO_2 : 2-3mole, R_2O_3 : 0.3-0.5mole의 영역은 조선백자보다는 한국의 청자와 분청의 영역과 더욱 많이 겹쳐진다. 한편, 용융제로 작용하는 원소산화물들의 비율과 1-2%정도 함유된 미량성분에는 세 지역이 조금씩 다른 특징을 보인다. 이것은 주성분분석법으로 보다 구체적으로 확인할 수 있는데, 세 지역의 유약을 구분 짓는 주 산화물성분은 P_2O_5 , MgO와 CaO인 것을 알 수 있다. <그림 8a>에서는 P_2O_5 와 MgO 성분이 가장 많은 서리가 제일 위쪽에, 그 다음 중암리 그리고 아래쪽에는 방산동이 그룹을 이룬다. 중암리 중에서 인산화물성분이 많은 JA-19도편은 서리와 같은 영역대에 위치한다. <그림 8>에는 잘 나타나지 않지만, <표 3b>에서 볼 수 있는 것과 같이 중암리 중 II층과 I층의 유약은 CaO 함량이 상대적으로 적어서 중암리 도편들만 서로 비교하는 주성분분석법의 결과에서는 따로 구분된다.

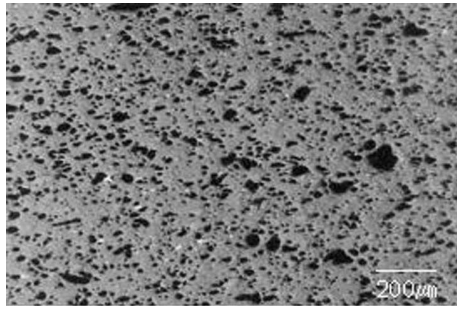


〈그림 8〉 (a) 서리, 방산동, 중암리 출토 백자 유약 성분에 대한 주성분분석법 통계결과
(b) 요인 적재값 도표

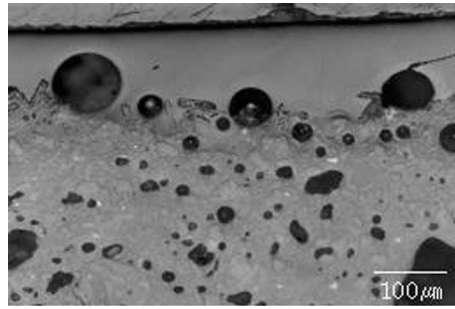
지금까지 분석된 각 지역 백자의 유약성분의 특성을 살펴보면 서리 I기층은 높은 라임계열 유약(high-lime type glaze)으로 분류되며, 서리의 나머지 세 층위와 다른 두 요지는 높은 라임계열에 비교하여 칼슘성분은 적어지고 알칼리 성분이 많아지는 라임계열 유약(lime type glaze)이었다. 특히 서리 II기층 청자에서 관찰된 P₂O₅와 MgO의 높은 함량은 I기층을 제외한 나머지 백자에서도 지속적으로 나타나고 있다. 이러한 특성은 방산동의 II기층(S1E1)과 중암리의 모든 층위의 백자에서 공통적으로 조사되고 있으며, 앞서 살펴본 바와 같이 서리 II기층 청자와 방산동 특정층위에서도 관찰되고 있어 전축요계 청자와 백자에서 공통적으로 나타나는 특징으로 간주할 수 있다.

4) 미세구조

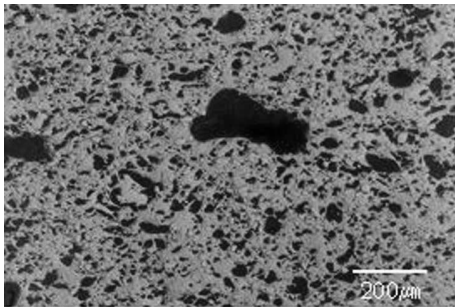
<그림 9>의 (a)와 (b)는 비교적 잘 자화된 것으로 보이는 서리의 청자의 태토와 유약의 광학현미경 관찰사진이다. (c)와 (d)는 자화가 덜 된 방산동 백자 태토와 유약의 사진이다. 태토 내의 기공과 광물의 크기와 모양, 분포양상, 유약의 기포와 결정 분포양상 등으로 자화정도와 수비상태 등을 알 수 있다. 도편마다 약간의 차이는 있으나, 청자와 백자가 동시에 만들어진 서리와 방산동의 경우 청자는 태토와 유약이 적당히 자화된 경향을 보이는 반면 백자는 좀 다른 경향으로 유약은 거의 유리화가 잘 되었으나 태토는 거의 덜 자화된 도편이 많았다.



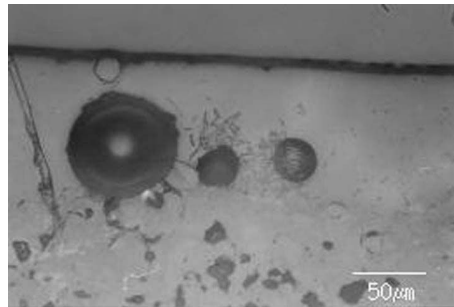
(a)



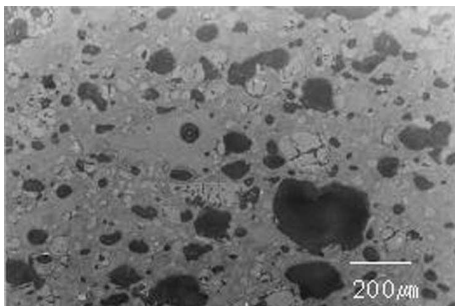
(b)



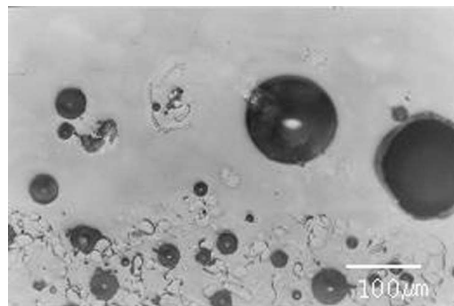
(c)



(d)



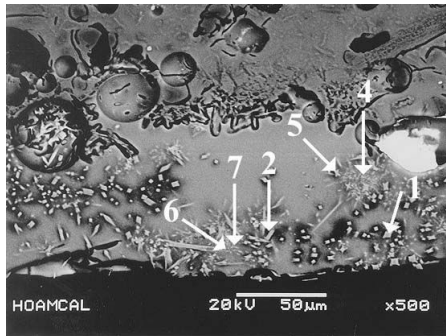
(e)



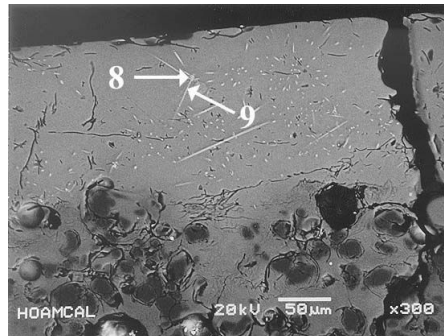
(f)

〈그림 9〉 태토와 유약의 광학현미경 사진

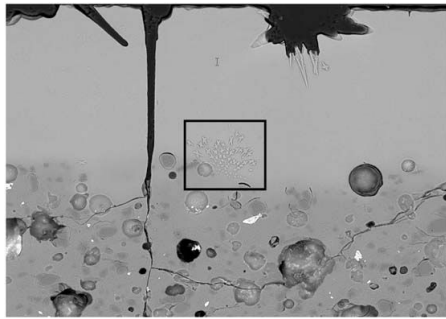
- | | |
|------------------------|------------------------|
| (a) 854 서리청자 I기층 태토 | (b) 854 서리청자 I기층 유약 |
| (c) 706 방산동백자 III기층 태토 | (d) 706 방산동백자 III기층 유약 |
| (e) JA-24 중암리백자 I층 태토 | (f) JA-19 중암리백자 II층 유약 |



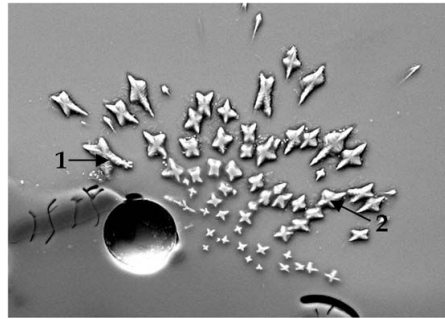
(a)



(b)



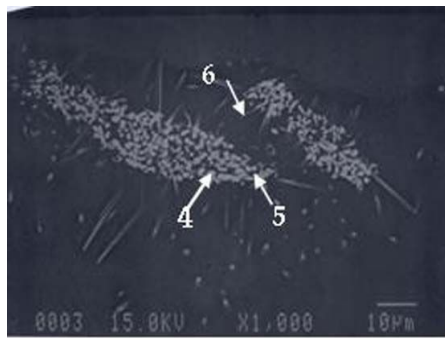
(c)



(d)



(e)



(f)

〈그림 10〉 유약 내부 결정의 반사전자상

- (a) 841(서리 Ⅲ층 청자) (b) 851(서리 Ⅲ층 백자) (c) 700(방산동 N1E3上층 청자)
(d) (c)의 □부분 확대상 (e) JA-19 (중암리 Ⅳ층 백자) (f) (e)의 □부분 확대상

대체로 청자보다 백자의 태토성분에 알루미늄이 많아 자화되는데 더 오랜 시간과 더 높은 온도를 필요로 한다는 점을 감안하여 볼 때, 초기 청자와 백자에서 나타나는 이러한 경향은 청자와 백자가 같은 가마에서 동시에 번조되었고, 청자에 맞는 번조상황으로 제작되었다.15) 또한 서리의 경우에는 청자유약보다 백자유약의 용융제함량이 약간 높은 것으로 나타나, 번조할 때 유약의 자화정도를 기준으로 하다보니 태토가 완전히 자화되기 어려운 상황이었을 것이라는 것도 짐작해 볼 수 있다. 한편 제작과정에서 초벌과정 없이 태토에 유약을 바른 후 한 번에 구웠던 공정으로 인해 태토가 충분히 자화되기 어려웠을 것으로 보이는데, 인위적인 성분 조절이었는지 아닌지는 판단하기 어려우나 초기 청자와 백자 태토성분이 대체적으로 알루미늄 성분이 낮은 점은 초벌과정 없이도 자화가 잘 될 수 있었던 요인 중 하나이다. 반면, 중암리 백자는 다른 지역보다 용융제 함량이 약간 높아 좀 더 자화되기 쉬운 성분상의 특성으로 인해 자화가 잘 되어 있는 것으로 추정된다. 또한 가마의 크기가 절반으로 줄어들어 번조과정의 조절이 용이하였으리라는 점도 자화의 정도를 고르게 유지하도록 하는 중요한 요인으로 작용하였을 것이다.

세 지역에서 공통적으로 관찰되는 특징으로 가장 이른 시기에 제작된 도편이 가장 자화가 잘 되고 수비도 잘 되어있는 반면, 위층으로 갈수록 태토 내의 결정입자의 크기가 커지고 덜 번조되거나 지나치게 번조된 것들이 종종 보여 제작과정에서 소홀해졌음을 반영하고 있다. 대표적인 사례로 중암리 I 층의 백자태토와 II 층의 백자유약의 관찰사진을 <그림 9>의 (e)와 (f)에 나타내었다.

앞서 성분분석 결과 세 지역 특정 층위의 유약에서 P_2O_5 , CaO와 MgO의 함량이 많은 특징을 보이는 것이 확인된 바 있다. <그림 10>에는 이러한 도편들 중 일부의 유약 내부에서 관찰되는 매우 흥미로운 결정들을 나타내었는데, 이 결정들은 크게 두 그룹으로 구분된다. 하나는 마그네슘과 칼슘이 많은 두꺼운 막대기나 혹은 다이아몬드 형태의 것(dolomite-like composition, $[Ca(Mg)(CO_3)_2]$)이고, 다른 하나는 인과 칼슘을 많이 함유한 좀 더 얇은 침상형태의 것(apatite-like composition, $[Ca_5(PO_4)_3(OH,F,Cl)]$)으로 구분된다.16)

<표 4>에는 이 결정들의 미세부분에 대한 성분을 나타내었다. 이러한 결정의 존재는 원료의 광물특성을 알 수 있는 단서를 제공해주고 동시에 어떠한 조건에서 번조되었는지를 일러주는 자료가 되며, 초기청자 제작당시 특정장인집단의 이동에 따른

15) 실제로 용인 서리에서는 청자와 백자편이 붙어서 출토된 예가 보여 백자와 청자를 동시에 한 가마 안에서 구웠음을 알 수 있다.

16) 이 결정들이 과연 번조과정에서 생성된 것인지, 원료광물에서 처음부터 존재하는 것인지에 대한 것은 지금으로써는 정확하게 판단하기 어려우나 재소성하여 관찰해보았을 때 결정이 관찰되지 않은 실험결과에 비추어볼 때 원료광물에서 기인했다는 추론을 할 수 있다. C. K. Koh Choo, Y. E. Lee, I. W. Shim, W. K. Choo, G. H. Kim, W. Y. Huh and S. C. Chun, op. cit. p. 263을 참고.

가마터 간의 기술적인 연관성이나 원료의 유사성에 대해서도 조심스럽게 예측하게 한다. 지금까지 분석된 한국의 도자기 중 이러한 결정이 발견된 예가 초기청자와 백자의 특정층위에 국한되고 있다는 것은 이러한 예측을 더욱 뒷받침해준다. 그러나 이러한 독특한 미세구조가 각 요지의 단 몇 편에서만 관찰되는 결과이므로 단언하여 결론을 짓기는 어려우며, 이 점에 대해서는 앞으로 도자기 분석에서 미세구조에 대한 분석결과가 계속 축적되어야 할 것으로 판단된다.¹⁷⁾

〈표 4〉 SEM-EDS 로 측정된 유약내 미세결정 성분

도편 번호	분석위치	Normalized 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
용인 서리											
841 (청자, Ⅱ기층)	1	51.75	5.79	4.23	12.86	21.59	0.51	0.47	0.62	0.37	1.82
	2	52.37	7.57	4.64	10.43	20.41	0.64	0.74	0.81	0.32	2.07
	3	48.61	10.56	1.36	2.97	21.66	1.07	1.82	0.76	0.21	10.97
	4	53.99	12.06	2.19	3.04	18.16	1.12	1.85	0.84	0.24	6.50
	5	44.27	9.95	2.58	2.12	24.85	1.17	1.49	0.76	0.22	12.59
	6	44.68	9.66	2.82	2.16	24.93	1.07	1.76	0.67	0.17	12.09
851 (백자, Ⅱ기층)	7	29.48	7.06	0.49	1.34	35.93	0.32	1.85	0.10	0.19	23.24
	8	27.34	6.52	0.39	1.13	37.81	0.35	1.59	0.02	0.17	24.68
시흥 방산동											
700 (청자, N1E3上층)	1	56.63	10.04	3.08	8.89	17.23	0.84	2.26	0.61	0.41	-
	2	54.19	9.47	3.50	10.26	18.63	0.52	1.52	0.84	0.64	0.43
여주 중암리											
JA-9 (Ⅳ층)	1	20.12	5.17	0.33	0.86	41.41	0.47	1.15	-	0.14	29.88
	2	22.96	5.95	0.31	0.92	40.93	0.60	1.27	-	0.19	29.19
	3	4.54	1.15	0.06	0.29	52.51	0.14	0.28	-	0.08	40.45
JA-19(Ⅱ층)	4	24.63	5.24	0.37	0.82	37.29	0.74	1.50	-	0.08	27.99
	5	10.30	2.25	0.24	0.59	48.26	0.29	0.59	-	-	36.68
	6	60.21	14.07	0.91	3.01	15.03	1.67	2.97	0.21	0.17	1.63

5) 번조온도의 추정

- 17) 인과 마그네슘산화물을 많이 포함하고 있는 것으로 조사된 도편에서 모두 이와 같은 미세구조의 결정이 관찰되는 것은 아니었다. 서리에서는 I기층과 II기층의 청자 3편, II기층과 III기층의 백자 2편에서, 중암리의 경우에는 IV층과 II층에서 각각 1편씩에서 발견되었다. 방산동의 경우, 인과 마그네슘산화물의 성분이 높은 층위는 청자 중 N1E2上, 백자 S1E1층이 있으나, 미세구조에서 결정성분이 관찰된 것은 697번(백자), 700번(청자) 뿐이었다. 이것은 미세구조를 관찰하는 단면이 매우 한정될 수 밖에 없는 데서 기인하는 것으로 판단되며, 아마도 인과 마그네슘성분이 많은 것으로 조사된 도편에는 모두 이러한 결정이 존재할 것으로 추측된다.

도편시료를 일정온도에서 다시 번조하고 기공의 수와 크기, 형태의 변화를 비교하는 방법으로 서리 청자도편 1점과 백자 3점에 대하여 번조온도를 추정하였다.¹⁸⁾ 재번조하는 온도는 950℃부터 1200℃까지 50℃ 간격으로 온도를 올리면서 실험하였고, 변화를 더 자세하게 관찰하는 것이 필요할 때는 25℃로 온도의 간격을 좁혔다.¹⁹⁾

<표 5>에는 각 도편에서 기공의 분포가 달라지는 것이 감지되기 시작하는 온도, 그러한 자화과정이 진행되는 온도범위, 원료 특성상 자화범위보다 더 높은 온도까지 재소성되었을 때 나타나는 과번조상태의 블로팅(bloating)이 감지되기 시작하는 온도, 블로팅현상이 확실하게 나타나는 온도, 그리고 이들 결과를 종합하여 추정할 수 있는 실제 번조 온도범위와 적절한 번조온도 범위를 나타내었다. I기층 청자 854번은 1050℃에서부터 1150℃까지 치밀화 과정이 더 진행되었으므로 적절하게 자화되기 전에 번조가 멈추었던 것을 알 수 있었다. 따라서 제작시의 번조온도는 1050-1100℃, 적당하게 번조되는 온도는 1100-1150℃로 판단된다. 세 편의 백자도편 중 한 편(II기층 849번)도 청자와 비슷한 온도에서 실제로 번조되었으나, 이도편은 청자와 달리 덜 자화된 양상의 미세구조를 보이므로 적당하게 자화되려면 청자보다 높은 온도가 필요한 것을 알 수 있다. I기층의 857번은 약간 더 높은 온도(1100-1150℃)에서 번조된 것으로 추정되나 많이 덜 자화되었기 때문에 적절한 번조온도는 1150-1200℃ 정도로 생각할 수 있다. IV기층의 백자도편은 1100-1150℃사이에서 적절하게 번조된 것으로 추정된다.

비균일계 미세구조의 작은 변화로 추정하는 이 방법에 내재된 넓은 오차범위를 감안하면서 번조상황을 정리해보면, 청자와 백자가 같은 가마 내에서 번조되었고, 1150±50℃ 사이의 온도에서 청자는 약간 덜 자화되거나 적절하게 된 상태, 그리고 백자는 대부분 자화가 많이 덜 된 상태까지 번조된 것으로 판단된다. 청자의 적절한 번조온도는 1100-1150℃, 백자는 그보다 약 50℃정도 높은 1150-1200℃인 것으로 추정된다.²⁰⁾

18) 번조온도추정실험은 여러 가지 방법이 있으나, 본 연구에서는 재번조한 후 미세구조의 변화를 관찰하는 방법으로 번조온도를 추정하고자 하였다. 이와 같은 방법으로 온도를 추정한 결과는 다음의 논문을 참조할 수 있다. 이영은, 『조선 분청의 성분 및 미세구조 연구』 (박사학위논문, 1998), 102-107쪽; C. K. Koh Choo, K. H. Kim, Y. E. Lee and J. S. Kim, "A Scientific Study of Chosŏn White Ware: Early Porcelain from a Royal Kiln at Kwangju Usanni," *Archaeometry* 44(2002), pp. 206-210; 이영은·고경신, "한국 전통 도자기의 번조 공정에 관한 미세구조 연구 — 광주 충효동 분청사기를 중심으로", 『대한화학회지』 46(2002), 125-138쪽; C. K. Koh Choo, Y. E. Lee, I. W. Shim, W. K. Choo, G. H. Kim, W. Y. Huh and S. C. Chun, op. cit. pp. 247-265.

19) 번조온도실험은 전기로(box furnace, REX-P100, RKC Instrument Inc.)에서 900℃까지는 2.5℃/h, 그 이상온도에서는 1.25℃/h의 속도로 재번조하였다.

20) 번조온도의 추정실험은 서리 도편에 대해서만 실시하였으나, 미세구조의 양상과 성분분석결과를 종합하여 볼 때, 다른 두 요지의 도편들도 크게 이러한 범위를 벗어나지는 않았을 것으로 추정된다.

〈표 5〉 재소성 실험결과

(단위: °C)

실험도편	원래의 변조정도	변화 시작 온도	변화 진행	Bloating 시작온도	Bloating이 확실한온도	추정 변조온도	적절한 변조온도
⁸⁵⁴ (청자, I 기층)	약간 덜 변조	1050	1050-1150	1175	1200	1050-1100	1100-1150
⁸⁵⁷ (백자, I 기층)	아주 덜 변조	1100	1100-1200	>1200	>1225	1100-1150	1150-1200
⁸⁴⁹ (백자, II 기층)	덜 변조	1050	1050-1150	1200	1225	1050-1100	1150-1200
⁸³⁴ (백자, IV 기층)	적절하게 변조	1100	1100-1150		1200	1100-1150	1100-1150

5. 결 론

서리, 방산동과 중암리의 초기요지에서 출토된 도편들의 분석에서 여러 가지 결과들이 도출되었다. 태토와 유약의 성분들은 한국 도자기의 전형적인 성분 범주에 속하며, 다만 용융제가 약간 많은 것으로 나타난다. 이것은 화강암이 풍화되어 고령토로 변화하는 과정에서, 초기 상태에 더 가까운 지표면에 근접한 원료에는 장석이 더 많이 남아 있을 수 있으므로, 초기 청자와 백자 제작에 사용된 표면의 원료는 더 낮은 온도에서 변조가 일어날 수 있었던 때문이라고 추정할 수 있다.

초기 자기들은 외형의 색상만으로는 청자와 백자로 구분하기가 어려운 경우가 많은데, 성분에서 착색산화물인 Fe_2O_3 와 TiO_2 의 함량이 백자에 훨씬 적은 것이 뚜렷하게 나타난다. 미세구조의 분석에서 백자가 청자에 비하여 전반적으로 덜 변조된 것으로 나타나는데, 우선 서리에서는 백자유약에 좀 더 많이 포함된 용융제로 인해 유약의 자화정도를 기준으로 하여 변조하면 태토가 제대로 자화되지 않은 채 변조가 멈추게 되는 경우로 볼 수 있다. 방산동의 경우 Al_2O_3 성분 차이가 주된 원인으로 나타나는데, 청자태토보다 백자태토에 약 3-4wt.% 정도 더 많이 포함된 Al_2O_3 으로 인해 청자를 위주로 해서 소량의 백자를 같은 가마에서 동시에 변조한 제작상황에서 청자는 어느 정도 자화가 잘 되었으나, 백자는 적절한 자화상태에 많이 못 미친 결과로 나타난다. 변조 온도의 추정은 서리 도편들에만 실시하였으나, 성분들이 비슷하였기 때문에 다른 요지에도 적용할 수 있다고 판단된다. 불균일계에 대한 실험인 관계로 온도추정은 넓은 범위의 오차를 감안하여, 적절한 변조온도는 $1150 \pm 50^\circ\text{C}$ 로 추정하고 실제온도는 이보다 약 50°C 낮은 것으로 할 수 있다.