

# 청자상감운학문매병 제작 재료의 물리화학적 특성 및 제작 단계별 형상학적 특성 변화

Physicochemical properties  
of the materials used for  
the production of celadon  
maebyeong inlaid with  
cloud-and-crane designs and  
changes in their morphological  
properties by production stage

김지혜, 하지향, 한민수\*

한국전통문화대학교 문화유산전문대학원 문화  
재수리기술학과

Kim Jihye, Ha Jihyang, Han Minsu\*

Graduate School of Cultural Heritage,  
Korea National University of Cultural  
Heritage

\* Corresponding Author:  
Han Minsu

Tel: 82-41-830-7381  
E-mail: dormer@nuch.ac.kr

## 요약

본 연구는 전통도자기의 제작 전과 후, 소성 전과 후에 기물의 내부에서 일어나는 다양한 물리화학적 변화를 알아보고자 청자상감운학문매병의 재현품을 성형 → 조각 → 상감 → 초벌 → 유약 → 재벌 등의 6단계로 제작하여 과학적 조사 및 3차원의 정밀한 투과 이미지 촬영으로 획득한 이미지를 세부 영역별로 분석하였다. 재현편의 제작 재료는 각각의 재료가 가진 성분에 따라 다른 광물상이 존재하며, 산화철( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )의 함량이 높은 흑상감은 어두운 색을 나타냈고, 알루미나( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )의 함량이 높은 백상감은 백색이 나타나는 것과 같이 색상에도 영향을 준다. 재현편의 색도와 전암대자율, 주요성분 등의 물리화학적 특성을 CT이미지를 통해 밀도의 차이로 확인할 수 있었으며, 미세조직과 흡수율, 겉보기기공률, 주요구성광물 등의 번조에 따른 특성 변화는 영상 분석에서 기물 내부의 기공 유무와 존재량, 균열의 발달과 확장으로 파악하였다.

**주제어** : 청자상감운학문매병, 제작 재료, 제작 단계, 물리화학적 특성, CT이미지

## Abstract

In order to investigate the diverse physicochemical changes that occurred in traditional Korean pottery during its production, including before and after firing, this study produced six replicas of a celadon maebyeong inlaid with cloud-and-crane designs, respectively corresponding to the process of shaping, carving, inlaying designs, first firing, glazing and second firing, respectively. It then conducted a scientific study of these six replicas and analyzed their images through high-resolution three-dimensional transmission imaging.

The materials used for the replicas show different mineral phases and even colors depending on the components of each material. For example, black inlay with a high content of iron oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) shows dark colors and white inlay with a high alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) content appears white. Physicochemical properties such as chromaticity and magnetic susceptibility and major components of the replicas were confirmed by the differences in the density in the computed tomography (CT) images. The characteristics of fired products such as fine structure, absorption ratio, apparent porosity, and other characteristics of the major mineral components were identified by the presence of pores and the formation of cracks inside the replicas in the image analysis.

**Keywords** : Celadon Maebyeong Inlaid with Cloud-and-Crane Design, Production Materials, Production Stage, Physicochemical Characteristics, Computed Tomography (CT) Image

투고일: 2021.03.31

심사(수정)일: 2021.04.22

게재확정일: 2021.04.29

## 1. 서론

도자기는 무기물질로 구성된 점토로 형태를 만들어 구어 낸 소결체이다. 무기물의 종류나 조합량, 소성온도와 가마의 분위기, 유약의 특성이나 종류에 따라 다른 특징을 지니게 된다<sup>[1]</sup>. 또한, 제작 단계별로 기물의 크기뿐만 아니라 내부 공극의 변화에 따라 밀도와 기공률이 달라지며, 태토를 형성하는 다양한 물질들이 상전이 등 화학적 변화를 수반한다. 따라서, 이러한 단계별 변화양상을 과학적으로 살펴보고 특징을 밝히는 것은 도자기 공학에서 매우 중요한 분야이다. 따라서 본 실험에서는 청자상감운학문매병을 재현한 실험용 도자기를 대상으로 과학적 분석과 영상 분석을 실시하였다. 청자상감운학문매병은 13세기 후반 상감청자의 대표적인 작품으로, 상감청자는 철분이 2~3% 들어있는 태토로 그릇의 형태를 만든 다음, 어느 정도 마르면 태토 표면에 나타내고자 하는 무늬 또는 그림을 파고, 그 자리에 백토 또는 자토로 메꾼다. 그 표면에 역시 철분이 1~3% 들어 있는 유약을 발라 환원 소성하면 백토는 회색, 자토는 검게 나타나 투명한 청자유를 통하여 상감무늬가 보이게 만든 청자를 말한다<sup>[2]</sup>. 상감기법은 비색청자의 전성시대에 병행하여 나타났으며, 상감청자의 발전단계는 고려왕조나 불교사원 등의 요청에 따라 기면에 글자나 범자 등을 나타내는 소위 문자상감이 시대의 요구에 따라 아름다운 모양을 한 상감청자로 발전하였고, 도자에서 이 시공법은 중국에 없는 고려의 독특한 것이라고 한다<sup>[2], [3]</sup>. 과학적 분석은 청자상감운학문매병 재현편의 제작 재료 4종과 제작 단계별 도자기 6점 등 총 10종을 대상으로 하였다. 영상 분석에서 CT촬영은 재현편의 제작 단계별 도자기 6점으로 실시하였다. 청자상감운학문매병의 성형 → 조각 → 상감 → 초벌 → 시유 → 재벌의 단계별로 물리화학적 특성을 분석하여 특징적인 객관적 데이터를 확보하고, 나아가 단계별 기물의 형상학적 특성 변화를 제시함으로써 실제 도자기 제작기술에 대한 재료학적 변화 매커니즘을 밝히는데 기여하고자 하였다.

## 2. 연구대상

### 2.1. 제작 재료

실험용 청자상감운학문매병 재현편은 한국전통문화대학교 전통미술공예학과에서 제작하였다. 제작 재료는 태토, 문양을 새기는데 사용한 백상감과 흑상감, 유약인 청자유 등 총 4종이다. 분석 대상 시료의 원료는 표1과 같고, 시료 사진은 도1과 같다.

표1. 청자상감운학문매병 재현편 제작 재료의 원료 및 배합비율

구분	원료 및 배합비율
태토	송추요업 무균열 청자토 : 고려도토 K1 = 8 : 2
백상감	카올린 : 와목점토 : 규석 = 1 : 1 : 0.2
흑상감	구매(대원도재)
청자유	장석 : 규석 : 석회석 : 카올린 : 산화철 : 와목점토 : 물토 = 9.67 : 32.3 : 58 : 2.33 : 1.67 : 12 : 113.33

			
태토	백상감	흑상감	청자유

도1. 청자상감운학문매병 재현 도자기의 제작 재료

## 2.2. 재현 도자기

청자상감운학문매병 재현품의 제작 단계는 총 6단계로 구분되며, 태토를 물레로 성형한 ‘성형편’, 성형 후 문양을 조각한 ‘조각편’, 조각에 상감을 넣은 ‘상감편’, 상감 작업 후 초벌한 ‘초벌편’, 초벌 후 유약을 바른 ‘유약편’, 유약을 바른 후 재벌한 ‘재벌편’으로, 시료 사진은 도2와 같다.

		
성형편	조각편	상감편
		
초벌편	유약편	재벌편

도2. 청자상감운학문매병 재현편의 제작 단계별 도자기

### 3. 연구방법

#### 3.1. 과학적 분석

도자기 제작에 사용된 재료와 재현도자기에 관한 육안 관찰 후 표면의 특성을 휴대용 현미경(DG-3, Scalar, Japan)과 실체현미경(SMZ800N, Nikon, Japan)으로 촬영하였다. 색차는 원료 내 함유되어 있는 물질의 특성을 알 수 있고, 소성편에서 표면색은 원료 물질의 화학조성과 소성환경에 의해 영향을 받기 때문에 색 정보를 통해 소성도 및 소성환경을 비교할 수 있다. 모든 시료의 외면 색도는 자연건조 후 휴대용 색채색차계(CM-700, Minolta, Japan)로 측정하였다. 측정 시 오차를 줄이기 위하여 3회 측정 후 평균값을 사용하였다. 측정 결과는  $L^*$ (명도),  $a^*$ (녹색-적색),  $b^*$ (황색-청색)로 표시하는 CIE LAB 색공간을 이용해 도시하였다.

태토의 공극과 관련하여 도자기의 물리적 성질을 비교하기 위해 겉보기비중 및 부피비중, 흡수율, 겉보기기공률을 측정하였다. 태토만의 물리적 성질을 측정하기 위해 표면의 요철과 오염물을 연마하여 제거한 후 105℃에서 24시간 이상 완전 건조시킨 무게  $W_1$ 을 구하고, 이것을 증류수 속에서 24시간 이상 침적시킨 후 무게  $W_2$ 와 수중 무게  $W_3$ 을 측정한 다음 아래와 같은 식에 의해 겉보기비중 및 부피비중, 흡수율, 겉보기기공률을 구하였다. 측정은 정밀전자저울(GR-200, AND, Japan)과 비중측정용 키트(AD-1653, AND, Japan)를 이용해 실시하였다.

$$\begin{aligned} \text{겉보기비중} &= \frac{W_1}{W_1 - W_3} & \text{부피비중} &= \frac{W_1}{W_2 - W_3} \\ \text{흡수율}(\%) &= \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 & \text{겉보기기공률}(\%) &= \frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} \times 100 \end{aligned}$$

태토의 상태와 도자기에 존재하는 기공과 입자의 분포 및 크기, 색상, 광물상을 확인하고자 미세조직을 관찰하였다. 관찰을 위해 시료를 절단한 후 에폭시 수지에 고착시켜 연마기(Rotopol-11, Struers, Denmark)와 연마지 #500, #800, #1200, #2400, #4000을 순서대로 사용하여 단면을 연마하였다. 가공된 단면에 대하여 금속현미경(EPIPHOT200, Nikon, Japan)을 이용하여 층위 구성을 확인하였다. 광학현미경 관찰 후 표면을 금 코팅(SCR-20, Coxem, Korea)하여 주사전자현미경(FlexSEM, Hitachi, Japan)의 이차전자상(Secondary Electron Image)과 후반산란전자상(Backscattered Electron Image)으로 층위별 구성입자와 상태를 관찰하였다.

도자기 제작 재료와 재현 도자기의 구성광물과 소성온도 및 환경에 따른광물학적 특징을 확인하고자 시료의 일부를 분말화한 후 X-선회절분석기(Miniflex600, Rigaku, Japan)를 이용하여 결정구조를 분석하였다. 분석조건은 40kV, 15mA, 5°

$\sim 80^\circ$ , scan step  $0.02^\circ$ , scan speed  $1^\circ/\text{min}$ 로 하였다.

도자기의 성분은 10개의 주요성분 분석을 통해 재료의 특성을 비교하기 위해 제작 재료의 성분을 분석하였다. 주요성분은 파장분산형X-선형광분석기(MagiX, PANalytical, Netherland)를 이용하였다. 오염되지 않은 내면에서 시료 일부를 채취한 후 분말화하였으며, 시료와 용융제(Lithium Tetraborate)를 1:11의 비율로 혼합하여 백금도가니에 넣고 비드제작기를 이용하여 원판 형태의 비드(Bead)를 제작한 후 측정하였다. 분석은 기초과학지원연구원에 의뢰하였다.

### 3.2. 영상분석

육안으로 확인이 불가능한 도자기 내부 단면의 구성 및 결합을 확인하기 위해 CT 이미지를 분석하였다. CT촬영은 Bright 240 450 Dual CTR을 이용하였다. 분석 조건은 160kV,  $100\mu\text{A}$ , 정밀촬영 720장으로 상하 2회로 분할 촬영하였다. CT촬영은 (주)덕인에 의뢰하였다. CT촬영으로 얻어진 데이터는 이미지 뷰어 프로그램(Volume Graphics VGL)을 이용하여 상하좌우로 세부적인 위치별 단면상태를 확인하고 내부의 기공, 균열 등의 결합의 존재와 미세조직적 특징이 있는 부위를 선택하여 capture 이미지로 저장하고, 해석했다.

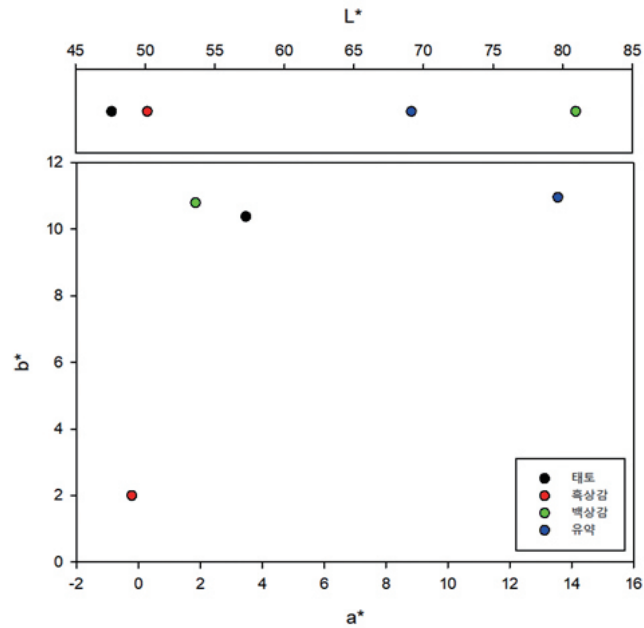
## 4. 연구결과

### 4.1. 과학적 분석

#### 4.1.1. 제작 재료

##### 4.1.1.1. 색도 측정결과

제작 실험재료의 색도측정 결과를 도3에 도시하였고, 표2에 측정된 색도값과 그에 따른 의사색상을 표시하였다. 태토와 흑상감은 명도( $L^*$ 값)가 유사하게 측정되었으며, 47.58, 50.15로 비교적 낮은 값을 보였으나 백상감의 명도는 80.93으로 비교적 높게 측정되었다. 흑상감과 유약의 채도값은 그래프 분포와 육안상 관찰한 색상이 서로 확연한 차이를 보인 반면, 백상감과 태토의 경우에는 채도( $a^*$ ,  $b^*$ 값)가 유사하게 측정되었으며, 의사색상의 차이는 채도보다는 명도에 의한 차이로 판단된다.



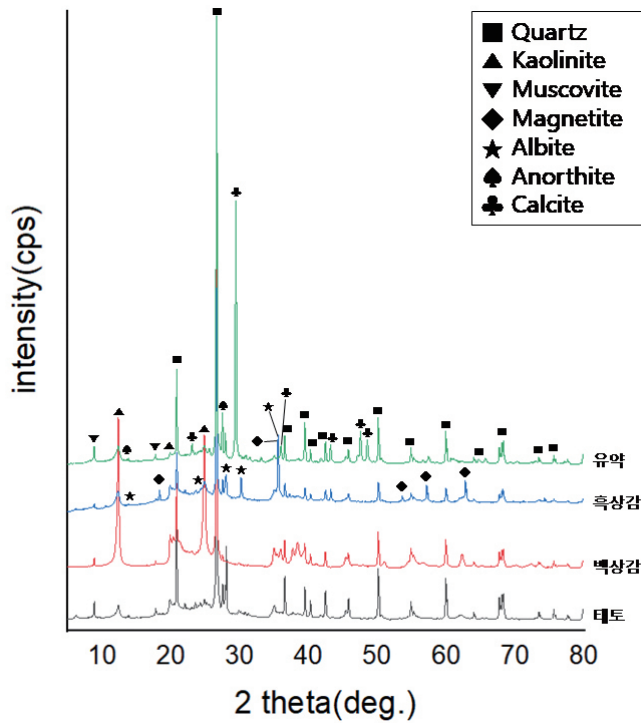
도3. 제작 재료의 색도 측정 결과 그래프

표2. 색도측정 결과표

구분		L*	a*	b*	색상
실험재료	태토	47.58	3.47	10.38	
	흑상감	50.15	-0.22	2.00	
	백상감	80.93	1.84	10.8	
	유약	69.13	13.56	10.96	

#### 4.1.1.2. 구성광물 분석결과

재현 도자기 제작에 사용된 재료인 분청토와 백상감, 흑상감, 유약의 주요구성광물을 분석한 결과, 석영(Quartz)과 카올리나이트(Kaolinite), 백운모(Muscovite)가 모든 재료에서 공통적으로 확인되었다<sup>(표3)</sup>. 카올린이 주요 원료인 백상감은 카올리나이트의 회절 피크 강도가 높게 나타난다. 흑상감에서는 자철석(Magnetite)이 확인되어 흑색 발색의 주요 요인으로 추정된다. 제작 원료 중 석회석의 함량이 높은 유약은 방해석(Calcite)과 회장석(Anorthite)의 회절 피크가 확인되었다<sup>(표4)</sup>.



도4. 제작 재료의 구성광물 분석결과

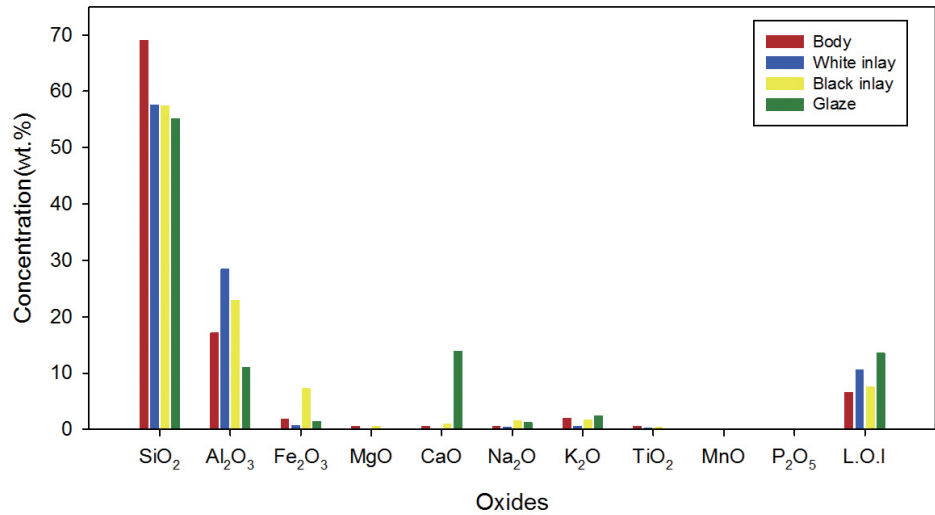
표3. 제작 재료 4종의 주요구성광물

구분	주요구성광물						
	석영	카올리나이트	백운모	조장석	자철석	방해석	회장석
태토	○	○	○	○			
백상감	○	○	○				
흑상감	○	○	○	○	○		
유약	○	○	○			○	○

4.1.1.3. 성분 분석결과

재현 도자기 제작에 사용된 재료인 태토와 백상감, 흑상감, 유약의 성분을 분석한 결과, 모든 재료에서 실리카( $\text{SiO}_2$ )와 알루미나( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )의 함량이 높아 도자기 원료 중 골격 성분(산성산화물:  $\text{RO}_2$ )과 안정제 성분(중성산화물:  $\text{R}_2\text{O}_3$ )이 대부분을 차지하는 것으로 나타났다<sup>(표5)</sup>. 재료별로 살펴보면, 태토는 실리카( $\text{SiO}_2$ )의 함량이 높았으며, 백상감은 흰색으로 알루미나( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )의 함량이 높다. 어두운 색의 흑상감은 착색산화물인 산화철( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )의 함량이 다른 재료에 비해 높다. 유약은 용융온도를 높

여주는 안정제 성분의 함량이 낮은 대신 용융제 성분(염기성 산화물:  $R_2O+RO$ )인 CaO가 높은 함량으로 나타났다<sup>(표4)</sup>.



도5. 제작 재료 4종의 주요 성분 그래프

표4. 제작 재료 4종의 WD-XRF분석 결과

구분	산화물 함량(wt.%)											Total
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	L.O.I	
태토	69.0	17.1	1.82	0.52	0.54	0.53	2.03	0.52	0.02	0.04	6.57	98.7
백상감	57.6	28.4	0.73	0.10	0.08	0.40	0.56	0.30	0.01	0.01	10.6	98.9
흑상감	57.4	22.9	7.22	0.52	0.92	1.46	1.63	0.36	0.08	0.02	7.52	100.0
유약	55.2	11.0	1.42	<LL**	13.9	1.19	2.44	0.06	0.02	0.00	13.6	98.7

\*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Total Fe

\*\*LL=Low Limit

#### 4.1.2. 재현 도자기

##### 4.1.2.1. 표면 관찰

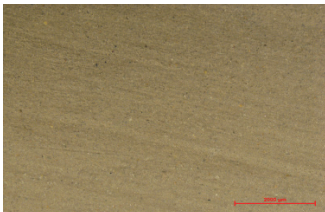
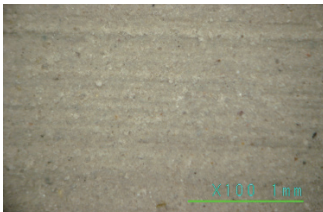


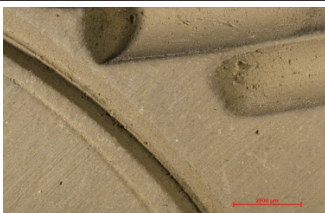

제작 단계별로 태토의 기질과 표면의 색상의 변화 특성을 표5에 제시하였다.


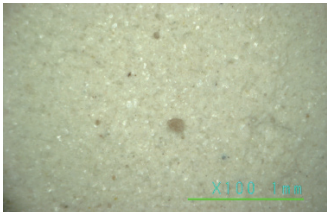
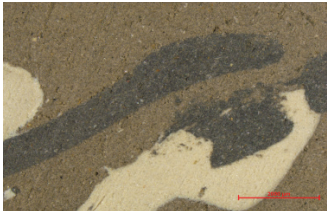
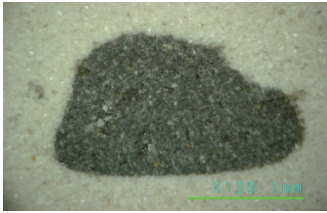
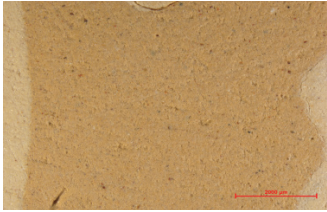
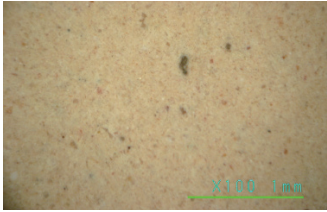
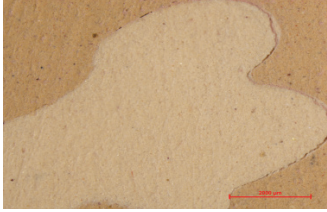
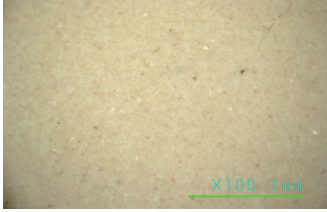
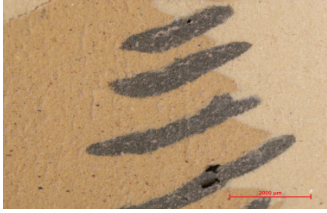
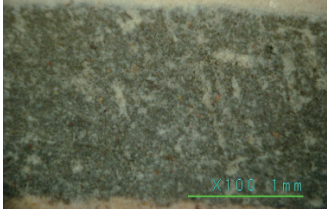
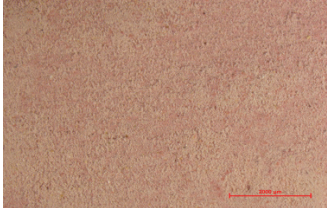
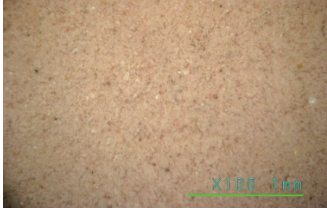
초별 소성 전의 기물인 성형 및 조각, 상감편은 태토의 기질이 곱고 일정하며, 광물 입자의 크기가 미세하여 수비과정을 통해 일정 입도 이하의 태토를 선별하여 사용한 것을 알 수 있다. 초별편은 성형편과 비교하여 태토의 색상이 짙은 갈색에서 황토색으로 변화하여 산화 환경에서 초별 구이로 인한 색상변화의 특징을 명확히 확인할 수 있다. 또한 백상감 부위는 미세한 붉은 입자들이 발견되고, 소성 전 상감

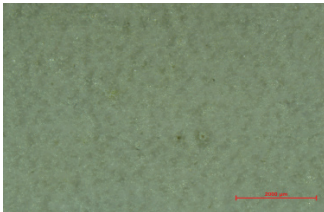
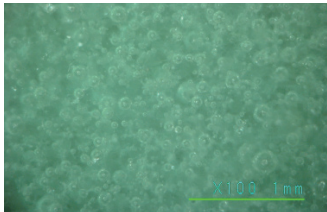
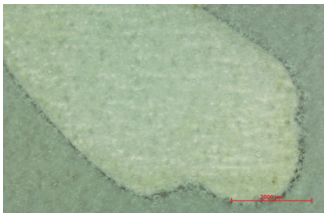
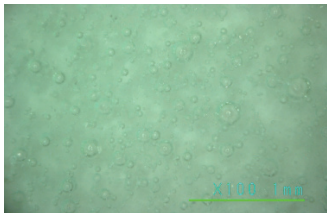
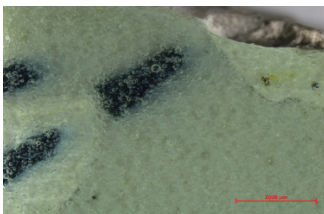
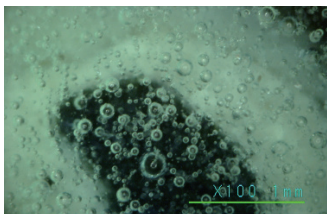


편과 비교하였을 때 흰색에서 연분홍색으로 변색하였으며, 흑상감 부분은 색상의 변화가 거의 없지만 표면에 불규칙한 균열이 확인되었다. 유약편은 표면이 전체적으로 분홍색을 띠고 있으며, 태토와 마찬가지로 기질이 곱고 일정하여 산화철을 함유한 정제된 유약이 사용되었다는 것을 알 수 있다. 재벌편은 유약층에서 전체적으로 다수의 기공이 관찰되며, 표면의 색상은 초벌편과 비교하여 황토색에서 비취색으로 변화되어 기물이 환원 환경에서 소성되었다는 것을 알 수 있다. 또한 백상감이 있는 부위는 초벌편과 비교하여 백색도가 다시 증가하여 흰색에 가깝게 변화하였으며, 흑상감 부위는 더욱 짙은 검은색으로 변화하였다. 이는 초벌편에서 관찰되었던 백상감과 흑상감에 포함되어 있던 다른 색상의 이물질이 모두 고온 소성으로 인하여 광물의 상변이가 발생하였기 때문으로 추정된다.

표5. 재현 도자기의 표면관찰 결과

구분		표면 관찰	
		실체현미경(x15)	디지털현미경(x100)
성형			
조각	1		
	2		

구분		표면 관찰	
		실체현미경(x15)	디지털현미경(x100)
상감	백상감		
	흑상감		
초벌	바탕		
	백상감		
	흑상감		
유약			

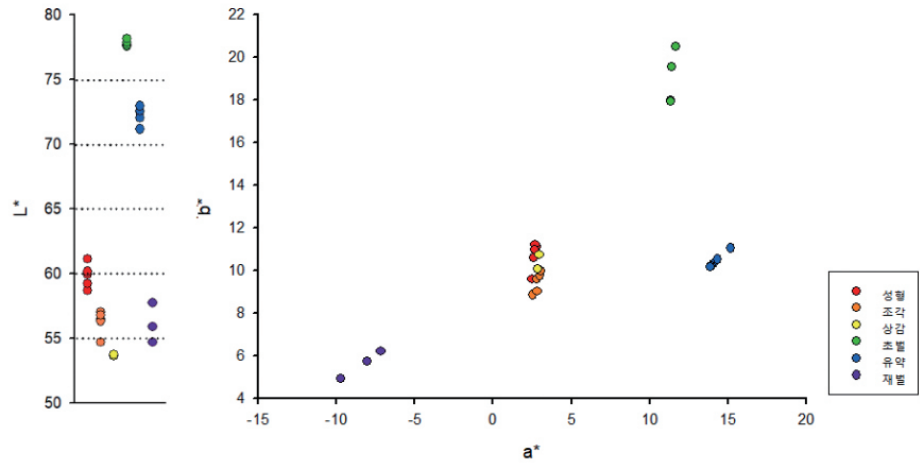
구분		표면 관찰	
		실체현미경(x15)	디지털현미경(x100)
재벌	바탕		
	백상감		
	흑상감		

4.1.2.2. 색도 측정

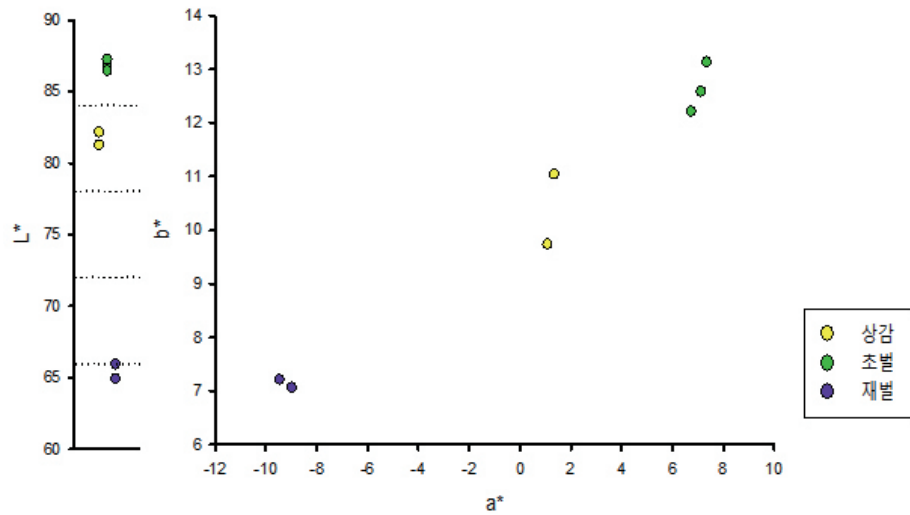
토기를 구성하는 토양은 소성과정을 거치면서 구성광물과 미세조직의 변화를 겪게 되고, 색과 흡수율, 기공, 강도 등 제작된 토기의 물성에 영향을 미친다<sup>[4]</sup>. 재현 도자기의 경우, 소성과정에 따른 기물의 색변화 및 물성은 중요한 분석 요소이다. 재현 도자기의 단계별 색도를 LAB 색공간에 도시하였고, 바탕 색상표는 표6에 제시하였다. 바탕색의 경우, 성형-조각-상감 단계까지는 색 변화가 거의 없으나 초벌 과정을 거치면서 명도( $L^*$ ) 값과 채도( $a^*$ ,  $b^*$ ) 값이 커졌다. 특징적으로 분홍색을 띠는 유약편은  $b^*$  값이 낮고  $a^*$  값이 다른 단계에 비해 가장 높게 나타났으며, 비취색을 띠는 재벌편은 다른 단계에 비하여 명도( $L^*$ ) 값과 채도( $a^*$ ,  $b^*$ ) 값이 가장 낮았다<sup>(56)</sup>. 또한 흑상감은 면적이 작아 색도 측정이 어려웠으나 백상감은 초벌 후 채도와 명도가 모두 높아졌다가 재벌 후에는 매우 큰 폭으로 낮아지는 것이 확인되었다<sup>(57)</sup>. 이는 태토의 색도 변화와 유사한 패턴을 보이며, 재벌 후에 색도가 큰 폭으로 변하는 원인은 비취색을 띠는 유약층이 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

표6. 단계별 재현품 바탕 색상표

성형	조각	상감	초벌	유약	재벌



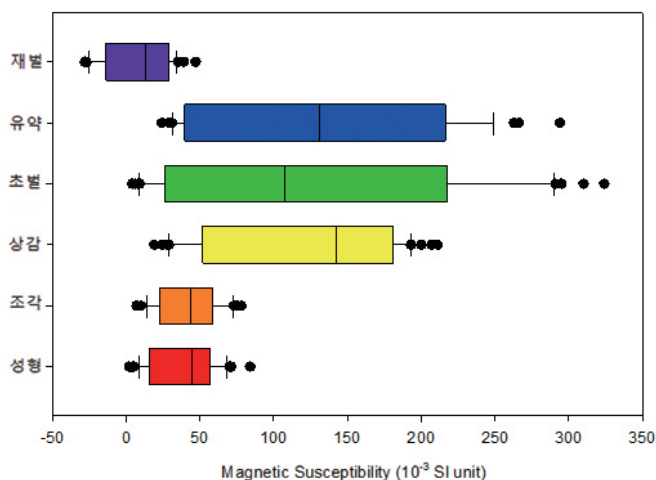
도6. 색도 측정 결과(바탕)



도7. 색도 측정 결과(백상감)

## 4.1.2.3. 전암대자율

도자기의 자화 강도는 구성 광물 중 자성 광물에 의해 나타나며, 소성 시에는 대자율 값이 변화할 수 있다. 예로 페리자성을 띠는 자철석은 산화 시 적철석으로 변하며, 550℃ 이상에서 자성을 잃는데 이러한 구성광물의 자성의 변화가 도자기의 자화강도에 영향을 미치게 된다. 따라서 상부에서 하부까지 단계 당 40포인트씩 전암대자율을 측정하여 도 8에 제시하였다. 그 결과, 성형 단계에서 평균 약 38.5, 표준편차 약 22.9, 조각 단계에서 평균 약 42.5, 표준편차 약 20.2, 상감 단계에서 평균 약 129, 표준편차 약 62.6, 초벌 단계에서 평균 약 125, 표준편차 약 100, 유약 단계에서 평균 약 134, 표준편차 약 89.3, 재벌 단계에서 평균 약 9.75, 표준편차 약 22.4로 측정되었다( $10^{-3}$  SI unit). 성형 단계의 재현품은 평균 6단계 모두 기물의 하부로 갈수록 전암대자율이 상승하는 경향이 있다. 상감 단계에서 약 129까지(약 87 이상 증가) 크게 상승한 뒤, 재벌 후 약 10까지 하락하며, 단계 중 최저치를 기록했다( $10^{-3}$  SI unit). 결과적으로 상감-초벌-유약 단계에서 철 산화물이 함유된 재료가 추가되고, 산화 환경으로 인해 생성되었다가, 970℃ 이상에서 환원소성을 시작하는 재벌단계에서 사라진 것으로 추정된다.



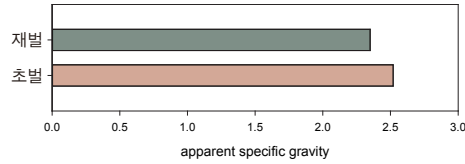
도8. 재현편의 전암대자율 결과

## 4.1.2.4. 비중, 흡수율 및 기공률

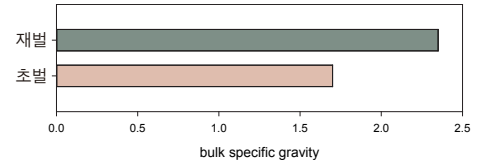
재현 도자기 중 초벌과 재벌 단계의 비중, 흡수율 및 기공률을 측정하고 비교하였다. 겉보기 비중은 초벌편 2.35, 재벌편 2.52의 유사한 값을 보였으며, 부피 비중의 경우에는 초벌편 1.70, 재벌편 2.35로 재벌편의 부피 비중이 더 크게 나타났다. 흡수율과 겉보기기공률 모두 초벌 단계가 재벌 단계에 비해 매우 높은 수치를 보이고 있



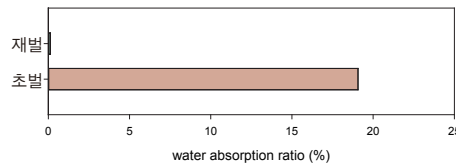
는데, 이러한 결과는 초벌 단계가 재벌 단계보다 낮은 온도에서 소성되어 유리질화가 진행되지 않았기 때문으로 판단된다<sup>(도9, 10, 11, 12)(표7)</sup>.



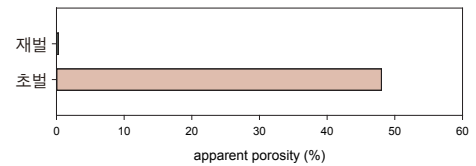
도9. 겉보기 비중 그래프



도10. 부피 비중 그래프



도11. 흡수율 그래프



도12. 겉보기기공률 그래프

표7. 재현 도자기의 비중, 흡수율 및 기공률 측정 결과

시료명	겉보기 비중	부피 비중	흡수율(%)	겉보기기공률(%)
초벌	2.52	1.70	19.07	48.02
재벌	2.35	2.35	0.13	0.30

#### 4.1.2.5. 단면조직 관찰 결과

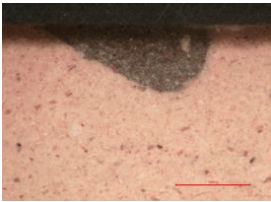
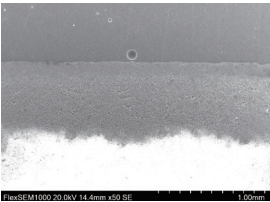
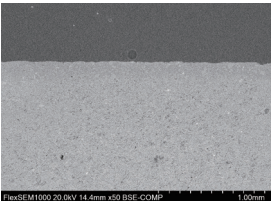
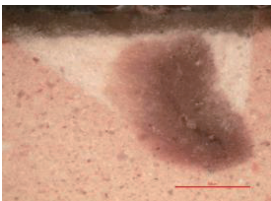
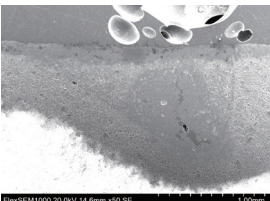
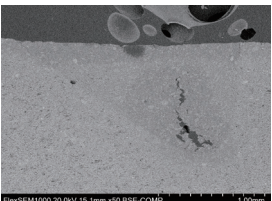
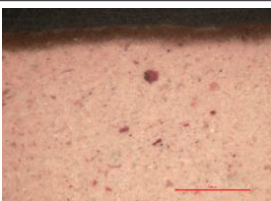
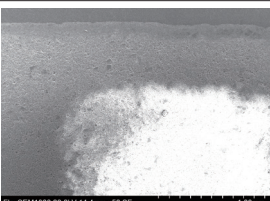
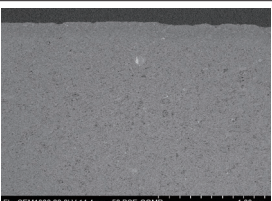
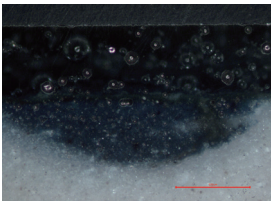
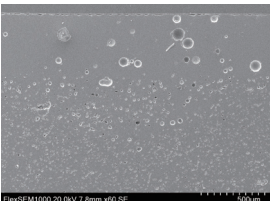
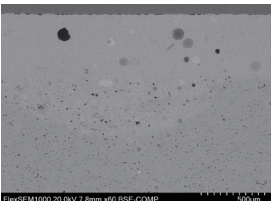
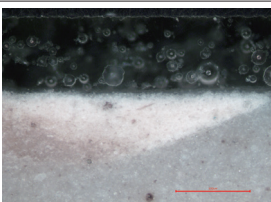
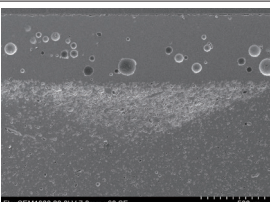
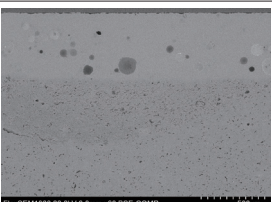
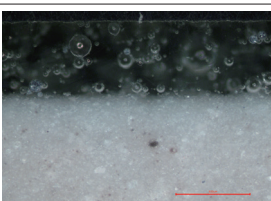
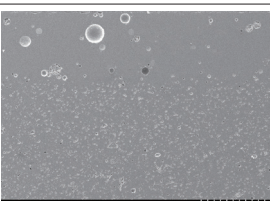
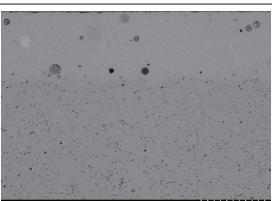
재현 도자기 중 초벌편과 재벌편의 단면조직을 관찰하고 그 특성을 표8에 제시하였다.

초벌편에서 태토의 색상은 밝은 적갈색을 띠며, 전반적으로 입자의 형상이나 분포가 균일하게 나타났다. 흑상감 부위는 표면 관찰에서 균일한 색상으로 보이지만, 단면 관찰에서는 적색이나 백색의 입자가 섞여있는 것을 볼 수 있으며, 주사전자현미경 상에서 태토와의 경계가 구분되지 않는 특징을 보인다. 반면, 백상감 부위는 중앙에 짙은 분홍색으로 형성된 부분이 존재하는데 이는 백상감의 원료가 태토와 차이를 보이기 때문이며, 주사전자현미경 관찰에서도 그 경계가 뚜렷하게 확인된다.

재벌편의 단면에서는 유약과 태토의 경계를 뚜렷이 구별할 수 있고, 초벌편에 비해 다수의 기포가 존재하며, 태토는 밝은 회색을 띠고 있어 고온의 환원 환경에서 소성되었다는 것을 알 수 있다. 또한 초벌편과 비교하였을 때, 상감 부위의 변화가 특징적으로 관찰되는데, 백상감은 백색도가 흰색에 가깝게 증가하였고, 주사전자현미경의 후방산란전자상(BSE)에서 태토와 상감부의 경계가 명확히 나타나 고온에서

광물의 상변이가 일어났음을 알 수 있다.

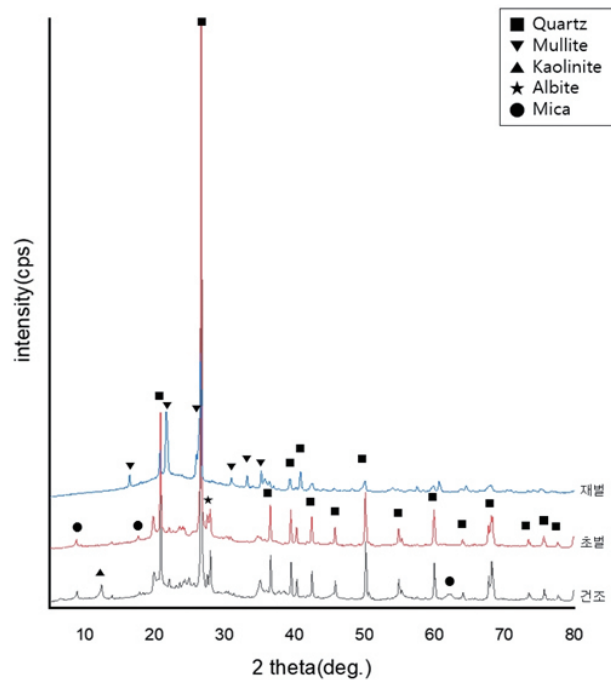
표8. 초벌 및 재벌편 도자기의 단면관찰 결과

구분		금속현미경(x50)	주사전자현미경(x50)	
			SE	BSE
초벌	흑상감			
	백상감			
	태토			
재벌	흑상감			
	백상감			
	유약			

#### 4.1.2.6. 구성광물 분석결과

재현 도자기의 결정구조를 분석하여 구성광물을 확인하였다. 도13은 재현실험의 성형, 초벌, 재벌 시편에 대한 결정구조분석 결과 그래프이며, 확인된 광물을 표9에 제시하였다. 성형편에서는 석영(Quartz), 운모류(Mica), 조장석(Albite), 점토광물이 확인되었고, 초벌편에서는 석영, 운모류, 알칼리장석, 재벌편에서는 석영과 물라이트(Mullite)가 동정되었다.

성형편에서 확인되었던 카올리나이트(Kaolinite)는 초벌편과 재벌편에서 확인되지 않았다. 석영과 운모 및 장석류는 성형편, 초벌편 모두에서 확인되었다. 하지만 성형편에서 결정화도가 좋게 나타난 석영, 운모 및 장석류는 초벌소성을 함에 따라 피크 양상이 변화되며, 강도 또한 점차 약해지는 것을 확인할 수 있다. 재벌편에서는 성형, 초벌편에서 확인되지 않는 물라이트의 피크가 검출되는 반면, 저온성 광물의 피크는 확인되지 않는 것을 알 수 있다. 이를 통해 소성온도가 상승함에 따라 저온성 광물의 피크는 점차 약해지다가 재벌편에서 소멸되고, 고온성광물이 생성되는 것을 확인할 수 있다.



도13. 재현도자기의 구성광물 분석결과



표9. 재현 도자기의 주요구성광물

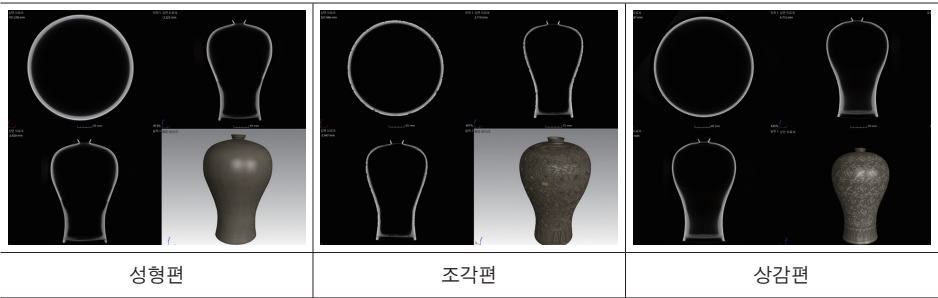
구분	주요구성광물				
	석영	운모류	물라이트	조장석	카올리나이트
성형	○	○		○	○
초벌	○	○		○	
재벌	○		○		

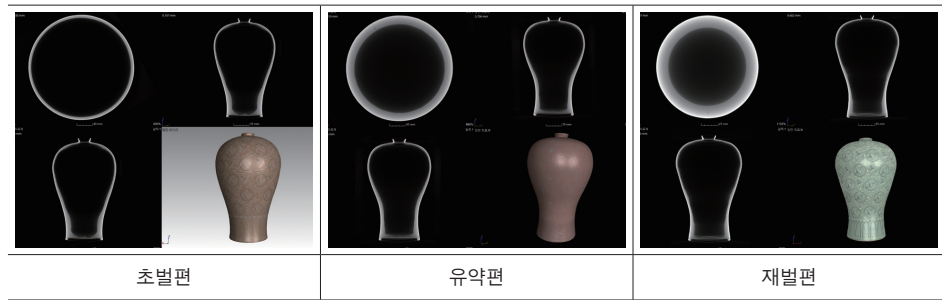
4.2. 영상분석

4.2.1. 단계별 기물의 전체형상 특성

청자상감운학문매병 재현편에 대해 단계별로 도자기 전체의 CT 형상 이미지를 비교 분석한 결과, 기물의 크기와 기벽의 두께에 따른 세부적인 변화 특성을 명확하게 판단하는 것은 한계가 있었다<sup>(도14)</sup>. 하지만, 성형에서 재벌까지 단계별 기물의 육안적인 특성 판단에 비해 전체적인 부피 수축현상을 수치로 측정하고 비교할 수 있는 장점이 있으며, 변형률에 대한 편향현상 등도 기계적으로 분석할 수 있었다.

기물의 단계별 특성 중에서 CT이미지를 구연부에서 굽바닥 방향으로 바라봤을 때, 물레 성형품의 특징인 내외벽의 원형도와 두께의 변화도를 보다 용이하게 판단할 수 있었다. 특히 굽 바닥에 가까운 저부에서는 물레 성형을 했음에도 불구하고 원형이 변형되어 타원형을 이루는 곳이 존재했으며, 이러한 작은 찌그러짐 현상도 이미지 분석을 통해 쉽게 파악할 수 있었다. 물론, 이러한 현상이 제작과정에서 형성된 도예작업의 특성일 수 있으나 커다란 기물이 성형이나 건조의 과정에서 상부의 무게와 기벽의 두께 차이 등 다양한 원인에 의해 발생된 것일 수도 있어 제작기법 연구와도 연관지을 수 있을 것이다.



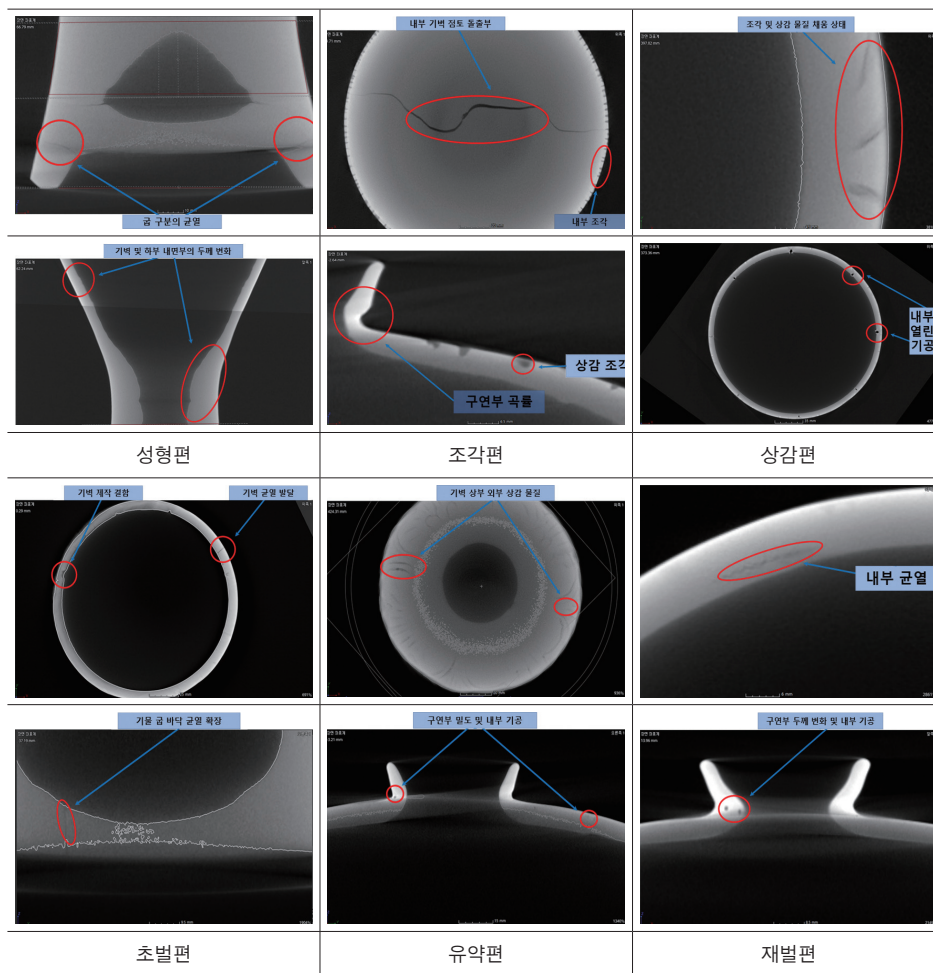


도14. 청자상감운학문매병 재현편의 제작 단계별 도자기 전체 CT 이미지

#### 4.2.2. 단계별, 부위별 기물의 세부형상 특성

청자상감운학문매병 재현편의 세부적인 CT 이미지를 통해, 제작단계별 기물 내외부의 태토와 유약 재료에 대한 특징적인 형상 변화를 살펴보았다(도15).

먼저, 성형 후 건조된 기물에서는 내부에 수분이 빠져나가 생긴 기공과 균열이 상대적으로 많고 밀도가 낮아 이미지에서 3차원적으로 미세조직과 결함을 쉽게 관찰할 수 있을 것으로 예상하였으나 오히려 균일한 특성을 보였다. 반면, 기벽이나 굽 바닥면에서 보여지는 다양한 표면 요철과 내면의 가공 상태는 보다 자세히 파악할 수 있었다. 조각된 기물에서는 상감문양의 위치와 각 위치별 조각의 깊이, 모양, 형태를 입체적으로 파악할 수 있었고, 모든 운학문이 기물의 표면에 같은 깊이로 조각되지 않은 것을 확인할 수 있었다. 반면에 상감된 기물에서는 오히려 조각의 깊이가 잘 관찰되지 않았으며, 외부에서도 조각의 형태를 알 수 없었다. 다만, 태토 물질과 상감 물질의 재료(밀도) 차이로 인하여 이미지에서 명암의 대비가 확인되어 이들 물질 간의 구분이 가능하였다. 초벌편 부터는 이전 단계의 기물에 비해 소성에 의한 기벽의 수축이 관찰되었고, 이는 기벽 위치별 밀도의 변화에 차이를 파악할 수 있었다. 또한 소성에 의한 찌그러짐의 정도와 연속된 파괴균열, 기벽의 선별적 수축 등을 명확하게 확인할 수 있었다. 유약편에서는 시유 후 육안으로는 판단이 불가능한 하부의 상감 문양과 형태, 기공이 초벌편에서와 같이 이미지상에서 명확하게 구분되었다. 마지막으로 재벌편에서는 내부에 불규칙하게 확장되어 존재하는 균열과 태토의 유리질화에 의해 발달된 기공을 쉽게 확인할 수 있었고, 특히 유약층과 태토 경계면의 미세조직 특성까지도 파악할 수 있었다.



도15. 청자상감운학문매병 재현편의 제작 단계별 도자기 세부 특성 이미지

## 5. 고찰 및 결론

본 연구는 도자기 제작 재료의 물리화학적 특성과 제작 과정에 따른 형상학적 변화 특성을 알아보기 위하여 실험용 청자상감운학문매병을 단계별로 제작하였고, 자연과학적 분석과 영상분석을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

기물의 제작 재료는 육안관찰과 색도에서 차이를 보였으며, 이는 구성광물의 재료학적 차이를 반영한다. 특히 도자기 재료의 주구성 광물은 석영과 카올리나이트, 백운모였고, 산화철( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )의 함량이 높은 흑상감과 알루미늄 함량이 높은 백상감은 특정 광물의 비율이 매우 높은 것을 알 수 있다.

재현된 도자기에서는 단계별로 재료의 변화와 제작기술의 특징을 과학적 데이터로 확인하고 비교분석할 수 있었다. 모든 기물의 표면은 태토의 기질이 곱고, 입자

의 크기가 일정하여 정선된 재료로 제작되었다는 것을 확인할 수 있었다. 색상 변화는 물질의 종류와 구성광물의 상대적인 비율에 의해 그 다양성이 단계별로 확인되었다. 산화환경에서 초벌구이 된 태토는 짙은 갈색으로 변화하고, 이후 환원환경 하의 재벌구이에 의해 회색을 띠었다. 이러한 변화는 백상감과 흑상감 부위에서도 관찰되었는데, 특징적인 것은 흑상감에 비해 백상감이 산화-환원환경에서 색상변화가 급격하게 일어났다는 것이다. 그러나 원재료와 비교했을 때, 재벌편의 단면관찰에서 태토와 흑상감, 청자유가 모두 산화철의 발색으로 인하여 색상 변화가 일어난 반면에 백상감은 원재료의 색상인 백색으로 다시 돌아오는 패턴을 보였다. 즉, 태토와 유약, 흑·백상감 물질의 주구성광물이 서로 다르고, 소성환경의 변화에 대한 민감도가 다르기 때문에 재료별로 제작 단계에 따라 다양한 패턴의 색상 변화를 가져오는 것으로 판단된다. 또한 철산화물의 함량이 높은 청자 재료의 특징 상 전암대자율 값의 변화가 확인되었는데, 상감-초벌-유약 단계에서 철산화물이 다량 함유된 흑상감과 청자유 등의 재료가 추가됨에 따라 기물에서 전암대자율 값이 증가하였다가 재벌편에서 다시 낮아지는 것으로 확인되었다. 이러한 변화 패턴은 환원소성으로 인한 철(Fe)의 상변화가 원인인 것으로 판단된다.

컴퓨터 단층촬영(CT, Computed Tomography) 이미지를 이용하여 각 단계별로 제작된 기물 전체의 형상학적 특성을 살펴본 결과, 기물의 부피수축률과 변형률, 변형형상 등을 기계적으로 수치화할 수 있는 장점이 있으며, 획득된 형상 정보를 활용하여 제작과정에서 개입될 수 있는 도공들의 제작기술이나 사용 도구 등과 연관된 다양한 연구에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 더욱이 세부 위치별 형상 정보는 소성 전과 소성 후로 대별하여 상감 조각의 깊이와 형태, 상감 물질의 압밀도 등 문양기법 정보를 획득할 수 있으며, 기공과 균열의 발달, 밀도의 변화 등 기본적인 태토의 물리적 정보를 이미지화하여 제공할 수 있다. 또한 사용재료와 단계별 피열 환경에 따라 수축률의 변화와 차이, 균열의 발달 방향, 유리질화의 정도와 분포 위치 등 다양한 미세조직학적 정보도 파악할 수 있어 도자기 제작과 자연과학적 분석연구에 시각화된 양질의 자료를 제공할 수 있는 특징을 가지고 있다. 이러한 형상 정보가 도자기의 경도나 강도, 포와송비 등 재료학적 정보와 연관지어 추가 해석될 수 있다면 보다 포괄적 데이터로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

결론적으로 재현 도자기의 제작실험에서 사용된 원료의 색도와 성분, 구성광물, 배합비율에 대한 물리화학적 기본 정보를 확보하고, 단계별로 완성된 기물에서 이들 기존 데이터가 어떻게 변화하는지를 연구하는 것은 실제 유물의 특성과 가치, 제작 당시 기술 등을 이해하는데 도움이 될 것이다. 나아가 이러한 과학적 데이터와 CT영상 정보를 비교 분석함으로써 추가적으로 얻을 수 있는 이점이 무엇인가

살펴보는 것은 도자기의 제작기법과 재료학적 특성을 파악하는 연구 분야에서 중요하다.

<사 사>

이 연구는 「2020년도 한국전통문화대학교 대학원 연구개발지원 사업」의 지원을 받아 수행되었습니다.

---

## 참고문헌

1. 윤용이, *한국도자사 고려청자의 이해*, p5-9, 명지대학교 미술사학과, 서울, (2007).
2. 국립기술품질원, 요업기술원, *전통도자기 제조기술 개발(1차년도 중간보고서)*, p23-25, 통상산업부, 서울, (1997).
3. 고유섭, *고려청자 우현 고유섭 전집 5*, p50-56, 열화당, 파주, (2010).
4. 장성윤, *문화재 과학적 분석-재질별 연구 사례*, p14, 국립문화재연구소, 대전, (2018).