백자 철화 인물형 명기의 염 손상 메커니즘 연구

Study on the Damage Mechanism by Salt of White Porcelain Figurine in Underglaze Iron

이선명^{1,*}, 진흥주², 윤지현², 권오영³

¹국립문화재연구소 복원기술연구실, ²국립문화재연구소 보존과학연구실, ³국립문화재연구소 문화재보존과학센터

Sun Myung Lee^{1,*}, Hong Ju Jin², Ji Hyeon Yun², Oh Young Kwon³

¹Restoration Technology Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 34122, Korea

²Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 34122, Korea

³Cultural Heritage Conservation Science Center, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 34122, Korea

Received September 09, 2020
Revised September 24, 2020
Accepted September 28, 2020

*Corresponding author

E-mail: choro13@korea.kr

Phone: +82-42-860-9348

Journal of Conservation Science
2020;36(5):368-382

<https://doi.org/10.12654/JCS.2020.36.5.07>

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 백자 철화 인물형 명기는 전시 후 철수하는 과정에서 염 손상이 확인되었다. 이 연구에서는 유물의 보존방안을 마련하기 위해 염 손상 상태를 분석하고 재질 특성과 전시환경을 검토하여 손상 메커니즘을 파악하였다. 명기 표면에 결정화된 탄산염(Na_2CO_3)은 수용성 알칼리염으로 흡습성이 높고 물에 잘 용해되며 온도가 상승할수록 용해도가 증가한다. 재질 분석 결과, 명기는 1000℃ 부근에서 소성된 저화도 백자로 연유(鉛釉)가 시유되었고 유약 면에는 빙렬이 있어 표면 물성이 취약한 상태였다. 전시환경 분석 결과, 공조기 가동에 따라 환경제어가 되는 전시실에 비해 진열장 내부는 온·습도가 높은 환경에 노출되면서 결로 등 수분환경 조성이 예측되었다. 또한 공조기 가동과 중단에 따른 급격한 온·습도 변화에 노출된 것을 확인하였다. 이를 통해 명기 내 잔류한 수용성 염이 온도 변화에 따라 상대적으로 취약한 부위인 유약층 표면 쪽으로 이동하고 건조환경에서 수분이 증발함에 따라 염의 결정화 압력 작용하여 표면 손상이 가중된 것으로 판단된다.

중심어 백자 철화 인물형 명기, 탄산염, 염 손상, 연유(鉛釉), 전시환경

ABSTRACT It was confirmed that a white porcelain figurine in underglaze iron was damaged after exhibition. This study analyzes the current state of salt damage on the artifact and identifies the factors contributing to its deterioration by examining the material characteristics of the artifact and exhibition environment. The analysis will thus assist in preparing a conservation scheme for artifacts. The crystallized carbonate on the surface of the white porcelain figurine is a water-soluble alkali salt with high hygroscopicity and high solubility in water. This solubility increases as the temperature increases. The figurine was low-fired at approximately 1000℃. A lead glaze was applied, and thin cracks were formed on the glazed surface, indicating poor surface properties. Our analysis suggested that the showcase used in the exhibition likely created a moist environment resulting from condensation, as it was exposed to high temperature and relative humidity, particularly in comparison to the exhibition room where the temperature was regulated using an air conditioner. In addition, the artifacts in the showcase were exposed to sudden changes in temperature and relative humidity as the air conditioner was repeatedly turned on and off. Therefore, it can be deduced that the soluble salt remaining on the white porcelain figurine moved toward the surface of the relatively weak glaze as a result of the temperature, and the crystallized salt exacerbated surface damage as the moisture evaporated in a dry environment.

Key Words White porcelain figurine in underglaze iron, Lead glaze, Carbonate, Salt damage, Exhibition environment

1. 서론

명기(明器)는 순장의 풍습 대신 생겨난 조상숭배 사상으로 피장자와 함께 묻힌 사람이나 동물 대신에 인물·동물형 그리고 그릇 등 다양한 형태의 기물을 만들어 무덤에 넣은 것을 말한다(Choi, 1988). 명기는 시대에 따라 사용된 재료, 기술, 생활양식의 차이 등으로 종류와 형태에 변화를 나타내는데 삼국시대에는 토기류가 다양하게 확인되고 고려시대에는 거의 알려지지 않은 편이며 조선시대에는 자기류가 대부분을 차지하고 있다.

이중 조선시대 명기는 종류와 형태가 다양할 뿐 아니라 수량도 많아서 명기라고 하면 조선시대 명기를 일컬을 정도이다. 조선시대 명기는 백자로 된 것이 많은데 이는 14~16세기 조선백자의 기술 발달사와 연관 지어 볼 수 있다. 명기는 고려 말 유입된 성리학으로 인해 유교적 예제(禮制)가 국가 운영의 기반으로 활용되면서 성립되고 발전하여 조선사회 전반에 뿌리내리게 되었다. 따라서 명기는 성리학적 발달과정과 그에 상응하는 예제의 변화에 영향을 받으며 양식적 변화를 나타낸다(Lee, 2000; Jang, 2010).

백자 철화 인물형 명기는 부산시립박물관 소장유물이다. 이 유물은 두발이나 복식의 조각표현, 유약의 시유상태 및 태토의 질과 굽 받침 등을 바탕으로 17세기 후반의 것으로 평가되어 조선시대 다른 인물형 명기와 비교자료로서 가치가 있다. 그러나 최근 3개월간의 전시를 위해 대여되었으며 전시 종료 후 진열장에서 유물을 철수하는 과정에서 염에 의한 손상을 확인하면서 유물의 안정화를 위해 보존상태 진단 및 보존처리의 필요성이 제기되었다.

도자기, 토기, 석재 등과 같은 다공성 유물에서 수용성 염은 다양한 유입경로를 가지며 백화현상을 통한 미관적 손상과 함께 물성 붕괴를 초래하는 중요한 손상 요인 중 하나이다. 일반적으로 염은 온도의 변화와 수분의 영향을 수반하는 것으로 수화에 따른 부피팽창, 결정화에 따른 부피팽창, 대상 재질과의 차별적 열팽창 등으로 손상을 가중시킨다(Winkler, 1994).

염이 침투하면 염의 용해도 차이와 주변 환경의 영향으로 유물 표면에 결정화(efflorescence)되거나 내부로 이동하여 결정화(subflorescence)된다(Kim and Park, 1999). 이중 내부에서 일어나는 결정화는 박리, 박락 등 표면의 주요 손상 요인으로 유약을 바른 도자기의 경우 치밀한 조직의 유약층과 다공성 조직의 태토층 경계부분에서 염이 결정화되면서 응집력을 잃고 표면 손상이 가해질 수 있다(Jang *et al.*, 2009).

도자기, 토기 등과 같은 유물의 염 손상은 국내외 모두

해수에 기인한 염에 관한 연구가 대부분을 차지한다. 손상 염의 종류와 상태에 대한 분석, 염을 제거하기 위한 탈염 방법과 탈염효과에 대한 조사 연구, 보존처리 등을 들 수 있다(Olive and Pearson, 1975; Lee, 1981; Freedland, 1999; Moon *et al.*, 2004; Jang *et al.*, 2009; Nam *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2010; Zomoza-Indart *et al.*, 2011). 또한 매장환경에 따른 다양한 염의 유입 가능성과 제조 당시 유물의 조성 조건에 따른 물리적 상태에 따라 염 손상 정도가 다르며 이에 따른 탈염 조건이 제시되어야 한다는 연구도 보고된 바 있다(Jang *et al.*, 2011; López-Arce *et al.*, 2013).

한편 국외에서는 박물관에 전시 및 보관된 석회질 도자 유물이 진열장에 사용된 목재와 각종 접착제, 표면 마감용 페인트 등 전시재료에서 방출되는 유기산 성분에 의해 calcite($\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})\text{Cl} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), thecotrichite ($\text{Ca}_3(\text{CH}_3\text{COO})_3\text{Cl}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 등 다양한 acetate salts가 결정화되어 물리적 손상이 가해진 사례도 보고된 바 있다(Linnow *et al.*, 2007; Boccia Paterakis and Steiger 2015; Bette *et al.*, 2017). 이처럼 전시공간은 다양한 전시기법을 적용하여 연출되고 관람객이 출입하는 곳으로 수장공간에 비해 복합적이고 다변화되는 환경에 노출될 가능성이 크다. 그러나 다른 유물에 비해 도자기 토기류 유물은 소성물로 비교적 환경변화에 안정한 것으로 인식되어 손상에 대한 인지와 사례연구가 다른 재질에 비해 상대적으로 미진한 실정이다.

본 연구에서는 전시과정에서 염 손상이 발생한 백자 철화 인물형 명기를 대상으로 손상 요인을 해석하기 위해 염의 종류와 손상특성을 분석하였다. 또한, 유약과 태토 등 구성재질 분석과 전시 환경에 대한 영향을 검토하여 전반적인 염 손상에 대한 메커니즘을 분석하고자 하였다. 이 자료는 염 손상에 대한 보존과학적 진단 연구로, 염 손상 유물의 보존방안을 마련하는데 기초자료가 될 뿐만 아니라 전시 및 보존환경을 관리하는 데 있어 중요한 사례연구로 활용될 수 있을 것이라 기대한다.

2. 연구대상 및 방법

2.1. 연구대상

조선시대 백자 명기는 대부분 사대부를 비롯한 극히 소수의 계층이 사용하였던 부장품으로 크게 기명형(器皿形)과 인물형·마형(人物形·馬形)으로 구분할 수 있다. 특히 백자 인물형 명기는 16세기 전반에 이르러 사대부 계층으로 발단, 확산되면서 16세기 중반에는 전성기를 나타낸다. 따라서 섬세한 조각수법이나 철채장식을 통한 공

수표현, 복식표현에 신중함이 엿보이나 광해군(1608-1623)때 부터 임란의 여파로 백자 제작의 기술적 제반 요소에 타격이 가해지면서 명기의 양상 또한 서서히 쇠퇴한다. 조형적 면에서는 표현이 간략화, 패턴화 된다. 유색은 탁해지고 시유상태가 고르지 않으며 빙렬이 많은 특징을 보이는 등 유약과 태토의 질이 저하되고 바닥은 굵은 모래 받침으로 변조한 양상이 보인다(Lee, 2000).

백자 철화 인물형 명기(이하 명기)는 인마형 명기 9점 일괄 유물 중 1점으로 높이 83.5 mm, 무게 57.1 g이다 (Figure 1A). 조각 수법, 태토 및 유약의 시유상태 등을 통해 조선 시대 후기의 것으로 편년 된다. 인물형 명기는 공수한 자세의 여자상으로 얼굴과 머리는 형태에 맞추어 적당히 성형하고 얼굴의 눈, 코, 입과 머리에 덧대는 가채(加髹), 공수한 부분을 철채(鐵彩)하였다. 태토는 잡물이 섞인 석고와 같은 모습을 보이고 유약층은 얇은 편이며

표면에는 빙렬이 있다. 가채 부분의 가장자리의 경우 일부 시유상태가 양호하지 않은 모습을 보인다. 바닥에는 유약이 없고 굵은 모래받침 흔적이 확인된다(Figure 1B).

이 명기는 일괄 유물 중 인물형 명기들과 함께 전시되었으나 전시 종료 후 철수하는 과정에서 두상 부분의 앞·뒷면이 태토를 묻고 유약층이 박락된 것을 확인하였다. 따라서 보존처리를 통한 유물의 안정화가 시급한 상태로 유물의 보존처리 방안을 마련하기 위해 보존상태 진단 및 손상 요인에 대한 분석이 필요하였다.

2.2. 연구방법

이 연구에서는 백자 철화 인물형 명기를 대상으로 염 손상 상태 분석, 재질특성 분석, 전시환경을 분석하고 이를 바탕으로 염 손상 메커니즘을 해석하였다.

Figure 1. Shape and features of the white porcelain figurine. (A) White porcelain figurines in underglaze iron with human and horse shape(provided by the Busan Museum), (B) Shape and feature.

2.2.1. 염 손상 상태 분석

명기의 표면 염 결정화 현상과 손상 상태를 조사하기 위해 실체현미경 관찰을 실시하였다. 이를 위해 사용된 기기는 휴대용 현미경 DG-3(Scalar, JPN)과 Stemi 2000C(Carl Zeiss, DEU)이다. 또한 손상된 유물의 내·외부 구조 및 손상 상태를 파악하기 위해 고분해능 X-선 미세단층 촬영장치(CT, Computed Tomography) X-eye 7000B(SEC, KOR)를 이용하여 획득된 디지털 영상을 분석하였다. 촬영 조건은 120 kV · 0.7 mA · 1 sec, average 2, projection 720회이다.

염 결정으로 인해 표면에서 박락된 미세 편을 시료로 수습하고 주사전자현미경을 사용하여 염 결정에 대한 미세조직 및 반정량적 성분분석을 하였다. 활용 기기는 에너지 분산형 성분분석기(X-MAX^N, Oxford, GBR)가 부착된 Jeol사의 JSM-IT300(JPN)이다. 분석용 시료는 표면 코팅을 하지 않고 탄소 테이프로 고정 후 15 kV, Probe Current 60, Working Distance는 10 mm 조건 하에서 분석하였다.

염의 이온성분을 파악하기 위해 이온크로마토그래피(Ion Chromatography, Dionex ICS-3000, ThermoFisher, USA) 분석을 실시하였다. 이를 위해 표면에 결정화된 염과 박락된 편을 수습하여 증류수에 6시간 정도 침지 후 여과지로 걸러내고 염 용출액을 준비하였다. 분석조건은 셀 온도 35℃, 컬럼 온도 30℃, 시료 주입량은 10 µL로 설정하였다. 음이온 컬럼은 Dionex AS15-5 µm, AG15-5 µm를 양이온 컬럼은 Dionex CS12A-5 µm, CG12A-5 µm를 이용하였다. 분석 전 스탠다드는 0.1 ppm, 1 ppm, 4 ppm, 8 ppm, 16 ppm을 분석해 검량선을 작성하였다. 일반적으로 이온크로마토그래피에서는 탄산이온이 분석되지 않으나 이번 분석에서는 탄소성분에 대한 파악을 위해 IC 장비 내에 탄소제거장치를 제거한 상태에서 분석을 진행하였다.

2.2.2. 구성재질 분석

구성재질을 분석하기 위해 표면 성분조성을 비파괴적으로 분석하였다. 사용된 장비는 미소부 X-선 형광분석기(Micro-XRF, Eagle 3-XXL, EDAX, Inc., USA)로 장비 내 진공 후 40 kV, 400 µA, spot size는 300 µm에서 200초간 분석하였다. 분석 결과는 태토와 유약층 각 부분별 3번씩 분석해 평균값을 산출하였다.

표면에서 태토를 물고 박락된 미세 편 중 재접합이 어려운 미세편을 시료로 확보하여 현미경 조사를 실시하였다. 이를 위해 에폭시수지를 이용하여 마운팅 시편을 만들고 폴리싱 작업을 한 후 유약층 및 태토에 대한 미세조

직을 실체 및 반사현미경과 주사전자현미경으로 관찰하였다. 사용된 실체현미경 및 주사전자현미경은 위에서 언급한 바와 같고 반사현미경은 DMRBE(Leica, DEU)이다.

또한 명기의 조성 광물을 분석하기 위해 X-선 회절분석(XRD)을 실시하였으며 분석에 사용된 장비는 Empren(PANalytical, NED)이다. 사용된 X-선은 CuKα, 전압과 전류는 45 kV, 40 mA이며, 5°~60° 2θ 구간에서 주사간격 0.02°로 설정하여 연속스캔 방식으로 회절 값을 기록하였다.

2.2.3. 전시환경 분석

전시환경 분석을 위해 해당 전시실에서 전시기간(2018년 5월 4일~8월 26일) 중 관람시간(09:00~18:00)내 2시간 간격으로 현장에서 측정된 데이터를 제공받아 분석하였다. 그러나 현장에서 단편적으로 측정된 데이터로는 전시환경을 면밀히 파악하기 어려웠다. 따라서 전시관 내에서 명기가 전시된 곳과 유사한 지하공간이면서 전시실과 유물 진열장에서 연속적으로 수집한 온도 습도 데이터를 다시 확보하였다. 제공받은 전시환경 데이터는 외기환경 데이터와 함께 분석하여 명기 손상에 전시환경이 어떤 영향을 미치는지 유추하는데 활용하였다.

외기 및 전시환경 데이터는 2018년 6월 2일부터 8월 27일까지 1시간 간격으로 수집된 온·습도 데이터를 사용하였다. 해당 지역의 외기는 기상청에서 제공하는 지역별 AWS 관측자료를 활용하였다. 전시환경 온·습도 측정에 사용된 데이터 로거는 ±0.5℃, ±2%의 정밀도와 0.1℃, 0.1%의 분해능을 가진 177-H1(Testo, DEU)이다.

3. 연구결과

3.1. 염 손상 상태 분석

명기는 일부에서 유약층 빙렬의 이격이 뚜렷하고 빙렬 사이에 오염물이 침착된 모습을 보였다(Figure 2A). 빙렬 사이에는 흰색 염이 침상으로 결정화된 모습을 보이고 두상의 앞·뒷면의 경우 태토와 유약층의 경계면에서 염 결정이 석출되면서 유약 면이 들뜨거나 표면 박락을 촉진시킨 것을 알 수 있다(Figure 2B~2E). 두상의 가장자리인 가체 부분은 철채되었고 시유상태가 양호하지 않다. 따라서 채색층이 드러난 채로 흰색 염 결정의 성장과 함께 채색층이 박락되어 안쪽 태토가 노출되는 등 물리적으로 취약한 상태였다(Figure 2F).

유물의 내·외부 구조 및 손상 상태를 파악하기 위해 C·T 촬영 영상을 확인한 결과, 태토와 유약층에서 뚜렷

한 명암차이를 보였다. 표면 유약층의 경우 저부에 비해 두상과 공수한 부분에서 유약면의 밀도가 낮아 불안정한 상태를 보이는 것으로 표면 염 손상에 기인한 결과로 판단된다(Figure 3A, 3B, 3D, 3F). 측면의 단면 영상을 살펴본 결과(Figure 3C), 태토 내 곳곳에서 제작과정에서 생성된 공극이 확인되는 것으로 일부 바닥면 쪽에는 직경이 약 3 mm에 달하는 내부 결함이 관찰되었다. 또한 내부 중앙부분에서 높이 56.2 mm, 바닥면 지름 5.7 mm, 꼭대기

지름 0.6 mm을 보이는 원뿔 형태의 홀이 확인되는 것으로, 점토 성형과정에서 지지대로 붕괴 같은 도구를 사용하고 바닥면의 구멍은 점토로 메운 흔적을 알 수 있다. 이 같은 내부 구조를 통해 제작방법과 결함 등을 파악하였다.

염 결정에 의해 박락된 미세 편을 주사전자현미경으로 분석한 결과, 표면은 유약층이 깨지고 태토가 드러난 것을 알 수 있다(Figure 4A). 태토를 묻고 있는 안쪽에는 염

Figure 2. Salt damage condition of the white porcelain figurine. (A) Crack extension and contaminant deposition, (B) Crystallized salt in the thin cracks on the glaze surface, (C, D, E) Exfoliation of glaze layer by crystallized salt, (F) Exposure of clay by salt damage.

Figure 3. CT (Computed Tomography) image of the white porcelain figurine. (A) Front side, (B) Left side, (C) Side of the vertical section, (D) Back side, (E) Right side.

이 기둥 모양을 형성하고 있고 기둥의 단면을 고배율로 관찰한 결과, 비정형의 입자들이 얹히고 설켜 있는 것을 알 수 있다(Figure 4B~4D). 성분 분석 결과, 주요 구성원소가 Na 21.5 wt.%, C 78.5 wt.%를 나타내 흰색 염이 NaCl 결정이 아님을 확인하였다(Table 1). 염 성분을 좀 더 명확하게 규명하기 위해 염을 물고 박락된 미세편을 증류수에 침지한 용출액을 이온크로마토그래피 분석하였다. 이 결과, 용매로 사용된 증류수 대비 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , F^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} 이온이 검출되었고 이중 Na^+ 과 CO_3^{2-} 이 다른 이온에 비해 높은 용출함량을 나타냈다(Table 2). 이를 통해 명기의 표면 곳곳에서 보이는 염은 탄산염 중 하나인 Na_2CO_3 로 판단하였다.

3.2. 구성재질 분석

명기의 손상 요인을 해석하기 위해서는 구성재질에 대한 이해가 필수적이다. 유약층 표면과 유약층의 박락으로 드러난 태토를 대상으로 비파괴적으로 X선 형광분석을 실시하여 구성 성분을 분석하였다(Figure 5A~5C). 이 결

과, 태토에서는 Si 41.3 wt.%, Na 27.8 wt.%, Al 16.3 wt.%, K 8.6 wt.%, Fe 2.3 wt.%, Ca 1.5 wt.%, Ti 1.2 wt.%, 이 검출되고 그 외 Mn, Zn, Pb, Zr은 1 wt% 미만을 나타냈다(Figure 5D).

전반적으로 일반적인 점토 성분이 확인되나 Na의 함량이 높은 것은 손상이 진행된 표면에서 염의 주요 성분이 상대적으로 높게 측정된 것으로 해석된다. 태토 성분 중 Fe, Mn, Ti과 같은 발색 원소 성분이 일반적인 백자의 함량보다 높은 편으로, 육안 및 현미경 관찰에서 확인된 바와 같이 양질의 백자에 비해 태토 내 불순물이 많은 것을 알 수 있다(Ahn and Hwang, 2013; Lee and So, 2017).

유약층은 태토에 비해서 Ca, Pb, Zr의 함량이 높았다. 이중 유약 내 용융제 성분인 Ca은 10배 Pb는 80배 정도 높았다. Zr은 보통 현대에서 도자기의 백색도를 높이기 위해 불투명화제(유백제)로 사용되는 것으로 태토 대비 약 4배 정도 높은 함량을 나타냈다. 이를 통해 명기의 유약층은 백색 점토를 기본 재료로 납산화물을 용제로 한 연유(鉛釉)가 사용된 것을 알 수 있다. 철채된 부분은 상대적으로 Fe의 함량이 높아 산화철을 채색 안료로 사용

Figure 4. Exfoliated micro sample SEM image by salt damage. (A) Surface micro-structure of glaze layer, (B, C) Pillar-shaped salt, (D) Sectional crystal structure of salt.

한 것을 확인하였다.

유약층 및 태토를 실체 및 반사현미경으로 관찰한 결과(Figure 6A, 6B, 6D, 6E), 유약층의 두께는 약 200 μm 내외로 얇은 편이며 균열이 확인되었다. 태토와 유약층의 경계면에는 공극이 밀집된 모습을 볼 수 있다. 태토는 유백색의 점토질 바탕에 석영과 장석류 등의 미세 광물이 확인된다. 부분적으로 광물이 자화되어 유리질화된 모습을 보이거나 전반적으로 기질이 치밀하지 않고 염 손상에 의해 물리적으로 취약한 상태를 나타냈다(Figure 6C, 6F).

명기에서 박락된 미세 편 중 접합이 불가한 편은 X-선 회절분석을 실시하여 태토를 구성하는 광물조성을 분석하고 구성광물의 상변이 과정을 추정하여 대략적인 소성 온도 범위를 추정하였다. 분석 결과, 장석, 석영이 주를 이루고 고온생성 광물인 멀라이트의 회절선이 검출되었

다(Figure 7). 이를 통해 장석이 멀라이트로 전환되는 과도기의 온도 즉, 약 940~1000 $^{\circ}\text{C}$ 부근에서 소성되었을 것으로 추정하였다(Kim *et al.*, 2009; Woo *et al.*, 2014).

3.3. 전시환경 분석

명기가 전시된 곳은 휴관일(매주 월요일)을 제외하고 전시실을 상시 개방하고 있으며 개방 시 쾌적한 관람환경을 조성하기 위해 관람시간인 오전 9시에서 오후 6시까지 공조기를 가동하였다. 명기가 있는 전시실은 건물 구조상 지하 1층에 해당하고 전시실 내 비공조식 밀폐형 진열장에 다른 토기 유물과 함께 전시되었다. 진열장 내부에는 별도로 습도를 조절하는 조습제는 없었다(Figure 8A).

손상된 명기의 전시 전과 종료 후 손상 정도를 고화질

Table 1. Result of the SEM-EDS analysis for crystallized salt

Point		Component (wt.%)								
		C	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Total
1	clay	58.6	9.5	0.4	7.9	20.8	2.5	-	0.2	99.9
2		55.1	8.5	0.7	9.2	23.1	2.7	0.8	-	100.1
3		62.5	11.6	1.8	6.6	15.6	1.6	-	0.4	100.1
Mean value		58.7	9.9	1.0	7.9	19.8	2.3	0.8	0.3	100.0
4	salt	78.4	21.7	-	-	-	-	-	-	100.1
5		79.2	20.6	-	-	0.1	-	-	-	99.9
6		77.9	22.2	-	-	-	-	-	-	100.1
Mean value		78.5	21.5	-	-	0.1	-	-	-	100.0

Table 2. Ion components in elution solution for salt

Sample	Cation (ppm)				Anion (ppm)			
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	NO ₂ ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻
Elution solution	15.73	1.09	0.04	0.34	0.51	0.07	0.89	15.29
Distilled water	-	-	-	-0.19	-	-	-	-3.54

Figure 5. Result of surface nondestructive X-ray fluorescence analysis for the white porcelain figurine.

Figure 6. Microscope images of clay and glaze layer for the white porcelain figurine. Optical microscope image (A), reflecting microscope image (B) and scanning electron microscope image (C) of clay and glaze layer. Optical microscope image (D), reflecting microscope image (E) and scanning electron microscope image (F) of clay and underglaze iron layer.

이미지로 비교한 결과, 두상의 유약층이 다른 부분에 비해 병렬 사이가 확대된 상태에서 오염물 침적되고 유약층이 일부 벗겨진 모습을 보였다(Figure 8B, 8C). 명기는 유약층이 박락되기 전부터 주요 손상부위의 표면 물성이 취약한 상태를 보이는 것으로 표면 손상이 촉진된 원인을 파악하기 위해 수집된 전시환경 데이터를 분석하였다.

전시 기간 중 공조기가 가동되는 관람 시간의 온습도

환경 분포를 살펴본 결과, 명기가 전시된 전시실(Room 5)은 평균적으로 온도 23.2°C(17.0~27.6°C), 습도 56.2%(42.0~64.2%)를 기록하였다. 이는 전시관 내 다른 전시실에 비해 온도가 평균 0.7~1.6°C 정도 낮고 습도는 평균 1~3% 정도 높은 수치로 지하 공간의 특성을 확인할 수 있다(Table 3).

Figure 7. Result of X-ray diffraction analysis for the white porcelain figurine.

Figure 8. Exhibition environments and main damage condition of the white porcelain figurine. (A) Exhibition room and showcase, (B) Before and after damage to the front of the head, (C) Before and after damage to the back of the head.

Table 3. Comparison of temperature and relative humidity for each exhibition rooms

Classification (N = 570)	Temperature (℃)					Relative humidity (%)				
	Room 1	Room 2	Room 3	Room 4	Room 5	Room 1	Room 2	Room 3	Room 4	Room 5
Min	17.2	17.4	17.6	17.5	17.0	43.8	42.7	39.4	41.6	42.0
Max	28.2	28.0	28.8	29.0	27.6	64.2	64.2	64.5	64.3	64.2
Mean±SD	23.9±1.9	24.0±1.8	24.8±2.0	24.8±2.0	23.2±1.6	55.2±3.9	54.5±4.1	53.3±4.4	53.2±4.4	56.2±4.0

Room 1: 1st floor including basement floor, Room 2: 1st floor, Room 3: second floor, Room 4: second floor, Room 5: basement floor(display place of the white porcelain figurine)

Data collection period: May 4~Aug. 26, 2018

Table 4. Daily mean temperature and relative humidity of exhibition room and showcase

Classification (N = 87)	Temperature (℃)			Relative humidity (%)			Precipitation (mm)
	Room 2	Showcase	Outdoor	Room 2	Showcase	Outdoor	Outdoor
Min	23.5	22.7	20.9	39.8	55.4	57.1	0
Max	28.4	28.3	31.5	59.0	65.4	93.9	151.9 (8.23, typhoon Soulik)
Mean±SD	25.6±1.1	25.1±1.6	26.4±3.2	47.6±5.5	60.5±2.5	75.7±8.1	432.8 (accumulation amount)

Data collection period: June 2~Aug. 27, 2018

Location of data logger: Room 2

Figure 9. Daily mean temperature and relative humidity distribution of exhibition room and showcase.

전시 기간 중 외기 대비 전시실과 진열장 내 온·습도 환경변화를 살펴보기 위해 명기가 전시된 전시실과 유사한 지하 공간이면서 전시실과 진열장 내에서 연속적으로 온습도 데이터가 수집된 다른 전시실(Room 2)의 전시환경을 분석하였다. 외기는 계절과 일기에 따라 온·습도가 급격하게 변화하나 전시실과 진열장 내부는 비교적 안정된 경향을 보인다. 특히 전시실과 진열장은 공조기 가동과 중단에 따라 환경 분포를 달리하여 전시공간 안에서도 환경적 특성에 차이를 나타냈다(Table 4, Figure 9).

전시실과 진열장 내 온·습도 환경을 면밀히 살펴보기 위해 6월 2일부터 8월 27일까지 1시간 간격으로 기록된

2,088개의 온·습도 데이터 변화를 살펴보았다(Table 5, Figure 10). 전시실의 경우 온도가 22.5~28.9℃의 범위로 평균 25.6℃, 진열장은 21.2~29.2℃의 범위로 평균 25.1℃를 기록하였다. 이를 통해 일기에 영향을 받아 전시실과 진열장의 기온분포가 유사한 변화 경향을 보이나 진열장의 온도 편차가 전시실에 비해 미세하게 큰 모습을 알 수 있다.

7월부터는 외부 기온이 점차 상승하면서 전시실과 진열장의 온도도 상승하는 모습을 보였다. 특히 진열장 내부 온도는 전시실에 비해 낮은 분포를 보였으나 8월에 들어서면서 높은 분포를 나타냈다. 전반적으로 전시실의 온

Table 5. Hourly temperature and relative humidity of exhibition room and showcase

Classification (N=2,088)	Temperature (℃)			Relative humidity (%)		
	Room 2	Showcase	I/O	Room 2	Showcase	I/O
Min	22.5	21.2	1	35.8	53.1	1.3
Max	28.9	29.2		62.9	67.8	
Mean±SD	25.6±1.3	25.1±1.8		47.6±5.9	60.5±2.7	

I/O: Inside (showcase) and outside (exhibition room) environmental factor ratio of the showcase

Data collection period: June 2~Aug. 27, 2018

Location of data logger: Room 2

Figure 10. Hourly temperature and relative humidity distribution of exhibition room and showcase.

도는 공조 운영에 바로 영향을 받지만 진열장은 밀폐된 별도의 보존공간으로 일정 시간이 지난 후에 외부의 온도를 수렴하는 것을 알 수 있다. 이로 인해 전시실과 진열장 내부가 동 시간대에 4~6℃의 온도 차이를 기록하였다.

습도는 전시실이 35.8~62.9%의 범위로 평균 47.6%, 진열장은 53.1~67.8%의 범위로 평균 60.5%를 나타냈다. 전시실은 7월에 들어서면서 40~50%의 습도 분포 내에서 규칙적인 변동률을 나타내는 것으로 공조 운영으로 습도가 제어되는 모습을 볼 수 있다. 반면 진열장의 경우 꾸준히 60% 대를 일정하게 유지하다 7월 이후부터 ±5~10%의 편차로 변동률을 보이며 전시실에 비해 높은 습도 환경이 조성되는 것을 알 수 있다.

명기가 전시된 곳은 공조기의 가동 여부에 따라 전시실과 진열장 공간 내 온도 차이가 발생하고 있다. 8월부터는 진열장 내부의 습도 분포가 60%를 상회하는 상태에서 공조 운영에 따라 전시실 온도가 낮아지고 상대적으로 밀폐된 공간인 진열장 내부의 온도가 높은 분포를 보이는 데, 이 같은 환경이 조성되면 진열장 안쪽 유리면 또는 유물 표면의 온도가 공간 내 이슬점보다 낮아지면서 표면에 결로가 발생 될 수 있다. 실제 전시실과 진열장 내부 온도 차가 4~6℃를 나타내는 것으로 진열장 일부에서 결로 등 수분 공급이 이루어질 수 있다.

여기에 전시가 종료되기 직전인 8월 23에는 해당 지역이 태풍 솔릭의 영향권에 들면서 2018년 1일 강수량 최고 기록(151 mm)을 경신 했다. 또한 공조기 가동이 2일간 중단되면서 외기에 영향을 받아 전시실과 진열장 내부 온·습도가 상승하는 것을 볼 수 있다. 일정 시간 이후 공조기가 다시 가동되었지만 공조기 운영에 따라 전시실과 진열장 내부의 온·습도가 급격히 변화하면 유물의 보존상태에 충분히 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.

4. 고 찰

유물의 염 손상 양상과 정도는 염의 종류, 재질특성, 주변 환경에 의해 좌우되는 것으로 염 손상 상태 분석과 함께 구성재질 및 전시환경에 대한 검토가 필요하였다.

유물 표면에서 확인된 흰색 염 결정은 성분 및 이온 분석 결과, 탄산염 중 하나인 Na_2CO_3 으로 확인하였다. Na_2CO_3 은 보통 소다 또는 탄산소다라고도 부르는 것으로 무수물은 백색 분말의 흡습성이 강한 소다화이며 1수화물($\text{NaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Thermonatrite), 7수화물($\text{NaCO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, Heptahydrate), 10수화물($\text{NaCO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)이 알려진다. Na_2CO_3 무수물은 물에 잘 녹고 수용액은 알칼리성을 나타내는 것으로, 실제 염 용출액을 pH 시험지로 산성도를 살펴본 결

과, pH 10를 나타냈다.

명기의 태토는 성분분석 결과, Fe, Ti, Mn의 함량을 통해 불순물이 많은 저품질의 태토임을 알 수 있다. 또한 구성광물 분석 결과, 장석류, 석영이 주를 이루고 멀라이트가 곳곳에서 검출되어 1000℃ 부근에서 소성된 것으로 추정하였다. 유약은 연유가 사용되었으며 유약층에는 빙렬이 형성되어 있다. 일반적으로 저온 소성된 자기류는 기공이 크고 흡수율이 높아 매장환경에 따라 다량의 염이 더 쉽게 유입될 수 있다(Jang *et al.*, 2011). 여기에 표면에 발린 연유는 낮은 온도에서 용융되고 광택이 좋은 편이나 유약의 경도가 비교적 낮아서 작은 충격에도 잘 견디지 못하며 화학적 안정성도 떨어지는 것으로 알려져 있다(The Academy of Korean Studies, 2020). 이를 통해 명기는 일반적인 백자에 비해 견고하지 않고 태토내 공극, 유약층의 기본 물성과 빙렬로 인한 결함 등이 복합적으로 작용해 표면 물성이 취약한 재질임을 알 수 있다.

Na_2CO_3 은 NaCl에 비해 결정화 압력이 낮은 편이나 1수화물과 7수화물 모두 석재나 도토기와 같은 소성물에서 결정화될 시 CaSO_4 에 준하는 결정압력으로 물리적 손상을 가할 수 있다(Table 6). 실제 인형 명기 표면에 석출된 수용성 알칼리염(Na_2CO_3)은 흡습성이 높고 물에 잘 용해되며, 온도가 상승할수록 용해도가 증가한다.

전시환경을 분석한 결과, 진열장 내부는 공조 운영 따라 전시실과 별도의 미세 환경적 특성을 나타냈다. 조습제와 같이 별도의 습도제어가 적용되지 않은 상태에서 진열장 내부는 60% 내외의 습도가 유지되었고 공조기 운영 여부에 따라 전시실과 진열장과의 온도차이가 4~6℃가 발생하였다. 8월에는 공조기 가동에 따라 환경이 직접적으로 조절되는 전시실에 비해 진열장 내부는 온·습도가 높아지면서 결로 등 수분이 유입될 수 있는 환경이 조성되었을 것으로 예측되었다. 특히 전시 종료 직전에 태풍의 영향권에 든 상태에서 공조기의 가동이 일정 기간 중단되는 등 명기가 급격한 환경변화에 노출되었다.

이를 통해 일반적인 백자에 비해 물성이 상당히 취약한 명기 내부 및 표면 곳곳에 잔류해 있던 수용성 염이 수분이 유지된 상태에서 환경변화에 따라 공극 및 결함이 밀집된 유약층 표면 부위로 이동되고 건조환경에서 결정화되면서 표면 손상이 가중된 것으로 판단된다.

진열장은 전시유물의 직접적인 보존공간으로, 대부분 밀폐형 방식을 사용한다. 진열장은 기밀 성능이 우수할수록 환경제어 효율이 높으나 시간이 지남에 따라 외부의 온·습도 환경을 수렴하게 된다. 따라서 아무리 성능이 좋은 진열장이라도 유물을 손상 없이 안전하게 전시하기 위해서는 진열장 내에 조습제와 같은 환경을 조절할 수

있는 방법이 적용되어야 한다(Kim and Oh, 2003). 토기, 도자기류는 소성물로 다른 유물에 비해 재질이 안정하다고 인식되는 경향이 있다. 그러나 본 연구에서와 같이 물성이 약하거나 가용성 염이 잔류한 경우 환경변화에 의해 손상이 촉진될 수 있으므로 전시 및 보관 시 유물상태 점검과 함께 환경관리에 각별히 유의해야 할 것으로 보인다.

그렇다면 명기에 손상을 가한 염은 어디서 왔는지를 몇 가지 관련 자료를 토대로 추정해 보았다. 조선시대 백자 명기는 당시 적어도 사대부를 비롯한 극히 소수의 계층이 사용하였던 부장품이었다(Lee, 2012). 또한 백자 명기가 출토되는 분묘 양식은 대부분 회곽묘로, 묘제에 따른 매장환경에 기인한 것으로 가정해 볼 수 있다. 매장상태에서 토기 및 도자기류는 공극을 통해 유입된 수분 및 이온과 평형상태를 유지하지만 출토 후 건조환경에 놓이면서 내부에 남아있던 염이 결정화되면서 표면에 압력을 가할 수 있다(Jang *et al.*, 2011).

명기는 조선시대 후기 명기로 매장 출토 유물이다. 개인 소장품을 박물관에서 매입한 것으로 정확한 출토이력을 확인하기 어려운 실정이다. 그러나 조선시대 백자 명기 대부분이 회곽묘에서 출토되었다는 자료를 토대로 가정해보자면 명기가 회곽묘에 매장될 당시 오랜 기간 알칼리 환경에 노출되면서 염이 유입될 수 있고 출토 이후 잦은 환경변화에 노출되면서 잔류해 있다 급격한 환경변화

에 노출되면서 손상이 촉진된 것으로 추정할 수 있다. 염의 기원과 유입경로는 대략적으로 추정할 수는 있으나 대상이 유물로 시료를 채취하는 정밀 분석이 어렵고 정확한 매장환경과 관리 이력을 알 수 없는 제한적인 상황에서는 명확하게 규명하는데 어려움이 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 백자 철화 인물형 명기의 염 손상 메커니즘을 파악하기 위해 염 손상 상태 및 종류를 파악하고 구성재질 분석 및 전시환경을 분석하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

1. 명기는 표면 유약층이 취약한 두상 및 가슴의 빙렬 사이에서 토양 오염물이 침적되고 흰색 염이 결정화된 모습을 보였다. 두상의 가장자리 일부에서는 채색안료 및 태토가 드러나 있고 두상의 앞·뒷면에서는 염이 결정화된 상태에서 유약 면이 들뜨거나 박락된 상태이다. 염 결정에 의해 박락된 미세 편을 성분 및 이온 분석한 결과, 탄산염 중 하나인 Na_2CO_3 로 수용성 알칼리염으로 확인되었다.

2. 명기의 구성재질을 분석한 결과, 태토는 불순물이 많은 저품질 점토가 사용되었고 연유(鉛釉)가 시유된 것

Table 6. Crystallization pressure of some salts (Winkler, 1994)

Salt	Chemical formula	D ^{a)} (g/cm ³)	Mw ^{b)} (g/mol)	Mv ^{c)} (cm ³ /mol)	Crystallization pressure (atm)			
					C/C _s ^{d)} = 2		C/C _s = 10	
					0℃	50℃	0℃	50℃
Anhydrite	CaSO ₄	2.96	136	46	335	398	1120	1325
Bischofite	MgCl ₂ · 6H ₂ O	1.57	203	129	119	142	397	470
Dodecahydrate	MgSO ₄ · 12H ₂ O	1.45	336	232	67	80	222	264
Epsomite	MgSO ₄ · 7H ₂ O	1.68	246	147	105	125	350	415
Gypsum	CaSO ₄ · 2H ₂ O	2.32	127	55	282	334	938	1110
Halite	NaCl	2.17	59	28	554	654	1845	2190
(Heptahydrate)	Na₂CO₃ · 7H₂O	1.51	232	154	100	119	334	365
Hexahydrate	MgSO ₄ · 6H ₂ O	1.75	228	130	118	141	395	469
Kieserite	MgSO ₄ · H ₂ O	2.45	138	57	272	324	910	1079
Mirabilite	MgSO ₄ · 10H ₂ O	1.46	322	220	72	83	234	277
Natron	MgCO ₃ · 10H ₂ O	1.44	286	199	78	92	259	308
Tachhydrite	2MgCl ₂ · CaCl ₂ · 12H ₂ O	1.66	514	310	50	59	166	198
Thenardite	Na ₂ SO ₄	2.68	142	53	292	345	970	1150
Thermonatrite	Na₂CO₃ · H₂O	2.25	124	55	280	333	935	1109

a) D: Density, b) Mw: Molecular weight, c) Mv: Molar volume, d) C/C_s: the actual concentration of the solute during crystallization / the concentration of the solute at saturation.

을 확인하였다. 또한 1000℃ 부근에서 소성된 저화도 백자임을 알 수 있었다. 즉, 명기는 저온 소성 백자로 태토 내 기공률 및 흡수율이 높은 상태이고 물리적 및 화학적 안정성이 떨어지는 연유가 시유되어 유약층이 약한 상태였다. 여기에 유약면이 병렬이 결합으로 작용하는 등 여러 요인이 복합적으로 작용하여 표면 물성이 취약한 재질임을 알 수 있다.

3. 명기가 전시된 곳의 전시환경을 분석한 결과, 진열장은 전시실과 달리 60% 내외로 습도가 유지되었고 공조 운영에 따른 전시실과 진열장과의 온도 차이가 4~6℃가 발생하는 등 각 공간별 미세 환경에 차이를 보였다. 8월에 들어서면서 공조 운영에 따라 온·습도 환경 제어가 되는 전시실에 비해 진열장 내부 온·습도 분포가 전시실에 비해 높은 수치를 보이면서 결로 등 진열장 내 수분환경 조성의 가능성이 예측되었다. 또한 공조기의 가동과 중단에 따른 급격한 온·습도 변화에 노출되는 등 전시환경이 유물에 스트레스를 가할 수 있는 가능성이 확인되었다.

4. 명기 표면에 결정화된 탄산염(Na_2CO_3)은 수용성 알칼리염으로 흡습성이 높고 물에 잘 용해되며 온도가 상승할수록 용해도가 증가한다. 따라서 진열장 내 수분환경이 조성되면 인물형 명기 내 잔류한 수용성 염은 온도변화에 따라 용해도를 달리하며 상대적으로 취약한 부위인 유약층 표면쪽으로 이동할 수 있다. 이때 염은 다양한 수화물 형태로 존재하며 수화압을 형성하고 건조환경에서는 수분이 증발되면서 유약층 표면의 결합부를 따라 염이 결정화되면서 표면 손상을 가중시킨 것으로 판단된다.

5. 토기, 도자류는 소성물로 금속, 지류, 직물, 목재와는 달리 환경변화에 민감하지 않은 안정화된 재질로 여겨진다. 대부분 외부 충격에 의한 파손이 많은 것으로 조사, 연구, 전시 시 취급 주의에 치중되어 있다. 실제 전시공간 내에서 다른 재질에 비해 진열장 내부의 습도 제어가 별도로 적용되지 않는 경우도 많다. 그러나 본 연구의 대상과 같이 다공성 태토 및 물성이 취약한 유약층을 가진 유물은 염이 유입되면 환경 변화에 의해 물리적 및 화학적 손상이 가중될 수 있다. 따라서 유물을 오랜 기간 안전하게 보존·관리하기 위해서는 유물의 재질특성 및 취약부위를 확인하고 주기적으로 유물과 주변 환경 상태를 점검하는 것이 중요하다.

사 사

이 연구는 국립문화재연구소 문화유산조사연구(R&D) 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사한다.

REFERENCES

- Ahn, S.Y. and Hwang, H.S., 2013, Study of material characteristics by a componential analysis on the whiteware from the kiln of Chiljeon-ri, Bangsan-myeon, Yanggu-gun. *Journal of Conservation Science*, 29(3), 261-277. (in Korean with English abstract)
- Bette S., Eggert, E., Fischer, A., Stelzner, J. and Dinnebie, R.E., 2017, Characterization of a new efflorescence salt on calcareous historic objects stored in wood cabinets: $\text{Ca}_2(\text{CH}_3\text{COO})(\text{HCOO})(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. *Corrosion Science*, 132, 68-78.
- Boccia Paterakis, A. and Steiger M., 2015, Salt efflorescence on pottery in the Athenian Agora: A closer look. *Studies in Conservation*, 60(3), 172-184.
- Choi, H.R., 1988, A study of Myunggi(burial object), Korea. *Journal of East Asian Cultures*, 14, 67-92. (in English abstract)
- Freedland, J., 1999, soluble salt in porous materials : evaluating effectiveness of their removal. Mater Thesis, University of Pennsylvania, Philadelphia, 14-21.
- Jang, N.W., 2010, Meaning and organization of burial craftworks in the Joseon Dynasty: Based on the burial goods from civilian tombs in Seoul and Gyeonggi area. *Journal of Art History*, 24, 109-136. (in English abstract)
- Jang, S.Y., Nam, B.J., Park, D.W., Kang, H.M. and Jung, Y.H., 2009, A study on the soluble salt and deterioration of ceramics from Taean Shipwreck. *Conservation Studies*, 30, 189-202. (in English abstract)
- Jang, S.Y., Nam, B.J., Park, D.W. and Yu, J.E., 2011, Influence of burial environments on excavated ceramics. *Journal of Conservation Science*, 27(4), 441-450. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.Y. and Oh, M.D., 2003, Analysis of dynamic humidity control characteristics of museum showcase with adsorption material. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 15(12), 1070-1077. (in English abstract)
- Kim, R.H., Lee, S.M., Jang, S.Y. and Lee, C.H., 2009, Interpretation of firing temperature and material characteristics of the potteries excavated from the Nongseori site in Giheung, Korea. *Journal of Conservation Science*, 25(3), 255-271. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.H., 2000, A study on the Baekja-Myong Gi of the Chosŏn Period. Master thesis, Hong-ik University, Seoul, 1-24. (in Korean with English abstract)
- Lee, S. S., 1981, Conservation treatment of pottery excavated under the sea. *MUNHWAJAE*, 14, 110-118.
- Lee, D. H., Kwak, E. G. and Hwang, H. S., 2010, Conservation process of celadon janggo excavated from the

- seabed. *Conservation Science in Museum*, 11, 53-60. (in Korean with English abstract)
- Lee, B.H. and So, M. G., 2017, Comparative study on material characteristics of Joseon white wares excavated from Gangwon Wonju Province. *Journal of Conservation Science*, 33(4), 225-239. (in Korean with English abstract)
- Linnow, K., Halsberghe, L. and Steiger, M., 2007, Analysis of calcium acetate efflorescences formed on ceramic tiles in a museum environment. *Journal of Cultural Heritage*, 8(1), 44-52.
- López-Arce, P., Zornoza-Indart, A., Gomez-Villalba, L., Pérez-Monserrat, E. M., Alvarez de Buergo, M., Vivar G. and Fort, R., 2013, Archaeological ceramic amphorae from underwater marine environments: Influence of firing temperature on salt crystallization decay. *Journal of the European Ceramic Society*, 33(10), 2031-2042.
- Moon, S.H., Kim, B.K. and Yang, S.S., 2004, On-site conservation of the underwater objects excavated. *Conservation Studies*, 25, 133-150. (in English abstract)
- Nam, B.J., Park, D.W., Kang, H.M., Jang, S.Y. and Jung, Y.H., 2010, A study of extracting appropriate conditions for efficient desalination for the underwater archaeological ceramics from Ma Island in Taean. *Journal of Conservation Science*, 26(2), 133-142. (in Korean with English abstract)
- Olive, J. and Pearson, C., 1975, The conservation of ceramics from marine archaeological sources. *Studies in Conservation*, 20, 63-68.
- The Academy of Korean Studies, 2020, Lead glaze. <https://encykorea.aks.ac.kr/> (Sep. 2, 2020)
- Winkler, E.M., 1994, *Stone in Architecture*, 3ed, Springer-Verlag, Germany, 166.
- Woo, H.D, Kim, O.S. and Jang, Y.D., 2014, Petrological and mineralogical characteristics and firing temperature of pottery in the 5-6th century from Changnyeong, Gyeongsangnamdo. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 27(2), 63-72. (in Korean with English abstract)
- Zornoza-Indart, A., López-Arce, P., Gómez-Villalba, L.S., Alvarez de Buergo, M., Fort, R., Vivar, G., Morigi, M.P. and Bettuzzi, M., 2011, Salt weathering in desalinated and non-desalinated ceramic amphorae from underwater marine environments. *Proceedings of SWBSS, Limassol, Cyprus*, 249-256.