

# 철제 환두부 보존처리 과정의 3차원 디지털기록 및 형상변화 분석

Three-dimensional digital  
recording of the conservation  
treatment and form analysis of  
an iron ring pommel

최효령, 홍성혁, 조영훈, 조남철\*  
국립공주대학교 문화재보존과학과

Choi Hyoryeong, Hong Seonghyuk,  
JoYounghoon, Cho Namchul\*  
Department of Cultural Heritage  
Conservation Sciences, Kongju

\* Corresponding Author:  
Cho Namchul

Tel: 82-41-850-8541  
E-mail: nam1611@kongju.ac.kr

## 요약

부식생성물, 이물질 등이 고착된 금속유물의 보존처리는 처리 전·후 형태와 특성, 유물의 중량 및 두께가 변한다. 지금까지 보존처리 전·후 변화에 대한 기록은 주로 육안관찰, 사진촬영 등을 통해 수행되었으나, 이 방법들은 보존처리 변화에 대한 정량적 결과를 파악하는 데 어려움이 있다. 본 연구에서는 환두부를 중심으로 이물질 제거, 균열부 메움, 복원 등의 과정을 3차원 스캐닝으로 기록하여 보존처리에 따른 형상 변화를 정량적으로 분석하였다. 3차원 스캐닝 결과를 기반으로 보존처리에 따른 부피 변화를 산출하고 형상 변화에 대한 수치자료를 분석하였다. 이 결과, 전체적으로 이물질 및 부식물은 보존처리 전 부피의 약 52%(18.1㎤)가 줄어들었고, 표면적으로 볼 때 약 98%가 제거된 것으로 확인되었다. 이 연구는 3차원 형상분석 기술이 유물의 보존처리 기록화 및 분석에 유용함을 보여주었다. 따라서 이 방법론은 금속 유물뿐만 아니라 다양한 재질의 문화유산에 확대적용이 가능할 것으로 판단된다.

**주제어** : 철제유물, 보존처리, 3차원 스캐닝, 디지털 기록화, 형상분석

## Abstract

Conservation treatment of metallic artifacts contaminated with corrosion and foreign substances requires changes in the shape, characteristics, weight and thickness of the artifacts. Thus far, recording the changes after conservation treatment has mainly been performed through visual observation and photography, which lacks any quantitative description of the changes. In this study, the processes of removing foreign substances, joining cracks, and restoring an affected area were recorded using 3D scanning and then quantitatively analyzed to identify changes in form due to conservation treatment. The volume change after the conservation process was calculated based on the results of the 3D scanning, and numerical data on the changes to the form was analyzed. It was revealed that the foreign or corroded substances removed after the conservation accounted for 18.1 cm<sup>3</sup>, which is approximately 52% of the total volume of the ring pommel, and those substances were removed from about 98% of the surface of the ring pommel. This study confirmed that 3D form analysis was useful for recording the processes of conservation treatment and analyzing the results. It is therefore believed that this methodology can be applicable to not only metal artifacts, but to cultural heritage items in a range of materials.

**Keywords** : Iron Artifact, Conservation Treatment, Three-dimensional Scanning, Digital Documentation, Shape Analysis

투고일: 2021.03.31

심사(수정)일: 2021.04.22

게재확정일: 2021.04.29

## 1. 서론

유물에 많이 이용된 금속재료는 금(Au), 은(Ag), 구리(Cu), 철(Fe), 납(Pb), 주석(Sn) 등이 있다. 금속유물에서 큰 비율을 차지하는 철제유물은 양호한 상태로 출토되는 경우가 드물며, 부식화합물과 이물질 등이 고착되어 유물의 형태가 변형된 경우가 대부분이다. 따라서 유물의 원형을 찾아주고 고고미술사적 증거물과 제작기법 등을 최대한 보존하기 위한 과정은 매우 중요하다<sup>[1], [2]</sup>.

보존처리 과정 중 기록은 상세하고 정확해야 한다. 미국 American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works(AIC)에서 제정한 보존윤리규범에서 보존가는 조사, 과학적 연구, 처리 결과에 대해 정확하고 완전하며 영구적인 기록을 남기고 유지할 의무가 있다고 규정하고 있다. 또한, The Australian Institute for the Conservation of Cultural Materials(AICCM)와 European Confederation of Conservator-Restorers' Organisations(E.C.C.O) 등의 지침서에도 보존처리에 대한 기록화의 중요성을 언급하고 있다<sup>[3]</sup>.

이는 보존처리를 진행하는 과정에서 유물의 형태, 중량, 두께 등이 변하여 보존처리가 끝난 후 대상 유물의 상태 혹은 형태가 변하기 때문이다. 현재 기관별로는 상이하나, 대부분 보존처리 과정에 대한 기록은 주로 육안관찰, 상태 조사, 사진촬영 등을 통해 수행되고 있다. 그러나 이 방법은 보존처리 변화에 대한 정량적 결과를 파악하는 데 어려움이 있다.

최근 3차원 기술의 발전으로 문화재의 보존·복원에 이를 적용한 연구가 늘어나고 있다. 국내에서는 미켈란젤로 프로젝트의 영향을 받아 2000년부터 문화유산에 대한 3차원 디지털 기록이 시작되었으며 다양한 광원을 이용한 3차원 스캐너로 원형정보와 이를 통한 실측작업이 수반되고 있다<sup>[4]</sup>. 또한, 3차원 스캐닝 데이터로 위치, 크기, 각도 등을 추정하여 대형 치미의 결실부 복원에 활용되거나<sup>[5]</sup> 3차원 프린팅 기술을 이용하여 석조보살좌상이나 훼손된 도자기의 결실부를 복원하는 연구사례가 있다<sup>[6], [7]</sup>. 그러나 금속유물의 경우, 건조물이나 도자기에 비해 이러한 연구가 부족한 실정이며, 특히 보존처리 전·후 형상 변화에 대한 3차원 기록화 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 철제유물의 이물질 제거, 균열부의 접합, 복원 등의 과정을 입체적으로 기록하고 분석하기 위해 3차원 스캐닝을 이용하여 보존처리에 따른 형상변화를 정량적으로 분석하였다. 연구결과를 통해 보존처리 과정의 디지털 기록화 적용성을 다각적으로 검토하고 지속적인 활용방안을 모색하고자 한다.

2. 연구대상 및 방법

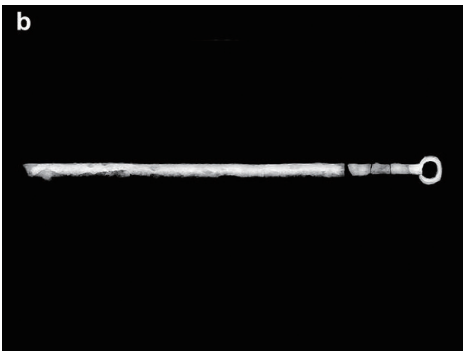
2.1. 연구대상

도(刀)는 양날을 가진 검(劍)에 비해 외날을 가진 칼을 가리킨다<sup>[8]</sup>. 연구대상인 환두대는 충청남도 천안 유적의 원삼국시대 토광묘에서 출토되었다. 도신부, 병부, 환두부를 하나의 철 소재로 제작하고 환두를 구부린 일체형<sup>[9]</sup>이며, 환 내에 문양이 없는 소환두도로 길이는 약 76.1cm이다<sup>(표1)</sup>.

4개의 편으로 이루어져 있고 모두 접합이 가능하다. 전체적으로 표면에 주황색 계열의 흙이 고착되어 있으며 녹흔이 다수 관찰된다. 부분적으로 짙은 갈색 계열의 흙과 식물의 뿌리도 관찰되었다. X-선 투과촬영(Soft Radiography Apparatus, SOFTEX M-150, SOFTEX, JAPAN)을 통해 내부에는 부식되지 않은 금속심을 확인하였고 부식에 따른 명암차이가 관찰된다<sup>(도1)</sup>. 이에 유의하여 보존처리를 실시하였고, 3차원 스캐닝 및 형상분석은 환두부에 한해서 진행하였다.

표 1. 처리 전 유물의 제원(諸元)

연번	길이(cm)	너비(cm)	두께(cm)	무게(g)
1	56.4	2.8	0.8	427.7
2	4.8	2.5	1.3	28.1
3	4.0	1.8	0.6	15.8
4	10.9	5.5	1.5	106.6



a a

(a) 디지털 사진  
(b) X-선 투과촬영 사진  
(85kV, 1.5mA, 3초)

도 1. 환두대도의 보존처리 전 현황.

## 2.2. 연구방법

### 2.2.1. 보존처리

금속유물의 보존처리는 이물질로 덮여있는 유물의 원형을 찾고 부식 인자를 제거하여 더 이상 부식이 진행되지 않도록 하는 것이 목적이다.

보존처리 과정은 이물질 제거, 탈염 및 탈알칼리처리, 건조, 강화처리, 접합 및 복원 순으로 진행하였다. 먼저, 처리 전 유물의 형태를 기록하기 위해 사진촬영(EOS 6D Mark II, EF 24-70mm F2.8 II USM, CANON, JAPAN) 및 X-선 투과조사를 실시하여 부식 상태, 외형상 나타나지 않는 내부구조 등을 진단하고 기록하였다. 진단한 내용을 토대로 흙 등의 이물질을 제거하였다. 이물질 제거는 메스, 붓 그리고 정밀분사사공기(Air-Brasive)를 활용하였다. 부식 인자인 염화이온을 제거하기 위하여 탈염 및 탈알칼리처리를 진행하고 열풍건조기에서 건조하였다. 유물에 더 이상 부식이 진행되지 않도록 Paraloid-B72 10wt%(in Xylene)로 두 번 강화처리를 실시하였다. 강화된 유물의 원형을 찾아주기 위해 에폭시계 Araldite(Rapid type)나 셀룰로오스계 Cemendine-C로 유사한 색감의 무기안료를 혼합하여 복원하고 색맞춤을 한 뒤 표면을 강화한 후 마무리하였다.

### 2.2.2. 3차원 스캐닝 및 형상분석

철제 환두대도의 3차원 스캐닝 및 형상분석은 크게 3차원 스캔, 데이터처리 및 최적화, RMS 편차분석 순으로 진행하였다. 3차원 스캐닝의 경우, 철제 환두대도의 환두부 크기와 미세 형상을 고려하여 고정형 방식의 3차원 고정밀스캐너(HDI Advance R3X, LMI TECHNOLOGIES)를 사용하였다. 이 스캐너는 백색 구조광과 두 대의 스테레오 카메라(2.8MP)를 이용한 삼각측량 방식이며, 0.88초의 고속 스캔이 가능하고, 렌즈 초점거리(16mm, 25mm, 30mm)에 따라 30~80 $\mu$ m의 정확도를 가진다. 본 연구에서는 2개의 12mm의 렌즈를 FOV 200mm로 설정하여 45 $\mu$ m의 정확도로 스캔하였다. 현장 스캔과 데이터의 정합 및 병합은 Flexscan3D 소프트웨어를 이용하였으며, 데이터 편집과 RMS 편차분석은 3D Systems 사의 Geomagic DesignX와 Geomagic ControlX를 사용하였다.

표2. 연구에 사용된 3차원 고정밀스캐너 주요 제원

활용기기	3D Scanner : HDI ADVANCE R3X 3D SCANNER
정확도	200mm diagonal FOV : 30 $\mu$ m 400mm diagonal FOV : 50 $\mu$ m 600mm diagonal FOV : 80 $\mu$ m
해상도	2.6 million point per scans
카메라	12mm 렌즈, 2.8MP
이동성	200mm FOV : 370mm
	400mm FOV : 690mm
	600mm FOV : 1040mm
데이터 획득속도	2,600,000점/0.88초

### 3. 과학적 보존처리

#### 3.1. 이물질 제거

처리 전 상태조사 후 이물질 제거를 실시하였다. 이물질 제거는 표면의 흠이나 부식물을 제거하는 과정으로 육안조사와 X-선 투과촬영을 토대로 원형이 훼손되지 않도록 진행하였다. 메스, 붓 등의 소도구를 사용해 일차적으로 이물질을 제거하고 정밀분사가공기(Air-Brasive)를 활용하여 고착된 흠을 제거하였다. 정밀분사가공기는 미세한 유리가루를 고압으로 분사하여 이물질을 제거하는 방법이다. 정밀분사가공기로도 제거되지 않는 단단한 부식물은 니퍼 등을 이용해 물리적으로 제거하였다.

#### 3.2. 탈염 및 탈알칼리 처리

철제유물에서 가장 부식을 촉진하는 물질은 염화이온( $\text{Cl}^-$ )과 이산화황( $\text{SO}_2$ )이다<sup>[1]</sup>. 탈염처리는 철제유물의 부식인자 중 가장 치명적인 수용성 활성염인 염화이온( $\text{Cl}^-$ )을 추출해 제거하는 것으로 유물의 부식정도 및 보존상태, 매장환경, 제작기법 등에 따라 적합한 방법을 적용한다<sup>[10]</sup>.

염화이온( $\text{Cl}^-$ )을 제거하기 위하여 0.1M Sodium Sesquicarbonate Dihydrate ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 수용액을 사용하여 60℃에 침적해 탈염처리를 실시하였고 10ppm 이하로 떨어질 때까지 진행하였다. 이후, 잔류 약품을 제거하고 수소이온농도(pH)를 중성으로 만들기 위해 탈알칼리처리를 실시하였다. 안정화처리에서 사용된 용액은 24시간마다 교체하여 탈염처리는 9차례, 탈알칼리처리는 6차례 실시하였다. 탈염처리와 탈알칼리처리가 완료된 용액은  $\text{Cl}^-$  pH 측정기(pH/ION METER, F-53, HORIBA, JAPAN)로 염의 농도 및 수소이온농도를 측정하였고, 결과는 표3, 4와 같다.

표3. 탈염처리 용액 측정 결과(ppm)

차수	1차	2차	3차	4차	5차	6차	7차	8차	9차
측정결과	202	194	42.20	20.20	30.50	26.36	14.57	9.97	7.29

표4. 탈알칼리처리 용액 측정 결과(pH)

차수	1차	2차	3차	4차	5차	6차
측정결과	10.04	-	9.93	-	-	6.84

### 3.3. 건조 및 강화처리

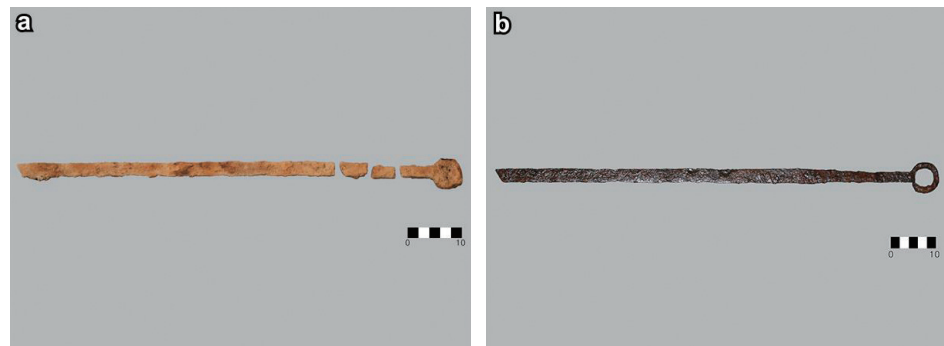
유물의 안정화처리 이후, 잔류 수분을 제거하기 위해 열풍건조기(60℃)에서 7일간 건조하였다. 완전히 건조된 유물은 더 이상 부식이 진행되지 않도록 Paraloid-B72 10 wt%(in Xylene)를 사용하여 강화하였고 이는 강화제가 충분히 유물에 침투할 수 있도록 24시간 두 번 침적하였다. 자연 건조 후, 유물 표면에 묻힌 강화제는 Xylene과 붓을 이용해 정리하였다.

### 3.4. 접합 및 복원

파손되었던 편들은 에폭시계 수지인 Araldite(Rapid Type)을 이용하여 접합하였다. 결손부위는 Araldite(Rapid Type)에 비슷한 색감의 무기안료를 섞어 복원하였고 미세균열은 셀룰로오스계 Cemendine-C를 사용하여 메워주었다.

### 3.5. 마무리

보존처리 과정에서 사용한 약품 및 재료 등을 상세하게 기록하고 처리 후 사진을 촬영하였다<sup>(도2)</sup>. 이후 유물을 실리카겔 등과 함께 밀폐 포장하여 외부 공기 차단 및 습기를 최소화하여 보관하였다.



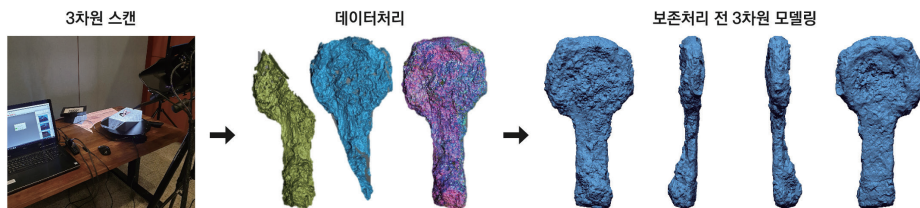
도2. 환두대도의 보존처리 전·후 사진.

## 4. 보존처리 기록화 및 입체분석

### 4.1. 보존처리 디지털 기록화

발굴된 철제유물은 이물질 제거, 탈염처리, 강화처리, 균열부 메움 등을 통해 표면 형상이 변화되므로 보존처리 과정과 결과의 기록은 매우 중요하다. 이를 위해 주로 사용되는 방법은 보존상태에 대한 상태조사 및 도면 작성과 디지털 사진 촬영이다. 그러나 도면과 사진은 2차원적인 결과만을 제공하여 이물질 제거와 접착에 대한 입체 분석에 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 출토된 환두부의 보존처리 과정을 입체적으로 기록하고 분석하기 위해 3차원 스캐닝 기술과 RMS 기반의 편차분석을 수행하였다. 이를 통해 보존처리 과정 및 결과를 시각화하고 정량적으로 분석하였다. 철제 환두대도 보존처리 과정에 대한 3차원 스캐닝은 중요 형상 변화에 따라 총 6차례 실시하였다. 각 단계별 원시데이터는 정합, 병합, 필터링, 최적화, 편집 등의 후처리과정을 통해 3차원 모델로 완성되었다<sup>(도3)</sup>.



도3. 3차원 스캐닝을 통한 철제 환두부의 디지털 기록화 과정.

### 4.2. 보존처리 변화 형상분석

보존처리 과정에 대한 3차원 스캐닝 모델을 이용하여 철제 환두부의 부피 변화를 정량적으로 산출하였다. 이 결과, 보존처리 전 환두부( $34.7\text{cm}^3$ )를 기준으로 1차( $27.3\text{cm}^3$ )와 2차( $20.9\text{cm}^3$ ) 보존처리에서는 환두 안쪽 흙이 상당히 제거되어 각 단계별로 각각  $7.4\text{cm}^3$ 와  $6.4\text{cm}^3$ 의 부피가 감소한 것으로 분석되었다. 또한, 주로 정밀분사사공기를 이용한 3차( $18.5\text{cm}^3$ )와 4차( $16.6\text{cm}^3$ ) 보존처리에서는 표면 부식물이 미세하게 제거되어 큰 형상변화 없이  $1.9\sim 2.4\text{cm}^3$ 의 부피만큼 줄어들었다. 이렇게 하여 철제 환두대도의 환두부는 보존처리 전에 비해 약 52%인  $18.1\text{cm}^3$ 의 이물질 및 부식물이 제거된 것을 알 수 있다. 한편 최종 보존처리 단계에서는 환두부의 안정화를 위해 부분적으로 복원하였는데, 이로 인해 앞의 4차 보존처리에 비해 약  $0.41\text{cm}^3$ 의 부피가 증가하였다.

이러한 형상변화 수치자료를 기반으로 보존처리 단계별 3차원 스캐닝 모델을 하



나의 좌표축으로 정합하고, 이를 통해 RMS(제공평균제곱근) 편차분석을 수행하였다. 또한, 편차분석 결과를 매핑하여 보존처리로 인해 변화된 형상을 시각화하고 정량화하였다. 각 단계별 보존처리 형상분석은 기본적으로 데이터 간의 거리 벡터 분석이 가능한 좌표에서만 수행할 수 있으며, 두 수치데이터 중 하나만 존재할 경우 RMS 편차분석 및 시각화가 불가능하다. 따라서 각 좌표별 음(-)의 값은 보존처리에 의해 형상이 줄어든 것을 의미하고, RMS는 보존처리에 의해 형상이 변화된 전체 거리 벡터 값을 말한다. 공차는 3차원 스캐너의 정확도를 고려하여  $\pm 0.1\text{mm}$ 로 설정하였으므로 공차 외 범위는 실제 보존처리가 수행된 표면적으로 이해할 수 있다.

편차분석 및 시각화 결과, 철제 환두부는 대부분의 지점에서 이물질 및 부식물이 제거되어 음(-)의 수치를 나타냈다. 또한, 보존처리 단계가 높아질수록 RMS 값은 최초  $1.42\text{mm}$ 에서 최종  $0.29\text{mm}$ 로 감소하였고, 보존처리 범위는 3단계까지 76.27~77.55%로 유사한 반면 4차 이후에는 58.31%와 24.24%로 급격히 감소하였다. 특히 보존처리 완료 후 환두부에서 양(+)의 값이 두드러지게 시각화되었는데, 이를 통해 복원부의 범위와 두께를 파악할 수 있었다. 전체적으로 보존처리 전·후의 형상변화를 종합하면, 이물질 및 부식물은 전체적으로 약 52%( $18.1\text{cm}^3$ )의 부피와 98%의 표면적만큼 제거된 것으로 확인되었다<sup>(도4)</sup>.



도4. 철제 환두부의 보존처리 과정별 입체형상 변화 및 3차원 편차분석 결과.



## 5. 고찰 및 결론

첫 번째, 유물의 처리 전 조사를 통해, 본 환두대도는 하나의 철 소재로 제작한 일체형이며, 환 내에 문양이 없는 소환두도임을 확인하였다. 유물의 상태를 고려하여 이물질 제거, 탈염 및 탈알칼리처리, 건조 및 강화처리, 접합 및 복원 순으로 진행하였다. 이물질 제거 후 관찰된 크고 작은 균열들은 접합 및 복원 과정에서 예폭시계와 셀룰로오스계 수지를 사용하여 메워주었다. 처리 전 4개의 편도 모두 접합 가능하여 원형을 찾아주었다.

두 번째, 철제 환두부의 보존처리 과정에 대한 3차원 스캐닝은 중요 형상변화에 따라 6차례 실시하였다. 각 과정별 부피값을 산출한 결과, 1차부터 4차까지의 과정을 거쳐 보존처리 전에 비해 약 52%인  $18.1\text{cm}^3$ 의 이물질 및 부식물이 제거된 것을 알 수 있다. 최종 보존처리 단계에서는 녹후이 크게 떨어져 나간 부위의 안정화를 위해 복원을 진행하였는데 이로 인해 약  $0.41\text{cm}^3$ 의 부피가 증가하는 것을 볼 수 있다.

이러한 형상변화 수치자료를 기반으로 보존처리 단계별 RMS 편차분석 및 시각화를 진행하였다. RMS 값은 보존처리 단계가 높아질수록 최초  $1.42\text{mm}$ 에서 최종  $0.29\text{mm}$ 로 감소하였다. 또한, 편차분석 시각화 이미지를 통해 철제 환두부는 보존처리 과정 대부분에서 이물질과 부식물이 제거되어 음(-)의 수치를 나타내며, 보존처리 완료 후에는 양(+)의 값을 확인할 수 있었다. 전체적으로 보존처리 전과 후의 형상변화를 종합하면, 이물질 및 부식물은 전체 부피의 약 52%( $18.1\text{cm}^3$ )의 부피와 98%의 표면적만큼 제거된 것으로 확인되었다.

세 번째, 본 연구에서는 철제 환두부의 보존처리 과정을 디지털 기록화하였고, 이 결과를 이용하여 각 단계별 형상 변화를 정량적으로 비교 분석하였다. 특히, RMS 편차분석 및 매핑을 통해 보존처리 범위와 두께를 시각적으로 파악할 수 있었다.

편차 분석은 데이터 간 거리 벡터 분석이 가능한 좌표에서만 수행할 수 있어 두 수치데이터 중 하나만 존재하는 지점은 시각화하지 못했다. 또한, 보존처리 단계별 중량을 측정하지 않아 부피 변화와 직접적인 비교를 하지 못한 점은 아쉬운 점이다. 후속연구에서 3차원 시각화 및 중량 데이터 비교 연구를 보완하고자 한다.

네 번째, 기존의 보존처리 기록 카드는 육안관찰, 상태조사, 사진촬영 등을 통해 작성하였으나 2차원적인 결과만을 제공하여 한계가 있었다. 본 연구를 통해 3차원 디지털 기술이 보존처리 형상변화 기록에 적극 활용될 수 있음을 확인하였으며, 객관적인 정보를 기록하고 파악하는 데 매우 유용함을 알 수 있었다. 향후, 금속유물 보존처리 시 철제뿐만 아니라 다양한 재질에 3차원 형상분석 기술을 적용하여 보존처리 활용성 및 기록법을 좀 더 고도화할 수 있을 것으로 판단된다.

---

## 참고문헌

1. 이오희, *문화재보존과학*, p121-171, 주류성, 서울, (2014).
2. 정광용, *금속문화재의 보존관리*, 보존과학기초연수교육, 국립문화재연구소, p37-60, (2004).
3. 국립문화재연구소, *보존윤리규범기초연구종합보고서*, 국립문화재연구소, p11-61, (2011).
4. 전병규, 한병일, 홍천 물걸리 삼층석탑의 3차원 디지털 기록과 활용, *보존과학연구* **35**, 국립문화재연구소, p99-110, (2014).
5. 이승강, 조성연, 허일권, 원주 법천사지 토제 치미의 제작기법과 보존처리, *보존과학회지* **35**, p518-527, (2019).
6. 조성연, 권윤미, 최보배, 평창 발견 석조보살좌상의 보존처리와 3차원 디지털기술을 활용한 복원, *박물관 보존과학* **20**, p77-92, (2018).
7. 오승준, 위광철, 훼손 도자기 결실부 복원을 위한 3D 세라믹 프린팅 기술의 기초 적용성 연구, *한국융합학회논문지* **11**, p165-173, (2020).
8. 국립대구박물관, *한국의 칼-선사에서 조선까지*, 국립대구박물관, (2007).
9. 이영범, *6C 이전 제작된 소환두도의 병부 제작기법 연구-전라북도 출토 소환두도를 중심으로*, 공주대학교 대학원 문화재 보존과학과, 석사학위논문, p50-51, (2009).
10. 국립문화재연구소 문화재보존과학센터, *보존처리 지침서*, p16-32, (2018).