

# 광학식 표면스캐닝 및 X-선 CT를 활용한 유물의 3차원 융합모델 제작: 국립진주박물관 소장 삼총통

Creation of Three-dimensional  
Convergence Model for  
Artifact Based on Optical  
Surface Scanning and X-ray  
CT: Sam-Chongtong Hand  
Canon in Jinju National  
Museum

조영훈<sup>1,\*</sup>, 김다솔<sup>1</sup>, 김해솔<sup>2</sup>, 허일권<sup>2</sup>,  
송민규<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>공주대학교 문화재보존과학과

<sup>2</sup>국립진주박물관 보존과학실

<sup>3</sup>주쓰리디산업영상

JoYounghoon<sup>1,\*</sup>, Kim Dasol<sup>1</sup>,  
Kim Haesol<sup>2</sup>, Huh Ilkwon<sup>2</sup>, Song Mingyu<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Department of Cultural Heritage  
Conservation Sciences, Kongju National  
University

<sup>2</sup>Conservation Science Laboratory,  
Jinju National Museum

<sup>3</sup>3D Industrial Imaging Co., Ltd

\* Corresponding Author:  
JoYounghoon

Tel : 82-41-850-8539

E-mail : joyh@kongju.ac.kr

## 요약

이 연구에서는 표면형상 취득에 최적화되어 있는 광학식 정밀스캐닝과 내부 형상 획득에 사용되는 X-선 CT스캐닝 결과를 이용하여 삼총통의 내·외부 형상을 다각적으로 분석할 수 있는 3차원(이하 3D) 융합 모델을 제작하였다. 먼저 두 스캐닝 결과를 호환 가능한 확장자로 변환 한 다음 상호간의 정합성을 검증하고자 3D 편차분석을 수행하였다. 이 결과, 두 스캐닝 모델은 대부분(56.98%)  $\pm 0.1\text{mm}$  이내의 편차를 보였으며, 이 수치는 ICP 알고리즘 기반의 정합 및 병합에 큰 영향을 주지 않았다. 병합된 데이터는 총통의 외부 표면색 및 미세형상, 내부 두께 및 구조를 잘 표현하였다. 광학식 표면스캐닝과 X-선 CT스캐닝의 3D 융합 모델은 문화유산의 디지털기록화뿐만 아니라 제작기법 해석에 유용하게 사용되었다. 향후 박물관 전시 영역에서 전시품의 과학적 조사 정보를 보다 쉽게 관람객에게 전달하는 효과를 발휘 할 것으로 기대된다.

**주제어** : 광학식 표면스캐닝, X-선 CT스캐닝, 3차원 융합모델링, 디지털기록화, 삼총통, 국립진주박물관

## Abstract

This study was focused on the three-dimensional convergence modeling that can multilaterally analyze internal and external shapes of the Sam-Chongtong Hand Canon by optical precision scanning optimized for acquiring the surface shape and X-ray CT scanning used for obtaining the internal shape. First, the scanning results were converted by compatible extension, after which three-dimensional deviation analysis was conducted to verify mutual conformities. Accordingly, most (56.98%) deviations between the two scanning models was found be  $\pm 0.1\text{mm}$ . This result did not influence registration and merging based on the ICP algorithm. The merged data exhibited the external surface color, detailed shapes, internal width, and structure of the hand canon. The three-dimensional model based on optical surface scanning and X-ray CT scanning can be used for traditional technique interpretation as well as digital documentation of cultural heritage. In the future, it will contribute to deliver accessible scientific information of exhibits for visitors.

**Keywords** : Optical surface scanning, X-ray CT scanning, Three-dimensional convergence modeling, Digital documentation, Sam-Chongtong Hand Canon, Jinju National Museum

투고일: 2019.10.2.

심사(수정)일: 2019.10.28.

게재확정일: 2019.11.9.

## 1. 서론

문화유산의 제작기법을 해석하고 보존상태를 진단하기 위해서는 표면부터 내부 형상까지 다각적인 분석이 필요하다. 이를 위해 전통적으로 육안관찰이 주로 사용되었고, 최근에는 X-선<sup>[1, 2]</sup>, 자외선<sup>[3]</sup>, 가시광선<sup>[4]</sup>, 적외선<sup>[5, 6]</sup>, 테라헤르츠파<sup>[7]</sup> 등과 같은 전자기파와 다양한 물리적 에너지원을 이용한 비파괴검사법이 널리 활용되고 있다. 특히 이러한 검사법들이 점차 고도화되고 보편화되면서 기존에 확인하지 못했던 새로운 정보를 밝혀내는 과학적 조사와 기록화 연구가 국내외적으로 매우 활발히 진행되고 있다.

대부분의 선행연구들은 단일 기술을 이용한 2차원(이하 2D) 영상분석이 주를 이루고 있으며, 3차원(이하 3D)적인 형상을 취득하더라도 결과 제시에 있어 표면분석에 의존하는 경우가 많다. 이는 적용기술의 한계와 데이터처리 과정의 복잡성이 주요인이다. 다행히 최근 들어 컴퓨터 영상처리와 관련된 다양한 알고리즘이 개발되고 3D 스캐닝 기술이 보편화되면서 문화유산의 입체적인 디지털기록화와 형상분석이 가능해지고 있다<sup>[8-10]</sup>.

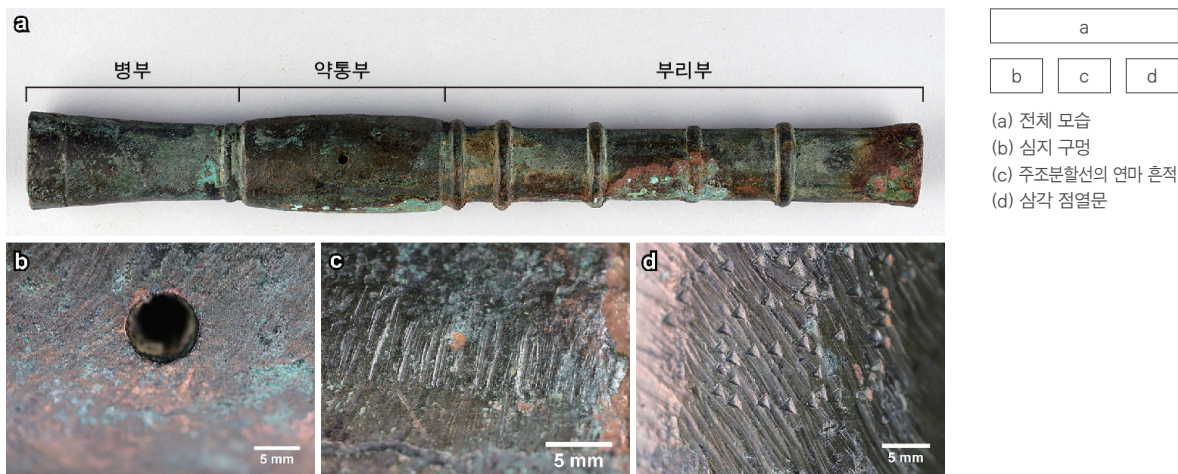
그러나 문화유산의 정밀한 디지털기록화를 위해서는 내·외부를 고려한 3D 영상 제작 및 분석이 필요함에도 불구하고 이에 대한 적극적인 대처와 가시화된 연구결과가 부족한 실정이다. 따라서 이 연구에서는 내·외부 형상의 다각적 분석이 필요한 총통을 대상으로 표면형상 취득에 최적화되어 있는 광학식 표면스캐닝과 내부형상 획득에 사용되는 X-선 CT(컴퓨터단층촬영)스캐닝 기술을 적용하였다. 또한 각 스캐닝 기법으로 완성한 모델링 결과를 융합하여 종합적 제작기법 분석이 가능한 3D 모델을 제작하였다.

## 2. 연구대상

총통이란 고려 말부터 조선시대에 걸쳐 사용된 유통식(有筒式) 및 지화식(指火式) 화약무기를 총칭하는 단어이다. 유통식은 총구를 통해 화약과 발사체를 넣는 구조를 말하며, 지화식은 불씨를 손으로 지펴 격발하는 방식을 의미한다. 총통은 주로 청동 또는 철로 만들며, 나무자루를 끼는 병부, 화약이 들어가는 약통부, 총신의 역할을 하는 부리부로 구분된다<sup>[11]</sup>. 특히 약통부와 부리부 사이에 위치하는 격목통 부분은 총통 구조에서 큰 역할을 한다. 격목통은 총통의 폭발력을 증대시키기 위한 구조로써, 격목이라 하는 나무를 총통의 약통부까지 밀어 넣어 약통부를 밀폐시키는 역할을 한다. 대형과 소형 총통의 가장 큰 구조적 차이가 바로 이 격목부에서 나타난다.

연구대상인 삼충통은 경남 하동군 고전면 고하리에서 발견되었고, 현재 국립진주박물관에서 소장하고 있다. 이 충통은 「국조오례의」에 기록된 조선 초기의 소형 충통이며(도1a), 횡방향으로 좁고 종방향으로 긴 원통형의 모습을 가져 내부구조 파악에 어려움이 있으나, 표면에는 충통 특유의 질감과 색상이 잘 드러나 있다. 또한 심지구멍이 있는 약통부의 외형은 거의 일자형을 보이고 있다(도1b).

충통 주조과정 시 외형 거꾸집을 분할했던 흔적인 주조분할선은 충신 양측면으로 길게 나타나며, 이를 제거하기 위한 연마 흔적도 확인 된다(도1c). 이러한 연마흔은 삼충통의 외형을 정밀하게 만들기 위한 과정으로 당시 제작기법을 유추하는데 중요한 자료이다. 또한 삼충통 병부에는 “○○宙”자의 명문이 삼각 점열문으로 새겨져 있다(도1d). 이 점각 명문은 정확히 알 수 없으나 충통 제작처를 의미하는 것으로 추정된다.



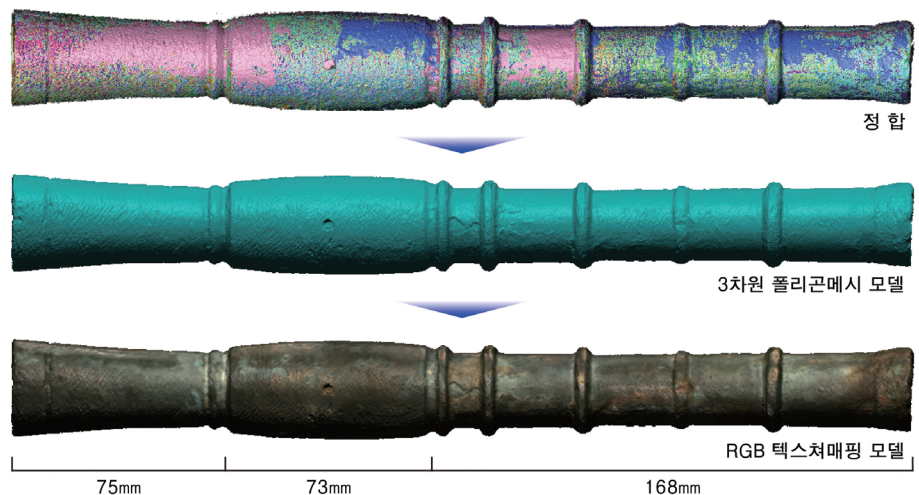
도1. 국립진주박물관 소장 삼충통의 현황

이 삼충통은 발굴 이후 1987년 국립문화재연구소에서 이물질 제거와 부식방지 처리 등의 보존처리를 실시한 바 있다<sup>[12]</sup>. 휴대용 XRF(Bruker, S1 Titan)를 이용하여 재질분석을 실시한 결과, Cu(81.0%), Sn(7.9%), Pb(9.7%)가 주성분인 Cu-Sn-Pb의 삼원계 청동합금임을 알 수 있었다. 현재 부식된 표면의 색과 형태로 보아 짙은 녹색의 염기성탄산구리가 전반적으로 분포하며, 특히 약통부와 부리부의 밝은 녹색은 염기성염화구리로 추정되는 것으로 볼 때 부식 진행 속도가 비교적 빠르게 진행된 것으로 판단된다. 따라서 보존상태 및 제작기법을 이해할 수 있는 디지털기록화 뿐만 아니라 부식 억제 보존처리가 필요한 상태이다.

### 3. 광학식 표면스캐닝 방법 및 결과

#### 3.1. 3차원 표면모델링

3D 스캐닝이란 표면에 투사한 광원의 간섭현상이나 반사데이터를 이용하여 문화재를 점군 또는 메시 형태의 입체형상으로 취득하는 기술을 말한다. 이러한 스캐닝은 크게 하드웨어인 스캐너를 이용하여 문화유산의 형상을 측정하고 구조화된 점군으로 변환하는 3D 스캔 과정과 점군으로부터 하나의 입체형상을 구성하는 데이터 처리 과정으로 구분된다. 이처럼 3D 스캐닝은 측정데이터를 기반으로 데이터처리 과정을 거쳐 동일 형상의 실물이나 컴퓨터상의 디지털 모델로 만들기 때문에 형상 역공학의 개념으로도 설명할 수 있다<sup>[10]</sup>.



도2. 삼총통의 3D 모델링을 위한 광학식 표면스캔 결과의 데이터처리 과정

3D 스캐닝을 통한 삼총통의 입체형상 모델링은 크게 작업계획 수립, 현장 3D 스캔, 데이터처리 과정으로 진행하였다. 먼저 현장 스캔은 삼총통의 크기와 미세 형상을 고려하여 구조광을 이용한 고정형 고정밀스캐너(LMI TECHNOLOGIES, HDI Advane R3X)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.

이 연구에서는 12mm의 렌즈를 FOV 200mm로 설정하여 45 $\mu$ m의 정확도로 스캔하였다. 일반적으로 한 번의 스캔으로 대상을 완전한 모델로 만들 수 없기 때문에 총 50회의 스캔을 통해 개별 이미지를 획득하였다. 현장 스캔 결과는 특정 부분의 데이터이기 때문에 후처리 과정을 통해 하나의 좌표계로 합치는 정합을 수행하였다. 또한

모든 스캔 이미지를 하나의 데이터 세트로 합치는 병합을 수행하여 삼충통의 최종 3D 모델을 완성하였다. 마지막으로 3D 폴리곤메시 모델에 RGB 텍스처매핑을 실시하여 삼충통 고유의 색상정보에 대한 실감효과를 높여주었다<sup>(도2)</sup>.

### 3.2. 형상분석

완성된 삼충통 3D 모델은 전체적으로 2,855,125개의 폴리곤과 0.16mm의 점밀도를 가진 고해상도 결과이며, 스캔된 면적은 31,367mm<sup>2</sup>로 확인되었다. 특히 완성된 3D 스캐닝 모델은 표면 요철과 부식물들의 형상 및 질감이 매우 뚜렷하게 표현되었다. 3D 모델을 통해 전체적인 크기를 실측한 결과, 삼충통은 약 316mm의 길이와 약 20mm의 구경을 가지고 있다. 또한 약통부의 외경은 약 35mm이며, 병부의 내경은 약 28mm로 산출되었다.

이처럼 구조광을 이용한 3D 표면스캐닝은 삼충통의 형상과 치수를 파악하고, 표면에 대한 고해상도 색상과 질감을 얻는데 최적의 방법임을 알 수 있다<sup>(도3)</sup>. 그러나 3D 스캐닝은 표면에 한정된 형상정보를 획득할 수 있기 때문에 육안으로 보이지 않는 내부구조를 형상화할 수 없었다. 또한 삼충통의 제작기법을 이해할 수 있는 두께와 체적을 산출할 수 없는 한계가 있었다.



도3. 삼충통의 내부형상 및 단면구조를 보여주는 3D 폴리곤메시(a)와 RGB 텍스처 모델(b)

## 4. X-선 CT스캐닝 방법 및 결과

### 4.1. 3차원 단층모델링

이 연구에서는 구조광 표면스캐닝 결과를 보완하고 내부구조에 대한 정밀한 형상을 획득하기 위해 X-선 CT스캐닝을 실시하였다. 이 방법은 X-선 발생장치와 영상검출기 사이 회전테이블에 피사체를 올려놓고 360° 회전하면서 X-선을 투과시켜 수백 또는 수천 여개의 단층영상을 획득하는 비파괴검사법이다. 각각의 단층영상은



전용알고리즘을 통해 3D로 재구성되고, 이를 통해 내부 형상 및 결합 등을 조사할 수 있다.

1960년대 CT스캐너의 개발이 시작되었고, 1970년대 상용화가 가능한 CT스캐너가 개발된 이후 임상분야를 중심으로 널리 활용되기 시작되었다. 문화유산 분야에서는 2000년대 본격적으로 적용되어 주로 미라<sup>[15]</sup>, 금동관모<sup>[16]</sup>, 목재조각상<sup>[17]</sup>, 금동식리<sup>[18]</sup>, 금동불상<sup>[19]</sup> 등 유물의 제작기법과 보존상태 연구에 가장 활발히 사용되고 있다.

삼총통의 X-선 CT스캔은 국립중앙박물관(CT Moduler, YXLON)에서 실시하였으며, 사용된 X-선 전압은 500kV와 전류 1.4mA이며, 영상출력장치는 가로와 세로 각각 409.6mm의 크기로 200 $\mu$ m의 해상도를 갖는다. CT스캔을 통해 획득한 삼총통의 단층 영상은 총 2,048개이며, 재구성 복셀은 162 $\mu$ m의 정방형으로 설정하였다<sup>(표1)</sup>. CT스캐닝을 통한 삼총통의 3D 모델링은 크게 개별 단층프레임 영상 획득, 개별 영상의 컴퓨터 전송, 재구성 알고리즘을 통한 모델링 순으로 진행하였다. 또한 완성된 3D CT 모델의 영상분석은 (주)쓰리디산업영상에서 제작한 VX3D 소프트웨어를 사용하였다.

표 1. X-선 CT스캐닝 조건

X-선 발생 장치				영상 출력 장치			복셀 크기
전압	전류	전력	초점 크기	크기	해상도	단층영상 개수	
500kV	1.4mA	700W	0.7mm	409.6×409.6mm <sup>2</sup>	200 $\mu$ m	2,048개	162 $\mu$ m

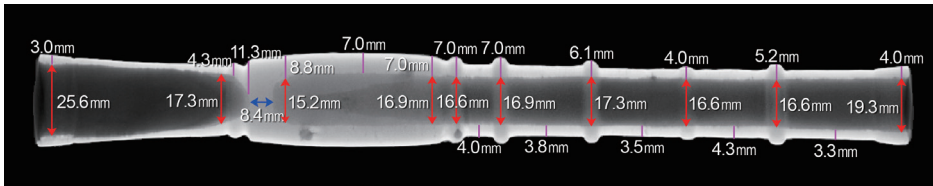
#### 4.2. 내부구조 분석

총통 구조에 대한 선행 연구는 부리부와 약통부의 크기, 부리부 죽절(마디)의 수 등 외부 특성에 관한 연구가 주를 이루었으며<sup>[11, 13]</sup>, 내부 구조에 관한 연구는 측량이 어려운 형태 특성으로 인해 「국조오례의」등의 고문헌에 기록된 재원을 인용하거나 부정확한 실측자료를 사용하는 한계가 있었다<sup>[14]</sup>. 그러나 총통은 화약 폭발무기로써 기벽 두께와 구조의 정밀성으로 당대 제작기술력을 평가할 수 있기 때문에 정밀한 조사 및 연구가 반드시 필요한 문화유산이다.

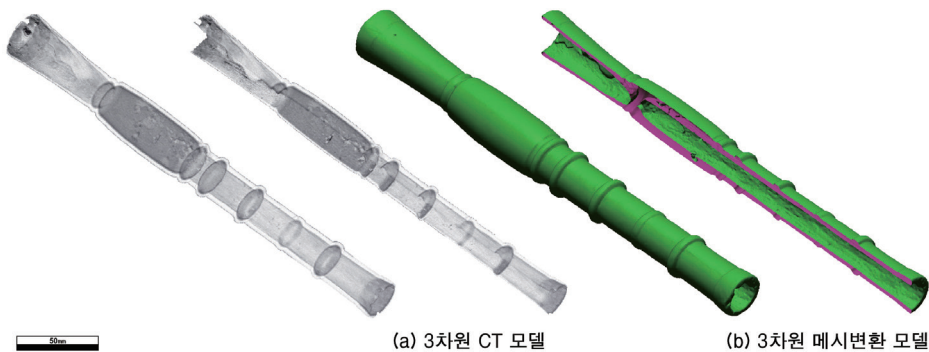
이러한 한계를 극복하기 위한 CT 스캐닝 모델은 삼총통 특유의 표면 색상은 기록되지 않았으나 육안으로 관찰할 수 없는 내부 구조를 파악하는데 큰 도움을 주었다. 특히 삼총통의 병부부터 약통부, 부리부까지의 두께를 파악하는데 매우 유용한 자료를 제공하였다. 이러한 CT스캐닝 결과를 통해 삼총통 내부의 제작기법을 분석한 결과, 병부의 내경은 25.6mm에서 점차 줄어드는 반면 약통부(15.2~16.9mm)와 부리부(16.6~17.3mm)는 큰 변화 없이 거의 일정한 크기를 나타냈다.

특히 약통부의 외경은 외형적으로 가장 두터우나 내경은 부리부와 거의 유사한 특징을 가졌다. 부리부는 19.3mm의 비교적 높은 구경을 보였다. 또한 총통의 두께를 분석한 결과, 병부와 약통부 사이는 8.4mm를 나타냈으며, 병부는 3.0~4.3mm를, 약통부는 7.0~8.8mm를, 부리부는 3.3~4.3mm로 약통부가 가장 두텁고 병부가 가장 얇은 것을 알 수 있다. 부리부 죽절의 두께는 전체적으로 4.0~7.0mm 범위에서 비교적 다양한 수치를 보였다<sup>(도4)</sup>.

한편 CT스캐닝 결과를 3D 폴리곤메시 모델로 변환한 결과, 전체적으로 앞의 광학식 표면스캐닝 결과에 비해 표면적이 증가했음에도 불구하고 폴리곤의 수가 432,210개로 약 6배 이상 급격히 감소하였다. 이로 인해 삼총통의 표면 정밀도가 떨어져 부식물이나 미세 형상이 드러나지 않았다<sup>(도5)</sup>. 이처럼 CT스캐닝 결과가 표면스캐닝에 비해 낮은 폴리곤 수와 점밀도를 보인 이유는 CT스캐너의 해상도가 표면스캐너에 비해 낮고, 복셀 기반의 CT스캐닝 모델이 폴리곤메시로 변환되면서 점간격이 증가했기 때문이다.



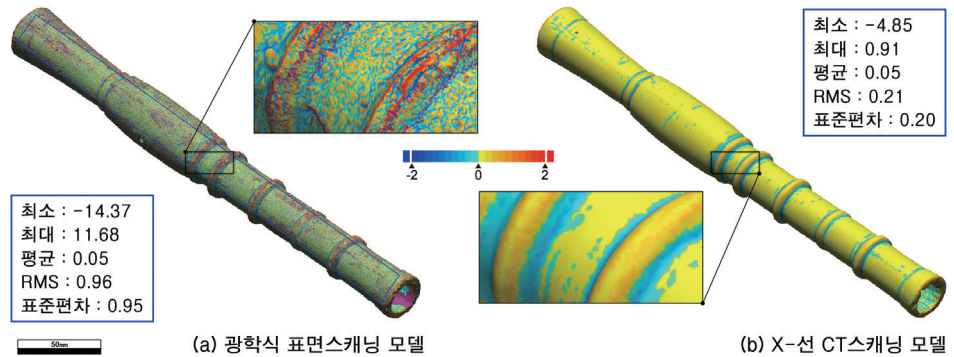
도4. X-선 CT스캐닝 결과를 이용한 삼총통의 단층 분석



도5. 삼총통의 내부형상 및 단면구조를 보여주는 X-선 CT스캐닝(a)과 메시 변환(b) 모델

이를 곡률(R)로 살펴보면, 광학식 표면스캐닝은 약 -14.37~11.68의 곡률을 보이지만 CT스캐닝은 약 -4.85~0.91의 곡률을 보여 전체적으로 CT스캐닝의 표면정밀도가 확연히 낮은 것을 알 수 있다<sup>(도6)</sup>. 그렇지만 변환된 CT스캐닝의 폴리곤메시 모

텔은 삼충통의 내외부 형상을 파악할 수 있는 입체모델로써 매우 중요한 기록 자료라고 할 수 있다.



도6. 광학식 표면스캐닝(a)과 X-선 CT스캐닝(b) 모델의 곡률 비교

## 5. 3차원 융합모델링

문화유산의 3D 디지털기록화는 주로 표면스캐닝 기반의 외부형상 모델링에 치중되어 있다. 3D 스캐닝으로 문화유산의 외형 및 보존상태를 파악할 수 있으나, 상당수의 유물들은 육안으로 확인할 수 없는 내부구조 형상화를 통해 새로운 제작기법을 밝혀낼 수 있다. 따라서 이 연구에서는 광학식 표면스캐닝과 X-선 CT스캐닝의 기술적 한계를 상호보완 할 수 있도록 3D 융합모델링을 수행하였다.

먼저 두 스캐닝 데이터를 호환확장자로 변환하고, ICP 알고리즘 기반의 형상정합을 실시하여 동일한 좌표체계를 구축하였다. 이 결과, 광학식 표면스캐닝과 X-선 CT스캐닝 모델의 중첩 영역은 완벽하게 일치하지 않았으나, 비교적 거의 동일한 기하정보를 가지고 있는 것을 알 수 있다<sup>(도7a)</sup>. 이러한 각 스캐닝 결과의 정량적인 형상 차이를 비교하기 위해 광학식 표면스캐닝 결과를 기준으로 X-선 CT스캐닝 모델의 편차를 분석한 결과, 대부분(약 56.98%)  $\pm 0.1mm$  범위 이내의 편차를 나타냈으며, 평균 편차 및 RMS는 각각  $-3.47mm$ 와  $7.78mm$ 를 보였다<sup>(도7b-c)</sup>.

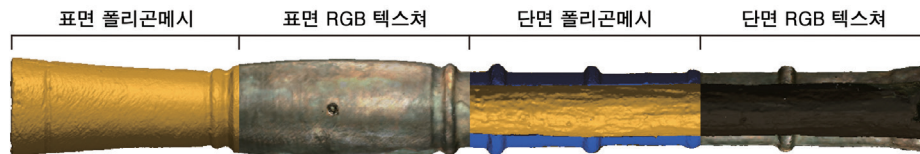
특히 대부분의 수치가 음의 방향을 보이는데, 이는 X-선 CT 모델의 경우 부식물을 중심으로 표면조도와 곡률이 급격히 감소했기 때문이다. 이러한 부분을 제외하고 대부분  $\pm 0.1mm$  이내의 매우 낮은 편차를 보였다. 이는 일반적인 정밀스캐너의 정확도와 유사한 수치이기 때문에 ICP 알고리즘 기반의 병합 및 융합모델 제작에는 큰 무리가 없는 것으로 판단된다.





도7. 광학식 표면스캐닝 모델과 X-선 CT스캐닝 모델의 편차분석 결과

이상의 편차분석을 통한 정확도 검증 이후 전용소프트웨어에서 두 모델의 공통된 위치 5지점을 지정하여 ICP 알고리즘과 샘플링 연산과정 기반의 형상정합 및 병합을 실시하였다. 병합된 모델에서는 삼충통의 외부 표면색과 요철을 명확하게 확인할 수 있으며, 삼충통의 두께 및 내부구조 역시 잘 드러났다<sup>(도8)</sup>. 이 융합모델은 약 1,567,556개의 점데이터와 3,133,462개의 폴리곤으로 구성되어 있으며, 닫힌 모델 상에서 완벽한 면적(약  $50,501mm^2$ )과 부피( $111,145mm^3$ )가 산출되었다. 특히 삼충통의 내·외부 형상을 동시에 파악하는데 매우 큰 강점이 있었다.



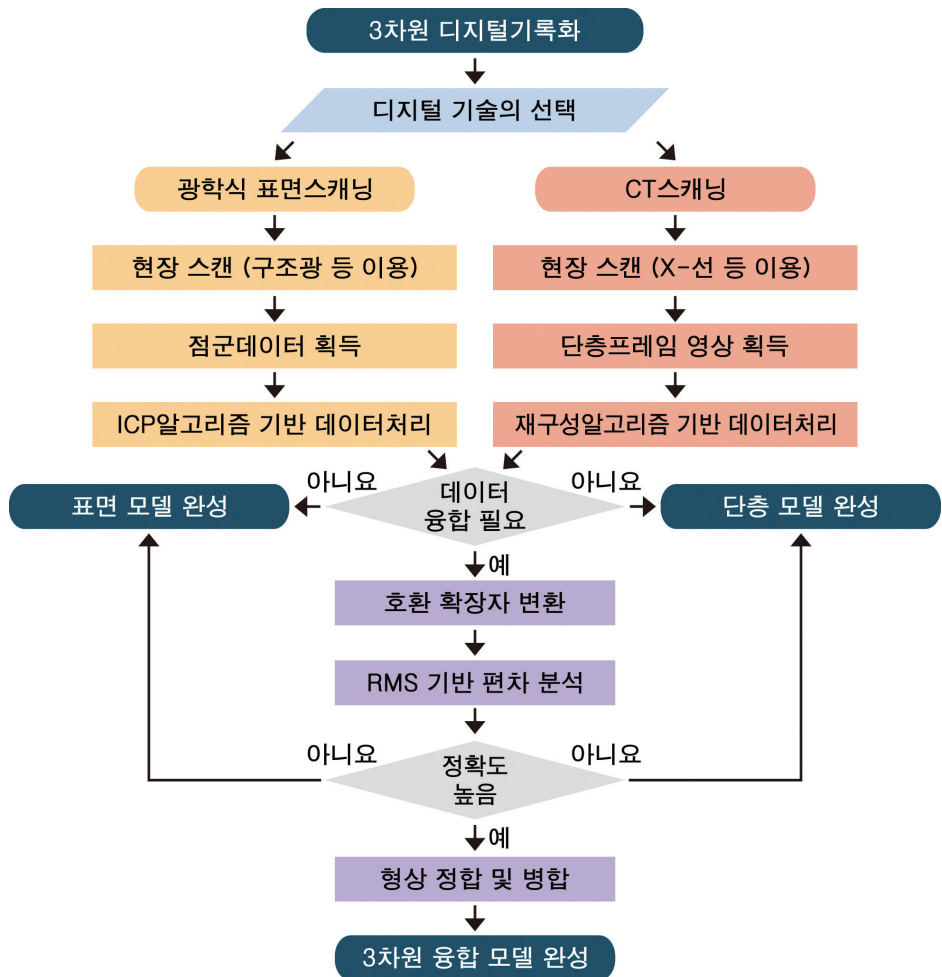
도8. 삼충통의 3D 융합모델링 결과

## 6. 고찰 및 결론

이 연구에서는 삼충통 표면의 정밀한 수치정보를 취득하기 위해 백색의 구조광을 사용하는 광학식 표면스캐닝을 수행하였다. 이 결과, 삼충통의 표면 요철과 색상 정보가 명확하게 드러난 반면 내부의 형상정보 파악은 어려웠다. 따라서 X-선 CT스캐닝을 이용하여 충통의 내부 입체모델을 제작하였으며, 이를 통해 전체적인 제작기법과 구조를 파악할 수 있었다. 또한 두 스캐닝 결과를 융합모델로 제작하여 하나의 데이터 상에서 고해상도의 표면 질감과 내부 구조를 파악할 수 있었다.

광학식 표면스캐닝과 CT스캐닝 모델의 원시데이터 및 기하정보를 비교한 결과, 표면스캐닝 모델은 외부 형상만 획득했음에도 불구하고 점군데이터와 폴리곤 수에

서 압도적으로 높은 수치를 나타냈다. 이에 반해 CT스캐닝 모델은 삼충통의 면적과 부피에 있어 원형에 적합한 수치를 제공하였다. 두 스캐닝 기법을 결합한 3D 융합 모델의 경우 CT스캐닝 모델에 비해 표면 정밀도가 높아져 면적과 부피가 상승한 결과를 보였다.



도9. 광학식 표면스캐닝과 X-선 CT스캐닝의 3D 융합모델링 순서도

이상의 결과를 통해 광학식 표면스캐닝과 X-선 CT스캐닝을 이용한 융합모델링 과정을 하나의 작업흐름도로 정리하였다. 먼저 각 스캐닝 기법은 스캔 계획, 유물 스캔, 데이터처리과정을 거쳐 일차적인 형상데이터가 완성된다. 만약 두 기술 간에 데이터 융합이 필요하지 않으면 광학식 표면스캐닝은 외형 중심의 미세형상과 색상 표현이 우수한 3D 모델을 완성할 수 있고, X-선 CT스캐닝은 유물의 내·외부 구조

를 파악할 수 있는 단층 모델을 제작할 수 있다. 만약 서로 다른 두 기술의 융합이 필요하면 호환 확장자로 변환하고, RMS 기반의 편차분석을 실시하여 상호간의 데이터 융합성을 정밀하게 분석한다. 그런 다음 형상 정합 및 병합을 실시하여 3D 융합 모델을 완성한다<sup>(도9)</sup>.

두 결과를 결합한 융합모델은 향후 데이터 호환성 확장과 하이브리드 융합기술의 보편성을 높이기 위한 추가 연구가 필요하다. 특히 CT스캐닝 결과를 폴리곤메시 모델로 변환할 경우 내부 형상을 파악하는데 전혀 무리가 없으나 정밀도가 감소하여 표면 미세형상이나 부식물을 표현하는데 한계가 있었다. 이는 CT스캐너의 영상출력 장치 해상도와 복셀크기가 메시 모델 제작에 큰 영향을 주기 때문이다.

그러나 두 스캐닝 모델은 전체적으로 형상정합도가 높아 디지털기록화 방법론으로서 새로운 가능성을 제시하였다. 특히 총통을 이해할 수 있는 표면 색상 및 미세형상, 내부 구조 등 제작기법적 요소들을 다양하게 보여주었다. 이러한 3D 융합모델은 전체 형상을 이해할 수 있는 3D 수치자료를 제공함으로써 문화유산의 디지털 기록화뿐만 아니라 제작기법 해석 등에 유용하게 사용되었다. 또한 국립진주박물관 상설전시실에 적극 활용하였으며<sup>(도10)</sup>, 이는 전시품의 과학적 조사 정보를 관람객에게 쉽게 전달할 수 있는 효과가 있었다.



- |   |   |
|---|---|
| a | b |
|---|---|
- (a) 국립진주박물관 상설 전시실  
(b) 총통 3D 융합 모델을 이용한 디지털콘텐츠 "화약무기의 발달"

도10. 총통 3D 융합모델의 활용 사례

## 사사

이 성과는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2016R1C1B2010883).

## 참고문헌

1. 한나라, 이찬희, 이정은, 방사선 투과촬영을 활용한 철불의 손상도 평가 및 제작기법 고찰, *보존과학회지*, **30**, p81-93, (2014).
2. 송정일, 박영환, 유지혜, 문화재 방사선 조사에서 발생하는 산란 방사선의 특성과 영향, *보존과학회지*, **34**, p539-548, (2018).
3. Baldia, C.M., Jakes, K.A., Photographic methods to detect colourants in archaeological textiles, *Journal of Archaeological Science*, **34**, p519-525, (2007).
4. 조영훈, 이찬희, 석조문화유산의 손상지도 제작방법과 표면 및 3차원 손상을 평가기법, *보존과학회지*, **27**, p251-260, (2011).
5. Jo, Y.H., Lee, C.H., Quantitative modeling of blistering zones by active thermography for deterioration evaluation of stone monuments, *Journal of Cultural Heritage*, **15**, p621-627, (2014).
6. Jo, Y.H., Lee, C.H., Quantitative modeling and mapping of blistering zone of the Magoksa Temple stone pagoda (13th century, Republic of Korea) by graduated heating thermography, *Infrared Physics & Technology*, **65**, 43-50, (2014).
7. 백나연, 송유나, 김문정, 정용재, 이한형, 테라헤르츠 이미징기법을 이용한 유화의 상태분석 및 진단, *보존과학회지*, **35**, 237-244, (2019).
8. 이찬희, 조영훈, 김선덕, 함안군 대치리공룡발자국 화석의 3차원 영상분석과 손상도 평가 및 과학적 보존처리, *지질학회지*, **48**, p179-191, (2012).
9. Jo, Y.H., Hong, S., Three-Dimensional digital documentation of cultural heritage site based on the convergence of terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **8**, 1-14, p53, (2019).
10. Jo, Y.H., Hong, S., Application of Three-dimensional Scanning, Haptic Modeling, and Printing Technologies for Restoring Damaged Artifacts, *Journal of Conservation Science*, **35**, p71-80, (2019).
11. 박제광, *화염조선*, p21, 글항아리, (2009).
12. 이창근, 차재선, 경남 하동 고현성지출토 총통의 보존처리, *보존과학연구* **9**, p1-39, (1988).
13. 이강철, *한국의화포*, p46-189, 동재, (2004).
14. 국방군사연구소, *한국무기발달사*, p297-359, 국방군사연구소, (1994).
15. Hoffman, H, Torres W.E., Ernst R.D., Paleoradiology: advanced CT in the evaluation of nine Egyptian mummies, *Radiographics*, **22**, p377-385, (2002).
16. 정광용, 이수희, 김경택, 서산 부장리 백제 금동관모의 제작기법 연구, *문화재* **39**, p243-280, (2006).
17. Morigi, M.P., Casali, F., Bettuzzi, M., Brancaccio, R., D'Errico, V., Application of X-ray Computed Tomography to Cultural Heritage diagnostics, *Applied Physics A* **100**, p653-661, (2010).
18. 권혁남, 서정은, 이정민, 함철희, 고흥 길두리 안동고분 출토 금동식리의 과학적 보존, *보존과학연구* **31**, p17-30, (2010).
19. 박흥인, 권미혜, 고려시대 금동제십일면천수관음보살좌상의 보존처리 및 제작기술 연구, *보존과학회지* **35**, p253-258, (2019).