

# 성덕대왕신종의 3차원 디지털 기록화 의미와 모니터링 기초자료 구축

Significance of Three-Dimensional Digital Documentation and Establishment of Monitoring Basic Data for the Sacred Bell of Great King Seongdeok

조영훈<sup>1,\*</sup>, 송형록<sup>1</sup>, 이승은<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국립공주대학교 문화재보존과학과,

<sup>2</sup>국립경주박물관 학예연구과

JoYounghoon<sup>1,\*</sup>, Song Hyeongrok<sup>1</sup>,  
Lee Sungeun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Cultural Heritage  
Conservation Sciences,

Kongju National University,

<sup>2</sup>Curatorial Affairs Division,  
Gyeongju National Museum

\* Corresponding Author:  
Jo Younghoon

Tel: 82-41-850-8539

E-mail: joyh@kongju.ac.kr

## 요약

성덕대왕신종은 현재 표면의 문양과 명문을 중심으로 부식물이 존재하고, 일부 마모 흔적이 관찰되는 만큼 보존상태에 대한 디지털 정밀 기록이 필요한 시점이다. 따라서 이 연구에서는 4종류의 3차원 스캐닝과 무인항공사진측량을 이용하여 성덕대왕신종의 디지털 기록화를 수행하였고, 영상처리를 통해 다양한 형상분석을 실시하였다. 먼저 지상레이저스캐닝과 무인항공사진측량의 융합모델링 결과는 성덕대왕신종과 종각의 상호 공간적 관계를 구축할 수 있어 향후 지진에 의한 구조적 변형을 모니터링하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 선행자료에 비해 4~9배 정도 높은 해상도를 보인 정밀스캐닝 결과는 성덕대왕신종의 문양 및 명문 가시화에 상당히 유용한 정보를 제공했으며, 표면 보존상태 변화를 파악할 수 있는 기초데이터로 매우 적절하였다. 성덕대왕신종의 원형 보존에 3차원 스캐닝 결과를 적극 활용하기 위해서는 단기적으로 추가적인 스캔을 하여 형상변화 시점과 지점을 설정할 필요가 있다. 만약 단기모니터링을 통해 큰 형상 변화가 확인되지 않는다면 중장기모니터링으로 전환할 필요가 있다.

**주제어** : 성덕대왕신종, 3차원 스캐닝, 디지털 기록화, 형상분석, 모니터링

## Abstract

The Sacred Bell of Great King Seongdeok is required digital precision recording of conservation conditions because of corrosion and partial abrasion of its patterns and inscriptions. Therefore, this study performed digital documentation of the bell using four types of scanning and unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry technologies, and performed the various shape analyses through image processing. The modeling results of terrestrial laser scanning and UAV photogrammetry were merged and utilized as basic material for monitoring earthquake-induced structural deformation because these techniques can construct mutual spatial relationships between the bell and its tower. Additionally, precision scanning at a resolution four to nine times higher than that of the previous study provided highly valuable information, making it possible to visualize the patterns and inscriptions of the bell. Moreover, they are well-suited as basic data for identifying surface conservation conditions. To actively apply three-dimensional scanning results to the conservation of the original bell, the time and position of any changes in shape need to be established by further scans in the short-term. If no change in shape is detected by short-term monitoring, the monitoring should continue in medium- and long-term intervals.

**Keywords** : Sacred Bell of Great King Seongdeok, Three-dimensional Scanning, Digital Documentation, Shape Analysis, Monitoring

투고일: 2020. 10. 5. 심사(수정)일: 2020. 11. 9. 게재확정일: 2020. 11. 13.

## 1. 서론

문화유산은 과거와 현재를 이어주고 미래로 계승해야 할 민족적 자산이자 문화 발전의 근간이다. 20세기까지만 해도 문화유산 관련 주요 관심은 역사, 고고, 미술사, 건축사 등 주로 인문학적 분야였다. 그러나 21세기에 들어서면서 첨단기술의 발전과 함께 보존과학이 활성화되었고, 이에 따라 문화유산을 바라보는 시각이 상당히 다양해졌다. 특히 문화유산의 과학적 조사, 분석, 진단, 수리, 복원, 활용이 활발해지면서 기록은 필수적인 과정으로 자리매김되었다.

문화유산은 전통적으로 육안관찰, 실측, 점단위 측량, 사진 등의 직·간접적 기법을 통해 기록되어 왔다. 그러나 최근에는 드론, 3차원 스캐닝, 영상처리 등 다양한 하드웨어 및 소프트웨어 기반 첨단기술이 문화유산에 적극 활용되고 있다<sup>[1,2,3]</sup>. 이로 인해 문화유산적 자원과 정보는 점차 디지털화되고 있고, 디지털로 생산되고 배포되면서 우리들은 언제 어디서나 문화유산에 접근할 수 있는 시대에 살고 있다. 이러한 디지털 접근성은 새로운 지식을 창출하고 상호간 교류 및 공유하는데 큰 강점을 가지고 있다.

유네스코는 현재와 미래 세대를 위해 가치 있는 유산을 대상으로 디지털화하는 것은 보존의 가치로 매우 중요함을 인지하여 2003년 ‘디지털 유산 보존에 관한 헌장’을 선포하였다<sup>[4]</sup>. 이 헌장에서 말하는 ‘디지털 유산’은 인간의 지식과 표현으로 만들어진 자원과 정보 중 독특한 유·무형의 유산을 태생적으로 디지털로 창조하거나 기존의 아날로그 자원을 디지털 형태로 변환하는 것을 말한다. 따라서 디지털 기술을 통해 유산을 기록하고 창조하는 과정은 매우 중요하며, 이러한 노력의 일환으로 문화유산의 디지털 기록화 관련 연구는 전 세계적으로 활성화되고 있다<sup>[5,6,7]</sup>.

연구대상인 성덕대왕신종(국보 제29호)은 771년 신라시대에 제작된 범종으로 우리나라를 대표하는 동종이다. 이러한 뛰어난 역사적 가치 때문에 성덕대왕신종에 대해서는 명문<sup>[8]</sup>, 형태<sup>[9]</sup>, 음향적 특성<sup>[10,11,12]</sup>, 재질특성<sup>[13]</sup>, 주조기법<sup>[14]</sup> 등 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 또한 문화재청과 국립경주박물관은 지금까지 1999년<sup>[15]</sup>, 2009년<sup>[16]</sup>, 2017년<sup>[17]</sup> 총 세 차례에 걸쳐 디지털 기록화 사업을 진행해 왔다.

그러나 야외 노출된 성덕대왕신종의 전시환경으로 인해 최근 부식과 함께 마모가 진행되고 있음이 보고되었으며<sup>[18]</sup>, 보존환경에 대한 개선 필요성도 주장되고 있다<sup>[19,20]</sup>. 이러한 보존관리 상태를 정밀하게 분석하고 모니터링하기 위해서는 3차원 디지털 자료의 활용은 필수적이다. 그러나 과거 수행된 기록화 프로젝트들은 목적이 다소 상이하고, 3차원 스캐닝 결과의 최적화 과정 및 활용성이 정립되지 않아 성덕대왕신종이 가지고 있는 다양한 형상 정보를 종합적으로 구축하지 못했다.

성덕대왕신종은 현재 표면의 문양과 명문 중심으로 부식물이 존재하고, 일부 마모

흔적이 관찰되는 만큼 보존상태에 대한 정밀 기록이 필요한 시점이다. 따라서 이 연구에서는 선행 디지털 기록화 결과의 의미와 활용성을 살펴보고, 이를 통해 현재 시점의 기록화 방향성을 설정하고 의미를 고찰하였다. 또한 성덕대왕신종의 보존상태를 모니터링할 수 있는 수치데이터 및 디지털 기초자료를 구축하였고, 다양한 영상분석 기술을 활용하여 성덕대왕신종의 문양, 명문, 두께 등의 형상분석을 수행하였다.



도1. 국보 제29호 성덕대왕신종의 전경

## 2. 현황 및 방법

### 2.1. 현황

성덕대왕신종은 불국사 및 석굴암과 함께 8세기 신라 문화를 대표 하는 중요한 유산으로, 신라 성덕왕의 덕을 기리기 위해 경덕왕 때 만들기 시작하여 혜공왕 재위 때 완성되었다. 전체적으로 당좌 2개, 명문 2개, 비천상 4개 등 범종의 주요 문양들이 새겨져 있으며, 현재 내진보강이 완료된 종각에 의해 보호되고 있다<sup>(표1)</sup>. 제원은 높이 3.66m, 입지름 2.27m, 무게 18.9톤으로, 우리나라에 완형으로 남아 있는 가장 큰 종으로 알려져 있다. 특히 서문 630자와 명(銘) 200자 등으로 구성된 1,000여자의 명문은 문장뿐 아니라 제작기법이 뛰어나며, 범종의 제작 시기 및 의도, 당시 신라인들의 관념과 사상 등 여러 중요 정보가 기록되어 있다.

성덕대왕신종의 재료학적 성분은 포항산업과학연구원과 강형태 외(2004)에 의해 실시된 바 있다. 이 결과를 요약하면, 성덕대왕신종은 구리와 주석의 평균 조성비가 86:13인 구리-주석계 청동이며, 불순물이 매우 적은 정제된 원료로 제작었다<sup>[13]</sup>. 다만 종을 주조하기 위한 원료 수급이나 주조 방법 등에 대한 문헌이 남아 있지 않아 이에 대한 다양한 과학적 연구가 추가적으로 필요한 상황이다.

## 2.2. 3차원 디지털 기록 방법

문화유산의 디지털화에 있어 가장 중요한 것은 대상의 크기, 표현 해상도 및 기록 목적에 적합한 기술을 선택하는 것이다. 이를 위해 여러 실측 및 측량 기술의 특성, 성능, 정밀도, 사용 가능한 자원에 대한 이해가 우선적으로 필요하며<sup>[24]</sup>, 이 외에도 접근성과 기록 환경을 정확히 이해해야 한다. 일반적으로 하나의 기술만으로 기록이 가능한 경우도 있지만 대부분 다양한 디지털 기술을 보완적으로 사용하여 융합할 때 최적의 결과를 도출할 수 있다. 특히 다양한 크기의 형상이 복합적으로 존재하는 문화유산의 경우 문양, 명문, 미세 손상 등의 실측치에 따라 다양한 스캔 방식을 적용해야 한다.

따라서 이 연구에서는 성덕대왕신종과 종각을 대상으로 지상레이저스캐닝, 무인항공사진측량, 핸드헬드형 중정밀스캐닝, 핸드헬드형 고정밀스캐닝, 고정형 고정밀스캐닝의 5가지 방식을 이용하여 3차원 디지털 기록을 수행하였다<sup>[25]</sup>. 먼저 종각과 신종의 전체형상 및 위치정보는 4mm(10m 거리)와 7mm(20m 거리)의 정확도를 갖는 지상레이저스캐너(BLK360, Leica Geosystems)를 이용하였으며, 텍스처 매핑소스는 내부에 장착되어 있는 3대의 내장카메라(15MP)를 통해 획득되었다. 지상레이저스캐너 데이터를 실세계 좌표상으로 위치시키기 위한 지상기준점측량에는 가상기지국(virtual reference station, VRS) 방식의 GNSS 시스템(V100, Hi-Target)이 사용되었다.

지상레이저스캐너는 주로 지면과 수직적 형태에 치중되어 이루어지기 때문에 종각 지붕 상부와 같이 높고 평면적인 영역의 수치데이터를 획득하는데 어려움이 있다. 이를 보완하기 위해 20MP 카메라가 장착된 드론(Phantom 4 Pro, DJI)을 이용한 무인항공사진측량을 실시하였다. 현장에서는 수동으로 약 75%의 중첩도를 유지하면서 사진을 촬영하였고, 모델링에 활용된 스틸사진은 총 228매이다.

성덕대왕신종의 전체 모델링 및 형상분석(크기, 두께 등)에는 핸드헬드형 중정밀스캐너(Eva, Artec3D)이, 문양 및 명문의 디지털화에는 핸드헬드형 고정밀스캐너(Spider, Artec3D)이 활용되었다. 두 스캔 방식은 공통적으로 24bpp의 색상과 1.3MP의 텍스처 해상도를 가지나 최대 해상도(중정밀스캐너 0.5mm, 고정밀스캐너 0.1mm)와 정확도(중정밀스캐너 0.1mm, 고정밀스캐너 0.05mm)에는 차이가 있다. 또한 스캔 거리와 프레임에 따른 초당 취득 데이터의 수 역시 다르다.

성덕대왕신종 문양 및 명문의 보존상태 모니터링과 디지털 가시화 기초자료를 구축하기 위해 고정형 고정밀스캐너(HDI Advance R3X, LMI Technologies)를 수행하였다. 고정밀스캐너는 백색 구조광과 두 대의 스테레오 카메라를 이용한 삼각측량 방식으로, 이 연구에서는 2.8MP의 12mm 렌즈를 이용하여 40 $\mu$ m 정확도(200mm 시야각)와 최대 0.124mm의 해상도로 스캔하였다. 이 방식은 성덕대왕신종의 디지털 기록에 사용된 3차원 스캐너 중 가장 높은 해상도와 정확도를 가지고 있다.

표 1. 성덕대왕신종의 디지털 기록에 사용된 사진측량 및 3차원 스캔 방식

스캔 방식					
	사진측량	지상레이저스캔	중정밀스캔	고정밀스캔	고정밀스캔
대상	공간정보	공간정보	전체형상	문양 및 명문	문양 및 명문
목적	종각 지붕 모델링	공간 모니터링	3차원 모델링	3차원 모델링	형상 모니터링
범위	광대역	중대역	저대역	초저대역	초저대역
광원	가시광	레이저	백색 구조광	청색 구조광	백색 구조광
이동성	드론 비행	고정형	핸드헬드형	핸드헬드형	고정형
정확도	cm 내외	4mm	0.1mm	0.05mm	0.04mm

### 3. 3차원 모델링 결과

#### 3.1. 공간 모델링

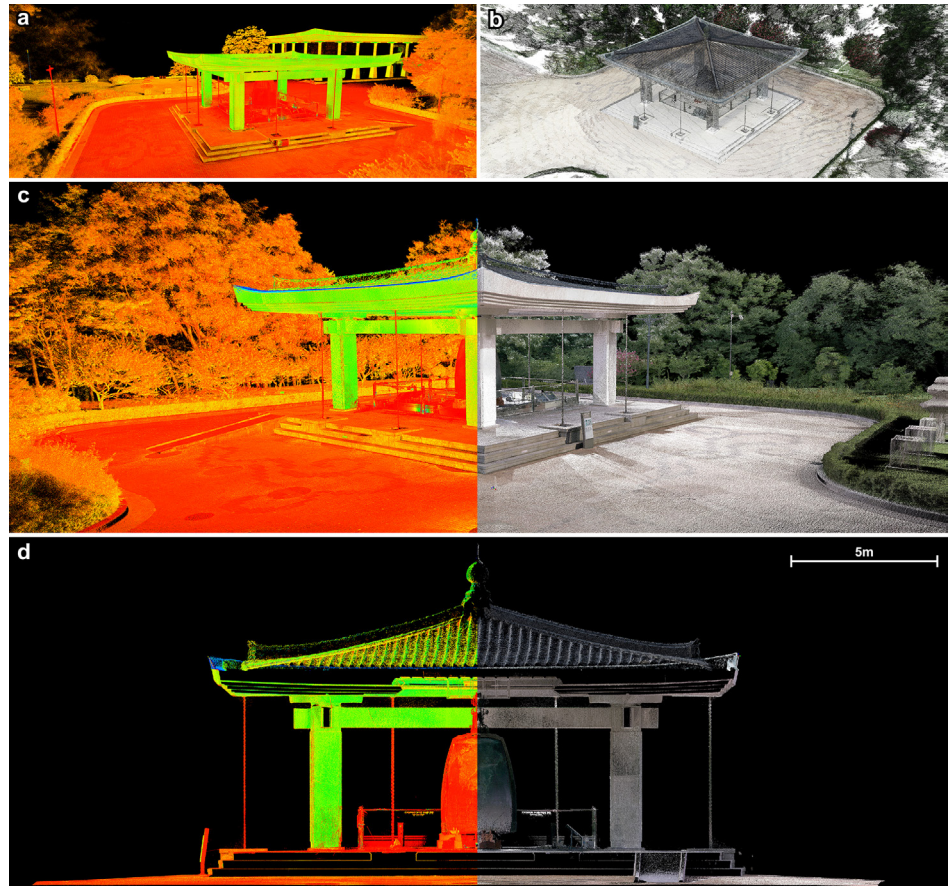
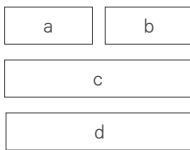
국립경주박물관 내 성대왕신종은 종각으로 보호되고 있고, 주변에는 전시관과 수장고 등 중요 시설이 위치하여 공간적 배치현황이 매우 중요하다. 또한 경주는 역사적으로 지진에 대한 기록이 다수 존재하며<sup>[22]</sup>, 2016년에는 규모 5.1과 5.8의 지진이 연달아 발생한 곳이다. 따라서 성덕대왕신종의 3차원 원형 자료와 종각 및 주변환경에 대한 디지털 기록이 매우 중요하다. 신종의 공간정보는 지진에 의한 구조적 변형을 모니터링하는데 중요한 기초자료가 될 수 있기 때문이다. 이 연구에서는 중대역 기반의 지상레이저스캐닝을 통해 성덕대왕신종을 중심으로 종각 및 주변환경의 디지털 기록을 수행하였다.

현장 스캔은 총 75지점에 대해 실시하였고, 모델링을 위한 데이터처리는 전용소프트웨어(Cyclone, Leica)를 이용하여 정합, 병합, 필터링, 텍스처매핑 순으로 진행하였다. 데이터처리 과정에 대한 상세 설명은 이미 다양한 연구자들에 의해 보고된 바 있다<sup>[23,24]</sup>. <도2a>를 보면, 성덕대왕신종 공간에 대한 입체형상이 잘 구현되었으나, 지상레이저스캐닝의 위치적 한계로 인해 종각 지붕의 상부는 표현되지 않았다. 따라서 이를 보완하기 위해 무인항공사진측량을 수행하였으며, 촬영된 스틸사진의 특징점 추출과 점군데이터 생성을 거쳐 종각 지붕 중심의 3차원 모델을 완성하였다<sup>(도 2b)</sup>. 이처럼 지상레이저스캐닝은 수직적 기하정보를 취득하는데 유용한 반면 무인항공사진측량은 평면적 기하정보 획득에 강점을 가지고 있다.

따라서 지상레이저스캐닝과 무인항공사진측량을 융합하면 성덕대왕신종의 공간정보뿐만 아니라 종각에 대한 수치정보 파악에 용이하다. 이러한 융합모델링 방법에 대해서는 최근 들어 비교적 많은 연구들이 보고되고 있으며<sup>[25,26]</sup>, 이 연구에서도 두 기술을 융합하여 3차원 모델을 구축하였다. 이를 위해 종각 주위 임의의 6지점



에 대한 지상기준점측량 결과를 각 모델에 입력하고, 3개의 공통 대응점을 지정하여 형상정합 및 병합을 진행하여 융합모델을 완성하였다<sup>(도2c, 2d)</sup>. 이 결과를 보면, 종각의 수직 및 평면 형상이 완벽하게 구현되었으며, 지상기준점을 통해 성덕대왕신종 및 종각이 진북 방향의 절대좌표를 갖게 되었음을 알 수 있다.



도2. 지상레이저스캐닝을 통한 성덕대왕신종의 공간모델링 결과

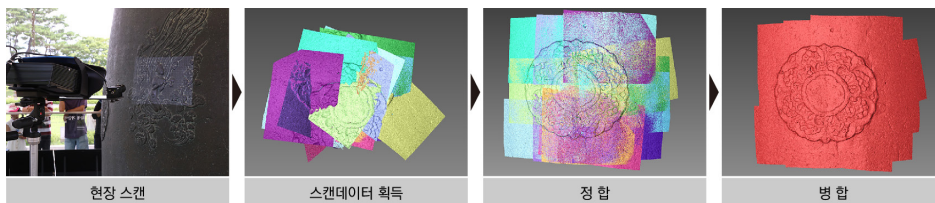
### 3.2. 성덕대왕신종 모델링

정밀스캐닝은 크게 고정형과 핸드헬드형 방식이 있는데, 이 중 전자는 해상도와 정확도가 높은 장점이 있고, 후자는 이동성과 현장 접근성이 탁월하다. 따라서 성덕대왕신종의 전체 형상은 규모와 접근성을 고려하여 핸드헬드형 중정밀 스캔을 이용하였고, 중요 문양 및 명문은 핸드헬드형 및 고정형 고정밀 스캔을 통해 기록하였다. 이 방식들은 공통적으로 광원으로 사용되는 구조광의 구분이 가능한 환경에서 스캔할 수 있기 때문에 직사광선이 없는 환경조건에서 데이터를 취득하였다.

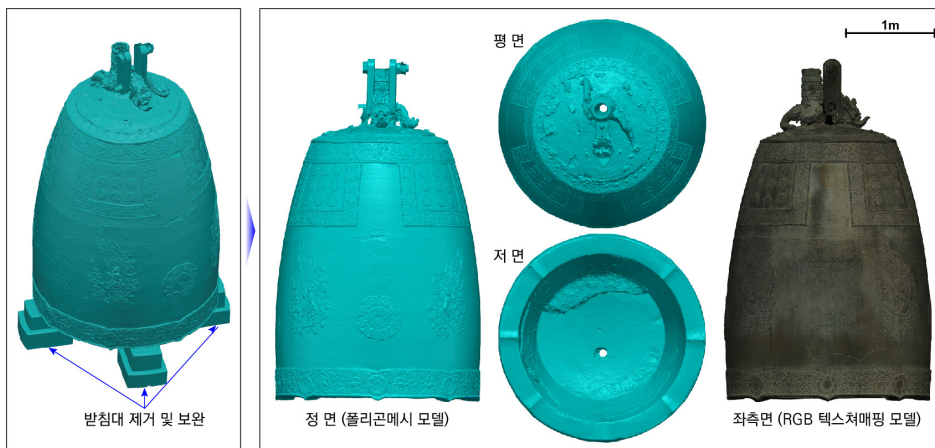
핸드헬드형(Artex Studio, Artec3D) 및 고정형(FlexScan3D, Polyga) 스캔 데이터

처리는 이미 다수의 연구자들에 의해 보고된 바 있다<sup>[27-29]</sup>. 이 연구에서는 기본적으로 개별 폴리곤메시의 정합, 병합, 필터링 과정을 거쳐 완료되었다<sup>(도3)</sup>. 특히 스캔 시 획득한 색상 정보의 밝기와 색도를 조절한 후 최종 폴리곤메시 모델에 RGB 텍스처를 매핑하였다. 이처럼 다양한 방식의 3차원 스캔을 통해 성덕대왕신종에 최적화된 모델링을 완료하였으나, 하부 받침목에 접하는 부분에 미스캔 영역이 발생하였다.

다행히 2009년 3차원 스캐닝 모델에는 받침목이 존재하지 않아 하부 데이터가 존재하였다. 따라서 디지털 상에서 받침대를 제거하고, 여기에 선행 3차원 스캐닝 모델을 융합하여 성덕대왕신종 하부의 형상을 보완하였다<sup>(도4)</sup>. 성덕대왕신종의 정밀스캐닝 결과는 전체적인 형상을 잘 표현하였으며, 폴리곤메시와 RGB 텍스처매핑 결과 모두 뛰어난 품질을 보였다. 특히 이 스캐닝 결과는 수백~수천만 개의 고해상도 폴리곤을 가지고 있어 신종의 표면질감, 제작기법, 단면구조, 상세문양 등을 확연히 드러냈다.



도3. 고정형 고정밀 스캔데이터 처리과정



도4. 성덕대왕신종의 3차원 정밀스캐닝 결과

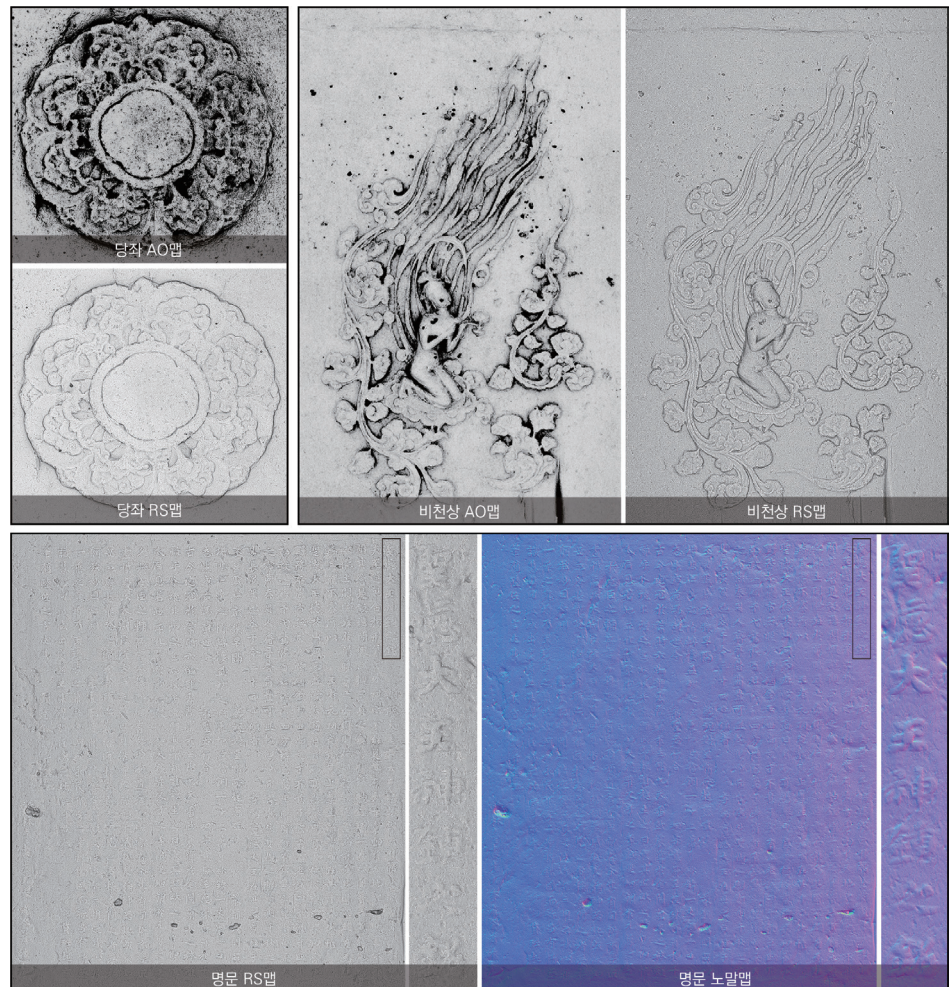
## 4. 3차원 형상분석

### 4.1. 디지털 가시화

3차원 스캐닝과 영상분석을 융합한 디지털 가시화는 스캔데이터 자체만으로 보



이지 않는 복잡한 문양이나 글자에 대해 명암, 곡률, 음영 등 여러 가지 특성 중 일부를 강조하여 보여주는 컴퓨터그래픽 기술이다. 이 기술은 최근 들어 금석문 판독과 문양 가시화 연구에 널리 활용되고 있다<sup>[30-36]</sup>. 이 연구에서는 입체 정보로 기준으로 빛의 차폐로 인한 감쇠 근사치를 구하는 엠비언트 오클루전(ambient occlusion; 이하 AO맵), 표면 곡률과 재료 특성에 따라 반사광의 강도를 조정하여 표면요철 및 볼록함을 향상시키는 래디언스 스케일링(radiance scaling; 이하 RS맵), 폴리곤의 법선 벡터 값을 사용하여 입체감 및 질감을 구현하는 노말 매핑(normal mapping; 이하 노말맵)을 활용하였다.



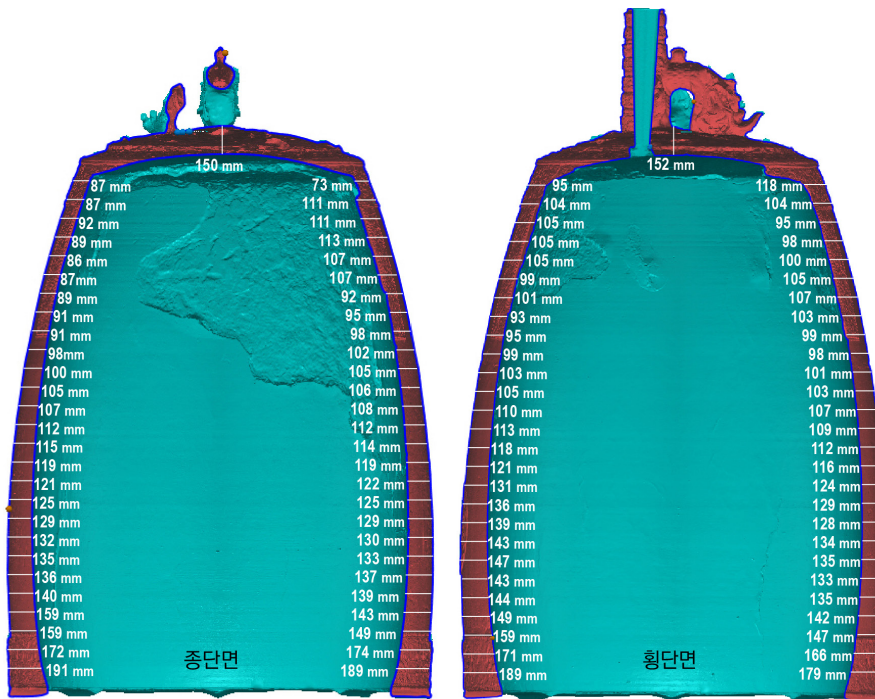
도5. 성덕대왕신종 문양 및 명문의 디지털 가시화 결과



이러한 가시화 기술을 성덕대왕신종의 당좌, 비천상, 명문에 적용한 결과, 문양의 입체감과 형상이 매우 선명하게 드러났으며, 명문의 경우 글자의 마모도와 윤곽이 두드러지게 구분되었다. 또한 부분적으로 주물공과 같은 제작흔들이 가시화되는 등 전반적으로 형상 특성에 따라 명암 및 곡률 대비가 뚜렷하게 나타나 문양과 명문의 보존상태를 이해할 수 있었다<sup>[55]</sup>. 이러한 가시화 렌더링 결과들은 성덕대왕신종의 미술사적 특징뿐만 아니라 표면형상의 변화를 모니터링하는데 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 렌더링 기술은 다양한 매개변수에 따라 가시화 결과가 달라질 수 있으므로 모니터링 시 동일한 조건을 재현하는 것이 중요하다.

#### 4.2. 두께 분석

성덕대왕신종은 유난히 길고 장중하면서 맑은 소리가 나는 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로는 타종 시 약 64Hz와 168Hz의 음파가 서로 간섭을 일으켜 진폭이 다른 소리를 만들기 때문이다<sup>[37]</sup>. 이를 맥놀이 현상이라고 한다. 맥놀이 현상을 야기하는 가장 중요한 원인 중 하나는 바로 성덕대왕신종 두께의 미세한 차이이다<sup>[38]</sup>. 따라서 국립경주박물관(1999)은 사진측량 모델을 이용하여 성덕대왕신종의 단면 형상을 획득하였고<sup>[15]</sup>, 이를 기반으로 두께를 측정하는 바 있다.



도6. 성덕대왕신종의 두께 분석 결과

이 결과에 의하면, 종단면은 75~217mm의 범위에서 평균 127mm의 두께를 보였으며, 횡단면은 95~329mm 범위에서 평균 133mm로 측정되었다. 평균 수치로 볼 때, 종단면과 횡단면은 평균 6mm의 두께 차이를 나타냈다. 이 연구에서는 기존의 사진측량이 아닌 3차원 정밀스캐닝을 통해 성덕대왕신종의 전체형상을 획득하였으며, 이를 기반으로 1999년도 분석과 동일 종단면과 횡단면의 위치 및 간격으로 두께를 측정하였다.

이 결과, 종단면은 93~189mm 범위에서 평균 121mm의 두께를, 횡단면은 73~191mm의 범위에서 평균 117mm를 나타냈다<sup>(도6)</sup>. 전체적으로 종단면과 횡단면의 평균 두께는 약 4mm의 차이를 보여 방위별로 유사한 두께를 가지고 있음을 알 수 있다. 그러나 한 단면에서 최대와 최소 두께 차이가 약 100mm 내외의 큰 차이를 보이는데, 이는 종의 맥놀이 현상과 높은 관련성이 있을 것으로 판단된다.

이 결과를 1999년도 측정된 두께와 비교하면, 2019년도 스캐닝 결과는 약 10mm 정도 얇은 것으로 확인되었다. 이는 단순한 측정 오류 또는 기록 기법 차이에서 기인된 현상으로 추정된다. 이 연구에서는 종단면과 횡단면을 대상으로 선행 위치와 최대한 동일한 위치 및 간격으로 두께를 측정하였지만 두께를 대별하는데 측정 빈도수가 적은 편이다. 향후 영상분석 기법을 통해 픽셀 단위 간격으로 두께를 측정한다면 성덕대왕신종 두께 측정 결과의 대표성이 향상될 것으로 판단된다.

#### 4.3. 형상 변화

성덕대왕신종의 표면 보존상태를 모니터링하기 위해서는 고정밀 스캐닝 기반의 디지털 기록이 필요하다. 다행히 문화재청(2009)은 중요동산문화재 범종기록화사업의 일환으로 성덕대왕신종의 고정밀 스캐닝을 수행한 바 있다<sup>[6]</sup>. 이 결과를 보면, 스캐닝 모델의 평균 점간격은 약 1.50mm로 측정되어 형상분석을 수행하기에는 다소 낮은 해상도를 가졌다. 그러나 우측 명문은 평균 0.35mm의 고해상도 점 간격을 보여 표면 마모도와 같은 정밀한 분석이 가능하였다. 따라서 이 연구에서는 성덕대왕신종 우측 명문을 대상으로 RMS 기반의 편차분석을 수행하였다.

일반적으로 편차분석에서 가장 중요한 것은 분석데이터의 신뢰도를 교차검증하는 것이다. 따라서 2019년 핸드헬드형 고정밀 스캔데이터와 고정형 고정밀 스캔데이터의 상호간 편차분석을 선행하였다. 두 스캔 기법의 정확도를 고려하여  $\pm 0.3mm$ 의 공차를 지정하여 분석 결과를 매핑하였다. 이 결과, 두 스캐닝 결과는 최대  $\pm 0.28mm$ 의 범위에서 0.05mm의 RMS를 보였다. 이는 스캔 및 데이터처리 과정에서 오차가 없음을 보여주는 결과로, 모니터링의 기준데이터로서 매우 적절한 것을 의미한다.

한편 2009년 선행 3차원 스캐닝 결과 중 점밀도가 가장 높은 우측 명문을 대상으

로 데이터 검수를 수행한 결과, 스캔 시 주사되는 구조광 패턴이 확인되었다. 또한 일정 간격마다 글자 1/4정도 되는 크기의 스캔 타겟이 나타났으며, 미스캔 영역이 비교적 많이 존재하였다. 이처럼 선행 스캐닝 결과는 정밀 분석에 최적화되어 있지 않으나, 현재로서 유일하게 비교할 수 있는 정밀 자료이기 때문에 2009년 스캐닝 결과를 기준값으로 설정한 후 2019년 스캐닝 결과를 분석하였다. 공차는 교차검증 시 사용한  $\pm 0.3\text{mm}$ 로 동일하게 설정하였다.

분석 결과, 대부분 공차 범위의 편차를 보이지만, 우측 상단과 좌측 하단에 비교적 높은 편차가 나타났다<sup>(57)</sup>. 최대 편차는  $\pm 8.19\text{mm}$ 이고, RMS는  $0.46\text{mm}$ 로 산출되었다. 일반적으로 명문의 표면 마모가 진행되었다면 음의 방향으로, 부식이 발생했다면 양의 방향으로 편차를 보여야 하는데, 대각선 방향으로 양 끝이 올라가는 양의 편차가 존재하였다. 이는 선행데이터의 정합 과정에서 오차가 발생한 것을 의미한다. 성덕대왕신종의 표면 마모 및 부식물의 경우 상당히 미세한 형상 변화가 발생하는 것을 고려할 때 2009년 선행 스캐닝 결과는 보존상태 모니터링의 기준 자료로 설정하는데 다소 아쉬운 점이 보인다. 따라서 현재 시점에서 성덕대왕신종의 표면형상 모니터링은 2019년 고정밀 스캐닝 결과를 기반으로 실시해야 할 것으로 판단된다.



도7. 성덕대왕신종 우측 명문의 3차원 편차분석 결과



## 5. 고찰 및 제언

### 5.1. 3차원 디지털 기록화 의미

성덕대왕성덕대왕신종의 최초 3차원 스캐닝은 문화재청의 중요동산문화재 범종 기록화사업(2009년) 일환으로 구축된 결과이다<sup>[6]</sup>. 당시 현장 3차원 스캔은 1.4MP 해상도의 고정형 고정밀스캐너(ATOS Triple Scan II, GOM, Germany)를 이용하였고, 명문을 비롯한 문양들과 전체 형상에 대한 기록이 진행되었다. 이 기록화사업을 통해 성덕대왕신종의 정밀도면이 제작되었고, 3차원 스캐닝 및 웹서비스용 모델이 결과물로 만들어졌다. 이 데이터는 현재 문화재청에서 3차원 프린팅 모델로 서비스되고 있으며, 정밀스캐닝을 통해 얻은 문양 및 명문 데이터는 현재와 비교 가능한 중요 자료로 기록되어 있다.

2017년도에 실시한 두 번째 디지털 기록화 사업은 2016년 지진 발생 이후 종각 전체 도면 제작의 일환으로 수행되었으며<sup>[7]</sup>, 이때 광대역 범위의 지상레이저스캐너(ScanStation C10, Leica)을 통해 36,328,541개의 점군데이터를 갖는 3차원 모델을 완성하였다. 광대역 스캐닝 특성상 점밀도에 한계가 있어 세부 분양이나 명문이 2009년 결과보다 정밀하지 못했다. 그러나 성덕대왕신종의 전체 및 세부 형상에 대한 도면을 제작하여 문서화하는데 큰 무리가 없었다. 이 스캐닝 결과는 향후 성덕대왕신종의 거시적인 변위 분석 및 모니터링의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2019년도에는 성덕대왕신종과 종각을 대상으로 지상레이저스캐닝, 무인항공사진 측량, 핸드헬드형 중정밀스캐닝, 핸드헬드형 고정밀스캐닝, 고정형 고정밀스캐닝의 5가지 방식을 이용하여 3차원 디지털 기록을 수행하였다. 기본적으로는 개별 기술만으로 성덕대왕신종의 3차원 모델링을 수행하였지만, 최종 결과물은 상호간 융합 모델링을 통해 완성하였다. 이를 통해 성덕대왕신종의 정밀 수치데이터 및 보존관리에 대한 디지털 기초자료를 구축할 수 있었다.

이상의 내용을 종합하면, 성덕대왕신종은 지금까지 2009년, 2017년, 2019년 총 세 차례에 걸쳐 3차원 스캐닝이 진행되었다. 각 스캐닝은 목적과 적용기술에 차이가 있으나, 기록된 3차원 수치데이터를 분석한다면 기록화 의미를 판단할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 성덕대왕신종의 내·외부(비문양부), 좌·우측 명문, 4개의 비천상, 정·배면의 당좌를 대상으로 해상도를 의미하는 점간격을 비교하였다. 전체적인 분석은 2019년 기록화 결과를 기준으로 선행 스캐닝 모델을 비교하는 방법으로 진행하였다<sup>(표2)</sup>.

표2. 성덕대왕신종의 점간격(해상도) 비교 결과

대 상	2009년	2017년	2019년			
	FH	TLS	TLS	HM	HH	FH
외부(비문양부)	6.69 $mm$	2.93 $mm$	3.15 $mm$	0.93 $mm$	-	-
내부(비문양부)	6.29 $mm$	3.04 $mm$	2.65 $mm$	0.92 $mm$	-	-
정면 당좌	1.28 $mm$	2.95 $mm$	3.19 $mm$	0.93 $mm$	0.31 $mm$	0.28 $mm$
배면 당좌	1.30 $mm$	2.82 $mm$	2.86 $mm$	0.93 $mm$	0.32 $mm$	0.27 $mm$
좌측 명문	1.39 $mm$	3.04 $mm$	2.99 $mm$	0.93 $mm$	0.32 $mm$	0.15 $mm$
우측 명문	0.60 $mm$	2.70 $mm$	2.87 $mm$	0.92 $mm$	0.31 $mm$	0.16 $mm$
비천상 1	1.52 $mm$	3.00 $mm$	3.18 $mm$	0.92 $mm$	0.31 $mm$	0.26 $mm$
비천상 2	1.55 $mm$	2.96 $mm$	3.02 $mm$	0.93 $mm$	0.32 $mm$	0.25 $mm$
비천상 3	1.56 $mm$	2.99 $mm$	3.53 $mm$	0.93 $mm$	0.32 $mm$	0.26 $mm$
비천상 4	1.48 $mm$	2.99 $mm$	3.20 $mm$	0.92 $mm$	0.31 $mm$	0.27 $mm$

FH: 고정형 고정밀스캐닝, TLS: 지상레이저스캐닝, HM: 핸드헬드 중정밀스캐닝, HH: 핸드헬드 고정밀스캐닝

먼저 성덕대왕신종의 전체형상은 2017년도 지상레이저스캐닝(평균 점간격 2.82~3.04 $mm$ )을 통해 이미 선행된 바 있다. 그러나 이때에는 성덕대왕신종의 정밀 실측에 초점을 맞춰 종각에 대한 형상정보는 기록되지 못했다. 그러나 이 연구에서는 향후 지진 등에 의한 구조적 변형을 모니터링하는데 기초자료로 활용될 수 있도록 평균 2.65~3.53 $mm$ 의 해상도로 신종과 종각의 상호 공간적 관계를 구축하였다.

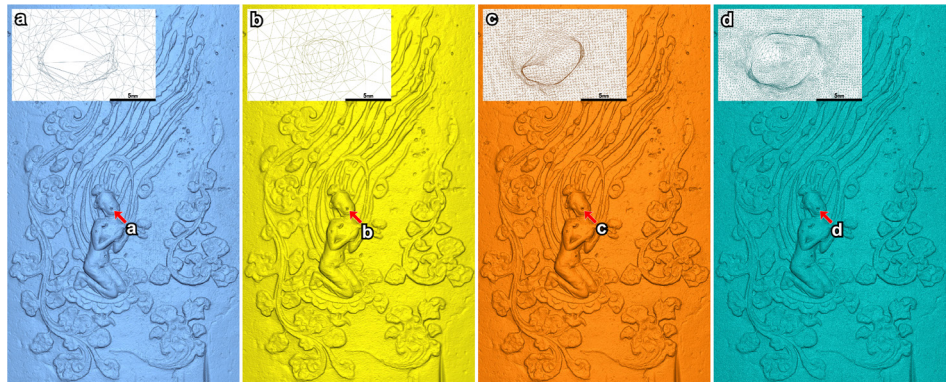
성덕대왕신종의 내·외부(비문양부) 상세 현황은 핸드헬드형 중정밀스캐닝을 통해 평균 0.92~0.93 $mm$ 의 해상도로 기록되었다. 이는 2009년 문화재청 결과(평균 점간격 6.29~6.69 $mm$ )에 비해 7배 정도 높은 해상도이다. 또한 당좌 및 비천상은 고정형 고정밀스캐닝을 통해 평균 0.25~0.28 $mm$ 의 고정밀도를 보였으며, 이는 2009년 결과(평균 점간격 1.28~1.56 $mm$ )보다 약 6배 높은 수치이다. 좌·우측 명문은 전체 스캐닝 결과에서 가장 높은 해상도(평균 점간격 0.15~0.16 $mm$ )로 기록되었으며, 2009년도 결과(평균 점간격 0.60~1.39 $mm$ )와 비교할 때 좌측은 약 9배, 우측은 약 4배 정도 높은 해상도이다.<sup>[58]</sup>

기록화란 개인이나 조직, 사회의 활동과 역사를 기록으로 재구성할 수 있도록 기록을 의도적으로 수집 및 생성하는 활동을 의미한다<sup>[39]</sup>. 특히 기록을 만들고 이를 정리하여 하나의 관리 단위로 만드는 과정을 기록화라고 정의할 수 있다. 이 연구에서는 다양한 디지털 기술을 이용하여 성덕대왕신종의 공간, 전체형상, 문양, 명문 등을 기록하였고, 이를 기반으로 디지털 가시화, 두께 분석, 형상 변화 등 다양한 기록화 과정을 거쳤다.

따라서 이 연구 결과는 성덕대왕신종의 전체 및 세부 형상의 3차원 모델링뿐만 아니라 표면 보존상태를 모니터링하는데 매우 유용한 수치정보로 판단된다. 특히 지상레이저스캐닝 결과는 환경적 변화에 대한 종각 및 신종의 구조적 변형에 활용될 수 있으며, 정밀스캐닝 결과는 부식 및 마모와 같은 표현형상 변화에 기준점이 될 것으로 판단된다. 이번에 구축한 3차원 디지털 기록 결과들은 향후 다양한 목적에 활용될 수 있기 때문에 지속적인 접근가능성이 요구되며, 이는 기록-기록화-아카이브의 선순환 단계를 통해 새로운 해석을 가능하게 하는데 기여 할 것으로 사료된다.



- (a) 2009년 고정형 고정밀스캐닝
- (b) 2019년 핸드헬드형 중정밀스캐닝
- (c) 2019년 핸드헬드형 고정밀스캐닝
- (d) 2019년 고정형 고정밀스캐닝



도8. 성덕대왕신종 3차원 스캐닝 모델의 점간격(해상도) 비교 결과

### 5.2. 3차원 형상분석 의미

성덕대왕신종의 형상분석을 위해 가시화 렌더링, 치수 분석, 형상 변화에 대한 분석을 수행하였다. 이 중 가시화 렌더링은 고정밀 스캔데이터를 이용하여 문양 및 명문을 대상으로 진행하였다. 물체 간 인접성 관계를 이용하여 빛의 차폐 특성을 표현하는 AO맵과 표면 곡률과 재료특성에 따른 반사맵을 이용한 RS맵의 기법을 사용하여 당좌 및 비천상을 가시화하였다. 또한 신종 좌·우측의 양각된 명문에는 AO맵의 가시화가 선명하지 않아 법선 벡터값을 이용하여 로우폴리곤 환경으로 만들어주는 노말맵을 추가로 사용하여 렌더링을 수행하였다.

성덕대왕신종의 가시화 렌더링을 통해 당좌 부분에서는 각각의 마모도가 상이하며, 정면이 배면에 비해 마모도가 높은 것으로 나타났다. 또한 주물선과 주물공과 같은 제작기법 및 결합 흔적들이 확연하게 가시화되었다. 명문의 경우, 전체적으로 글자의 마모도와 형상이 잘 기록되어 향후 보존상태 모니터링의 기초자료로서 유의미하게 활용될 것으로 판단된다.



한편 성덕대왕신종의 형상 변화를 분석하기 위해 2009년과 2019년 스캐닝 결과의 명문을 대상으로 RMS 편차분석을 수행하였다. 이 결과, 편차분석의 공차를 0.3mm로 설정했음에도 불구하고 우측 상부와 좌측 하부에 비교적 높은 편차가 나타났다. 이는 선행 스캐닝 결과에서 스캔 또는 데이터처리 과정의 오차가 발생한 것으로 추정된다. 따라서 현재 시점에서 성덕대왕신종의 표면 보존상태 모니터링의 기초자료는 데이터 교차검증이 완료된 2019년 스캐닝 결과를 이용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

### 5.3. 제언

성덕대왕신종은 국내 최대 크기의 범종으로 연꽃 무늬의 당좌, 선인을 나타낸 비천문, 제작과정이 기록되어 있는 명문 등 형상학적으로도 보존가치가 매우 높은 문화유산이다. 이 때문에 이미 한 차례의 사진측량과 두 차례의 3차원 스캐닝을 통해 지속적인 기록화가 진행되었다. 이 연구에서는 성덕대왕신종의 보존관리를 목적으로 3차원 스캐닝을 수행하였으며, 이를 위해 지상레이저스캐닝, 무인항공사진측량, 핸드헬드형 중정밀스캐닝, 핸드헬드형 고정밀스캐닝, 고정형 고정밀스캐닝 등 5가지의 디지털 기술을 적용하였다.

이러한 3차원 디지털기록화 기술들은 각 방식별 원리에 따라 정확도가 다르기 때문에 동일한 기준을 적용할 수 없다. 그러나 스캔 기법별 허용 오차를 설정하고, 이를 기반으로 활용 목적을 달리한다면 기록 자료로서의 가치가 높아질 것으로 판단된다. 대표적으로 지상레이저스캐닝과 무인항공사진측량을 통한 융합모델링은 지진이 간헐적으로 발생하는 경주지역을 고려할 때 종각을 포함한 공간정보의 구조적 변형을 모니터링하는데 중요한 기초자료가 될 것으로 판단된다. 또한 핸드헬드형 중정밀스캐닝 결과는 스캔 사각지대인 용뉴 일부분을 제외하고 신종의 전체 형상을 취득했다는 데 상당한 의미가 있었다. 이는 성덕대왕신종의 제작기법과 전체형상을 분석하는데 중요한 연구자료로 활용될 것으로 보인다.

성덕대왕신종은 2018년 몸통에 새긴 명문의 부식으로 인해 환경 개선 필요성이 제기된 바 있다. 따라서 명문 마모도를 분석하기 위해 이번에 구축된 고정밀스캐닝 결과와 2009년 선행 스캐닝 결과를 비교분석하였다. 그러나 선행 스캐닝 결과는 데이터의 점밀도가 떨어지고, 부분적으로 데이터 오류가 존재하여 모니터링의 기준 모델로 사용하기에 다소 한계가 있었다. 따라서 선행 스캐닝 결과를 모니터링의 기초데이터로 활용하기 위해서는 데이터최적화 등의 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

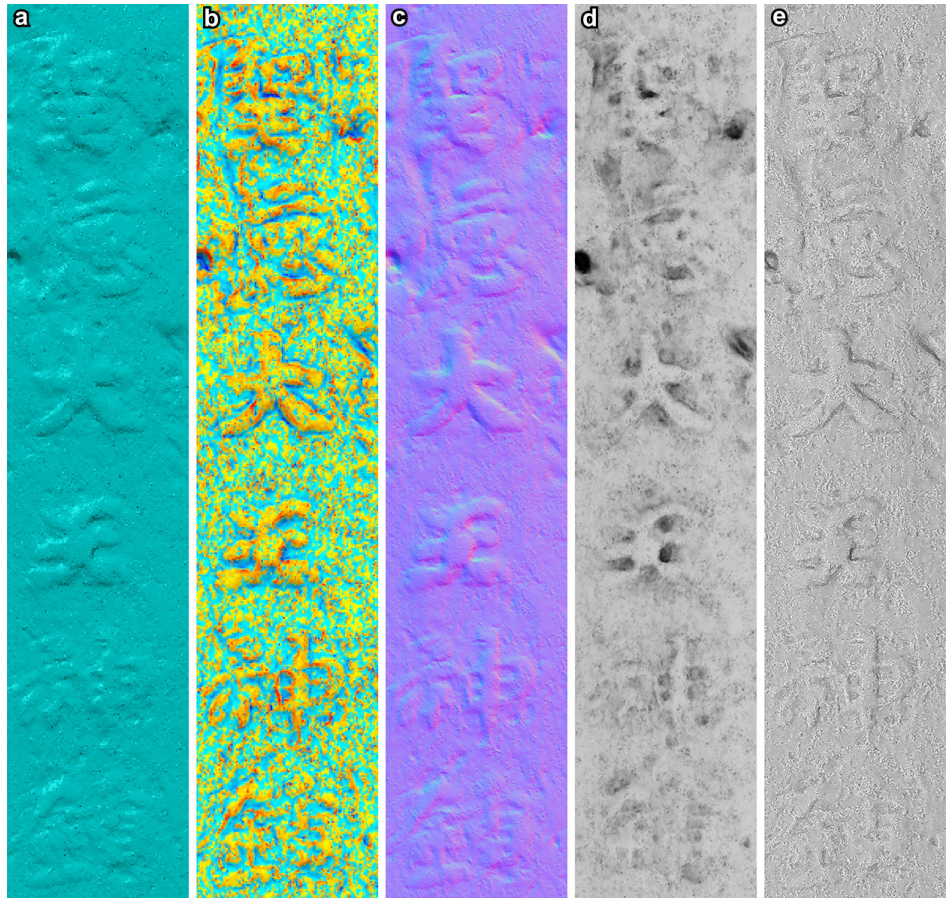
2019년 고정밀스캐닝 결과는 핸드헬드형과 고정형으로 교차검증을 수행했기 때문

에 명문, 비천상, 연화당좌의 모니터링 기초자료로 활용가능하다. 현재 표면 문양 및 명문을 중심으로 부식물이 존재하고, 일부 마모 흔적이 확인되기 때문에 2019년 고정밀 스캐닝 결과를 기반으로 모니터링을 수행하는 것이 적절하다. 현재로서는 성덕대왕신종의 표면 부식물과 마모 현상 파악을 위한 모니터링 주기 설정이 쉽지 않다.

따라서 단기모니터링을 통해 형상변화 시점을 파악하고, 이를 기반으로 중장기 모니터링 계획을 수립하는 것이 적절하다. 단기모니터링은 우선 3년 이내를 기준으로 적용하고, 이를 통해 형상변화가 관찰된다면 당분간 단기모니터링을 지속할 필요가 있다. 만약 단기모니터링에서 큰 변화가 확인되지 않는다면 5년 정도의 중장기 모니터링으로 전환하는 것이 예산과 노력을 고려할 때 적합한 주기로 판단된다. 특히 모니터링에 사용되는 3차원 스캐닝은 2019년 결과와 유사한 점밀도를 유지하거나 이보다 높은 해상도를 가진 스캔 기법을 적용해야 한다.



- (a) 폴리곤메시 모델
- (b) 곡률맵
- (c) 노말맵
- (d) AO맵
- (e) RS맵



도9. 성덕대왕신종의 명문 가시화 렌더링 예시

성덕대왕신종은 청동으로 이루어져 있고, 야외에 노출되어 있기 때문에 손상에 대한 우려가 매우 크다. 따라서 손상부에 대한 가시화와 변화를 진단하기 위해서는 단기모니터링을 통해 부식물, 균열부, 마모도 등 보존상태 분석에 적합한 모니터링 지점을 선정하고, 이에 대한 정밀한 기록이 필요하다. 이와 함께 디지털 사진촬영 기반의 이미지 분석을 병행한다면 모니터링의 가시적인 효과가 증대될 것으로 판단된다.

한편 이 연구에서는 3차원 렌더링 기법을 통해 명문과 문양의 가시화를 시도하였다. 이를 위해 곡률맵, 노말맵, AO맵, RS맵 등을 적용하였고, 기존에 볼 수 없었던 다양한 형상학적 이미지를 제공하였다<sup>(도9)</sup>. 특히 성덕대왕신종의 명문은 제작과정뿐만 아니라 당시의 종교와 사상을 담고 있어 매우 중요한 금석문 자료로 평가받고 있다. 기 판독된 명문에는 마모로 인해 미판독된 글자가 다수 있고, 조철제(2014)는 판독 오류를 지적한 바 있다<sup>[40]</sup>. 따라서 3D 스캐닝과 렌더링 기반의 디지털 판독을 통해 성덕대왕신종 명문의 가시화와 재판독을 고려할 필요가 있다. 이때 이번에 구축한 점 간격 0.15mm보다 해상도가 뛰어난 0.10mm 이하의 점 간격으로 스캔한다면 명문의 디지털 판독의 가독성이 좀 더 높아질 것으로 사료된다.

## 6. 결론

1. 성덕대왕신종을 포함한 종각의 3차원 모델링은 지상레이저스캐닝을 통해 획득한 종각의 수직적 점군데이터와 무인항공사진측량으로 완성된 지붕의 평면적 점군데이터를 병합하여 완성하였다. 완성된 3차원 융합모델은 종각의 수직 및 평면 형상을 뚜렷하게 보여줬으며, 향후 경주 지역 지진에 의한 구조적 변형을 모니터링하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
2. 핸드헬드형 중정밀스캐닝으로 기록된 성덕대왕신종의 전체 형상은 평균 0.92mm의 점간격을 나타냈고, 이는 2009년 선행 스캐닝 모델에 비해 약 7배 정도 높은 해상도이다. 고정형 고정밀스캐닝은 명문과 문양을 중심으로 적용되었으며, 명문은 평균 0.15~0.16mm를, 문양은 평균 0.25~0.28mm의 점간격을 보였다. 명문의 점간격을 선행 스캐닝 결과와 비교하면, 좌측은 약 9배, 우측은 약 4배 이상의 고해상도 결과이다. 이러한 고해상도 스캐닝 결과는 성덕대왕신종의 표면 보존상태를 모니터링하는데 매우 유용한 수치정보로 판단된다.
3. 성덕대왕신종 명문 및 문양을 가시화하기 위해 엠비언트 오클루전맵, 표면질감 향상맵, 노말맵의 렌더링 기술을 적용하였다. 이 결과, 문양의 입체감과 형상이 매우 선명하게 드러났으며, 부분적으로 주물공과 같은 제작흔들이 가시화되었다. 명문의 경우 글자의 마모도와 윤곽이 두드러지게 구분되는 것으로 볼 때 향후 재판독을 위한 기초자료로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.



4. 성덕대왕신종의 두께는 종단면에서 93~189mm, 횡단면에서 73~191mm로 측정되었으며, 이는 1999년도 선행 결과와 비교할 때 약 10mm 정도 얇은 수치이다. 이러한 차이는 측정 오류 또는 기록 기술의 차이에서 기인된 현상으로 추정된다. 향후 영상분석 기법을 통해 픽셀 단위 간격으로 두께를 측정한다면 빅데이터 기반의 두께 측정 결과가 도출될 것으로 판단된다.
5. 성덕대왕신종은 자연적이고 인위적 환경에 노출되어 있으며, 현재 표면의 문양과 명문 중심으로 부식물이 존재하고, 일부 마모 흔적이 관찰된다. 따라서 보존상태 모니터링을 위한 기준데이터의 신뢰도를 검증한 이후 2009년 선행스캐닝 결과(우측 명문)와 RMS 편차분석을 실시하였다. 이 결과, 우측 상단과 좌측 하단에 최대 편차  $\pm 8.19\text{mm}$ , RMS  $0.46\text{mm}$ 의 비교적 높은 편차가 확인되었다. 일반적으로 명문의 표면 마모가 진행되었다면 음의 방향으로, 부식이 발생했다면 양의 방향으로 편차를 보여야 하는데, 대각선 방향으로 양 끝이 올라가는 양의 편차가 존재한다는 것은 선행 데이터처리 과정에서 오차가 발생한 것을 의미한다. 현재 시점에서 성덕대왕신종의 보존상태 모니터링은 2019년 스캐닝 결과를 기반으로 실시해야 할 것으로 판단된다.
6. 성덕대왕신종 보존상태에 대한 단기모니터링을 위해서는 먼저 형상변화 시점을 파악하고, 이를 기반으로 중장기 모니터링 계획을 수립하는 것이 적절하다. 특히 단기모니터링을 통해 부식물, 균열부, 마모도 등 보존상태 분석에 적합한 모니터링 지점을 선정할 필요가 있다. 만약 단기모니터링에서 큰 형상 변화가 확인되지 않는다면 5년 정도의 중장기모니터링으로 전환하고, 모니터링에 사용되는 3차원 스캐닝은 2019년 결과와 유사한 점밀도를 유지하거나 이보다 높은 해상도를 가진 스캔 기법을 적용할 필요가 있다.
7. 성덕대왕신종의 명문은 마모로 인해 미판독된 글자가 다수 존재하고, 일부 판독 결과에 대한 이견이 있다. 따라서 3차원 스캐닝과 렌더링 기반의 디지털 판독을 통해 성덕대왕신종 명문의 가시화와 재판독을 고려해 볼 필요가 있다. 이때 이번에 구축한 점 간격  $0.15\text{mm}$ 보다 해상도가 뛰어난  $0.10\text{mm}$  이하의 점 간격으로 스캔한다면 디지털 판독의 가독성이 좀 더 높아질 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 허의행, 기록화된 고고자료의 복원과 활용방안에 대한 연구, *한국디지털컨텐츠학회 논문지* **18**, p723-731, (2017).
2. 김성한, 이찬희, 조영훈, 대전 계족산성 원형성벽의 디지털 기록화 및 단기모니터링 연구, *자원환경지질* **52**, p169-188, (2019).
3. 윤준섭, 류성룡, 목조 문화재 정밀실측 및 해체보수 시 3D 스캔을 통한 기록의 고도화 방안, *대한건축학회논문집* **36**, p97-105, (2020).
4. UNESCO, *Charter on the preservation of digital heritage*, (2003).
5. Remondino, F., Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning, *Remote Sensing* **3**, p1104-1138, (2011).
6. Chen, S., Yang, H., Wang, S., Hu, Q., Surveying and digital restoration of towering architectural heritage in harsh environments: a case study of the millennium ancient watchtower in Tibet, *Sustainability* **10**, 3138, (2018).
7. Cozzolino, M., Di Meo, A., Gentile, V., Mauriello, P., Zullo, E., Combined use of 3D metric survey and GPR for the diagnosis of the trapezophoros with two griffins attacking a Doe of Ascoli Satriano (Foggia, Italy), *Geosciences* **10**, 307, (2020).
8. 최영성, 신라 성덕대왕신종(新羅聖德大王神鍾)의 명문(銘文) 연구(研究): '사상성(思想性)' 탐색을 겸하여, *한국철학논집* **56**, p9-46, (2018).
9. 도학회, 상원사종과 성덕대왕신종의 용뉴(龍鈕)에 대한 고찰, *미술교육논총* **25**, p289-314, (2011).
10. 최성영, 배명진, 성덕대왕신종(에밀레종)의 음향 특성, *전자공학회지* **31**, p110-122, (2004).
11. 김석현, 정원태, 강연준, 성덕대왕신종의 명동과 간극의 공명조건, *한국음향학회지* **30**, p223-230, (2011).
12. 한찬훈, 성덕대왕 신종의 음향적 특성을 고려한 종각복원의 고찰, *한국음향학회지* **37**, p378-386, (2018).
13. 강형태, 김종오, 유혜선, 권혁남, 성덕대왕신종(국보 제29호)의 성분조성과 납동위원소비, *박물관보존과학* **5**, p49-57, (2004).
14. 나형용, 성덕대왕(聖德大王) 신종의 주조법(鑄造法)에 대한 고찰, *한국주조공학회지* **18**, p309-318, (1998).
15. 국립경주박물관, *성덕대왕신종 종합학술조사보고서*, (1999).
16. 문화재청, *중요동산문화재 [범종] 기록화사업 결과보고서*, (2009).
17. ㈜위프코, *성덕대왕신종의 3D 촬영 및 정밀도면 제작*, 국립경주박물관, (2017).
18. 조계현, *청동문화재의 부식과 보존*, p5-18, 성덕대왕신종의 전시 환경 학술 심포지엄, 국립경주박물관, (2018).
19. 신용비, *성덕대왕신종의 보존 관리*, p55-61, 성덕대왕신종의 전시 환경 학술 심포지엄, 국립경주박물관, (2018).
20. 조남철, *옥외 금속문화재의 손상 유형과 보존 사례*, p41-50, 성덕대왕신종의 전시 환경 학술 심포지엄, 국립경주박물관, (2018).
21. 안재홍, 김충식, *디지털유산: 문화유산의 3차원 기록과 활용*, p78, 시그마프레스, (2016).
22. 진광민, 김영석, 우리나라 지진지질학 연구에서 고고지진학의 중요성, *지질학회지* **56**, p251-264, (2020).

23. 조영훈, 이찬희, 석조문화재 디지털복원 및 구조안정성 평가를 위한 3차원 영상분석: 마곡사오층석탑, *보존과학회지* **25**, p115-130, (2009).
24. Jo, Y.H., Park, J.H., Hong, E., Han, W., Three-dimensional digital documentation and accuracy analysis of the Chojin Lama Temple in Mongolia, *Journal of Conservation Science* **36**, p264-274, (2020).
25. Zhang, J, Lin, X., Advances in fusion of optical imagery and LiDAR point cloud applied to photogrammetry and remote sensing, *International Journal of Image and Data Fusion* **8**, p1-31, (2016).
26. 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**, 53, (2019).
27. 오승준, 위광철, 3차원 디지털 기술을 활용한 도자기 복원 방법에 관한 연구: 접촉 및 비접촉식 방법을 이용한 백자의 복원 방법 비교, *문화와 융합* **40**, p595-614, (2018).
28. 조영훈, 김다솔, 김해솔, 허일권, 송민규, 광학식 표면스캐닝 및 X-선 CT를 활용한 유물의 3차원 융합모델 제작: 국립진주박물관 소장 삼충통, *박물관 보존과학* **22**, p15-26, (2019).
29. Kuş, Implementation of 3D optical scanning technology for automotive applications, *Sensors* **9**, p1967-1979, (2009).
30. 이찬희, 조영훈, 김선덕, 함안군 대치리공룡발자국 화석의 3차원 영상분석과 손상도 평가 및 과학적 보존처리, *지질학회지* **48**, p179-191, (2012).
31. 조영훈, 이찬희, 석조문화유산의 형상분석을 위한 3차원 디지털복원과 표면심도 모델링: 해운대 석각을 중심으로, *보존과학회지* **28**, p87-94, (2012).
32. 안재홍, 공달용, 원광연, 문화 및 자연 유산의 해석을 위한 3차원 스캔 모델의 가시화: 공룡발자국의 기록과 해석 사례, *한국HCI학회논문지* **8**, p19-28, (2013).
33. 최원호, 고선우, 각자된 글자의 형태적 시각화를 이용한 금석문 판독방법, *한국콘텐츠학회논문지* **17**, p740-749, (2016).
34. 권다경, 조영훈, 3차원 렌더링 기술을 이용한 청동거울의 표면형상 가시화 및 분석, *문화재과학기술* **14**, p71-76, (2019).
35. 조영훈, 권다경, 고광의, 충주 고구려비 판독을 위한 3차원 스캐닝 기술의 적용 및 고찰, *한국고대사연구* **98**, p9-45, (2020).
36. Zotkina, L., Kovalev, V.S., Lithic or metal tools: Techno-traceological and 3D analysis of rock art, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* **13**, e00099, (2019).
37. 김영수, 성덕대왕신종의 지중음파 및 공중음파의 스펙트럼 특성, *정보통신연구논문집* **4**, p44-75, (1997).
38. 김석현, 이종혁, 신라대종의 맥놀이 조절, *한국음악학회지* **36**, 194-201, (2017).
39. 설문원, 디지털 환경에서의 로컬리티 기록화 방법론 연구, *한국기록관리학회지* **11**, p207-230, (2011).
40. 조철제, *또 다른 경주를 만나다*, p84-117, 선, (2014).