

수구여신(修舊如新) 관점에서의 문화재 복원에 관한 디자인 연구
- 3D 스캐닝과 3D 프린팅의 복합적 적용을 중심으로 -

Design Research in Cultural Heritage Restoration
- Focusing on Developing and Applying Integration of 3D Scanning and 3D Printing -

주저자

배초문 (Pei, Chaowen)

국민대학교 테크노디자인전문대학원 제품이노베이션디자인학과 VR.3D프린팅제품디자인랩

교신저자

권호선 (Kwon, Hyosun)

국민대학교 공업디자인학과 조교수

hyosun.kwon@kookmin.ac.kr

목차

1. 서론

- 1-1. 연구 배경 및 목적
- 1-2. 연구 방법 및 범위

2. 문화재 복원에 대한 이해

3. 3D 스캐너 디자인 및 제작

- 3-1. 3D 스캐너 설계

4. 맞춤형 제작 3D 스캐너의 성능

검증 - 문화재 3D 스캔

- 4-1. 파단면 스캔 비교 검증

5. 맞춤형 제작 3D 스캐너의 효용성

검증 - 청동정(靑銅鼎耳) 모의 복원

- 5-1. 청동정이 손실부 리버스 모델링
- 5-2. 청동정(靑銅鼎耳)의 표면 무늬 복원
- 5-3. 복원 모델 출력 및 접합 확인

6. 연구 시사점과 한계점

7. 결론

참고문헌

(요약)

3차원 모델을 이용한 래피드 프로토타이핑 기술이 빠르게 발전함에 따라 3D 스캐닝과 3D 프린팅 기술이 문화재 보호 분야에서 광범위하게 응용되고 있다. 다양한 문화재 중 청동기 유물에 대한 전통 복원 과정은 복원 재료가 원본 문화재를 부식시키고 복원 과정을 조작하기 어렵다는 문제점이 존재한다. 본 연구에서는 3D 스캐닝과 3D 프린팅 기술을 활용하여 중국 고대 청동기 시대의 문화재 복원 과정을 소개한다. 특히, 본 연구는 수구여신(修舊如新) 방식에 입각하여 훼손된 문화재에 신기술을 적용하여 복원하는 방식의 가치를 재고한다. 3D 프린터를 이용해 저렴한 비용으로 제작 가능한 3D 스캐너를 개발하고 이를 활용하여 문화재의 형태적 특징과 구조를 다각도에서 신속하게 촬영하는 방식을 확인한다. 또한, 대중적인 3D CAD 소프트웨어를 사용해 문화재의 가상 모형을 복원할 수 있는 가능성을 보였다. 가상 복원을 마친 3D 모델을 3D 프린터로 출력하여 실제 문화재 복원에 적용하였다. 본 연구는 맞춤형 제작 가능한 3D 스캐너를 제안하여 기존의 첨단 3D 스캐너의 비용적 한계를 극복하고, 3D 프린팅 기술을 활용하여 전통 문화재 복원 작업에서 디지털 기술의 대중화 가능성을 시사하였다.

(Abstract)

Rapid Prototyping technology, including 3D scanning and 3D printing, has been widely applied in the field of cultural heritage restoration. Many artifacts from Chinese Bronze Age have been found with corruptions and losses that make archaeologists difficult to work through the restoration process. In this study, we developed a bespoke and affordable 3D scanner made with 3D printers. We examined our scanner in the restoration of an ancient Chinese object, which has been passed down from the Chinese Bronze Age. We captured and recorded the morphological features and structural information of the damaged artifact. We then employed the photos in restoring the virtual model of the artifact using 3D CAD software. The completed model was 3D printed and applied to the restoration of the original artifact. Our research addresses how digital technology can make cultural heritage restoration widely available to designers and researchers who wish to engage in this area.

(Keyword)

Cultural Heritage, Restoration, 3D Scanning, 3D Printing, 3D Modeling, Chinese Bronze Age

1. 서론

1-1. 연구의 배경 및 목적

중국 고대의 청동기는 깊고 풍부한 역사를 가지고 있다. 특히, 상주(商周) 시기의 청동기 문화재는 그 시대의 사상과 노비 제도에서의 생산 및 생활 방식을 잘 보여주기 때문에 당시 역사를 이해하는데 매우 중요하게 여겨진다. 또한, 이 시기의 청동기는 사회관계, 생산 방식 및 사람들의 미의식의 변화를 잘 나타내고 있어서 고대 노동자들의 지혜와 창의성을 볼 수 있다. 하지만 이 시기의 많은 문화재들이 지하 무덤이 무너지면서 받은 하중으로 인해 변형되거나 조각 난 상태로 출토되어 문화재의 보존과 연구 및 전시에 상당한 영향을 미친다. 문화재의 훼손과 손상은 범국가적인 인류의 큰 손실이다. 따라서, 문화재의 원시적 모습을 재현하는 문화재 복원 작업이 매우 중요하다.

현재 문화재 복원은 “수구여구(修舊如舊)”와 “수구여신(修舊如新)”, 두 가지 사상이 지배적이다. 이 두 사상은 모두 문화재를 보호하고자 하는 공통점을 갖고 있지만, 그 방식에서 차이를 나타낸다. “수구여구 (修舊如舊: 낡은 것을 옛것처럼 고치다)”는 문화유산을 보호하는 과정에서 하나의 기술적인 요구이다. 이미 훼손된 낡은 물건을 수리하여 낡은 모습 그대로 유지하는 것이다. “수구여신(修舊如新: 낡은 것을 새것처럼 고치다)”은 일부 예술품과 유물의 낡은 외형은 오염되거나 보존이 잘못되었기 때문이며 본래의 역사적 원형에 맞지 않는다는 의미이다. 따라서, 문화재를 복원할 때에 불필요하거나 본 문화재를 손상시킬 수 있는 요소를 제거하는 동시에 그 원형을 최대한 환원하여 사람들이 해당 예술품을 다시 접하고 감상할 수 있도록 해야 한다는 취지를 갖고 있다. 의중 (Yi-zhong, 2009)¹⁾에 따르면, 수구여구는 역사적 진실 유지를 강조하고 수구여신은 역사적 진실의 환원을 강조한다. 문화재 파손 현황에 따라 “수구여신”과 “수구여구” 복구 방향을 선택해야 한다. 금속 유물의 경우, 수구여구 사상의 복구 작업은 문화재가 낡아서 생기는 금속 녹반점이 문화재를 훼손시킬 가능성이 있다. 따라서 지속적인 복구 작업이 필요하다. 이에 반해, 본 연구에서는 “수구여신(修舊如新)”의 방향성을 채택하여 문화재 복원에 필요한 스캐닝 도구를 개발하여 이를 활용한 복구 작업 시현을 통해 그 확장성을 검증해 보았다. 이를 위해, 새로운 디지털 기술, 3D 스캐닝 (Scanning), CAD 모델링 및 3D 프린팅 (Printing)을 문화재 복원에 적용하였다. 브랜디 (Brandi, 2005)²⁾는 “효과적인 문화재 보호와 복원은 문화재에 대한 예술적, 역사적 연구만으로는 충분한 지지를 얻을 수 없으며, 동시에 일련의 기술적 분석과 연구가 필요한데, 이 작업에 있어 현대 과학은 매우 중요한 수단으로 작용할 수 있다”고 강조했다. 레이저 스캐닝과 같은 과학 기술은 이미 문화재를 수리·연구하기 위해 상태를 파악하고 실측하는 등과 같이 가장 기초적이지만 중요한 작업에 활발히 적용되고 있다 (문승현, 2011)³⁾. 하지만, 첨단 과학 기술은 많은 비용이 들고 일반인들이 접근하는 데에 한계가 따른다. 특히, 고대 문화재가 많은 중국의 소도시에는 문화재 복구를 위한 3D 스캐닝 장비가 없는 경우가 많고 문화재 복구 예산도 제한적이어서 저렴한 보급형 3D 스캐닝 장비를 설계, 제작 및 보급 방안에 대한 연구가 필요하다. 이에, 본 연구에서는 3D 프린터를 이용해 저렴하게 제작 가능한 3D 스캐너를 디자인하고 이를 실제 청동기 문화재 모의 복원 작업에 활용하여 그 효용성을 확인한다. 나아가, 오픈소스 3D 스캐너를 제안하여 문화재 모의 복원의 대중화와 확장성을 제고하고자 한다. 최종적으로, 고고학 및 문화재 정밀 분석, 레이저 스캐닝 기술 개발 등의 영역으로 여겨졌던 문화재 복원 분야에 3D 프린팅 및 3D CAD 디자인 분야 연구자들의 더 많은 관심을 유도하여 완성도 높은 작업으로 문화재 복원 분야의 발전에 기여하고자 한다. 본 연구에서 검

-
- 1) Yi-zhong, Q. (2009). Discussion of two common problems of oil painting restoration. *Sciences of conservation and archaeology*. Issue 3, Page 75-80
 - 2) Brandi, C. (2005). *Theory of Restoration* (Cynthia Rockwell, Trans). Istituto Centrale per il Resta. (Original work published 1977)
 - 3) 문승현. (2011). 미륵사지석탑 정밀 복원모형 제작을 중심으로 한 3차원 실측데이터의 활용 연구. *문화재*, 44(2), 76-95.

증하고자 하는 연구 문제를 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 접근성 높은 저렴한 재료, 부품 및 오픈소스 3D CAD 소프트웨어를 사용하여 파손 문화재의 형상을 저비용으로 디지털화하는 보급형, 오픈소스 3D 스캐너를 개발할 수 있는가.
2. 개발된 3D 스캐너를 활용하여 도출된 모델을 통해 문화재의 손실된 부분을 역설계하고 그 모델을 3D 프린트하여 문화재를 보충하는 수구여신(修舊如新) 관점의 복원 작업을 효과적으로 달성할 수 있는가.

위의 두 연구 문제에 답하기 위해 우선, 연구진이 디자인 및 개발한 3D 스캐너를 이용한 문화재 3D 모델과 이미 상용화되어 문화재 복원에 사용되고 있는 3D 스캐너 장비를 활용한 3D 모델을 비교하여 연구진이 제작한 스캐너의 효용성을 검증할 것이다. 그리고 DLP (Digital Light Processing) 방식의 3D 프린팅으로 탄성을 갖는 합성수지를 프린트하여 손실된 문화재를 복원하여 훼손 문화재와 접합하여 스캐닝의 효과를 실증적으로 확인한다. 이 과정에서, 고가의 전문 가용 장비 보급이 어려운 중국의 많은 소도시에서의 문화재 복원 작업에 오픈소스 3D 스캐닝 및 프린팅 장비를 적용함으로써 문화재 복원의 대중화 가능성을 볼 수 있을 것이다.

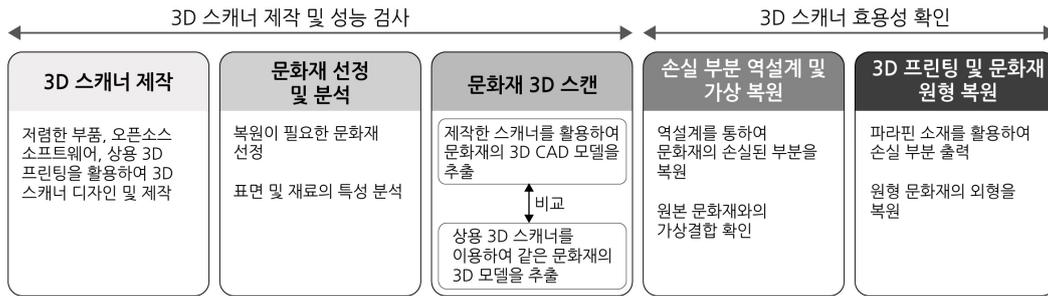
1-2. 연구 방법 및 범위

본 연구에서 다루어진 청동기 유물 보충 작업을 위한 연구 방법과 순서는 <그림 1>과 같이 요약할 수 있다. 우선, 복원이 필요한 유물을 디지털 도면화 하는 작업을 위한 3D 스캐너를 제작한다. 그리고 복원할 문화재를 선정하고 표면 및 재료의 특성을 분석한다. 이후, 스캐너의 효용성을 확인하기 위한 모의 문화재 복원 작업을 진행한다. 제작한 3D 스캐너를 활용해 해당 문화재를 스캔하여 3D CAD 모델을 완성한다. 이때, 개발된 3D 스캐너의 측정 신뢰성을 검증하기 위해 문화재 복원에 사용되고 있는 상용화된 전문 3D 스캐너를 활용하여 같은 문화재를 스캔하고 3D 모델을 도출 하여 측정 결과를 비교한다. 이후, 역설계(reverse modeling) 과정을 통하여 결함 부분을 복원하고 원본 문화재와의 가상결합을 확인한다. 마지막으로 파라핀 소재를 활용하여 DLP 3D 프린팅 기술을 통해 손실된 부분을 출력한 후 원본 문화재와 결합하여 문화재의 외형을 복원한다.

본 논문은 스캐닝 장비, 복원 소재, 3D CAD 소프트웨어 개발 등 형상 복원 기반 기술 개발이나 프린팅 재료 비교 분석, 새로운 공학적 설계 방법 개발이 아닌, 오픈소스 3D 스캐너 디자인, 개발 및 그 효율성 검증에 대한 내용을 주 범위로 다룬다. 복원에 적합한 소재나 역설계 방법은 이미 선행 연구에서 밝혀진 방법을 활용하면서 보급형 3D 스캐너 및 프린팅 장비를 이용한 문화재 복원 전체 과정에 초점을 맞춘다. 본 연구의 범위는, 문화재 복원 과정 중 보충 작업에 초점이 맞추어져 있다. 이를 위해 상용화된 저렴한 3D 프린터, 카메라, 마이크로컨트롤러 및 오픈소스 3D CAD 소프트웨어를 사용하여 개발한 보급형 3D 스캐너가, 고가의 전문 장비가 보급되기 어려운 중국의 많은 소도시에서 고대 문화재의 모의 복원 작업에 활용할 수 있는 가능성을 검증하는 것이다. 따라서, 본 논문은 맞춤형 제작 가능한 3D 스캐너의 디자인 및 제작, 그리고 이를 통한 문화재 모의 복원 과정을 보여줌으로써 보급형 오픈소스 3D 스캐너의 효용성을 제고한다.

2. 문화재 복원에 대한 이해

현재 문화재 복원은 목적에 따라 세 가지 방침인 상업 복원, 전시 복원, 고고학 복원으로 구분된다. 그중에서 청동기 보호의 복원 이념에 가장 부합되는 것은 전시 복원이다. 손실된 청동기의 부분에 대한 정보와 근거를 충분히 파악하고 있을 때, 복원 작업을 통해 유물이 완전무결하게 보이게 할 수 있다. 청동기를 보호하는 원칙에서 가능한 한 대중의 심미적 취향에 부합하여 사람들의 문화적 수요



〈그림 1〉 연구 방법 및 절차

를 만족시킬 수 있는데, 이때 현대인들의 심미적 안목을 위해 청동기의 원시적인 미를 왜곡해서는 안 된다. 결국, 사람들의 취향과 미적 감각은 시대의 변화, 문화 배경과 교육 정도 등의 영향을 받기 때문에 시기마다 아름다움에 대한 정의도 다르게 나타난다. 따라서, 현대인들의 심미적 기준이 변화함에 따라 “원상태를 바꾸지 않는다”는 원칙을 어느 정도 위반하여 청동기가 지닌 그 자체의 풍부한 예술성을 변형하는 사례도 있다 (Wu, 2020)⁴⁾. 중국 베이징 고궁 박물관의 청동기 유물 전시·보완 사례를 그 예로 들 수 있다. 고궁 박물관에서는 소장하고 있는 수면문(獸面文)과 청동술(靑銅斝)에 대하여 형태와 문식 및 공예 등의 관점에서 연구를 진행하였다. 그 후, 복구 과정에서 문화재 보호 및 복구에 관한 원칙에 따라 문화재를 해치지 않는 아크릴 수지 재료를 사용하여 청동 문화재의 절단된 부분에 접착 복원 작업을 실행하였다 (Wang et al., 2020)⁵⁾.

중국 청동기 전통 복원 공예는 수천 년의 발전을 거쳐 몇 세대의 전승, 개선, 혁신을 거친 후에 독특한 기술공예를 형성했는데 주로 정보 채취 (문화재에 관한 정보 채취), 녹 검출 분석 (문화재의 녹 정도 측정), 녹 제거(문화재 표면 소재 및 녹 제거), 교정 (문화재의 외형 교정), 보충 (문화재 분실 부분의 보충), 용접 (용접 또는 접착 문화재 조각, 구제 (채색), 완녹 (문물의 부식 완화), 봉인 (문화재의 봉인) 등의 과정으로 나뉜다. 그중에서 보충 작업이 가장 중요하다. 만약 출토된 청동기가 파손이 심각하고 부분적인 손실이 있다면, 문화재 복원 시 이를 보충해야 한다. 전통적인 보충 작업의 절차는 다음과 같다 (Lei, 2019; Mu, 2020)⁶⁾⁷⁾. 첫 번째, 탁본을 뜬다. 청동기 문화재의 결점이 있는 경우, 종이를 뒤를 받쳐준 후 사라진 결점과 같은 크기의 모양을 종이에 그린다. 그다음, 그 모양을 원본 문화재와 비슷한 두께의 붉은 동판에 붙여 강철 끌로 절단한다. 두 번째는 판금 작업이다. 내려치기(평평한 망치로 동판을 갈아 적당한 두께로 만들기), 팽개치기(동근 머리의 볼록 망치로 평면 동판 조각을 북 모양을 만들어 적합한 원본 기물의 형상 만들기), 떼기 등 일련의 과정이 끝나면 탁본 된 동판을 정형화된 패치로 처리한다. 세 번째는 금속새김 작업이다. 금속새김은 강철 끌로

4) Wu Xin. (2020) . 浅谈青銅器保护修整理念——以一件青銅觚的保护修复为例. 文物鑑定与鉴赏 (청동기 복원 이념을 토론하다 - 청동배의 보호 복구를 예시로 문화재 감정과 감상). Cultural relic identification and appreciation. 178 (07) .90-91.TS934;K876.41.
<https://wap.cnki.net/touch/web/Journal/Article/WWJS202007034.html>

5) Wang You Liang. Gao Fei. Xun Yan. (2020). 故宫博物院藏兽面纹青銅斝的保护修复研究 (고궁박물관 소장수면문 청동술의 보호 복원 연구). China Cultural Heritage Scientific Research.02.70-75.G264.3.
<https://wap.cnki.net/touch/web/Journal/Article/ZGWW202002013.html>

6) Lei Lei. (2019) . 銅板补配法在青銅文物修復中的應用. (동판보배법) STUDY ON NATURAL AND CULTURAL HERITAGE.4 (2) .95-98.K876.41.
<https://wap.cnki.net/touch/web/Journal/Article/YCBH2019S2020.html>

7) Mu JinFeng. (2020) . 傳統修復与現代科技在青銅文物修復中的应用分析. (청동유물 복구에 있어서 전통복구와 현대기술의 응용분석). Jingu Wenchuang. 23. 78-79. K876.41.
<https://wap.cnki.net/touch/web/Journal/Article/JGWC202023033.html>

철판에 무늬를 새기는 기술이다. 그 과정은 먼저 평평한 동판 패턴에 이전 모양대로 연속적인 부분을 그린 후, 금속새김 접촉제로 금속새김이 필요한 청동 패턴을 오프셋 플레이트에 단단히 부착한다. 마지막으로 금속새김 도구를 이용하여 문양을 새긴다.

원시 문화재의 전시 복구 작업에 있어 재료 선택 및 복원 방법은 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 금속 소재의 경우 경도가 높아 금속으로 제작된 복원부를 무른 소재의 문화재에 접합시 문화재 원형을 손상시킬 수 있으며, 접합부에 부식이 발생할 수 있어 사용에 신중을 기해야 한다 (Grousset, 2016; Rocca&Mirambet, 2007)⁸⁾⁹⁾. 또는, 복원부 형상 맞춤의 금형 제작을 합성 수지 재료를 사용할 수도 있다. 이때, 금형 제작이 필요한데 고가의 비용이 필요하고 금형의 정밀도가 높지 않으며 오차가 생길 수 있는데 이는 후기에 다듬기 작업이 추가적으로 필요하다 (Yan, 2020)¹⁰⁾. 석고 재료를 활용한 수리복원 방법도 있지만, 석고는 깨지기 쉬워 습도를 세심하게 고려해야 하는 어려운 점이 있다. 또한, 석고의 그라인딩 과정에서 발생하는 먼지는 사람의 호흡기에 악영향을 미치기도 하며 (Orsborne&Longcore, 2021)¹¹⁾, 복원 작업 중 원본 문화재와 큰 오류가 발생하면 다시 제작해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 탄성이 높은 합성수지 재료(예: 파라핀 소재)를 활용함으로써 (김사덕, 강대일, 1999; Lin, 2015)¹²⁾¹³⁾ 원본 문화재와의 접촉면 손상을 방지하고 동시에 틈새 기공(Void)이 없는 완전 밀착 상태를 실현함으로써 높은 접합강도를 갖는 보충 작업을 달성하고자 한다.

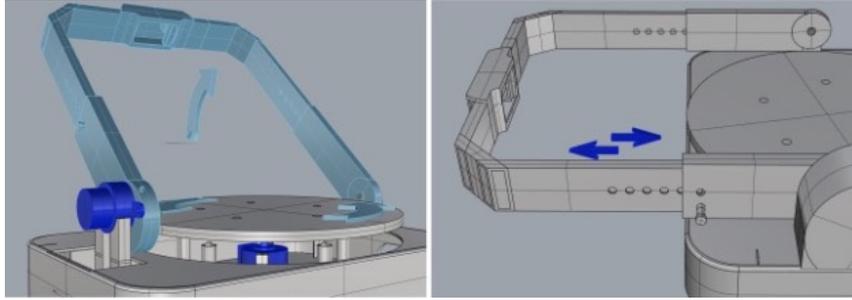
3. 3D 스캐너 디자인 및 제작

시중에 판매되고 있는 3D 스캐너 장비는 높은 가격, 낮은 휴대성, 비호환 소프트웨어, 장비 사용에 대한 전문 지식 요구 등 다양한 면에서 아직까지는 접근성이 매우 낮은 상황이다. 또한, 문화재 복원은 야외나 오지와 같은 곳에서 주로 작업이 행해지는데 그러한 특수 환경에서 사용될 때 고가장비의 휴대는 오염이나 파손 등의 위험성이 있다. 특히, 3D 스캐닝의 목적이 문화재 형상 전체를 높은 정확도로 디지털화하는 데 있기보다는, 복원부 제작에 필요한 파손 부위 일부 단면을 도면화 하기 위함이므로, 적정 수준의 정밀도 성능만이 요구된다는 점에 착안하여 3D 스캐너를 디자인할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 휴대성이 높고 3D 프린팅으로 맞춤 제작 가능한 저가의 3D 스캐너를 제안한다.

3-1. 3D 스캐너 설계

먼저, 3D 스캐너는 문화재를 모든 각도에서 촬영할 수 있어야 하며 모든 촬영이 끝날 때까지 문화

-
- 8) Grousset, S. (2016). Study of iron sulphides in long-term iron corrosion processes: Characterisations of archaeological artefacts. *Corrosion Science*. 112.264-275
- 9) Rocca, E., Mirambet, F. (2007). 18 - Corrosion inhibitors for metallic artefacts: temporary protection. *Corrosion of Metallic Heritage Artefacts*. 308-334. <https://doi.org/10.1533/9781845693015.308>
- 10) Yan Defu, Zhang Pengyu. (2020). 青銅文物翻模復制的一般工序—以大冶銅綠山銅斧的復制爲例 (청동 문물 복제의 일반적인 공정 - 대야동 녹산 동도끼 복제를 예시로). *China Cultural Heritage Scientific Research*. 92-96. G263. <https://wap.cnki.net/touch/web/Journal/Article/ZGWW202003015.html>
- 11) Osborne, Kendall H., Longcore, Travis. (2021) Effect of gypsum dust on lepidoptero larva. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 228. 113027. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113027>
- 12) 김사덕, 강대일. (1999). 문화재 수리복원 재료의 동향 - 특히 합성수지 중심으로 -. *MUNHWAJAE Korean Journal of Cultural Heritage Studies*, 국립문화재연구소, 32, 185 - 201. <https://doi.org/10.22755/KJCHS.1999.32.185>
- 13) Lin, ShengMin. (2015). Preparation and Structural Properties of DLP Type 3D Printing Precision Casting Light Curing Resin. (DLP型3D打印精密铸造光固化树脂制备与结构性能研究) 석사학위 논문, 지남대학교 (暨南大学). DOI: <https://10.27167/d.cnki.gjnu.2020.001636>



〈그림 2〉 3D 스캐너 모델링 과정. 카메라 팔의 회전과 길이 조절 방식

재의 위치가 달라져서는 안 된다. 이를 위해 문화재를 올려둔 회전판이 z축을 중심으로 회전할 수 있도록 설계하였다 〈그림 2〉. 그리고 촬영용 카메라가 x축을 중심으로 움직이는 팔에 부착되도록 하여 문화재 주변으로 반구를 그리며 움직일 수 있도록 하였다. 두 개의 회전축에는 각각 두 개의 스텝 모터가 회전한다. 또한, 촬영 팔은 문화재의 크기와 길이에 따라 촬영 거리를 조절할 수 있도록 디자인하였다. 카메라 (ELP-USBFHD01M)는 초고화질(4K 16:9, 2160p) 자동 촬영이 가능한 광각 웹캠(webcam)을 사용하였다. 스텝 모터 두 개를 사용하여 하나는 문화재가 올려진 원형 디스크를 회전시키는 용도, 다른 하나는 카메라가 연결된 팔의 각도를 조절하는 용도로 사용하였다. 두 개의 모터는 마이크로컨트롤보드(BKL-016)에 연결된 버튼으로 조작 가능하고 카메라는 USB 연결로 PC에서 조작 및 촬영이 가능하도록 하였다 〈그림 3〉 (가). 설계된 스캐너는 가로와 세로 폭이 40cm에 이르기 때문에 각 부분을 프린트하여 조립 및 분해하는 방식을 채택하였다. 〈그림 3〉 (나)는 최종적으로 프린트 및 조립이 완성된 후 설치된 모습이다. 3D 프린터로 자체 제작되기 때문에, 복원하고자 하는 문화재의 크기를 고려하여 스캐너 전체 크기를 맞추어 제작할 수 있다.



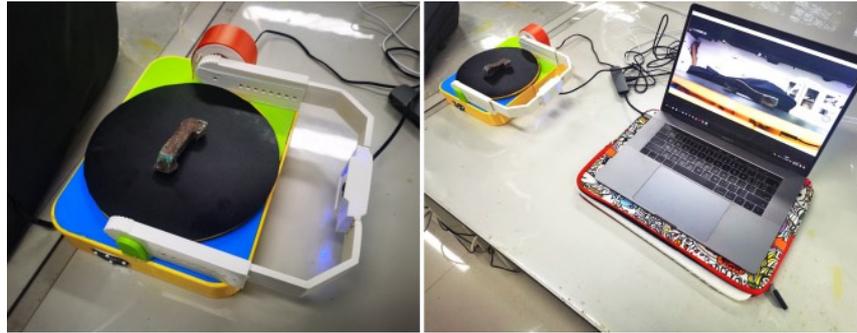
〈그림 3〉. (가) 3D 스캐너 내부 구조 및 부품 (나) 조립이 완료된 3D 스캐너

4. 맞춤 제작 3D 스캐너의 성능 검증 - 문화재 3D 스캔

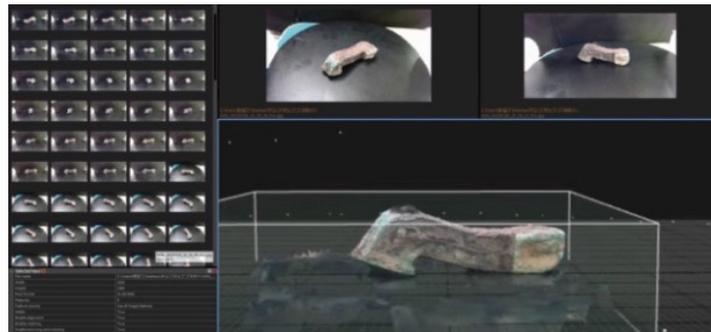
청동정의 소실된 부분의 형태를 복원하기 위해 앞서 제작한 3D 스캐너를 활용하여 촬영하였다 〈그림 4〉.

회전판 위에 청동정이 조각을 올려놓고 약 10°의 각도로 회전하며 이미지 간 최소 70%의 중첩을 허용하여 촬영하였다. 이 촬영 방법은 디지털카메라를 활용한 문화재 복원에 이미 사용되어 검증된 바 있다 (Higueras, M. et al. 2021)¹⁴. 촬영 각도에 따라 촬영 이미지 수량이 달라지는데 이에 따라 최종 모형의 정밀도가 결정된다. 매 각도마다 촬영하여 모형을 형성할 수도 있지만, 이는 고성능 컴퓨팅 파워가 필요하기 때문에 보급형 스캐너를 활용하는 모의 복원에 적합하지 않다. 또한, 청동

14) Higueras, M., Calero, A. I., & Collado-Montero, F. J. (2021). Digital 3D modeling using photogrammetry and 3D printing applied to the restoration of a Hispano-Roman architectural ornament. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 20, e00179. doi:10.1016/j.daach.2021.e00179



〈그림 4〉 제작한 3D 스캐너를 활용한 문화재 스캐닝 모습



〈그림 5〉 촬영한 문화재 사진을 활용하여 3D 모델로 변환하는 과정

정이 문화재의 크기가 작기 때문에 10° 씩 촬영하여 36장의 이미지로 모형을 형성하는 것이 적당하였다. 회전판과 동일한 색상(검정)의 배경을 사용하여 스캐닝 되는 피사체와의 전체적인 색조가 대비되도록 하였다 (Higuera, M. et al. 2021)¹⁵⁾. 세로 촬영 각도 0° 에서 36장, 45° 에서 36장, 90° 에서 1장을 촬영하였고 모든 사진을 Reality Capture 소프트웨어에서 재현하였다 〈그림 5〉. 해



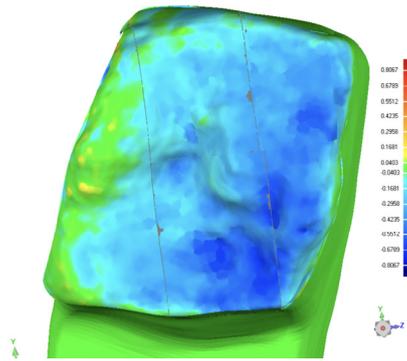
〈그림 6〉 (가) 스캐너 캘리브레이팅. (나) 청동정이 스캐닝 모습

당 소프트웨어로 모든 사진을 불러오면 실시간으로 3D 모델을 〈그림 10〉 (가)처럼 생성할 수 있다.

4-1. 파단면 복원 모델 비교 검증

본 연구에서 가장 중요한 연구 목표는 자체 제작한 3D 스캐너를 활용하여 훼손된 문화재의 파단면을 스캔하고 그것이 모의 복원에 활용될 수 있는 정도의 모델인지 확인하는 것이다. 따라서, 자체 제작한 3D 스캐너의 성능을 검증하기 위해 문화재 복원 분야에서 사용하는 고성능 전문가용 상용 3D 스캐너(EinScan-SP desktop, Shining3D®, 중국)을 사용하여 스캔 된 모델을 비교하였다 〈그림 6〉. 이 장비는 백색광의 3D 스캐닝 기술을 사용하며, 측정 정밀도는 50μm이다. 이 상용 스캐너를 통해 얻은 청동정이 3D 형상 데이터를 앞서 자체 제작 3D 스캐너로 획득한 3D 모델과 비교하기 위해 CAD 소프트웨어 (Geomagic® Control X™)를 이용하여 청동정이 파단면의 주요 기구학적 특

15) Ibid. p.4



〈그림 7〉 두 스캐너로 추출한 파단면 모델을 겹쳐서 일치하는 정도를 확인하는 작업.

징들 (폭, 높이, 접합 단면 프로파일 등)에 대해 치수를 측정하였다 〈그림 7〉. 〈그림 7〉과 같이 두 모델을 겹쳐 파단면을 비교한 결과, 두 파단면의 일치 정도를 측정한 오차 값의 범위는 $-670\mu\text{m} \sim 166\mu\text{m}$ (Mean: $-20 \sim 190\mu\text{m}$, SD: $183\mu\text{m}$) 에 분포함을 확인할 수 있었다. 이는 일반적인 웹캠으로 얻은 수치로써 상용 스캐너와 매우 근소한 차이를 보였으며, 향상된 성능의 웹캠으로는 더욱 근사한 값을 얻을 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 또한, 마이크로미터 수준의 오차는 본 연구에서 사용하고자 하는 합성수지 소재의 탄성을 고려했을 문화재와 접합되면서 받는 탄력으로 메워질 수 있는 정도의 공백이라고 할 수 있다. 이로써, 제작한 3D 스캐너와 오픈소스 CAD 프로그램을 활용하여 문화재 모의 복원을 위한 3D CAD 모델을 획득할 수 있음을 확인하였다.

5. 맞춤 제작 3D 스캐너의 효용성 검증 - 청동정(靑銅鼎耳) 모의 복원

본 연구에서 개발한 3D 스캐너가 실제 문화재 모의 복원 과정에 적용 가능 여부와 더불어 저가의 보급형 3D 스캐너로 발전될 가능성 여부를 확인하기 위해 실제 훼손된 문화재 모의 복원을 진행하였다. 모의 복원의 모든 과정은 문화재 복원 시 진행되는 과정과 동일하게 하였다. 본 연구에서는 중국 장쑤성 쉬저우 박물관에 보존되어 있는 청동정(靑銅鼎) 문화재를 활용하였다. 박물관 고고학자들에 따르면, 해당 문화재는 서주(西周) 왕조(기원전 771-1046년) 시기에 제작되었다고 한다. 청동정은 몸체 장식이 매우 풍부하여 서주 시대의 역사와 문화를 연구함에 있어 큰 가치가 있다. 현재 이 문화재는 지하 매장, 압출, 불법유통 등으로 인해 43조각만이 남아있으며, 이 중 9조각은 청동정의 몸체, 2조각은 귀, 1조각은 청동정의 덮개에 해당한다. 본 연구에서는 청동정(靑銅鼎耳), 즉 훼손된 한쪽 귀 부분의 복원만을 다루고자 한다 〈그림 8〉 (좌). 본 연구에 활용된 문화재는 외부에 공개되지 않는 것이기 때문에 여러 차례의 박물관 협조를 요청하여 연구 허가를 받을 수 있었다.

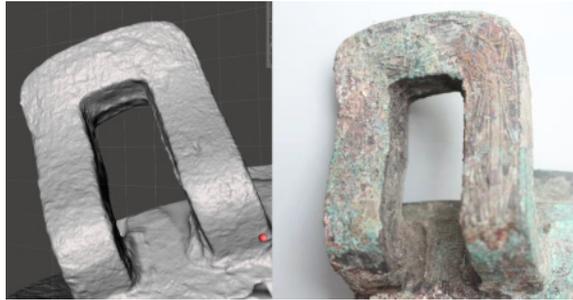
5-1. 청동정이 손실부 리버스 모델링

연구진은 두 차례의 3D 스캔을 통해 얻은 모형 데이터에 따라 소실된 문화재 부분의 가상 모형을 재구성하였다. 역 모델링 진행을 위해 우선 훼손되지 않은 하나의 온전한 청동정(靑銅鼎)을 3D 스캐너로 측정하여 전체 형상(Cast 1)을 획득하였다 〈그림 9〉. 그리고 반대편의 훼손된 청동정(靑銅鼎)을 스캔한 형상 (Cast 2)으로부터 복원부가 접합될 파단면 표면을 획득할 수 있다. Cast 1과 Cast 2 형상 정보로부터 복원이 필요한 부분의 개략 형상(Cast 3)을 얻고, 여기에 파단면 접합 표면 상세 프로파일 형상을 개략 형상에 결합한 최종 복원 형상(Cast 4)을 도출한다.

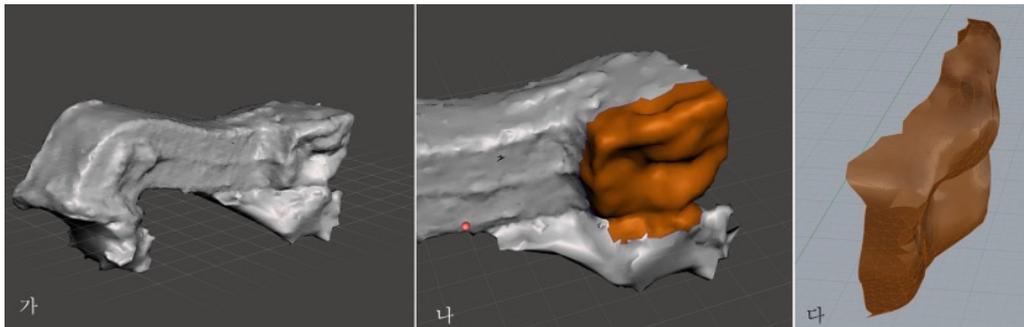
위의 작업을 위해 meshmixer 와 Rhino(버전 7.0) 소프트웨어를 사용했는데, 그 이유는 다음과 같



〈그림 8〉 (좌) 훼손된 청동정이가(青铜册耳) (우) 보존된 청동정이가(青铜册耳)



〈그림 9〉 (좌) 보존된 완전한 청동정이를 스캔하여 얻은 모형 (Cast 1). (우) 실제 청동정이가 문화재



〈그림 10〉. 〈그림 4〉 단계를 통해 만들어진 모형으로부터 파손된 표면을 NURBS로 변환하는 과정. (가) 훼손된 청동정이가의 스캔 모형 (Cast 2). (나) 파손된 표면을 추출하기 위해 붉은 색으로 표시. (다) 추출되어 NURBS로 전환된 파손된 표면

다. Rhino(버전 7.0) 소프트웨어는 OBJ 포맷의 모델을 STL 포맷의 모델로 변환하고 격자 모델을 곡면 모델로 변환하는 새로운 기능을 가지고 있다. 다만 너무 복잡한 모형은 전환이 불가능하다. 이 때문에 meshmixer 소프트웨어를 이용해 훼손된 청동정이가의 3D 격자 모델의 파손된 표면만을 추출해야 하는데 3D 스캔을 통해 완성된 모형이 너무 복잡하여 직접 모델링을 하는 것이 어렵기 때문에 Rhino 소프트웨어에서 모델 형식을 변환하여 진행할 수 있다 〈그림 10〉 (가), (Cast2). 〈그림 10〉 (나)의 붉은 부분이 파손된 표면으로 복원에 사용될 부분이다. Cast 2 모형의 파단면과 접합될 Cast 3의 결합부 표면 프로파일 정보를 획득하기 위해서 두 모델의 해당 단면 위치에서 Boolean 연산 절단 기능을 수행해야 하는데, Rhino 소프트웨어를 통해 가져온 STL 형식의 Cast 2 모형은 Cast 3 모형과 직접적으로 Boolean 연산을 실행할 수 없다. 따라서, Cast 2 모형에서 추출한 손상된 표면을 NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) 기하 모델로 전환하여 연산을 수행하였다 〈그림 10〉 (다).

3D 프린팅으로 제작할 복원부 3D 모델을 획득하는 상세 과정은 다음과 같다. 손실된 청동정이가

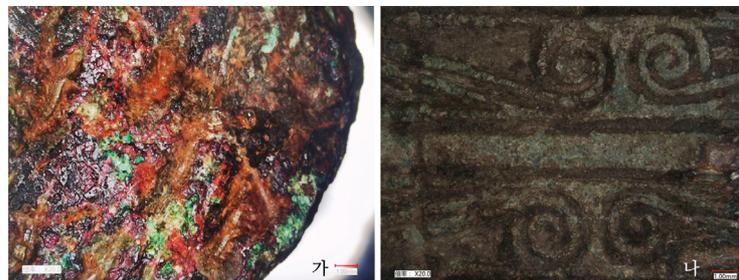
부분모형의 제작을 위해 Rhino 소프트웨어를 사용하여, 스캔이 완료된 Cast 1 모델에 따라 곡면 모델링 기능으로 결합 부분의 다중 곡면 모형을 만든다 <그림 11> (가), (Cast 3). 그리고 Cast 3 모형의 각 곡면에 곡면 재건 기능을 적용해 각 곡면을 조정한다. 또한, Cast 3 모형과 Cast 2 모형과의 대조 및 Cast 1 모형과의 비교를 통해 손상된 표면을 제외한 Cast 3 모형 표면 외관을 실제에 가깝게 재현한다. 다음 단계에서는 Boolean 연산 절단 기능을 사용하여 전환된 파손 표면 <그림 10> (다)와 손실 부분을 재현한 모형(Cast 3)을 절단한다 <그림 11> (나). 이러한 과정으로 완전한 청동정이의 복원부 모형을 완성할 수 있다 <그림 11> (다), Cast 4.



<그림 11>. (가) Cast 1로부터 도출한 소실된 청동정이가 부분 (Cast 3). (나) Boolean 연산 절단 기능을 활용하여 파손된 표면을 복구한다. (다) 손실된 청동정이가 부분을 완성한다 (Cast 4).

5-2. 청동정이(靑銅鼎耳)의 표면 무늬 복원

해당 청동정이가(靑銅鼎耳)의 표면 장식 3차원 형상 추출을 위해 청동정이가(靑銅鼎耳) 문화재 2조각의 표면에서 관찰할 수 있는 무늬의 패턴을 분석하였다. 표면층과 국부 무늬의 구성은 입체형 현미경을 통해 분석하였다. 이를 위해 평행광을 가지고 있는 KEYENCE VHX-5000 현미경을 사용했다. 해당 현미경에는 무한 자동보정 광학 시스템이 탑재되어 있어 20 에서 200배까지 확대 가능하다. 이를 통해 청동정이가 표면의 세밀한 모습을 관찰하였다 <그림 12>.



<그림 12>. (가) 20배로 확대한 청동정이가(靑銅鼎耳)의 표면. (나) 관측된 국소 무늬 장식

그림 7의 좌측 이미지는 현미경을 활용해 관찰한 청동정이가의 모습이다. 음각으로 들어간 부분이 무늬 장식의 흔적을 짐작할 수 있다. 이후 일반 고해상도 DSLR 카메라로 촬영해 확대 관찰하면 해당 문화재의 무늬 장식 사진을 확인하였다 <그림 12> (나). 이를 바탕으로 완전한 무늬 장식을 추리해 낼 수 있다. 문화재 표면의 무늬 장식을 복원하기 위해 손실된 부분의 무늬를 청동기 대칭성의 원칙에 따라 추론하였다. 우선, 섹션 4.1의 과정에서 추출한 국소 무늬 장식을 Rhino 소프트웨어로 불러와 무늬를 그린다. 불분명한 곳이 있을 경우 입체 현미경으로 촬영한 국소 무늬 사진을 참고하여 식별 가능한 무늬 장식 패턴을 그려내고 식별 가능한 무늬에서 규칙성을 찾아내 최종 무늬 패턴을 그린다. 소프트웨어에서 그린 패턴을 촬영한 청동정이가 사진 위에 올려 대조하면서 전체 무늬를 완성할 수 있다 <그림 13> (가), (나), (다). 서주 시대 청동기 무늬 장식은 대부분 좌우 대칭의 형태를 나타낸다. 예를 들어, 상해 박물관 전시실에는 서주 시대의 큰 정(鼎) 두 개가 있는데, 하나는 "대우정(大盂鼎)"이라 불리고, 다른 하나는 "대극정(大克鼎)"이라고 불린다. 두 정(鼎)의 무늬 장식은 모두 좌우가 대칭이다 (Wei, 2020)¹⁶. 이 특징에 따르면, 두 청동정이가의 안쪽 무늬를 통합함으로써

안쪽의 모든 무늬 패턴을 예측할 수 있다 <그림 13> (가-1), (나-1), (다-1). 해당 청동정의의 무늬는 안쪽과 바깥쪽에 분포되어 있다. 같은 방법으로 청동정의의 바깥쪽 무늬 장식 패턴을 복원했을 때, 바깥쪽 무늬 장식과 안쪽 무늬 장식 패턴은 대체로 일치하였고 패턴 배치는 동일하며, 모두 좌우 대칭의 패턴으로 확인된다. 그러나 바깥쪽 무늬 장식과 안쪽 무늬 장식 패턴의 국소 무늬 방향은 반대이며, 바깥쪽 전체 무늬 장식 패턴과 안쪽 무늬 장식 패턴 사이의 상하 간격은 다르게 나타난다. 이러한 특징에 따라 두 개의 청동정이 바깥쪽 식별 가능한 무늬를 통합한 후 바깥쪽의 무늬 장식을 완성할 수 있다 <그림 13> (가-2), (나-2), (다-2).



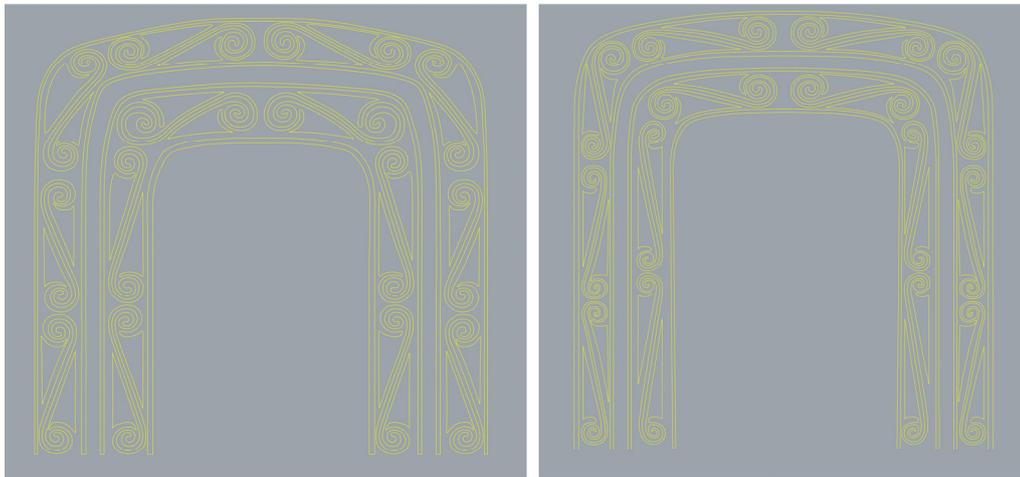
가-1. 보존된 청동정이 안쪽

가-2. 보존된 청동정이 바깥쪽



나-1. 훼손된 청동정이 안쪽

나-2. 훼손된 청동정이 바깥쪽



다-1. 복원된 안쪽 무늬 장식

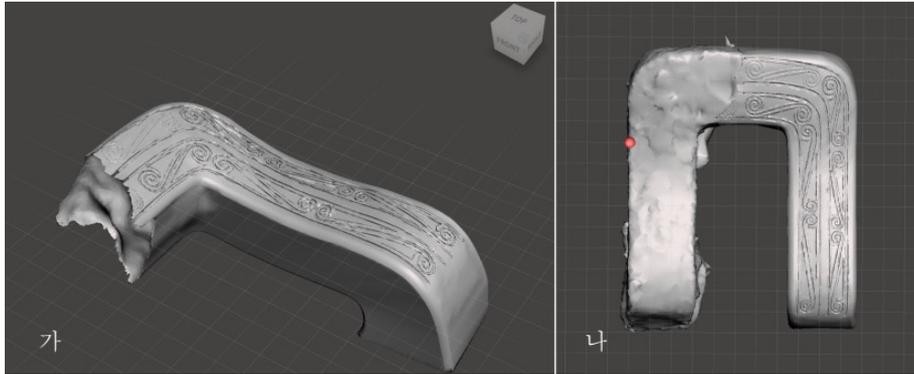
다-2. 복원된 바깥쪽 무늬 장식

<그림 13> 청동정이 무늬 복원 과정. 보존된 청동정의와 훼손된 청동정을 비교하여 안쪽과 바깥쪽의 무늬를 복원한다.

16) Wei, Cao. (2020). 西周青銅器上的“重环纹”命名探讨.文物. (서주 청동기에 새겨진 '중환무늬' 이름에 관한 연구).02.40-50.K876.41;K224
<http://www.dz.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=WENW202102004&dbcode=GOVJ&dbname>

5-3. 복원 모델 출력 및 접합 확인

복원한 두 무늬 장식 패턴을 Cast 4 모델에 맵핑 하여 Boolean 연산 절단을 실행하여 최종적으로 <그림 14> (가)에 보이는 훼손된 부분의 완전한 모형을 얻는다. 복원 작업을 거친 손실된 청동정이는 원본 문화재 모형(Cast 1)과 결합하여 본래의 청동정이의 모습을 재현하였다 <그림 14> (나). 최종적으로 모형을 STL 형식으로 저장하고 출력 정밀도를 0.01mm로 설정해 3D 프린팅 작업이 가능하도록 한다.



<그림 14> (가) 손실된 청동정이의 복원된 모형. (나) Cast 1을 활용하여 모의 복원한 청동정이가 원형

최종 모형을 활용해 남아있는 청동정이를 보호할 수 있는 재료로 3D 프린팅하였다. 3D 프린팅에는 여러 가지 방법이 있으며, 각각의 방법마다 정확도가 다르다. 본 연구에서 복구하는 청동정이의 모형은 매우 작고, 무늬 장식의 간격은 0.5mm를 넘지 않는다. 더 높은 정밀도를 위해 디지털 광 처리 기술(Digital Light Processing, 약칭: DLP) 방식의 3D 프린팅 기술을 선택하여 해당 문화재의 손실 부분을 제작하였다. 정밀도가 0.025mm까지 가능하며 신속 성형이 가능한 Sirius 300 (DLP) 3D 프린터를 이용하였다. DLP 광경화 3D 프린팅 기술의 기본원리는 표면광 형태의 디지털 광원이 액상 광감수지 표면에 층층이 투사되고 층층이 경화되어 성형 작업을 진행하는 것이다. 경화 시 각기 층마다 슬라이스 식 경화를 이루기 때문에 성형속도가 빠르고 정밀도가 높으며 표면 마감이 정교하다. 본 연구에서는 독일 Envisiontec의 붉은 광경화 수지를 프린팅 재료로 사용하였다 <그림 15>. 이 소재는 일반적으로 장난감, 수공예품, 보석류 등 정교한 표면 처리가 필요한 제품에 사용된다. 특히, 탄성을 가지고 있는 소재이기 때문에 원본 문화재와 결합 될 때 빈틈없이 접착되어 청동기에 해를 입히지 않기 때문에 매우 정교하고 내구성 높은 모델을 만들 수 있다 (김사덕, 강대일, 1999; Lin, 2015)¹⁷⁾18). 해당 왁스 재료는 착색 능력이 뛰어나기 때문에 프린팅 후 문화재 복원 전문가는 직접 모형에 착색 작업을 할 수 있다. <표 1>은 <그림 15> 모형의 프린팅에 활용된 파라미터 정보를 나타낸다.

17) 김사덕, 강대일. (1999). 문화재 수리복원 재료의 동향 - 특히 합성수지 중심으로 -. MUNHWAJAE Korean Journal of Cultural Heritage Studies, 국립문화재연구소, 32, 185-201.
<https://doi.org/10.22755/KJCHS.1999.32.185>

18) Lin, ShengMin. (2015). Preparation and Structural Properties of DLP Type 3D Printing Precision Casting Light Curing Resin. (DLP型3D打印精密铸造光固化树脂制备与结构性能研究) 석사학위 논문, 广东省暨南대학교. 출처: DOI: <https://10.27167/d.cnki.gjnu.2020.001636>

〈표 1〉 3D 프린팅 파라미터 정보

경화 파장	405nm
경화 출력	60mW
밀도	1.25g/cm ³
점도	200-800mPa
인장 강도	25-40MPa, 25-60D
쇼어 경도	25-60D
가열 변형 온도	80°
굴곡 강도	20-55MPa
건조층 두께	0.025-0.05mm
부피 수축률(%)	< 2.5%
pH (25 도)	6.8-7.2



〈그림 15〉 3D 프린팅으로 출력한 손실된 청동정이 부분

자체 제작한 보급형 3D 스캐너를 활용하고 3D 프린팅 기술을 통하여 손실된 청동정이 모형을 제작해 전시 복원의 보충 작업을 완료하였다. 완성된 모형을 원본 문화재와 결합하여 고대 청동정이 무늬 장식의 원본 모양을 그대로 재현하여 〈그림 16〉 문화재 복원의 가역성 원칙 (Yao, 2005)¹⁹⁾을 확인하였다. 본 연구에서는 수구여신(修舊如新) 관점의 복원 작업 과정을 완수하기 위해 원본 문화재를 모사하는 표면 처리가 아닌, 현대 기술을 적용하고 소재의 특성을 그대로 노출시키는 방식으로 복원하였다.

6. 연구 시사점과 한계점

본 논문은 전통적인 문화재 복원 방식과 달리 완전한 비접촉식의 문화재 복원 방식을 소개하였다. 그 과정에서 우선, 접근성이 높은 저렴한 재료와 부품 (예: 웹캠) 및 오픈소스 3D CAD 소프트웨어를 사용하여 파손 문화재의 형상을 저비용으로 디지털화하는 오픈소스 3D 스캐너 디자인을 제안하였다. 스캐너의 성능 검증을 위해 상용 레이저 3D 스캐너로 추출한 3D 모델과 비교하였고 두 모델의 파단면이 평균적으로 -20~190 μ m 정도의 작은 오차를 보였다. 또한, 개발된 3D 스캐너를 활용하여 도출된 모델을 통해 문화재의 손실된 부분을 역설계하고 그 모델을 3D 프린트하는 등 수구여신(修舊如新) 관점의 복원 작업을 완료하였다. 연구 과정을 통해 문화재 복원 절차 중 보충 작업에서 3D 프린팅 기술의 효용성을 볼 수 있었다.

본 연구는 문화재 복원 연구자들과 이와 관련된 3D 프린팅 디자인 분야 종사자들에게 여러 시사점

19) Yao, A.W. (2005). Applications of 3D scanning and reverse engineering techniques for quality control of quick response products. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 26 (11-12).1284-1288



〈그림 16〉 훼손되어 남아있는 청동정리와 3D 프린팅으로 복원한 손실된 청동정리 부분을 결합한 청동정리 본래의 모습

을 제시한다. 우선, 본 연구에서 개발한 3D 스캐너는 시중에 판매되는 3D 스캐너에 비해 현저히 낮은 단가로 제작이 가능하도록 하였다. 스캐닝과 모델링 소프트웨어에는 여러 종류가 있지만 본 연구에서는 산업 디자인과 3D 프린팅 관련 분야에서 일반적으로 사용되는 소프트웨어만을 사용하였다. 이러한 오픈소스 소프트웨어들은 매뉴얼이 인터넷 공간에서 널리 공유되어있기 때문에 전문 지식 없이도 사용자가 본인에게 맞는 스캐닝 조건을 확인하여 진행하는 것이 가능하다. 이를 통해 전통적으로 문화재를 복원하는 방식에 비해 시간과 비용을 절약하는 효과를 보여주었다. 또한, 스캐너 모델의 CAD 파일을 오픈소스 플랫폼에 공개하면 누구나 어디서든 프린트하여 사용할 수 있다. 이는 첨단 3D 스캐너의 보급이 어려운 지역에서 문화재 발굴 및 복원 작업을 하는 경우 매우 유용하게 사용될 수 있다. 일반적으로 3D 스캐너 장비는 이동하기 어렵고 야외에 오래 노출될 경우 파손 및 고장의 우려가 있기 때문에, 본 연구는 3D 프린터 장비만 있어도 스캐너를 그 용도와 상황에 맞게 제작할 수 있도록 하여 모의 복원까지 완료하는 방안을 제안하고 있다. 본 연구에서 제안한 3D 스캐너는 문화재 복원 분야뿐만 아니라 공방, 학교 등과 같이 다양한 디자인 작업 및 교육 현장에서 활용될 수 있다.

본 연구에서는 디지털 처리 기술(3D 스캐닝, 프린팅)을 통해 정교한 다중 곡면 3D 모델을 만들어 청동정리의 원본 형태와 표면 무늬 장식을 더욱 선명하게 표현하였다. 청동정리 복원부 제작에 적용한 DLP 3D 프린팅 기술은 유려한 표면 마감과 정밀한 표면 무늬 복원을 가능하게 함으로써, 문화재 원형을 환원하여 고대 청동정리 제작 당시 본래의 심미성을 드러내고자 하는 수구여신(修舊如新) 관점의 문화재 복원에 부합하는 복원 방법이라 할 수 있다. 또한, 3D 스캐닝을 통한 완전 비접촉 모의 복원 방법을 통해 원본 문화재를 더 확실히 보호하면서 복원할 수 있었는데, 파라핀 재료로 복원된 부분은 빈틈 밀착의 정확성을 최대한으로 높여 원본 문화재에 대한 피해를 최소화하였고 높은 내구성을 얻었다 (김영원, 전병환, 1999; 임형웅, 최원호, 2020)²⁰⁾²¹⁾. 본 논문에서 보여준 3D 스캐닝과 3D 프린팅을 결합한 이 과정은 문화재 복원 작업 중 전시 복원을 위한 보충 작업에서 중요한 성과를 거두었다고 볼 수 있다. 이 방법은 중국 강소 서주 박물관의 청동기나 다른 지역의 박물관에서 수집한 손상된 청동기 문화재 복원에 모두 사용될 수 있다.

20) 김영원, 전병환. (2005). 3차원 형상정보 처리기술 이용한 환두의 디지털 원형 복원. 한국콘텐츠학회논문지.5(4).133-140

21) 임형웅, 최원호. (2020). 임진왜란 당시 조선 화포 (중완구) 문화재복원. The Journal of the Korea Contents Association, 한국콘텐츠학회논문지. 20(7), 56 - 65. <https://doi.org/10.5392/JKCA.2020.20.07.056>

현 단계의 연구에는 몇 가지 보완점이 존재한다. 원본 문화재 표면은 복잡하기 때문에 스캔 된 모형도 매우 복잡하다. 현재 상용 웹캠을 사용하여 3D 스캐닝하여 손실된 부분을 모델링 할 때, 파일 형식의 비호환성 때문에 스캔 된 모형을 직접 조작할 수 없고 파일 형식을 변환해야 한다. 이때, 문화재 표면이 복잡하기 때문에 변환할 때 일반적인 PC로 진행하는데 소요 시간이 다소 길다. 3D 스캐너 또한 개선될 여지가 있다. 구조상 세로로 움직이는 촬영 팔은 자체 무게 때문에 떨어질 위험이 있어서 이 부분을 구조적으로 보완할 필요가 있다. 또한, 카메라를 장시간 사용하면 발열 때문에 카메라 부분의 소재가 변형될 여지가 있어 카메라 부착 부분은 열가소성이 낮은 소재를 사용하여 보완할 필요가 있다. 또한, 청동기의 문화재들은 오랜 세월 동안 눌러 있었기 때문에 많은 조각들이 뒤틀리고 변형되는 경우가 많다. 청동정 본체의 조각들은 매우 얇기 때문에 (두께 약 2mm) 이러한 변형된 문화재 조각들을 어떻게 복원할 수 있는지는 후속 연구에서 탐구할 계획이다.

7. 결론

본 연구에서는 오픈소스 3D 스캐너를 제안하여 문화재 모형을 디지털화하고 손실 부분을 3D 프린팅하여 비접촉식 문화재 복원에 적용하였다. 중국 장쑤성 쉬저우 박물관에 소장되어있는 실제 청동정 문화재 모의 복원 과정에, 개발한 3D 스캐너를 활용하여 그 효용성을 확인하였고 3D 프린팅 기술로 손실된 부분을 복원하여 대중화 가능성을 시사하였다. 중국 내의 많은 소도시에서 진행되는 문화재 복원 작업에 이러한 저렴한 스캐닝 장비가 보급된다면 모의 복원 작업이 활발히 진행될 수 있을 것이다. 또한, 본 논문에서 상세히 기술한 스캐너 설계 및 디자인, 무늬 복원, 3D 모델링 및 프린팅 등의 과정을 통해 그동안 고고학 및 문화재 연구자들의 영역으로 여겨졌던 문화재 복원 작업에 3D 모델 디자인 및 제품 디자인 분야의 전문성이 큰 역할을 할 수 있음을 실증하였다.

참고문헌

학술 논문

- 김사덕, 강대일. (1999). 문화재 수리복원 재료의 동향 - 특히 합성수지 중심으로 -. MUNHWAJAE Korean Journal of Cultural Heritage Studies, <국립문화재연구소>, 32, 185-201. <https://doi.org/10.22755/KJCHS.1999.32.185>
- 김영원, 전병환. (2005). 3차원 형상정보 처리기술 이용한 환두의 디지털 원형 복원 .<한국콘텐츠학회논문지>.5(4).133-140
- 문승현. (2011). 미륵사지석탑 정밀 복원모형 제작을 중심으로 한 3차원 실측데이터의 활용 연구. <문화재>, 44(2), 76-95.
- 임형웅, 최원호. (2020). 임진왜란 당시 조선 화포 (중완구) 문화재복원. The Journal of the Korea Contents Association, <한국콘텐츠학회논문지>. 20(7), 56-65. <https://doi.org/10.5392/JKCA.2020.20.07.056>
- Grousset, S. (2016). Study of iron sulphides in long-term iron corrosion processes: Characterisations of archaeological artefacts. Corrosion Science. 112.264-275
- Osborne, Kendall H., Longcore, Travis. (2021) Effect of gypsum dust on lepidopterous larvae. Ecotoxicology and Environmental Safety. 228. 113027. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113027>
- Rocca, E., Mirambet, F. (2007). 18 - Corrosion inhibitors for metallic artefacts: temporary protection. Corrosion of Metallic Heritage Artefacts. 308-334. <https://doi.org/10.1533/9781845693015.308>

- Lei Lei. (2019) . 銅板補配法在青銅文物修復中的應用. (동판보배법) STUDY ON NATURAL AND CULTURAL HERITAGE.4 (2) .95-98.K876.41.
<https://wap.cnki.net/touch/web/Journal/Article/YCBH2019S2020.html>
- Mu JinFeng. (2020) . 傳統修復與現代科技在青銅文物修復中的應用分析. (청동유물 복구에 있어서 전통복구와 현대기술의 응용분석). Jingu Wenchuang. 23. 78-79. K876.41.
<https://wap.cnki.net/touch/web/Journal/Article/JGWC202023033.html>
- Higuera, M., Calero, A. I., & Collado-Montero, F. J. (2021). Digital 3D modeling using photogrammetry and 3D printing applied to the restoration of a Hispano-Roman architectural ornament. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, 20, e00179. doi:10.1016/j.daach.2021.e00179
- Wang You Liang, Gao Fei, Xun Yan, (2020). 故宮博物院藏獸面紋青銅罍的保護修復研究 (고궁박물관 소장수면문 청동술의 보호 복원 연구). China Cultural Heritage Scientific Research.02.70-75.G264.3.
<https://wap.cnki.net/touch/web/Journal/Article/ZGWW202002013.html>
- Wei, Cao. (2020) . 西周青銅器上的“重環紋”命名探討.文物. (서주 청동기에 새겨진 '중환무늬' 이름에 관한 연구).02.40-50.K876.41;K224
<http://www.dz.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=WENW202102004&dbcode=GOVJ&dbname>
- Wu Xin. (2020) . 淺談青銅器保護修護理念——以一件青銅觚的保護修復為例.文物鑒定與鑒賞 (청동기 복원 이념을 토론타다 - 청동배의 보호 복구를 예시로 문화재 감정과 감상). Cultural relic identification and appreciation. 178 (07) .90-91.TS934;K876.41.
<https://wap.cnki.net/touch/web/Journal/Article/WWJS202007034.html>
- Yan Defu, Zhang Pengyu.(2020). 青銅文物翻模復制的一般工序——以大冶銅綠山銅斧的復制爲例 (청동 문물 복제의 일반적인 공정 - 대야동 녹산 동도끼 복제를 예시로). China Cultural Heritage Scientific Research.92-96.G263.
<https://wap.cnki.net/touch/web/Journal/Article/ZGWW202003015.html>
- Yao, A.W. (2005). Applications of 3D scanning and reverse engineering techniques for quality control of quick response products. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 26 (11-12).1284-1288
- Yi-zhong, Q. (2009). Discussion of two common problems of oil painting restoration. Sciences of conservation and archaeology. Issue 3, Page 75-80

학위논문

- Lin, ShengMin. (2015). Preparation and Structural Properties of DLP Type 3D Printing Precision Casting Light Curing Resin. (DLP型 3D 打印精密铸造光固化树脂制备与结构性能研究) 석사학위 논문, 지난대학교 (暨南大学). DOI:
<https://10.27167/d.cnki.gjinu.2020.001636>

도서

- Brandi, C. (2005). Theory of Restoration (Cynthia Rockwell, Trans). Istituto Centrale per il Resta. (Original work published 1977).