3D 프린팅을 이용한 토기 · 자기 문화재 복원 연구

이해순¹ | 위광철*

국립중앙박물관 보존과학부, *한서대학교 문화재보존과학연구소

Restoration of Earthenware & Porcelain Cultural Assets using 3D Printing

Hae Soon Lee¹ | Koang Chul Wi*

Dept. of Conservation Science, National Museum of Korea

*The Research of Conservation Science for Cultural Heritage, Hanseo Univ, Seosan, 356-706, Korea

¹Corresponding Author: potcup@korea.kr, +82-10-8582-1359

초록 문화재 보존처리는 손상된 문화재의 수명을 연장하고 그 가치를 재조명하는 실질적 수단으로서 높이 평가 받고 있다. 그러나 보존처리 과정은 대부분 보존처리자의 경험과 기술에 의한 수작업에 의존하고 있어 이에 따르는 많은 시간과 노력이 요구된다. 최근에는 문화재의 재질 특성과 형상에 따라 보다 정확하고 손쉽게 보존처리를 진행할 수 있는 방법을 채용할 수 있게 되었다. 즉, 지금까지 수작업으로 이루어지는 보존처리과정을 3D 프린터를 이용하여 컴퓨터 상에서 구현된 입체 형상 데이터를 실물로 출력하는 방법을 이용하는 것이다. 먼저 문화재의 결손 부분을 컴퓨터상의 데이터로 구축한 다음 3D 프린터로 출력하여 결손 부분을 손쉽게 성형 및 가공 과정을 거치는 것이다. 3D 프린터 적용 결과 반복적인 출력 및 디지털데이터의 형태 및 수치 조정이 가능하였으며, 다양한 소재를 활용한 여러 가지 복원재료로부터 시험출력을 통하여 문화재 복원의 완성도를 향상시킬 수 있었다. 본 연구에서 도자기 결손부분 복원을 위한 3D 프린터 적용 시험을 위하여 현대 재현품인 청자칠보무늬항로와 차륜식토기 2점을 인위적으로 파손시켰다. 복원결과 수작업에 비해 작업시간 단축 및 정확한 형태의 재현 등에서는 좋은 효과를 나타내었다. 반면 정밀한 접합 및 표면 질감을 생생하게 표현하기 위해서는 약간의 2차적인 수작업이 필요하였다.

중심어: 3D 스캔, 3D 프린팅, 역설계, 문화재 원형 복원, 실물복원

ABSTRACT Cultural assets restoration is being considered highly as a practical way to extend the lifespan of damaged cultural assets and re-highlight their value. However, restoration process has been mostly dependent on the manual work involving the experience and skill of a person performing restoration, thereby requiring much time and effort. In recent, it became possible to apply a method allowing restoration to be performed more accurately and easily according to the material characteristics and shape of cultural assets. Namely, it is to use a method of printing out the 3D shape data computed in computer as real object by using 3D printer for the restoration that has been performed manually. The missing part of a cultural asset is computed into computer data first and is printed out by using 3D printer to undergo a simple shaping process. The result of 3D printer application showed that repetitive output and shape and figure revision of digital data were possible, and it was possible to improve the degree of completeness of restoration through test output using

various types of restoration materials using various materials. For the purpose of verifying the possibility of applying 3D printer to restore missing part of earthenware, two pieces of modern reproductions, namely, the Seven Treasure Incense Burner and Earthenware with Wagon Wheel Decoration, were artificially damaged. The restoration result showed that compared to manual work, it showed better effectiveness in curtailing work time and reproducing accurate shape. On the other hand, secondary manual work was slightly needed for detailed binding and to vividly express surface texture.

Key Words: 3D scan, 3D printing, reverse engineering, digital restoration, life-size restoration

1. 서 론

문화재가 어떤 자연적·사회적 원인에 의하여 원래의 모습이 변형되거나 훼손되었다면 문화재로서의 생명과 가치를 잃게 되므로 이에 대한 보존과 복원은 중요한 분야로서 인정받고 있다.

이렇듯 문화재 원형보존의 중요성은 21세기 디지털 테크놀로지 시대를 맞이하면서 “문화재 원형의 디지털 복원”이란 개념을 도입하게 되었다(Jang, 2004). 이는 3차원 레이저 스캐닝 기술을 이용하여 유실된 문화재를 역사적 고증과 사료에 의해 디지털 복원을 하거나, 문화재를 복원하기 전에 우선 영상시뮬레이션을 구현하는 것이다. 문화재 원형에 대한 디지털 복원은 실제 발굴이나 문화재 복원시 손상을 최소화하는 역할 뿐만 아니라 그 자체가 새로운 콘텐츠로서 여러 분야에 활용되고 있다.

또한 인터넷과 같은 멀티미디어를 통해 언제 어디서나 문화재에 대한 정보를 손쉽게 취득할 수 있게 해준다는 것이다(Bae, 2006).

최근 도자기 복원재료로서 액체형 에폭시 계통(EPO-TEK 301®, L-30®, L-40®, Araldite AW106®, Araldite AY103® 등)의 재료를 많이 사용하고 있다. 이들 재료는 안료와 충전제를 혼합함으로써 성형강도를 조절할 수 있고 작업시간 확보를 위한 물성조절이 가능하며 도자기의 색깔과 질감을 유사하게 표현할 수 있는 등의 장점이 많기 때문이다. 토기 복원재료로는 CDK 520K®와 Araldite SV427®, Gray-tex, 석고 등을 주로 사용하고 있다. 그러나 이 재료들 중에 석고는 황변현상과 장기간 형태유지 능력이 약한 문제점 때문에 사용을 자제하고 있으며, 기름성분이 묻어내는 Araldite SV427®와 접착력이 없는 그레이텍스도 상황에 따라 드물게 사용하고 있다. 그러므로 CDK 520K®과 Epoxy Putty를 주로 사용하는 추세이다(Lee and Hwang, 2007).

본 연구에서는 기존에 수작업을 통해 복원하던 결실부 성형을 3D프린팅으로 출력하기 위해 출력 재료로 사용되

고 있는 6종류의 재료에 대하여 물성실험을 수행하였다. 그리고 현재 토기·도자기 문화재 복원현장에서 많이 사용되고 있는 액체 경화형 Epoxy(Araldite AY103+HY956®)와 Epoxy Putty(Quick Wood®)를 3D 프린팅 재료의 물성과 비교 분석하였다. 3D 프린팅으로 문화재의 결실부를 출력하는 것은 수작업으로 성형하는 것과는 전혀 다른 과정이므로 이에 따른 물성 실험으로 출력재료의 연마도, 마모율과 표면경도, 비중 및 흡수율, 황변성을 측정하였다.

3D 스캐닝은 문화재 디지털 원형을 토대로 결실된 부분을 역설계(Reverse Engineering)하였으며, 스캐너로부터 얻어진 형상 정보를 활용하여 모델링 소스로 추출하였다. 이 모델링 소스는 3D 프린팅 기술로 입체 출력하여 보존처리과정의 한 부분인 결실부 성형을 결실부 출력으로 대신하였다.

2. 선행연구

2.1. 3차원 모델링

2D 프린팅을 하기 위해서는 그림이나 문서 등의 2D 디지털 소스가 필요하듯이 3D 프린팅을 하기 위해서는 3D CAD (Computer Aided Design)와 3D CG(Computer Graphics) 등 각종 소프트웨어를 사용해 제작한 3D 모델링 소스가 필요하다(Kim, 2014). 그러므로 문화재의 결실부 형태를 3D 모델링 소스로 획득하기 위해서는 먼저, 문화재의 현재 보존상태 그대로를 스캔하여 디지털화된 형상 정보를 획득한 다음 이 데이터를 기반으로 결실부를 설계하여 모델링 소스로 얻어야 한다.

손상부가 있는 문화재를 스캐닝하여 얻은 원시 점군(point cloud)데이터는 불필요한 정보를 삭제하고 정리한 후 삼각메쉬를 생성하는 폴리곤화, 서로 다른 위치에서 측정된 데이터를 동일 기준좌표로 맞추는 정합, 각 데이터를 하나의 데이터로 합치는 병합, 삼각 메쉬의 표면을 매끄럽

게 하는 스무딩 등의 과정을 거친다(Kim, 2005).

이때, CAD모델 생성은 설계 과정 중에 다양한 설계 특징에 따른 형상 변수를 일일이 입력하는 것이 아니라 역설계용 소프트웨어를 사용하여 3차원 스캔 데이터에서 자동으로 추출한다. 또한 실제 치수와 물리 데이터를 기반으로 하는 CAD모델과 원래 측정 데이터인 점군이나 삼각형 면의 집합으로 형상을 나타내는 폴리곤 데이터와의 편차를 검사한다. 이렇게 완성된 문화재의 디지털 형상을 기반으로 결실부를 다시 설계하면 출력을 위한 3D 모델링 소스가 준비되는 것이다.

2.2. 3차원 프린팅 방식과 재료

3D 프린팅은 액체, 분말, 고체(실, 와이어, 펠릿) 형태의 특정 물질을 한 층씩 쌓아 올려 3차원 형태를 만드는 것으로 적층제조(AM: Additive Manufacturing)라고 불리며 입체물을 자르거나 깎는 절삭가공(Subtractive Manufacturing) 제조방식과는 반대되는 개념이다. 또한 프린팅 재료의 종류에 따라 적층하는 방식이 달라질 수밖에 없으므로 재료에 따라 프린터의 기종도 다르게 선택하여야 한다.

본 논문에서는 이미 상용화되어 있는 개인용 또는 상업용 3D 출력 재료들 중에서 아래 6가지를 복원재질로 선정하였고, 이 재질들의 상태에 따른 출력방식과 출력특성들을 간단히 살펴보면 아래와 같다(Dept. of editorial IRS Global, 2015).

첫째, 폴리유산(Ingreen White/TLC korea 社)의 출력방식은 FDM(Fused Deposition Modeling)으로 고체 필라멘트(실) 형태의 재료가 프린터의 가열된 노즐 통과하면서 녹고 통과한 원료는 신속하게 경화되어 막을 형성하면서 층층이 쌓이게 되는 방식이다. 폴리유산(Polylactic acid : PLA)는 옥수수과 같은 작물에서 발효된 유산균에서 생성할 수 있는 생물 분해성 고분자로 친환경소재이다. 다이옥신, 환경 호르몬 등의 유해 가스를 방출하지 않으므로 식품 용기, 식기, 음료 컵, 아기 제품에 널리 사용된다.

둘째, UV-에폭시(Xtreme/Materialise 社)는 액체상태의 폴리머 합성수지와 그 외 합성수지를 이용하여 물체의 모양을 따라 한 층씩 쌓은 후 레이저를 쏘아 광경화시키는 과정을 거치는 SLA(Stereolithography Apparatus)방식으로 출력한다. 다소 강한 재질이며 출력 후 서포터를 뜯어 내야만 하는 단점이 있고, 출력물 표면에 기름기가 남아있지 않아 형태 수정이 다소 수월한 편이다.

셋째, 아크릴 화합물(VeroWhitePlus RGD835/Stratasys

社)은 2001년에 발표된 기술로 대표적으로 Objet사(이스라엘, 현 Stratasys사)에 인수됨)에서 주로 사용되고 있는 Polyjet방식으로 출력한다. 이 기술은 광경화 방식과 잉크젯 방식의 혼합형으로 프린터 헤드에 있는 수백개의 미세 노즐에서 재료를 분사함과 동시에 자외선으로 경화시켜 조형하게 된다. 굉장히 얇은 층으로 조형되기 때문에 출력물의 완성도가 아주 높고, 서포트 재료를 워터젯이라는 기술로 녹여서 제거하는 부분이 특징이다. 또한 신축성을 조절할 수 있어 다양한 출력물을 얻을 수 있다.

넷째, UV-우레탄아크릴 중합체(VisiJet X Plastic Material/3D Systems 社)는 Multi-Jet(MJM)방식으로 출력하는데 이 방식은 잉크젯 프린터와 유사하게 액화플라스틱을 넓은 프린터 헤드로 분사하고 UV램프로 경화하여 레이어들을 쌓아간다. 아랫부분부터 수직으로 모델을 받쳐주는 왁스 서포터들을 만들어 가면서 출력을 하게 된다. 그러므로 출력 후에 오븐에서 저온으로 왁스 서포터들을 제거하는 공정을 거치게 되고 표면에 남은 것을 제거하지만 얼룩이 남을 수 있다.

다섯째, 합성목재(Woodfill/Color Fab 社)는 FDM방식으로 출력하며 70%의 PLA와 30%의 재활용 Woodfibres를 혼합하여 만든 재료이다.

여섯째, 석고(Z151 power/3D Systems 社)는 CJP(Color Jet Printing) 방식으로 출력한다. 석고 파우더를 미세한 두께로 프린터기의 플랫폼위에 얇게 한 층씩 뿌리면서 형태가 될 부분에 접착제를 도포하여 고체화하며, 출력 후 강도를 높이기 위해 표면에 특수 용액을 흡수시켜 코팅한다.

3. 3D 프린팅 재료의 물성실험

3.1. 마모율과 표면경도 측정

Table 1에서 살펴본 6종의 출력재질에 대하여 지름 10cm × 높이 0.6cm 크기의 원통형 시편을 3D 프린터로 출력하였다. 여기에 추가로 토기재질 복원에 많이 쓰이는 에폭시퍼티 Quick Wood[®]와 자기류 복원처리에 많이 쓰이는 에폭시 Araldite AY103+HY956[®] 2가지 시편을 화학적으로 경화시켜 준비하고 물성을 비교하였다(Wi et al., 2014).

마모율 측정을 위하여 테이버 마모시험기(COAT.101, 오션과학사)를 사용하였으며, 테스트 조건은 속도 70rpm, 압력 1000g, 회전수 500회, 마모자 Grinding wheel×2를 기준으로 실험을 하였다. 마모전·후의 중량을 측정하고 차이

Table 1. Printing system according to quality of the material.

No.	3D printing materials (trade name)	Condition of the material	Printing system (Printer model)	Surface of printed materials (×15)
1	Polylatic acid (Ingreen White)	Filament	FDM (S3D Delta)
2	UV-Epoxy (Xtreme)	Liquid cartridge	SLA (Materialise Mammoth)
3	UV-Acrylic compound (VeroWhitePlus RGD835)	Liquid cartridge	Polyjet (Objet Eden 500)
4	UV-Urethane:acrylic compound (VisiJet X [®] Plastic Materia)	Liquid cartridge	MJM (Projet [®] 3510HD)
5	Synthetic Wood, (Woodfill)	Filament	FDM (S3D Delta)
6	Plaster (Z151 power)	Powder	CJP (Projet 660Pro)

를 백분율로 산출하였다.

표면경도 측정은 Showa 경도기(JISK K 7215 D Type, TECLOCK)을 사용하였는데 이것은 압정 물에 의해 측정하는 대표적인 반발 경도 시험으로 브리넬 경도 시험이 불가능한 매우 단단한 강철재의 경도 측정에 쓰이며, 압흔이 작아 완제품의 경도 시험으로 이용되고 있다. 조작이 간단하기 때문에 신속한 측정이 가능하고 흠의 깊이가 미세하기 때문에 제품 검사에도 사용할 수 있는 장점이 있다. 또

한 팁의 크기는 Aguddl 0.79mm, Dguddl 0.1mm의 두가지 유형으로 나뉘어 작은 시료에서 큰 시료까지 광범위하게 측정이 가능하며 테스트 범위는 0~100Hs이다.

3.2. 비중 및 흡수율 측정

6종의 복원재질 시편을 한 변의 길이가 1cm인 정육면체로 입체출력하였다. 추가로 에폭시페티 Quick Wood[®]와 에폭시 Araldite AY103+HY956[®] 시편은 화학적으로 경화시켜 준비하였다.

부피비중은 비중측정 장치가 장착된 저울(PR503/METTER TOLEDO)을 사용하여 0.001g 단위까지 측정하였다. 공기 중 질량을 측정하고, 23℃에서 증류수보다 가벼운 알콜에 침적시켜서 질량을 측정한 후 알콜비중을 이용하여 계산하였다.

또한 동일한 시편을 사용하여 건조중량과 24시간 동안 증류수에 침적한 후 중량을 측정하였고 다음과 같은 식에 의해 흡수율을 구하였다.

3.3. 황변성 측정

6종의 출력재료 시편(가로6cm×세로3.5cm×높이0.6cm)을 준비하였다. 자외선조사기(CC-80/ Spectroline, Japan)를 사용하여 150시간 동안 조사한 후 분광측색계기(CM-2600d, Minolta, Japan)로 색차를 측정하였다. 이 기기는 국제조명위원회의 규격에 규정되어 있는 특성과 등가인 광원을 내장하고 있어 동일한 조건(CIE standard illuminant D65)로 측정할 수 있다. 명도를 나타내는 L*은 0에서 100까지 표시되며 수치가 낮을수록 명도가 어두워짐을 알 수 있다. 채도를 나타내는 a*, b*는 -60에서 +60의 수치로 표시되는데, -a*로 갈수록 Green, +a*로 갈수록 Red에 가까운 색상이다. -b*는 Blue, +b*는 Yellow에 가까운 색상이다. ab 값은 일반적으로 xy 좌표계와 같은 평면좌표계로서 ab 값이 0에 가까울수록 채도가 낮고, 값이 커질수록 채도가 높은 색상이다. 색좌표의 값은 선정된 3 종류의 시료에 대해 자외선 조사 실험 중 0시간, 2시간, 4시간, 6시간, 8시간, 10시간, 12시간, 24시간, 48시간, 96시간 종료 후 L*, a*, b*, ΔE^*ab 값을 측정하였다(Figure 2).

Table 2. Results of abrasion rate measurement.

3D printing materials	Weight before measurement(g)	Weight after (g)	Abrasion rate(%)
PLA	42.30	42.24	0.14
UV-E	54.73	54.64	0.16
UV-A	55.03	54.98	0.09
UV-UA	53.89	53.81	0.15
WD	39.62	39.57	0.13
P	69.36	69.19	0.25
EP	39.50	39.09	1.02
E	54.02	53.87	0.27

※ PLA: Polylactic acid, UV-E: UV-epoxy, UV-A: UV-acrylic compound, UV-UA: UV-urethane·acrylic compound, WD: Synthetic wood, P: Plaster, EP: Epoxy putty(Quick Wood[®]), E: Epoxy(Araldite AY103+HY956[®])

Figure 1. Graphs showing results of abrasion rate measurement.

Figure 2. Samples for yellowing measurement. (A) Before measurement, (B) After exposure in UV ray for 96 hours.

3.4. 실험결과

3.4.1. 물성

마모율 측정결과를 Table 2와 Figure 1에 나타내었다. 표에서 보듯 가장 마모율이 높은 재료는 석고로 0.25%를 나타내었다. 나머지 4종은 유사한 결과 값으로 UV-에폭시

Table 3. Results of hardness measurement.

3D printing materials	1st	2th	3rd	Hardness (Hs)
PLA	70	72	72	71.33
UV-E	78	78	80	78.67
UV-A	82	82	82	82.00
UV-UA	79	81	75	78.33
WD	60	59	59	59.33
P	82	85	84	83.67
EP	71	71	69	70.33
E	76	78	78	77.33

Figure 3. Graphs showing results of hardness measure ment. **Figure 4.** Graphs showing results of specific gravity and absorbance.

Table 4. Results of specific gravity and absorbance measurement.

3D printing materials	Measurement of specific gravity			Measurement of absorbance		
	Weight in air	The weight of liquid	Specific gravity	Weight before measurement (g)	After deposition of distilled water (24h)	Absorbance
PLA	1.104	0.298	1.081	1.12	1.125	0.446
UV-E	1.207	0.420	1.212	1.212	1.218	0.495
UV-A	1.167	0.396	1.195	1.168	1.175	0.599
UV-UA	1.130	0.376	1.183	1.131	1.135	1.945
WD	0.924	0.171	0.969	0.93	1.004	7.957
P	1.571	0.806	1.622	1.561	1.611	3.203
EP	0.948	0.119	0.903	0.958	0.966	0.835
E	1.202	0.394	1.174	1.182	1.187	0.423

(0.16%), UV-우레탄아크릴화합물(0.15%), 폴리유산(0.14%), 합성목재(0.13%)순이며, UV-아크릴화합물(0.09%)은 마모율이 가장 낮아 표면 성형이 다소 어려울 것으로 판단된다. 그러나 기존 재료인 Araldite AY103+HY956[®](0.27%)과 Quick Wood[®](1.02%)와 비교하면 0.02~0.77% 낮아 6종 모두 비교적 단단한 것으로 확인되었다.

Table 3과 Figure 3은 표면경도 측정 결과를 나타낸 것이다. 석고(83.67Hs)와 UV-아크릴화합물(82Hs)이 서로 유사한 경도로 비교적 단단하며 폴리유산(71.33Hs), UV-에폭시(78.67Hs), UV-우레탄-아크릴화합물(78.33Hs)은 기존재료인 Araldite AY103+HY956[®](77.33Hs), Quick Wood[®](70.33Hs)와 유사한 정도임을 확인할 수 있었다. 합성목재의 경우(59.33Hs) 경도가 상대적으로 약하지만 형태를 유지하는데는 무리가 없을 것으로 판단된다. 석고는 CJP방식으로 출력한 이후 표면으로부터 2mm두께까지 특수용액을 흡수시켜 코팅하게 되므로 표면경도는 높지만 마모율은 높은 특성을 보인다.

Table 4와 Figure 4는 비중 측정 결과를 나타낸 것이다.

6종의 재료 모두가 기존재료인 Araldite AY103+HY956[®] (1.17)과 Quick Wood[®](0.90)와 유사한 비중이다. 석고 (1.62), UV-에폭시(1.21), UV-아크릴화합물(1.19), UV-우레탄-아크릴화합물(1.18), 폴리우산(1.08), 합성목재(0.97) 순으로 측정되었는데, 합성목재를 제외한 5종의 출력 재료는 비중이 1보다 큰 물질로 물에 가라앉는 성질을 지니고 있으며 합성목재 경우 비중이 1보다 작아 Quick Wood[®]와 마찬가지로 가볍다는 것을 확인할 수 있었다.

표에서 흡수율 측정 결과 값은 합성목재(7.957%), 석고 (3.203%), UV-우레탄-아크릴화합물(1.945%), UV-아크릴화합물(0.599%), UV-에폭시(0.495%), 폴리우산(0.446%) 순으로 확인되었다. 전체적으로 합성목재와 석고를 제외한 4종은 유사한 흡수율을 지니고 있었다. 흡수율은 채색 시 안료의 흡수율과 상관관계 있어 흡수율이 높은 합성목재와 석고는 아크릴 물감을 칠할 때 채색층을 수월하게 올릴 수 있을 것으로 판단된다. 또한 기존 재료인 Araldite AY103+HY956[®](0.423%), Quick Wood[®](0.835%)도 4종의 출력 재료와 유사한 것으로 확인되었다.

3.4.2. 황변성

출력재료의 황변성은 자외선 조사기에 열화시간에 따른 변화값을 CIE L*a*b*표색계 시스템으로 측정하였다. 열화 전과 96시간 열화 후의 ΔE^*ab 변화값을 측정하였으며 결과 값을 Table 5와 Figure 5에 나타내었다. 측정 결과 시간이 경과함에 따라 폴리우산을 제외한 모든 재료에서 채도(chroma) 값이 증가하여 색조가 밝아지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 UV-A(아크릴화합물), WD(합성목재), P(석고)등 3종은 변화량을 감지 할 정도로 미약하여 도자기 복원재료로 적용 시 큰문제가 없는 것을 확인할 수

있었다. 이와는 달리 폴리우산(-0.77)의 경우 ΔE^*ab 변화 값이 초기의 측정값에 비해 근소하게 - ΔE^*ab 를 나타내고 있다. 이는 폴리우산의 매우 밝은 특성(L*: 88.85) 때문에 황변 후 근소하게 어둡고 탁해지는 것으로 추정한다.

3.4.3. 종합 고찰

3D 프린터 출력 재료의 물성과 채색성에 대한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 물성실험은 기존 수작업용 많이 사용되고 있는 복원처리재료인 Araldite AY103+HY956[®]과 Quick Wood[®]를 기준으로 비교하여 표면경도는 70Hs를 기준하여 ± 10 정도 범위에 있고, 연마율은 약 0.02~0.77% 정도 적게 연마되어 기본재료보다 단단한 것을 확인할 수 있었으나 전체적으로 큰 차이가 없어 성형 후 절삭력에서는 우수한 것을 확인할 수 있었다.

흡수율 측정결과 합성목재와 석고의 흡수율이 높게 나타났다. 그 이유는 Figure 6에서 볼 수 있듯이 출력방식의 특성 때문인데 합성목재는 FDM방식으로 적층할 때 각층

Figure 5. Graphs showing results of yellowing.

Table 5. Results of exposure in UV ray.

Exposure time	ΔE^*ab							
	PLA	UV-E	UV-A	UV-UA	WD	P	EP	E
2	1.13	0.61	0.22	1.53	2.48	0.47	8.72	5.10
4	1.43	0.87	0.35	1.68	3.15	0.29	11.13	3.55
6	0.38	1.29	0.70	1.71	3.41	0.52	13.36	2.27
8	0.60	2.01	0.80	2.37	2.91	0.48	15.10	1.86
10	0.50	2.30	0.91	3.42	3.31	0.69	16.33	2.77
12	0.31	2.78	1.00	3.83	4.12	1.12	17.13	2.86
24	0.45	5.55	2.09	7.05	4.17	1.42	19.8	6.14
48	0.29	9.20	3.30	8.97	3.79	2.58	24.2	8.59
96	0.36	13.18	5.33	10.77	3.95	4.66	27.36	12.86

Table 6. Basic Properties and yellowing of 3D printing materials.

3D printing materials	Basic Properties				Yellowing
	Abrasion rate	Hardness	Specific gravity	Absorptance	Yellowing of 3D printing materials
PLA	0.14	71.33	1.081	0.446	0.3
UV-E	0.16	78.67	1.212	0.495	13.18
UV-A	0.09	82.00	1.195	0.599	5.32
UV-UA	0.13	78.33	1.183	1.945	10.77
WD	0.25	59.33	0.969	7.957	3.94
P	0.15	83.67	1.622	3.203	4.65
EP	1.02	70.33	0.903	0.835	27.09
E	0.27	77.33	1.174	0.423	12.40

Figure 6. (A) Damaged area of wood.(×10), (B) Damaged area of plaster(×10).

을 다른 방향으로 진행하며 쌓고, 석고는 접착제로 각 층을 굳혀가며 쌓는 과정에서 생긴 현상임을 파손 부분에서 확인할 수 있다.

또한 출력재질들을 자외선 노출기에 96시간 노출 후 색상변화를 측정한 결과를 Table 6에서 보면 에폭시계통과 UV-우레탄-아크릴화합물이 황변이 높게 발생한 것을 확인할 수 있었다, 그러나 전체적으로 황변현상은 지속적 발생하고 있어 차후 사용 시 주의할 필요성이 있다고 판단된다.

4. 토기 · 도자기의 복원 적용

4.1. 차륜식(車輪飾) 토기

3D 프린팅을 이용한 복원대상은 삼국시대의 차륜식 토기를 재현하여 만든 것으로 창(窓)이 뚫린 굽다리 위에 U자형의 원통형이 얹혀져 있으며 좌우에 수레바퀴가 붙어 있는 형태를 대상으로 하였다. 실재 문화재를 대상으로 새로운 복원기법을 적용하기에는 어려움이 있기 때문에, 이

토기의 한 쪽 바퀴와 결구를 대상으로 위의 물성실험을 거쳐 선택한 석고를 사용하여 3D프린팅 기술을 복원에 적용하였다. 석고는 경화 후 토기의 질감과 유사할 뿐만 아니라 채색이 잘되고 황변도가 낮아 복원 재질로 선택하였다.

3D 프린팅 결과물을 이용한 보존처리 과정은 3D스캔 - 스캔데이터 정리 - 결실부 모델링 - 결실부 프린팅 - 표면 채색 순으로 이루어졌다.

4.1.1. 3D 스캔

3D스캔 방법은 비접촉식으로 백색광방식인 smartSCAN^{3D} 스캐너(Breuckmann, Germany)를 사용하여 측정하였다 (Figure 3참고). 이 스캐너는 비대칭인 두 개의 카메라를 이용하여 세 가지 각도(10도, 20도, 30도)의 데이터를 동시에 취득하였다. 피사체에 격자 형태의 기준 light를 반사시켜 3D정보 값과 객체의 색상을 동시에 스캔하였고 역설계용 소프트웨어(Rapiform XOR)을 사용하여 스캐너를 직접 제어하였다

4.1.2. 스캔데이터 정리

스캔데이터를 이용하여 3차원 모델을 만들기 위해서는 Figure 7에서 보듯 여러 방향에서 취득된 메쉬데이터

(Mesh Dater)들의 가장자리 부분 등에서 폴리곤을 삭제하여 좋은 데이터만 남기는 것이다. 이 정리한 데이터들의 특징 점을 이용하여 정렬(align)한 후 병합(Merge)하였다. 보

Figure 7. Triangulation of scanning data (A)Point cloud data, (B)Align, (C)Merge, (D)Edit.

Figure 8. Modeling process of missing part (A)Missing part copy, (B)making broken section of connection piece (C)Adjustment of the copied wheel, (D)pottery section.

Figure 9. Printing of missing part (A,B) Solide modeling sauce, (C)Printing condition.

Figure 10. Binding and coloring (A)Before restoration, (B,C) Tri-bonding, (D)After restoration.

통 메쉬데이터의 가장자리 부근에서 메쉬가 중복되거나 손상이 발생하기 쉬우므로 중복된 메쉬를 삭제하고 손상된 부분에는 폴리곤을 추가하였으며, 가장자리 등에 스무딩하여 폴리곤을 부드럽게 수정(Edit)하였다. 즉, 삼각화(Triangulation)하였다(Chang and Chen, 2011).

4.1.3. 결실부 모델링

차륜식 토기의 결실부를 모델링하기 위하여 역설계용 소프트웨어(Rapideform XOR)와 컴퓨터 그래픽용 소프트웨어(Zbrush)를 사용하였으며 작업 순서는 다음과 같다.

1. 결손된 바퀴와 결구부분 만큼을 스캔한 원본데이터

에서 복사하여 몸체에 위치시킨다(Figure 8-A).

2. 복사한 결구를 몸체의 일부분과 같이 Zbrush S/W로 불러와 Boolean작업(두 물체의 좌표값을 교집합(Intersection), 차집합(Difference), 합집합(Union) 등의 방법으로 계산하여 새로운 물체를 생성하는 기능)으로써 깨진 단면을 생성하여 결실된 결구를 완성한다(Figure 8-B).

3. 복사한 바퀴와 결구를 제자리에 위치시키고 조금씩 구부러 어색함이 없도록 조정한다(Figure 8-C).

4. 이것을 다시 Rapideform XOR S/W로 불러와 솔리드 데이터로 변환하였으며 원시데이터와 편차검사를 하여 완성하였다(Figure 8-D).

4.1.4. 결실부 프린팅 및 색맞춤

석고로 출력한 표면은 적층 출력으로 인하여 등고선 형태의 흔적이 조금 남기 때문에 표면을 사포로 정리하였고(Figure 9), 출력물을 토기에 접합하기 전에 아크릴 물감으로 채색하였다. 석고는 무게감이 있으면서 광택이 없고 흡수력이 있는 재질로 토기 느낌을 표현에 유리하다. 결구와 바퀴의 결합 방법은 석고 출력물인 결구를 미리 바퀴 중심부 구멍으로 통과 시킨 후 토기에 접합하였으며(Figure 10), 바퀴의 무게를 고려하여 접합제는 순간접착제(Loctite 401[®])을 사용하였다.

4.2. 청자투각칠보무늬향로

복원대상은 고려청자의 대표적인 명품 가운데 하나인 청자투각칠보무늬 향로의 재현품으로 받침과 몸통, 뚜껑을 조합하여 하나로 만들었다. 제작은 음각, 양각, 투각, 퇴화 등 다양한 기법이 조화롭게 적용된 재현품으로 3D프린터 출력물 적용성 연구에 매우 타당하다고 판단되었으므로 이를 인위적으로 파손시켜 3D스캔-3D프린팅-복원과정을 통하여 보존처리하였다.

4.2.1. 복원 재료

복원 재료는 UV-아크릴화합물을 선택하였다. 그 이유는 자기의 재질감을 유사하게 표현할 수 있고, 출력한 후에 형태수정을 거의하지 않아도 될 만큼 출력품질이 우수하며 강도 등 물성이 복원에 적합하였기 때문이다.

4.2.2. 스캔데이터 정리

파손된 청자칠보무늬향로 편들을 가접합하고 3D스캔한 후 여러 방향에서 스캐닝한 데이터를 정렬, 병합, 수정 작업을 거쳐 정리하였다(Figure 11).

4.2.3. 결실부 모델링

역설계용 소프트웨어(Rapideform XOR)와 컴퓨터 그래픽용 소프트웨어(Zbrush)를 사용하였으며 모델링 작업을 Figure 12에서 볼 수 있다.

1. 결실된 위·아래 편을 스캔한 메쉬데이터에서 복사하여 몸체에 위치시킨다(A).

2. 복사한 결실부를 몸체에 위치시킨 상태에서 Zbrush S/W로 불러와 Boolean작업으로 정확한 깨진 단면을 생성한다(B).

Figure 11. Triangulation of scanning data (A,B) Align, (C)Merge, (D)Edit.

Figure 12. Modeling process of missing part (A,B) Missing part copy, (C,D) Broken section copy, (E,F) Edit missing part, (G)Adjustment of the whole form, (H) Solide model.

Tri-bonding before scanning
Printing missing part
Tri-bonding
Bonding and retouching
Coloring
Before and After restoration

Figure 13. Restoration process of incense burner celadong using 3D printing.

3. 몸체에서 복사한 깨진 단면을 적용한 결실부 형태를 따로 분리하여 정리한다(C~G).

4. 완성된 결실부 모델링 데이터를 다시 Rapideform XOR S/W로 불러와 위치시켜보고 원시데이터와 편차검사를 검사한다(H).

4.2.4. 결실부 프린팅 및 색맞춤

Figure 13에 복원과정을 나타내었다. UV-아크릴화합물로 출력한 결실부의 표면은 정밀하여서 표면 정리를 거의 하지 않아도 될 정도였지만, 두께나 파손 단면의 세부가 미세하게 차이가 났으므로 출력물을 결실부에 끼워 넣을 때는 약간의 정형이 필요하였다. 출력물의 돌출된 부분은 깎아내고 순간접착제(Locite401[®])를 사용하여 향로의 몸체와 접합하였다. 이때 접합면의 틈은 광경화성수지(SECURE CP-7321[®])로 메움하였다. 도자기의 접합면은 미세한 경우가 대부분이지만 메움을 하지 않은 채 채색을 하면 접합부가 오히려 도드라져 시야에 거슬리는 경우가 많다. 그러므로 경화속도가 5초 이내이고 모세관 접합이 가능한 광경화성수지를 접합선 위에 붓을 이용하여 바르고 자외선을 조사하여 경화시켰다(Hwang *et al.*, 2014). 광경화성 수지와 출력물의 접합면끼리 높이를 맞추어 평활하게 다듬고 아크릴물감으로 청자색과 유사한 색이 되도록 혼합하여 바탕색을 칠하였다.

아크릴물감은 일정 경화시간이 지나면 약간 짙어지는 경향이 있으므로 충분한 시간이 경과한 후 색감을 보고 바탕색에서 부족하다고 여겨지는 색을 적층하여 색감을 조절하였다. 적층은 여러 번 행하였고 너무 여러 가지 색을 무분별하게 혼합하여 색이 탁해지지 않도록 하였으며, 채색층이 경화된 후 Gloss Vanish를 에어브러쉬로 분사하여 표면광택을 회복함으로써 보존처리 전 과정을 마쳤다.

5. 결론 및 고찰

문화재 원형의 디지털화는 이미 유형문화재 뿐만 아니라 무형문화재의 복원까지 확대되고 있으며 특히, 디지털 콘텐츠로서 역할이 강조되어가고 있는 상황이다. 그러나 아직까지는 3D 프린팅 기술을 접목하여 가상의 데이터를 실물로 구현하는 작업은 미미하다.

본 논문은 문화재의 디지털 원형을 3D 스캐닝으로 획득한 후 이를 바탕으로 결실부를 설계하여 손상된 부분을 완전한 형태의 디지털 원형으로 구현하였고 역설계한 결실

부를 3D 프린팅하여 수작업으로 이루어지는 복원방법을 대체할 수 있는 출력 재료 및 실물보존처리 적용하였다.

출력재료는 현재 3D 프린팅재료로 상용화된 것 중에서 물성실험을 통해 도자기 재질을 유사하게 표현할 수 있는 재료를 선택하였다. 이들 재료는 형태 유지성, 성형 가능성을 확인하기 위해 표면경도, 마모율, 황변성 측정을 실시하였다.

실험결과 도자기 결실부의 출력은 지금까지 수작업에 의한 성형과정을 대신하기에 충분함을 알 수 있었다. 3D 프린터용 출력재료를 도자기 복원재료로 차용하기위한 물성실험에서 폴리우산, UV-아크릴화합물, 합성목재, 석고는 안정적인 물성을 나타냈고, 에폭시계통과 UV-우레탄-아크릴화합물은 황변성이 높은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 현재 출력재료에 대한 많은 연구가 진행되지 못한 실정에서 차후 도자기와 유사한 재질의 출력재료 연구가 진행된다면 안정적이고 활용도가 높을 것으로 판단된다.

토기·도자기 디지털 원형을 복원하고 결실부를 프린팅하여 실물복원하는 방식의 장점을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 도자가 가지고 있는 구조, 문양, 내부 등의 특징을 아날로그 방식보다 더 정확하게 측정할 수 있어 자료로서의 가치가 높다.

둘째, 재 출력 및 데이터의 수정이 가능하므로 향후에 발생할 수 있는 파손에 대한 재복원을 대비할 수 있다.

셋째, 현재 3D 프린팅용으로 개발되어진 출력 재료를 문화재 복원재료로 활용할 수 있는 가능성 매우 높다.

넷째, 보존처리 기록물자체가 복제 혹은 3D애니메이션, 교육교재, 가상박물관 등의 2차적인 콘텐츠로 개발되어질 수 있는 장점을 지니고 있어 이러한 연구는 문화재 보존에 많이 활용될 것으로 판단한다.

REFERENCES

- Bae, D.H., 2006, Research about digitization of Cultural asset prototype that use 3D Scanner, Department of Information Processing, Graduate School Daegu Haany University, Kyoungbuk, Korea. (in Korean)
- Chang, K.H., and Chen, C.C., 2011, 3D Shape Engineering and Design Parameterization.
- Dept. of editorial IRS Global, 2015, 3D printing to open the 2015 creative economy (printers, materials) a comprehensive analysis of the industry looking for a new business

- strategy. IRS Global, Seoul, 57-72. (in Korean)
- Hwang, H.S., Koh, M.J., Lim, S.K., and Lee, D.H., 2014, Experiment to Select Materials for the Conservation and Restoration of a Glass Ewer, Korean National Treasure No.193. Journal of Conservation Science in Museum, 15, 33-34. (in Korean with English abstract)
- Jang, G.S., 2004, A Study on Digital Restorology of Cultural Assets Using 3D Scanning System, Department of Information Processing Graduate School Sung Kyun Kwan University, Seoul, Korea. (in Korean)
- Journal of Computer-Aided Design & Applications, 8, 681-692. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.M., 2014, Personal 3D Printing. Young Jin. com. seoul, 77. (in Korean)
- Kim, Y.W., and Jun, B. H., 2005, Digital Restoration of Ring-Pommeled Sword by Using of Technology of 3D Shape information Technology, Journal of the Korea Contents 5, 134-140. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.S., and Hwang, H.S., 2007, The Conservation and Restoration -Ceramics, Dept. of Conservation Science. National Museum of Korea, Seoul, 72-74. (in Korean)
- Wi, K.C., and Han, W.S., 2014, Ceramics, Pottery Restoration, Low Shrinkage for Low-Yellowing Resin Developed Reversible II. National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 69-81. (in Korean)