

보물 제1925호 금강산 출토 이성계 발원 사리장 엄구 내 유리제 사리병의 복원 및 안정성 연구

Restoration and Stability of the Glass Sarira Bottle (Treasure No. 1925) from the Sarira Reliquaries Commissioned by Yi Seonggye, Excavated from Geumgangsan Mountain

나아영, 황현성*

국립중앙박물관 보존과학부

Na Ahyoung, Hwang Hyunsung*

Conservation Science Division,
National Museum of Korea

* Corresponding Author :
Hwang Hyunsung

Tel : 82-2-2077-9426
E-mail : hshwang7@korea.kr

요약

문화재 복원 분야에서 3D 기술이 복원에 적용되고 있다. 그러나 아직까지 유리제 문화재의 복원에 관하여 3D 기술이 활용되어 복원된 사례가 적으며 이에 관한 연구가 필요한 상황이다. 이에 본 연구에서는 국립중앙박물관에서 소장하고 있는 보물인 금강산 출토 이성계 발원 사리장엄구 일괄 중 유리제 사리병의 결손부를 복원하는 과정에 3D 기술을 이용하였다. 보존처리는 3D 프린팅 출력물을 직접적으로 복원제로써 적용하지 않고 에폭시계수지로 복제한 복원편으로 결손부를 복원하였다. 보존처리 완료 후 3D 프린팅에 사용되는 재료와 기술방식에 관하여 기존 도자기의 복원 재료 중 투명성을 지닌 재료를 선택하여 사용감과 안정성을 비교하고자 하였다. 보존처리 완료 후 SLA(Stereo Lithography Apparatus)방식으로 출력한 광경화성 수지, 에폭시계 수지, 아크릴계 수지 등 총 5개의 시편을 제작 한 후 96시간까지 자외선에 노출시켜 황변화를 조사하였고, 광경화성수지의 시편은 출력물에 UV차단제를 분무 여부에 따라 2종으로 나누어 자외선에 노출시켰다.

자외선 노출 결과, SLA방식 시편에 UV차단제를 분무한 시편, 에폭시계수지의 시편의 b*값의 변화값이 1 미만으로 황변화에 안정적인 것으로 나타났으며 유리제 문화재의 복원제로써 적용 가능한 재료로 보여진다. 유리제 문화재의 형태가 매우 다양하고 복원해야할 부분 또한 다양하고 복잡하여 접근하기 어려울 수 있으므로 복원 재료에 대해 여러 가지 재료를 염두해두고 고민해볼 필요가 있다.

주제어 : 유리제 사리병, 3D 프린팅, SLA방식, 광경화성수지, 황변

Abstract

3D printing technology has been actively applied for the restoration of cultural properties. However, its application to the restoration of glass cultural properties has not yet been reported and thus requires further study.

In this study, 3D printing technology was used to restore a defective part of a glass sarira bottle that forms an element of a series of sarira reliquaries commissioned by Yi Seonggye (known as King Taejo after founding the Joseon Dynasty) that was excavated from Geumgangsan Mountain (designated as Treasure No. 1925) and is currently housed at the National Museum of Korea. The defective area was reproduced using 3D printing and the printed reproduction was reproduced again using an epoxy resin. This latter piece was used as the restoration component rather than the 3D printed element. After the completion of the conservation treatment, the materials used for the 3D printing were compared with transparent materials used to restore ceramics to evaluate their usability and stability. A total of five specimens were produced, including from photocurable resin made by a stereo lithography apparatus (SLA), epoxy resin, acrylic resin, and more. They were exposed to UV for 96 hours to test for yellowing. Of the two specimens made of photocurable resins and exposed to UV, one was sprayed with a UV blocking agent but the other was exposed as-is. The UV exposure test showed that the specimen made by the SLA and sprayed with a UV blocking agent and the specimen made of epoxy resin were stable in terms of yellowing with a change in the b-value was less than 1. They are thus considered to be suitable materials for the restoration of glass cultural properties. Such glass cultural properties are often diverse in shape and their restoration can be difficult as they generally consist of a range of complex parts that hamper restoration. In this regard, diverse materials should be considered when selecting materials for the restoration of glass cultural properties.

Keywords: Glass sarira bottle, 3D printing, SLA, Stereo Lithography Apparatus, Photocurable resin, Reduction of yellowing

투고일: 2021.09.29. 심사(수정)일: 2021.10.13. 게재확정일: 2021.10.27.

1. 서론

3D 프린팅 기술은 컴퓨터, 인터넷의 정보화 시기인 3차 산업을 거쳐 과학기술, 데이터기술에서의 그 범위와 영향력이 보편화되고 활용성이 높아진 4차 산업의 기술이다. 3D 프린팅은 제조사의 부품을 제작하거나 의료용 보조기구 제작, 소비자들의 개인적 취향이 반영되는 제품 제작 등 넓은 범위로 활용되고 있다. 이에 따라 문화재의 보존에도 3D 스캐닝과 3D 프린팅 기술들이 활용되고 있으며 점차 3D 기술을 이용한 사례가 증가하고 있는 추세이다.

도자기의 표면 질감을 고려한 3D 프린터의 재료 선정 및 복원재료로서의 적합성에 관한 연구^[1]나 평창 발견 석조보살좌상의 보존처리와 3차원 디지털기술을 활용한 복원^[2], 3D 스캐닝 및 프린팅을 활용한 나무외형 복원^[3]등 다양한 재질에서 3D 기술이 복원에 적용되고 있다. 그러나 아직까지 유리제 문화재의 복원에 관하여 3D 기술이 활용하여 복원된 사례가 적은 편이며 이에 관한 연구가 필요한 상황이다.

이에 본 연구에서는 국립중앙박물관에서 소장하고 있는 보물인 금강산 출토 이성계 발원 사리장엄구 일괄 중 유리제 사리병의 결손부를 복원하는 과정에 3D 기술을 이용하였다.

본 연구를 진행하기 전 유리제 사리병의 상태조사를 진행하였다. 유리제 사리병은 발견 당시부터 동체부가 파손되어 일부 결실되어있는 상태였으며 1999년에 긴급 보존처리가 진행된 사실을 과거에 기록된 보존처리기록카드를 통해 알 수 있었다.

과거 보존처리할 당시 깨진 유리편들을 접합하고 결손부를 복원하지 않은 상태로 보존처리를 완료하고 보관되어있었기 때문에 전체적으로 불안정한 상태였고 보존처리가 필요한 상태였다. 유리제 사리병의 결손부를 복원하는 과정에서 3D 프린팅 기술을 이용한 출력물을 복원제로 사용하고자하였으나 아직까지 유리제 문화재의 복원제로서 플라스틱 재질의 3D 프린팅 출력물을 복원제로 직접적으로 사용한 사례가 없고 직접 유리 복원에 적용하기에 다소 부담이 있기에 이에 관련하여 안정성에 대한 실험이 필요하였다. 그래서 연구보다 앞서 진행한 보존처리는 유리제 사리병의 결손부를 3D 프린팅 후 출력된 출력물을 에폭시계 수지로 복제한 후 복제한 복원편을 가지고 결손부를 복원하였다.

본 연구의 진행방향은 보존처리 완료 후 3D 프린팅에 사용되는 재료와 기술방식에 관하여 기존 도자기의 복원제 중 투명성을 지닌 재료를 선택하여 사용감과 안정성을 비교하였다. 안정성실험은 재료의 황변에 집중하여 3D 프린팅에 사용되는 아크릴레이트계 광경화성 수지와 기존 도자기 복원제인 아크릴계 수지인 Paraloid B-72®, 에폭시계 수지인 AY103 + HY956®과 EPO-TEK 301®의 황변성 실험을 진행

하였다. 이에 따라 3D 프린팅 방식과 광경화성수지에 관한 작업성과 안정성을 언급하고 유리제 복원제로써 3D 프린팅 기술의 활용 가능성을 제시하고자 하였다.

2. 연구 대상 및 실험 방법

2.1 유리제 문화재 복원 사례

보물 제 1925호 유리제 사리병은 연꽃무늬 대좌가 원통형의 유리제 사리병을 받치고 있고 사리병 내에는 원통형 유리병에 꽂아 놓은 금속심이 있으며 유리병의 위쪽에 연꽃 봉오리모양의 마개가 씌워진 대좌 지름 3.3cm, 원통형 유리병 지름 1.2cm, 높이 9.35cm의 사리병이다.



도1. 유리제 사리병 앞

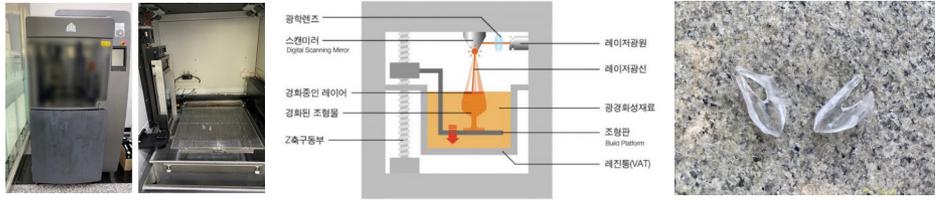
도2. 유리제 사리병 뒤

도3. CT 화상

도4. 3D 화상

유리제 사리병은 금속재질의 연꽃모양의 마개와 대좌 사이에 원통형 유리관이 있고, 유리관의 한 쪽 부분이 결실되어 불안정한 상태였다^(도1,2). 보존처리에 앞서 유리제 사리병은 전산화단층촬영(Computer Tomography, 이하 CT)촬영을 통해 내부의 금속심과 파손부의 위치를 정확하게 파악하였다^(도3,4). 처리전 조사 후 결손부를 복원하기 위해 새롭게 시도한 방식은 3D 프린팅 방식을 이용한 간접적인 복원방법이다. 유리제 사리병의 보존처리는 2단계로 진행하였는데, CT촬영을 통하여 만든 유리제 사리병의 디지털 데이터를 정합 및 병합을 하여 출력용 데이터인 STL파일로 변환한 다음 3D 프린팅(ProJet 7000HD, 3D Systems社, USA)으로 결손부를 출력 한 후, 출력된 결손부를 복제하여 만든 복제품으로 복원하였다^(도5,7). 3D 프린팅에 사용한 방식은 KS D ISO/ASTM 52900 적층 제조 표준에 기반한 SLA(Stereo Lithography Apparatus) 방식이다^(도6). SLA방식은 광경화성수지를 레진으로 사용하고 수조에 담긴 액체상태의 광경화성수지(Accura ClearVue, 3D Systems社, USA)에 200nm ~ 400nm 범위의 자외선 파장의 레이저를 조사하여 중합반응 발생시켜 필요한 부분만 경화시키는 방식으로, 플라스틱의 일종으로써 적층으로 층을 형성해나감에 따라 출력물을 완성한다^{[4],[5]}. 3D 프린팅 기술에는 SLA방식 이외에도 압출 적층 조형형(Fused

deposition modeling, FDM), 선택적 레이저 소결(Selective laser sintering, SLS), 마스크 투영 이미지 경화 방식(Digital light processing, DLP)등^[6] 많지만 이번 복원과 정에는 적층된 수지가 경화 후에도 투명성을 유지하는 레진과 투명한 레진을 경화시킬 수 있는 프린팅 기술을 사용하였다.



도5. 3D 프린터

도6. UV 3D 프린팅 SLA방식의 도식화^[7]

도7. 3D 프린팅 출력물

SLA방식은 색상이 있는 플라스틱소재부터 투명한 색상까지 출력이 가능하며^[8] 표면에 적층 자국 없이 매끄럽게 출력되기 때문에 매끈한 재질의 유리제 문화재에 적용 가능할 것으로 판단된다.

유리제 사리병의 보존처리는 접합편 해체 및 분리 → 세척 → 3D 출력물 실리콘 수지에 넣어 틀 제작 → 실리콘틀에 에폭시수지 주입 → 해체한 편 접합 → 복제한 복원편으로 성형 및 접합 → 마무리 순으로 진행하였다^(도8).

a	b	c	d
e	f	g	h

- (a), (b) 접착제 제거 및 세척
- (c) 3D 프린팅 출력물 실리콘 틀 제작
- (d) 실리콘 틀에 에폭시수지 주입
- (e) EPO-TEK 301[®] 로 복제된 3D 프린팅 출력물
- (f) 복원편 성형
- (g), (h) 복원편 접합



도8. 유리제사리병의 복원 과정

기준에 접합되어있던 접합편을 Acetone에 침적하여 접합면의 접착제를 용해시켜 편을 분리하고 3D 프린팅 출력물의 복제품을 미리 만든 후 접착제(Axia 031®(일반용 EE type))를 사용하여 복원편과 유리편을 접합하였다. 파손되고 동체부의 일부가 결실되어 불안한 상태였던 처리전 상태와 달리 복원한 결손부의 편을 채워 넣고 편과 편 사이를 지지해줌으로써 안정적인 형태로 유지할 수 있도록 하였다^(도9).

3D 프린팅에는 아크릴레이트계 광경화성수지(Photopolymer)가 사용되었으며 복제한 복원편은 도자기 복원제로 활용되는 에폭시계 수지인 EPO-TEK 301®을 사용하였다.

기존 유리제 문화재의 복원에 사용되는 재료는 주로 아크릴계 수지와 에폭시계 수지를 사용해왔다. 아크릴계 수지는 경화 후에도 색상이 투명하다는 장점이 있으나 경화시간이 길고, 경화과정에서 수지 내부에서 기포가 발생해 깨끗한 유리표면에 적용할 수 없으며 경도가 약한 단점이 있다. 에폭시계 수지는 경도가 높고, 충전제를 혼합하지 않으면 색상이 투명하다는 장점이 있지만 아크릴계 수지와 마찬가지로 경화시간이 길고 액체상태의 주제와 경화제를 유리제 문화재의 형태에 맞게 고정하고 성형하기 쉽지 않은 단점이 있다⁽⁹⁾. 이번 복원과정에는 경화과정에서 기포가 발생하지 않고 투명한 재질의 에폭시계 수지를 선택하였고 수지의 제형이 액상이기에 고정이 불가능하지만 실리콘 틀에 주입하고 경화시켰으므로 충분히 사용가능하였다.



도9. 유리제 사리병 보존처리 전·후 사진



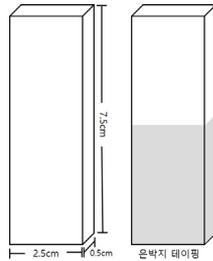
(a) 보존처리 전
(b) 보존처리 후

2.2. 황변도 실험

복원제 선정에서 가장 고민해야할 부분은 복원제가 장기간 자외선에 노출됐을 때에 대한 안정성이다. 특히 유리제 문화재에 필요한 투명한 재질의 복원제는 직접적으로 자외선에 노출되는 문제점이 있어 자외선에 의한 색변화가 유물의 미관에 미치는 영향도 고민해야하는 부분이다. 복원제가 황변이 되는 이유는 수지에 첨가된

Bisphenol-A계열이 자외선과 결합하여 광분해를 일으켜 표면 변색이 일어나기 때문에 자외선으로부터 노화에 더디고 오랜 시간 사용 가능한 재료가 필요하다^[10]. 이번 유리제사리병의 보존처리에 적용했던 새로운 복원방식과 기존에 사용되어온 재료에 대한 안정성을 비교해보고자 황변에 집중하여 실험하였다. 이에 따라 3D 프린팅 재료인 아크릴레이트계 광경화성 수지와 기존에 도자기, 유리 복원과정에서 주로 사용하는 재료인 아크릴계수지 Paraloid B-72®, 에폭시계 수지 AY103+HY956, EPO-TEK 301® 총 4종의 황변도 실험을 진행하였다.

시편의 크기는 가로 2.5cm 세로 7.5cm, 두께 0.5cm의 직사각형 형태로 설정하였으며 SLA방식으로 출력한 시편은 UV 차단제 도포 유무로 나누어 2가지로 나누어 제작하였고, 아크릴수지인 Paraloid B-72®, 에폭시수지인 AY103 + HY956®, EPOTEK 301® 등 총 5가지의 시편 제작하였다. UV 차단제는 MOLOTOW社의 UV Varinish®를 사용하여 시편 1종에 분무하였다^(도10).



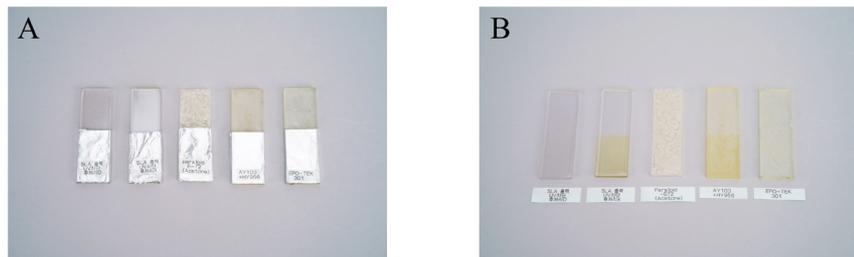
도10. 시편크기



도11. 자외선조사기



(a) 자외선 조사 전
(b) 자외선 조사 후



도12. 96시간 자외선 조사 결과

5종의 시편을 SpectralLightQC(X-rite社, Switzerland) 자외선 부스에 넣고 최대 96시간까지 자외선에 노출시켜 시간별 색변화값 L^* , a^* , b^* 을 측정하였으며 자외선 노출시간은 KS M 5982규격에 따라 설정하였다. 자외선 노출 후 각 시편의 L^* , a^* , b^* 에서 노란색 값을 나타내는 b^* 에 집중하여 시편의 색변화를 측정하였다^(도11).

3. 실험 결과

총 5종의 시편을 96시간동안 자외선에 노출시킨 후 0시간의 b*값과 96시간의 b*값을 비교한 결과값을 표1에 정리하였다. SLA방식 출력물 시편 중 UV차단제를 분무한 시편 1종과 Paraloid B-72®의 시편, EPO-TEK 301®시편의 b*값의 변화값이 1 미만으로 근소한 정도로 색이 변화하였고 이러한 결과값에 따라 3종의 재료가 자외선 노출에 대하여 안정적인 것으로 나타났다^{(도12),(표1)}.

그 중에서도 Paraloid B-72® 시편의 b*값이 가장 낮게 나타났고 가장 황변이 덜 되는 것으로 나타났으나 아크릴계 수지의 경화과정에서 기포가 발생하고 경화 후 시편의 경도가 무르다는 점에서 견고한 유리제 문화재의 복원제로는 부적합하다.

EPO-TEK 301® 시편 또한 b*값의 변화값이 1 미만으로 장기간 자외선이 노출에도 안정적이고, 투명하기 때문에 유리제 문화재의 보존처리에 적합하지만 재료의 제형이 액생이어서 복원 형태를 고정하기 어렵고 경화시간이 오래 걸리는 단점이 있으며 경화된 후 형태를 정형하기 위한 2차 가공이 필요하다.

표1. 자외선 열화 조사 결과

재료			자외선 노출 시간				
			0	12	48	76	92
SLA 3D 프린팅	UV 차단제 O	L*	78.88	78.45	78.27	78.48	78.33
		a*	0.57	0.63	0.60	0.58	0.58
		b*	3.92	4.08	4.39	4.38	4.50
	UV 차단제 X	L*	82.69	81.78	81.17	80.50	80.20
		a*	0.44	-0.01	-0.49	-0.65	-0.76
		b*	2.93	6.32	10.36	12.87	15.00
Paraloid B-72	L*	51.58	52.53	52.28	52.62	52.38	
	a*	-1.06	-0.95	-0.92	-0.91	-1.04	
	b*	0.94	1.30	1.34	1.43	1.36	
AY103 + HY956	L*	71.60	49.09	68.62	48.71	68.97	
	a*	0.05	0.35	0.3	0.33	0.26	
	b*	5.79	8.51	9.64	11.33	12.08	
EPO-TEK 301®	L*	72.7	74.43	72.97	73.13	74.45	
	a*	-0.03	0.01	-0.01	-0.04	-0.03	
	b*	4.72	5.19	5.06	5.37	5.54	

반면 SLA 3D 프린팅 방식은 복원하기 전 소실부분을 파악하고 3D 기술로 스캐닝을 한 후 스캐너로 정합하여 출력한 출력물을 본 유물에 바로 대입할 수 있어 작업과정을 줄일 수 있다. 다만 모델링 프로그램에서 스캐너 데이터를 바탕으로 출력한 출력물과 달리 실제 유물의 소실부분과 형태가 완전하게 맞지 않고 접합면의 공차가 생기기 때문에 틈 메꾸기 등의 2차 가공이 필요하지만 앞의 3종의 재료보다 정형단계에서의 번거로움과 작업시간을 단축할 수 있다.

또한 SLA방식 출력물 시편 중 UV 차단제 도포 유무의 결과값에서 편차가 크게 나타난 것으로 보아 UV 차단제가 시편에 코팅이 되고 자외선의 흡수를 막는 역할을 하였다. 그러나 UV 차단제가 건조되면서 투명했던 시편의 표면이 반투명해졌다. 시편위에 자외선 차단 방어막을 형성하면서 시편의 광택도를 낮추는 역할도 한 것으로 보여 진다. 이러한 UV 차단제의 특성을 활용하여 풍화가 진행되어 표면 마모가 심해 투명도가 낮은 유리제 문화재의 표면광택을 비슷하게 표현하기 위해 활용할 수 있고, 차단제의 도포 횟수에 따라 광택도가 조절이 가능하기 때문에 본 문화재의 풍화정도에 따라 자연스럽게 보이도록 표현이 가능할 것으로 판단된다.

4. 고찰 및 결론

문화재의 보존에도 3D 스캐닝과 3D 프린팅 기술들이 활용되고 있으며 점차 3D 기술을 이용한 사례가 증가하고 있는 추세이다. 국립중앙박물관에서 소장하고 있는 유리제 사리병의 결손부를 복원하는 과정에 3D 기술을 이용하였다. 그러나 유리제 문화재의 복원제를 3D 프린팅 재료로 직접적으로 사용한 사례가 없고 직접 유리 복원에 적용하기 위해 안정성에 대한 실험이 필요하였다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 3D 프린팅에 사용되는 재료와 기존 도자기의 복원재료의 사용감과 안정성을 비교하고자 하였다. 안정성실험은 재료의 황변에 집중하여 3D 프린팅에 사용되는 아크릴레이트계 광경화성 수지와 기존 도자기 복원재료인 아크릴계 수지인 Paraloid B-72®, 에폭시계 수지인 AY103 + HY956®과 EPO-TEK 301®의 황변성 실험을 진행하였다.

첫 번째, 먼저 광경화성 수지와 에폭시계수지, 아크릴계수지의 시편의 자외선 노출 실험을 하기 전 먼저 유리제 사리병의 보존처리를 완료하였다. 보존처리는 접합편 해체 및 분리 → 세척 → 3D 출력물 실리콘 수지에 넣어 틀 제작 → 실리콘틀에 에폭시수지 주입 → 해체한 편 접합 → 복제한 복원편으로 성형 및 접합 → 마무리 순으로 진행하였으며 파손되고 동체부의 일부가 결실되어 불안한 상태였던 처리 전 상태와 달리 동체부 결실부를 채워 넣고 편과 편 사이를 지지해줌으로써 안정적인 형태로 유지할 수 있도록 하였다.

두 번째, 보존처리 완료 후 SLA방식으로 출력한 아크릴레이트계 광경화성 수지와 에폭시계 수지, 아크릴계 수지등 총 5개의 시편을 제작 한 후 96시간까지 자외선에 노출시켜 황변화를 조사하였다. SLA방식 출력물은 UV차단제의 분무 여부에 따라 시편을 2종으로 나누어 자외선에 노출시켰다. 96시간 노출 후 SLA방식 출력물에 UV 차단제를 분무한 시편과 Paraloid B-72®의 시편, EPO-TEK 301®시편의 b*값의 변화값이 1 미만으로 근소한 정도로 색이 변화하였고 이러한 결과값에 따라 3종의 재료가 자외선 노출에 대하여 안정적인 것으로 나타났다. 실험 결과에 따라 사용가능한 재료는 Paraloid B-72®, EPO-TEK 301®, 광경화성 수지를 사용한 3D 프린팅 방식이고 각각 재료의 특성과 장단점을 고려하여 사용해야한다.

결론적으로 광경화성 수지를 활용한 3D 프린팅 방식과 도자기 복원재료로 활용되는 EPO-TEK 301®이 유리제 문화재의 복원에 적용 가능한 재료로 보여 진다. 완전 경화된 후에도 투명성을 유지하는 광경화성 수지의 장점을 활용하여 유리제 사리병의 복원 사례와 같이 투명한 유리제 문화재에 적용할 수 있다. 또한 유리제 문화재 중에서도 풍화로 인해 표면 마모가 심해 광택도가 낮은 유물에는 광경화성수지 복원편에 후처리를 하여 본 편과 이질감 없이 복원이 가능하다. SLA방식 출력물로 형태를 복원 한 후 형태가 맞지 않아 좀 더 복원을 해야 하는 경우에는 황변이 덜 되고 안정성이 확보된 EPO-TEK 301®를 유용적으로 사용 할 수 있다.

유리제 문화재의 광택을 그대로 표현하고 복원한 형태를 유지하여 유리제 문화재의 아름다움을 후대까지 그대로 보전하는 것이 유리제 문화재 복원의 목적이며 목적에 맞는 재료를 선정하는 것은 매우 중요하다. 현재까지 국내 기관에 소장되어있는 유리제 문화재의 형태가 매우 다양하고 복원해야할 부분 또한 다양하고 복잡하여 접근하기 어려울 수 있으므로 복원재료에 대해 여러 가지 재료를 염두 해두고 고민해볼 필요가 있다.

<사사>

본 연구에서 CT 조사를 촬영해주신 국립중앙박물관 양석진선생님께 감사드립니다.

참고문헌

1. 신연홍, 황현성, 도자기의 표면 질감을 고려한 3D 프린터의 재료 선정 및 복원재료로서의 적합성에 관한 연구, *한국도자학회* **15**, p131-144, (2019).
2. 조성연, 권윤미, 최보배, 평창 발견 석조보살좌상의 보존처리와 3차원 디지털기술을 활용한 복원, *박물관 보존과학* **20**, p77-92, (2018).
3. 이주오, 안태영, 최경식, 김성혁, 선우훈, 3D스캐닝 및 프린팅을 활용한 나무외형 복원, *한국농업기계학회* **24**, p507-507, (2019).
4. 이혜지, 유리 필라멘트 공급 FDM방식 3D 프린팅 연구, 한양대학교대학원 신소재공학과, 석사학위논문, p2-3, (2020).
5. 강병훈, 신성열, 진승은, 임미리, 이수진, 김종수, UV LED 이용한 광경화성수지 응고 실험, *한국정밀공학회* **2008**, p811-812, (2008).
6. 이진욱, 남산, 황광택, 김진호, 김응수, 한규성, 실리카 복합소재의 물성에 따른 DLP 3D printing 적용 연구, *한국결정성장학회* **29**, p55, (2019).
7. 윤범진, 세라믹 3D 프린팅 기술 개발 동향, *세라미스트* **19**, p78-88, (2016).
8. 김진성, SLA방식과 DLP방식의 다양한 치과용 3D프린팅 레진의 물성 비교, 배재대학교대학원 재료공학과, 박사학위논문, p4-18, (2021).
9. 이해순, 나아영, 유리제 문화재 복원용 광경화성 수지의 물성 연구 및 적용, *박물관보존과학* **21**, p2, (2019).
10. 정세리, 자외선 안정제 첨가에 따른 에폭시계수지의 노화특성 연구, 공주대학교대학원 문화재보존과학과, 석사학위논문, p6-10, (2011).
11. 황현성, 고민정, 임수경, 이다혜, 국보 제193호 봉수형유리병의 재보존처리에 사용할 복원재료 선정 실험, *박물관보존과학* **15**, p26-36, (2014).
12. 신우철, 김경중, 위광철, 조선시대 백자연적 편(片)을 활용한 3차원 디지털복원 기술 연구, *박물관보존과학* **22**, p85-96, (2019).
13. 4차산업혁명위원회, <https://www.4th-ir.go.kr/>, (2021).
14. 오승준, 위광철, 훼손 도자기 결실부 복원을 위한 3D 세라믹 프린팅 기술의 기초 적용성 연구, *한국융합학회* **11**, p165-173, (2020).