

# 훼손 도자기 결실부 복원을 위한 3D 세라믹 프린팅 기술의 기초 적용성 연구

오승준<sup>1</sup>, 위광철<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한서대학교 문화재보존과학연구센터 연구교수, <sup>2</sup>한서대학교 문화재보존학과 교수

## A Study on the Applicability of 3D Ceramic Printing Technology for Restoration of the Missing Part of Damaged Ceramics

Seung-Jun Oh<sup>1</sup>, Koang-Chul Wi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Research Professor, The Research Center of Conservation Science for Cultural Heritage, Hanseo University

<sup>2</sup>Professor, Department of Cultural Heritage Conservation, Hanseo University

**요약** 훼손 도자기의 결실부 복원은 ABS, PLA 등이 적용되고 있으나 도자기 재질과는 유사하지 않아 세라믹 수지에 대한 물성 및 적용성 연구를 진행해보고자 하였다. 기존 복원 방법인 거푸집과 ABS 수지 복원, 세라믹 수지의 실제 복원 및 물성 실험을 진행하였다. 연구 결과 세라믹 수지의 복원부 제작은 기존 재료에 비해 정밀도가 높아 미세한 형상의 출력이 가능하고, 표면 질감, 광택이 L30과 ABS 수지보다 우수하였다. 물성 측정 결과 수축, 변형이 없고 압축강도가 높아 기존 재료에 비해 내구성이 우수하나 비중과 경도 값은 복원부 제작 후 가공성이 저하될 수 있는 요소로 작용될 수도 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서 적용된 세라믹 수지의 장기적인 모니터링과 신뢰성 및 안정성 평가, 너무 얇거나 긴 형태의 복원부 출력 시 원형복원성 등에 대한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

**주제어** : 훼손 도자기 복원, 도자기 복원, 복원 재료, 세라믹 수지, 3D 프린팅 재료

**Abstract** ABS and PLA are applied for restoring missing part of damaged ceramics, but are not similar to the material of ceramics, so this study conducted a research on the properties and applicability of ceramic resin. This study conducted actual restoration of ABS and ceramic resin as well as cast restoration method with experiment of properties. Results show that manufacturing of restored part showed higher precision than existing materials, which enables printing of tiny shapes showing excellent surface texture and gloss than L30 and ABS resin. As a result of measuring properties, the material showed excellent durability than existing materials with no contraction and deformation and compressive strength, but value of specific gravity and hardness can lower processability after manufacturing. Long-term monitoring, evaluation of reliability of ceramic resin applied in this study, additional researches on the restorability of the original shape when printing too thin or long restored part are needed.

**Key Words** : Restoration of damaged ceramics, Restoration of ceramics, Restoration material, Ceramic resin, 3D printing material

\*This research is supported by Ministry of Culture, Sports and Tourism(MCST) and Korea Creative Content Agency(KOCCA) in the Culture Technology(CT) Research & Development Program R2018020101.

\*Corresponding Author : Koang-Chul Wi(kcwi@hanseo.ac.kr)

Received September 23, 2020

Accepted November 20, 2020

Revised November 4, 2020

Published November 28, 2020

## 1. 서론

금속, 섬유, 화학과 더불어 세라믹(Ceramics)은 4대 소재 중 하나로 '불에 구워 만든 흙'이란 어원을 가지고 있으며, 비금속 무기물에 열을 가하여 만든 제품으로 구석기 시대부터 현재까지 진화를 거듭하며 인류에 의해 사용되어지고 있다[1]. 이러한 세라믹은 도자기, 유리, 타일 등의 전통 세라믹과 고순도로 정제된 광물 및 합성원료로 본래의 소재보다 물성이 향상된 의료, 바이오, 전자 분야의 첨단 세라믹으로 분류할 수 있다[2].

전통 세라믹은 점토, 장석, 규석 등을 주원료로 사용하거나 일정 비율로 혼합하여 합성한 원료를 성형하고 소성하여 만든 소성체에 유약과 안료를 시유 채색하여 재소성한 제품으로, 도자 식기와 같은 생활 도자기, 기와 및 점토 벽돌 등의 건축(甄築) 도자기, 산업 도자기인 예자(軀子), 청자, 백자, 분청사기, 토기, 용기, 전돌, 전통 기와 등의 전승 도자기 등을 총칭한다[3].

전승 도자기는 출토 및 출수 고고 유물과 왕실 및 공예품으로 전해져오는 전승품으로 나누어 볼 수 있다. 이중 고고유물은 오랜 기간 매장되어 있어 토압이나 생물학적 원인 등으로 인해 손상이 일어나기도 하며, 가마터와 같은 유적에서는 매장 당시의 물리적 충격으로 파손되고 결실되어진 상태로 발굴된다. 이렇게 훼손된 도자기는 보존처리과정을 통해 원형이 복원되고 있으며, 특히 결실부에 대한 복원은 도자기 본래의 형태를 되찾고 구조적 안정성을 확보하기 위해서 반드시 필요한 과정 중 하나이다.

과거 훼손 도자기의 결실부 복원은 옷칠과 토분, 아교를 혼합한 재료 또는 석고 등을 이용해 이루어졌으나[4] 90년대 이후 합성재료의 문화재 적용으로 에폭시 수지와 필러, 안료 등을 혼합해 사용되기 시작하였으며 현재도 대부분의 복원 과정에서 쓰이고 있다[5]. 그러나 형태 복원용 에폭시 수지와 유약 층의 유리질 복원용 에폭시 수지, 필러 등이 보존처리 후 장기간 노출 시 황변현상이 일어나 재처리가 이루어지는 현상이 나타나고 있어 이를 대체하기 위한 재료의 개발 및 연구가 활발히 이루어지고 있다[6].

또한 전통 재료와 기법을 이용해 문화재를 수리하여야 한다는 보존윤리가 있으나, 훼손 도자기의 경우 전통 기술인 태토를 이용해 소성 및 유약처리 과정 등을 통해 결실부를 제작하면 소성 과정에서 수축·변형이 일어나 본래의 결실부와 일치하지 않는 현상이 발생한다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 연구는 태토의 반죽, 첨가물, 소

성 온도, 유약 처리 등 도자기를 구워내는 과정에서 발생하는 다양한 변수들로 인해 체계적으로 이루어지지 못하고 있다.

이에 훼손 도자기 유물의 복원을 위한 방법으로 전통 기술을 대체할 수 있는 3D 디지털 기술을 활용해 문화유산을 보존할 수 있는 융합기술의 적용 가능성을 확인해 보고자 하였다. 특히 3D 프린팅 기술을 활용한 훼손 도자기의 복원은 가장 최신의 보존처리 기술로서 연구가 진행되기 시작하였으며[7], 실제 국립중앙박물관 소장 유물인 차륜형 토기, 잡유호, 청자투각칠보문항로, 백자수주 등에 적용되어지고 있는 단계로 진입하고 있다[8]. 다양한 3D 프린팅 소재 중 일부 대중적으로 사용되어지고 있는 ABS, PLA 등과 같은 재료를 이용한 복원 연구 및 적용이 이루어지고 있으나[9] 도자기 본래의 재질과는 유사하지 않아 이질감이 높다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서 세라믹 수지를 이용한 적용성 연구가 필요하다고 판단된다.

3D 프린팅 재료 중 도자기와 유사한 재질인 세라믹 소재는 프린팅 후 반드시 탈지와 소결 등의 후처리 공정이 필요하고[10], 이러한 과정을 거치지 않을 경우 출력물의 신뢰성 저하가 발생할 수도 있다[11]. 반면에 소결 처리 과정에서 출력물의 수축과 변형이 일어날 수 있어 훼손 도자기 결실부 복원 재료로서의 적용성 연구는 지속적으로 이루어져야 할 부분이다.

그러나 소결과정 이전 단계에서 출력된 구조체는 수축·변형에 대한 신뢰성과 안정성을 확보할 수 있는 장점이 있으며, 소결 후 생성되는 유리질 층은 기존의 광택제인 그로스 바니시와 고색처리 등을 통해 복원이 가능할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 세라믹 소재 중 결정성 실리카를 기반으로 한 고분자 고점도 수지를 이용해 훼손 도자기 결실부 복원을 위한 3D 출력물의 적용 가능성을 확인해 보고자 한다. 또한 강도, 경도, 황변성 등 기존 재료와의 물성 비교 후 재료학적 안정성과 신뢰성을 확인하고 실제 훼손된 도자기 유물의 결실부 복원 3D 기술로서의 확장성을 판단해보고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구재료

훼손 도자기는 1,200°C 전후에서 소성되었을 것으로 추정되는 학술연구용 도기 2점으로 자기 보다는 강도가



Fig. 1. Research materials(A : glazed pottery, B : unglazed pottery, C : property experiment sample (C-1 : L-30 resin, ABS resin, ceramic resin))

약하고 투명도가 떨어지지만 유약처리 여부에 따른 비교 분석이 필요할 것으로 판단되어 샘플을 선정하였으며, 유약 처리가 이루어진 도기(이하 도기 1)와 유약 처리가 이루어지지 않은 도기(이하 도기 2)를 비교 분석하였다. 적용성 연구를 위한 복원 재료는 기존 재료인 L-30 액상형 에폭시와 3D 프린팅 복원 재료인 백색 ABS 필라멘트, 세라믹 molding을 선정하여 물성실험 및 적용성 연구를 진행하였다(Fig 1 참고).

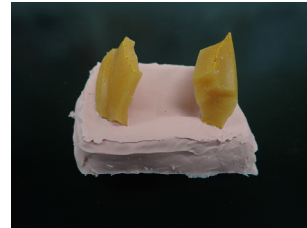


Fig. 2. Restored part manufacturing process using silicon mold

## 2.2 연구방법

현재 훼손 도자기의 결실부 복원은 몰드형 실리콘을 이용해 거푸집을 만들어 복원 부위를 제작하거나 퍼티형 에폭시 수지 등으로 복원 후 성형을 하는 방법으로 이루어지고 있다. 이 중 실리콘을 이용한 형틀 제작방법을 이용해 만들어진 복원부와 3D 프린팅 방법으로 제작된 복원부의 물성 및 정확성을 비교, 분석해 보고자 한다.

기존 복원 방법인 거푸집 복원은 몰드형 실리콘을 이용해 일회용 형틀을 제작한 후 액상형 에폭시 수지인 L30(주)풍림산업)을 탈크로 점도 조절하고, 무기안료를 이용해 색감처리 하여 복원 부위를 제작하였으며(이하 L30 수지), 유약처리가 된 도기 1 샘플의 경우 유광 그로스 바니시로 유약 층을 복원하였다(Fig 2).

3D 프린팅 복원은 현재 가장 많이 보급되어있는 프린팅 방식인 고체기반의 FDM 출력방법[12]에 백색 ABS 소재(이하 ABS 수지)를 이용해[13] 복원 부위를 출력하였으며(Fig 3), 세라믹 프린팅은 결정성 실리카를 기반으로 한 광경화성수지(이하 세라믹 수지)로[14] 액체기반 SLA 출력방법[15]으로 결실부를 제작하였다(Fig 4).

2종의 출력물도 유약처리가 된 도기 1 샘플의 경우 유광 그로스 바니시로 유약 층을 복원하였다. 복원 후 재료 본연의 성상을 확인하고 실제 도기와 비교를 위해 고색처리는 진행하지 않았다.

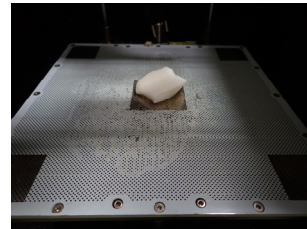


Fig. 3. Restored part manufacturing process using 3D ABS material

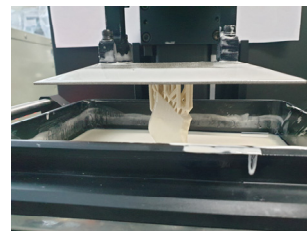


Fig. 4. Restored part manufacturing process using 3D ceramic material

그러나 본 연구에서 진행된 결실부 복원은 완형의 도기를 임의로 파손한 파편 중 한 점을 3D 스캐닝 후 프린팅 한 것으로 정확한 형태 확인이 가능한 상태에서 복원을 진행한 것으로 실제 발굴 현장에서 출토되는 훼손 도자기의 결실부를 복원하는 과정과는 다를 수 있으며, 이는 세라믹 3D 프린팅 기술의 적용 가능성을 우선적으로

확인해보고자 하는 단계라는 것을 사전에 언급하고자 한다.

이러한 차이점은 결실부 형태 복원에 대한 연구의 병행과 퍼티형 에폭시 수지를 이용한 비교, 결실부의 디지털 복원을 통한 형태 검증 및 정확도 등에 대한 추가적인 연구를 통해 보완될 수 있을 것으로 판단된다.

복원에 사용된 L30 수지, ABS 수지, 세라믹 수지 3종에 대한 재료학적 특성을 파악하기 위해 압축강도, 경도, 수축률, 자외선 열화실험을 진행하였으며, 유약 층 복원을 위해 도포된 유광 그로스 바니시로 인한 열화가 발생할 수 있어 도포 전의 시편에 대해서만 실험을 진행하였다.

압축강도 측정은 3D 필라멘트에 대한 표준 규격이 없어 기존 복원 재료인 에폭시 수지의 규격KS M ISO 604 측정법을 참고하여 만능재료시험기(AGS-X, SHMADZU 社, Japan)를 이용하였다. 시편은 길이(25.4±0.3)mm, 너비(12.7±0.3)mm, 두께(12.7±0.3)mm의 크기로 성형하였고 길이, 너비, 두께를 각각 외측 마이크로미터로 0.01mm 까지 측정하며 가압면의 평행도를 확인하였다. 시험기 크로스헤드의 이동 속도 1mm/min으로 하중을 가하고, 시험편이 파괴되었을 때 하중을 측정하였다.

표면경도의 측정은 규격화된 KS method가 없어 JISK K 7215 D Type형 표면경도계(Showa경도기, TECLOCK社, Japan)를 사용하여 측정하였으며 테스트 범위는 0 ~ 100 HS이다. 비중 측정은 전자고체비중계(MD-300S, Alfa Mirage社, Japan)를 이용하여 25℃에서 시료 50 × 50 × 10 mm의 무게와 그것과 같은 부

피의 25℃에서의 증류수의 무게를 측정하여 그 무게의 비로부터 시료의 비중 25/25℃를 구하였다.

수축률 측정은 75 × 50 × 0.5 mm 크기의 시편을 제작하여 중량을 측정 후 완전경화가 이루어질 때까지 7일 동안 자연 경화 후 중량을 측정하고 중량 변화율을 계산하였다.

자외선 조사 측정은 KS M 5982(도료의 촉진 내후성 시험 방법- 형광 UV 응축방식)를 참고하여 제작된 자외선 시험기를 사용, 자외선 노출 시간은 상온에서 96시간 노출시킨 후, 인공 열화 전·후 시료의 색도 측정을 통한 변색 정도는 분광측색계(Minolta, CM-2600d, Japan)를 사용하여 CIE L\*,a\*,b\* 표색법으로 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 거꾸집을 이용한 복원

결실부의 복원은 거꾸집을 이용한 복원 방법으로 진행하였으며, 몰드형 실리콘으로 결실부 도기 편의 형틀을 만들어 복원 부위를 제작하였다. 제작된 복원부는 순간접착제를 이용해 도기 1, 2와 접합하여 성상을 비교해 보았다.

도기 1은 몰드를 이용해 복원이 이루어져 크기, 형태, 곡률 등의 외형적인 성상은 도기의 형태와 유사하게 복원이 되었음을 확인할 수 있었다. 그러나 L30 수지 본래의 광택에 그로스 바니시가 도포되어 도기 본래의 광택

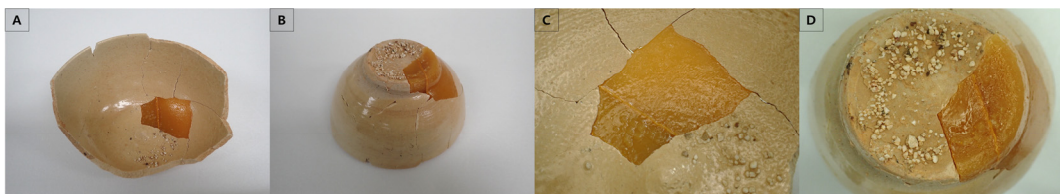


Fig. 5. Pottery 1 restoration result using L30 resin (A : Photo of front part after restoration, B : Photo of rear part after restoration, C : Detailed photo of front part after restoration, D : Detailed photo of curvaceous support after restoration)

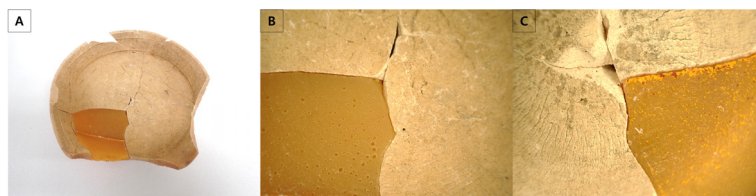


Fig. 6. Pottery 2 restoration result using L30 resin (A : Photo of front part after restoration, B : Detailed photo of front part after restoration, C : Detailed photo of curvaceous support after restoration)

과는 이질감을 보여주었다. 또한 몰드를 이용한 작업과정에서 굽 받침의 형태가 변형되어 몰드 작업 시 세심한 작업 과정이 필요할 것으로 판단된다(Fig 5 참고).

도기 2는 그로스 바니시가 도포되지 않은 복원부의 성상이 합성수지 본래의 질감과 성상을 나타내어 도기와는 이질감이 보여 지고, 몰드 작업 과정에서 발생한 것으로 추정되는 기포와 필러 및 안료의 미분산 등은 보다 숙련된 복원가에 의한 처리가 이루어져야할 필요성을 확인할 수 있었다. 이로 인해 복원 후 가공 및 성형 등의 추가적인 복원 작업이 필요할 수 있을 것으로 판단된다(Fig 6 참고).

### 3.2 3D 프린팅 기술을 이용한 복원

3D 프린팅 기술을 적용한 결실부 복원은 ABS 수지와 세라믹 수지를 이용해 진행하였으며, ABS 수지의 출력은 FDM 방식으로 도기 1의 경우 Quality Normal, 내부 채움 Midium, 출력시간 약 2시간 40분, 도기 2는 Quality Normal, 내부 채움 Midium, 출력시간 약 3시간 10의 옵션으로 진행되었다.

ABS 수지를 이용해 복원한 도기 1은 복원부 표면에 도포된 그로스 바니시의 영향으로 적층선이 이질감을 보일 정도로 관찰되지는 않으나 도기 2의 경우 그로스 바니시가 도포되지 않아 3D 출력물의 적층선이 관찰되어 도기와의 일체감이 훼손되어짐을 확인할 수 있었다. 또한 ABS 수지의 특성상 가볍고 합성수지의 성상이 뚜렷

이 나타나 유약 처리 여부에 관계없이 이질감이 확인 되었다(Fig 7, 8 참고).

세라믹 수지를 이용한 복원은 SLA 방식으로 도기 1이 Z축 정밀도 100  $\mu$ m, 출력시간 약 2시간 55분, 도기 2는 Z축 정밀도 100  $\mu$ m, 출력시간 약 4시간 30분으로 복원부를 세로로 출력하여 도기1에 비해 시간이 늘어나는 것을 확인할 수 있었다. 세라믹 수지로 복원이 이루어진 복원부는 ABS 수지와 거푸집을 이용한 복원부 제작 보다 미세한 형상 구현에서 정밀도 높은 것으로 확인되었으며, 이는 굽 받침 부분의 형상에서 판단할 수 있었다.

굽 받침 뿐 만 아닌 표면 질감과 세부 형상의 정밀함이 기존 재료 및 방법 보다 우수한 것으로 판단된다. 또한 복원부에 그로스 바니시를 도포하여 도기 1의 결실부에 복원 한 결과 도기 본래의 질감과 광택이 유사하게 표현된 것으로 보여지며, 표면처리 및 고색처리 등과 같은 후 처리와 가공이 이루어진다면 보다 유사한 질감과 광택, 색상 등의 복원부가 제작될 수 있을 것으로 사료된다.

도기 2도 세라믹 수지 본래의 표면 질감과 도기의 질감이 기존 재료인 L-30 수지와 ABS 수지와는 다르게 유사성을 보여주었다. 또한 ABS 수지에서 볼 수 있었던 적층 선은 관찰되지 않았으며, L30 수지를 이용한 복원부 제작 시 나타난 필러와 안료의 미분산 현상 등과 같은 불균일성도 확인되지 않았다(Fig 9, 10 참고).

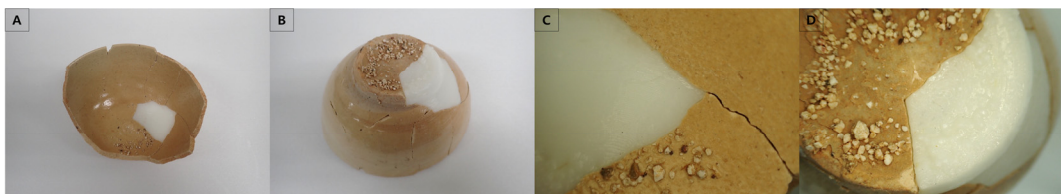


Fig. 7. Result of pottery 1 restoration using ABS resin (A : Photo of front part after restoration, B : Photo of rear part after restoration, C : Detailed photo of front part after restoration, D : Detailed photo of curvaceous support after restoration)



Fig. 8. Result of pottery 2 restoration using ABS resin (A : Photo of front part after restoration, B : Detailed photo of front part after restoration, C : Detailed photo of curvaceous support after restoration)

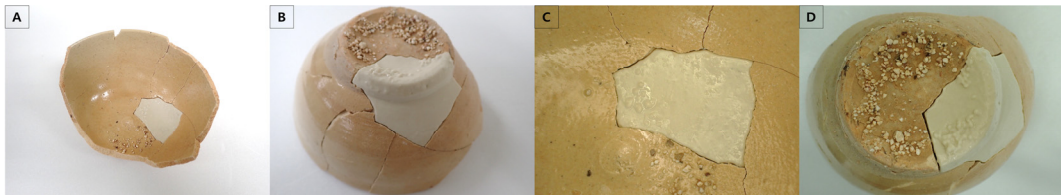


Fig. 9. Result of pottery 1 restoration using ceramic resin (A : Photo of front part after restoration, B : Photo of rear part after restoration, C : Detailed photo of front part after restoration, D : Detailed photo of curvaceous support after restoration)

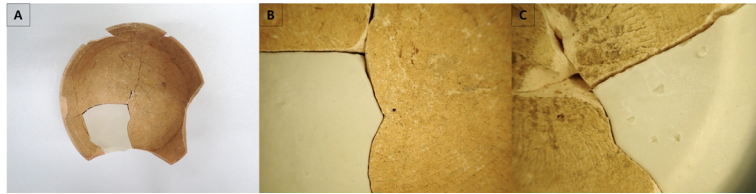


Fig. 10. Result of pottery 2 restoration using ceramic resin (A : Photo of front part after restoration, B : Detailed photo of front part after restoration, C : Detailed photo of curvaceous support after restoration)

### 3.3 물성 시험

자외선에 의한 열화 시험 결과 L30 수지는 96시간 이후  $\Delta E^*ab$  15.18의 변화량을 확인하였으며, 황변도를 나타내는  $b^*$  값은  $b^*$  13.21의 변화를 보여주었다(Fig 11 참고). ABS 수지는  $\Delta E^*ab$  12.40의 변화량을 확인하였으며,  $b^*$  값은  $b^*$  12.07의 변화를 보여주었다(Fig 12 참고). 세라믹 수지는  $\Delta E^*ab$  7.44의 변화량을 확인하였고,  $b^*$  값은  $b^*$  7.23의 변화를 보여주어(Fig 13 참고) 세라믹 수지가 평균 변화량과 황변도에서 가장 작은 변화 값을 나타내었다(Table 2 참고).

이는 세라믹 수지가 현재 훼손 도자기 복원 재료로 사용되어지고 있는 L30 수지와 ABS 수지의 황변현상으로 인한 재료의 변형을 개선할 수 있고, 재처리로 축적될 수 있는 도자기의 피로도를 최소화할 수 있는 복원 재료로서의 가능성을 보여준 것으로 안정성과 신뢰성이 일부 확보한 것으로 실제 복원 작업 시 적용이 가능할 것으로 판단된다(Table 3 참고).

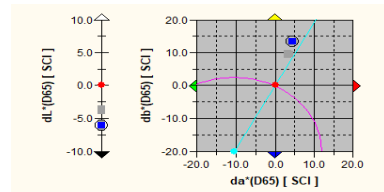


Fig 11. L30 resin color change

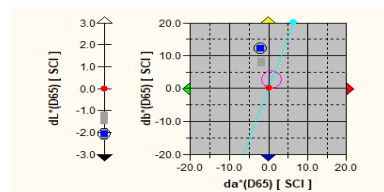


Fig 12. ABS resin color change

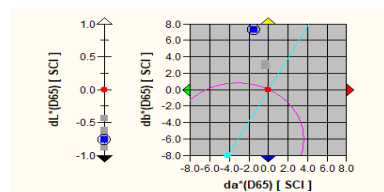


Fig 13. Ceramic resin color change

Table 3. Ultraviolet ray degradation test result value

Change value		L*	a*	b*	$\Delta E^*ab$	color
Sample						
L30 resin	0h	63.11	10.45	20.11	-	
	24h	59.44	13.79	29.61	10.71	
	96h	57.03	14.83	33.32	15.18	
ABS resin	0h	74.36	-0.83	-2.58	-	
	24h	72.87	-2.65	5.40	8.32	
	96h	72.30	-2.75	9.49	12.40	
Ceramic resin	0h	82.51	3.16	6.12	-	
	24h	81.87	2.85	9.01	2.98	
	96h	81.75	1.63	13.35	7.44	

압축강도는 L30 수지 107.7 Mpa, ABS 수지 48.5 Mpa, 세라믹 수지 126.2 Mpa로 측정되었으며, 세라믹 수지가 가장 높은 압축강도 값을 나타내었다. ABS 수지는 출력물 내부 그리드의 형태 및 밀도 등에 따라 압축강도가 다르게 나타날 수 있음을 언급하고자하며, 이는 훼손 도자기의 결실부 크기, 재질, 비중 등에 따라 다르게 제작할 수 있는 장점이 될 수 있을 것으로 판단된다. 반면에 ABS 수지의 특성 상 노즐 두께를 조절하더라도 적층선이 보여 지며, 밀도가 높아도 표면 재질의 변화는 거의 없어 복원 시 적용범위에 대한 재설정이 필요할 것으로 판단된다.

L30 수지의 경도는 83 Hs, 비중 1.33, 수축률 0% 물성 결과 값을 나타내었으며, ABS 수지는 경도 70 Hs, 비중 0.44, 수축률 0%, 세라믹 수지는 경도 89 Hs, 비중 0.76, 수축률 0%로 나타났다. 경도는 세라믹 수지가 가장 높은 결과 값을 보여주어 재료의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 몰드형 또는 3D 프린팅 출력물을 이용한 복원 작업에 한정적으로 적용될 수 있을 것이며, 기존 수작업 시 사용성 및 가공성 측면에서는 경도 값이 절삭력을 판단할 수 있는 기준이 될 수 있으므로 동일한 기준에서 판단하기에는 어려움이 있다.

비중은 경도 값과 반비례하는 결과를 나타내었으며, 수축률은 3종의 시편이 0%로 변화가 확인되지 않았다. 수축률의 경우 단기간에 진행된 연구로 향후 장기적인 보존성 측면에서의 추가적인 평가가 이루어져 안정성, 보존성, 신뢰성을 확보한다면 훼손 도자기 복원용 재료로서 적용이 가능할 것으로 사료된다.

Table 4. Property experiment result value

Property	Compressive strength (Mpa)	Hardness (Hs)	Specific gravity	Contraction rate (%)
L30 resin	107.7	83	1.33	0
ABS resin	48.5	70	0.44	0
Ceramic resin	126.2	89	1.76	0

#### 4. 결론

발굴 및 전승되어지는 도자기 중 훼손된 도자기는 복원 전문가를 통해 보존처리가 이루어지고 있다. 그러나 도자기의 제작 과정에서의 오차 범위가 광범위하여 전통 재료와 기법을 통한 복원 작업은 이루어지지 못하고 있으며, 대부분 합성수지를 이용한 복원이 이루어지고 있다.

이러한 복원기술을 대체하고자 문화유산의 보존기술과 최신 3D기술의 융합 연구를 통해 복원 기술 대체 가능성을 확인해보고자 하였다. 최신 3D 디지털 기술 중 도자기 재질과 유사한 세라믹 수지를 이용한 3D 프린팅 기술을 접목해 실제 훼손 도자기 복원 작업에서의 적용 가능성을 확인해보고자 하였다.

첫째, 세라믹 수지를 이용한 복원부 제작은 기존 재료에 비해 정밀도가 높아 미세한 형상의 출력이 가능하였다. 이는 형태가 단순한 대접, 접시 이외의 결실부 기형이 복잡한 청자 주전자, 향로 등의 복원부 제작 시에도 세라믹 수지를 이용한 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 출력물의 정확도가 기존 재료와 유사하고 후 처리 과정은 틈새 메움, 질감 표현, 고색처리 등 동일한 과정을 통해 복원이 가능해 실제 복원 작업에 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

둘째, 세라믹 수지의 물성 결과 기존 재료보다 상회하는 결과 값을 나타내어 재료의 기초적인 안정성과 신뢰성이 확인되었다. 재료의 수축, 변형이 없고 압축강도가 높아 기존 재료에 비해 내구성이 우수한 것으로 판단되며, 기존 재료에 비해 조금 낮은 가공성은 보다 정밀한 스캐닝과 프린팅 기술을 통해 오차를 최소화하여 출력물의 성형과정을 최소화하면 보정이 가능할 것으로 사료된다. 또한 최종 소결 과정은 그로스 바니시 처리 및 고색 처리 등으로 보완이 가능해 수축·변형이 없고 기존 복원 재료보다 물성이 상회하며, 도자기 원재료와 가장 근접한 세라믹 수지의 적용은 훼손 도자기 복원의 새로운 문화유산 디지털 복원 기술이 될 수 있다고 판단된다.

셋째, 기존 복원 방법에 비해 세라믹 수지를 이용한 복원은 실제 도자기 제작에 사용되는 원료·기법 등과 가장 유사하고, 세라믹 3D 디지털 최신 기술을 훼손 도자기 복원에 적용한 첫 사례로서 향후 문화유산 융합기술이 적용될 수 있는 기반으로 판단된다. 이러한 문화유산과 디지털 기술의 융합은 훼손된 도자기 뿐 만 아닌 토기, 도기, 기와 등과 같이 점토를 기반으로 제작된 문화유산의 복원에 활용이 가능할 것이며, 전시를 위한 복제품의 제작과 체험 형태의 관람 기술 적용 등으로의 활용 가능성도 있을 것으로 사료되어진다.

본 연구는 문화유산 복원과 디지털 기술의 융합을 통해 도자기 본연의 재료와 유사한 세라믹 수지로 훼손 도자기의 원형을 복원하고, 디지털 문화유산 복원 기술을 한 단계 향상시킬 수 있는 계기가 될 수 있을 것으로 사료되어진다. 또한 재료의 장기적인 모니터링을 통해 신뢰성과 안정성을 확보하면 실제 복원 현장에서의 적용뿐만 아닌 디지털 보존 기술과 문화유산의 보존, 전시, 교육, 홍보 등으로의 활용도 가능할 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- [1] F. Klocke. (1997). Modern approaches for the production of ceramic components. *Journal of European Ceramic Society*, 17(2-3), 457-465. DOI : 10.1016/S0955-2219(96)00163-X
- [2] A. Zocca. P. Colombo. C. M. Gomes & J. Günster. (2015). Additive manufacturing of ceramics: issue, potentialities, and opportunities. *Journal of American Ceramic Society*, 98(7), 1983-2001. DOI : 10.1111/jace.13700
- [3] H. S. Lee & H. S. Hwang. (2007). *The Conservation and Restoration -Ceramics-*. Seoul : National Museum of Korea.
- [4] S. J. OH & K. C. Wi. (2018). A Study on the Method of Restoring Pottery Using 3D Digital Technology - Comparison of the Restoring Methods of White Porcelain Using Contact and Contactless Methods -. *Culture and Convergence*, 40(2), 595-614. DOI : 10.33645/cnc.2018.04.40.2.595
- [5] National Research Institute of Cultural Heritage. (2014). *Ceramics, Pottery Restoration, Low Shrinkage for Low-Yellowing Resin Developed Reversible II*. Daejeon : National Research Institute of Cultural Heritage.
- [6] H. S. Hwang, M. J. Koh, S. K. Lim & D. H. Lee. (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. DOI : 10.22790/conservation.2014.15.0026
- [7] S. Y. Jo, Y. M. Kwon & B. B. Choi. (2018). Conservation Treatment of the Seated Stone Bodhisattva Discovered in Pyeongchang and Restoration of the Statue Using 3D Digital Technologies. *Conservation Science in Museum*, 20, 77-92. DOI : 10.22790/conservation.2018.20.0077
- [8] H. S. Lee & K. C. Wi. (2015). Restoration of a White Porcelain Pitcher Using 3D Printing. *Conservation Science in Museum*, 16, 123-126. DOI : 10.22790/conservation.2015.16.0122
- [9] H. S. Lee & K. C. Wi. (2015). Restoration of Earthenware & Porcelain Cultural Assets using 3D Printing. *Journal of Conservation Science*, 31(2), 131-145. DOI : 10.12654/JCS.2015.31.2.06
- [10] S. W. Cheon. (2015). Development of 3d printing technology-based composite material printing device. Master's dissertation. Korea National University of Transportation, Chungju.
- [11] S. M. Kim. (2014). *Personal 3D Printing*. seoul : Young Jin. com.
- [12] K. H. Lee, S.Y. Jang, S. Y. Lee & M. H. Seo. (2014). *A new revolutionary 3D printer that changes the world A to Z*. p27-35, Gyeonggi : Intobooks.
- [13] G. S. Jang. (2004). *A Study on Digital Restorology of Cultural Assets Using 3D Scanning System*. Master's dissertation. Sung Kyun Kwan University, Seoul.
- [14] E. M. Shin. (2018). *Study to develop and enhance the utilization of 3D technology - Focused on case studies in dental field -*. Master's dissertation. Sung Kyun Kwan University, Seoul.
- [15] S. H. Lee. (2016). Prospect for 3D Printing Technology in Medical, Dental, and Pediatric Dental Field. Master's dissertation. Chosun University, Gwangju.

오 승 준(Seung-Jun Oh)

[정회원]



- 2017년 8월 : 한서대학교 문화재학과 (이학박사)
- 2019년 2월 ~ 현재 : 한서대학교 문화재보존과학연구소 연구교수
- 2020년 1월 ~ 현재 : (사)한국문화재보존과학회 학술이사
- 관심분야 : 야외 조각 작품 보존, 예술

품 보존, 3D 디지털 문화유산 보존·복원

· E-Mail : cruser00@naver.com



위 광 철(Koang-Chul Wi)

[정회원]



- 2002년 1월 ~ 현재 : 한서대학교 문화재보존학과 교수
- 2003년 1월 ~ 현재 : 서울역사박물관 보존처리 자문위원
- 2006년 4월 ~ 현재 : 한서대학교 박물관 관장
- 2020년 1월 ~ 현재 : (사)한국문화재

보존과학회 회장

- 관심분야 : 금속 문화재 보존, 보존재료, 유적지 보존복원
- E-Mail : kcwi@hanseo.ac.kr