

하이드로겔 탈수를 통한 세라믹의 직접 4D 프린팅

한대훈 | 전남대학교 화학공학부 (E-mail: dhhan@jnu.ac.kr)

자극 반응성 소재를 활용한 4D 프린팅은 복잡한 구조물 제작을 가능하게 하여 다양한 분야에서 활용되고 있다. 세라믹은 내열성과 내식성이 높아 필수적인 엔지니어링 소재이지만, 낮은 변형성으로 인해 4D 프린팅 적용에 어려움이 있다. 최근 연구진은 하이드로겔과 세라믹 레진을 활용하여 다중재료 구조물을 제작했고, 하이드로겔 탈수에 의한 구조물 변형을 유도해 복잡한 형태의 순수한 세라믹 구조를 직접 제작할 수 있는 세라믹 4D 프린팅 기술을 개발했다. 이러한 기술은 항공우주 및 의학 공학에서 정밀한 세라믹 부품 제작에 큰 혁신을 가져올 것이다.

4D 프린팅은 3D 프린팅 기술과 시간에 따라 형태가 변하는 자극 반응성 소재를 결합하여, 특정 자극(예: 온도, 습도, 빛 등)에 따라 형태가 변형되는 구조물을 제작하는 기술이다. 4D 프린팅 기술을 통해 기존 3D 프린팅 기술로 제작이 어려운 복잡한 구조물 제작이 가능해졌으며, 또한 이들의 변형을 이용해 소프트로봇, 의료장치, 그리고 약물전달 등 다양한 응용기술들이 개발되었다. 세라믹은 높은 내열성, 강도, 내식성을 갖추고 있어 다양한 엔지니어링 산업 분야에서 필수적인 소재다. 하지만 세라믹의 낮은 변형성으로 인해 세라믹을 4D 프린팅에 적용하는 것에 한계가 있으며, 이로 인해 세라믹의 3D 프린팅은 단순한 구조 및 기능으로 제한되어 왔다. 최근 하이드로겔과 세라믹 레진을 결합하여 다중재료 3D 구조물 제작 및 탈수에 의한 4D 프린팅 기술이 보고되었다. 다중재료 프로젝션 기반의 3D 프린팅 기술을 활용하였으며, 세라믹 슬러리 레진과 아크릴 기반 하이드로겔 레진을 소재로써 사용하였다. 그림 1과 같이, 하이드로겔은 탈수에 의해 부피가 수축되고, 이는 하이드로겔과

직접 연결되어 있는 세라믹과의 변형률 차이를 만든다. 이로 인해 3D 구조물의 전체적 변형이 이루어지며, 변형된 구조물은 이후 고온 소성을 통해 복잡한 형태를 가진 순수 세라믹 구조로 변환된다. 연구진은 탈수로 인한 변형과 소성 과정에서의 수축을 예측하고, 최종 형태를 정밀하게 제어할 수 있는 이론적 모델을 개발했으며, 적층 구조와 굽힘 곡률을 연계하는 디자인 맵을 통합해 형태 변형을 정밀하게 조절하였다. 해당 연구는 기존 4D 프린팅 기술의 한계를 넘어 복잡한 세라믹 구조물 제작을 가능하게 하며, 견고하고 정밀한 세라믹 부품이 필요한 항공우주 및 의학 공학 등에서 큰 잠재력을 제공할 것이다. 또한 이는 세라믹 산업에 혁신을 가져올 수 있으며, 다양한 엔지니어링 분야에서 차세대 고분자-세라믹 소재 제작에 효율적이고 프로그래밍 가능한 방법을 제시할 것이다.

본 연구결과는 *Nature Communications*에 "Direct 4D printing of ceramics driven by hydrogel dehydration"의 제목으로 2024년 1월에 게재되었다 (DOI: 10.1038/s41467-024-45039-y).

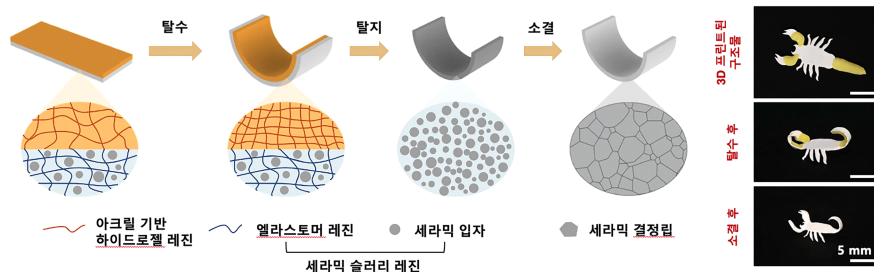


그림 1. 순수한 세라믹 구조물의 4D 프린팅 원리 및 제작된 구조물의 단계별 형태 사진.