

회전식 다중소재 3D 프린팅으로 구현한 형상변환 소프트 로봇

배재형 | 경희대학교 화학공학과 (E-mail: jbae@khu.ac.kr)

회전식 다중소재 3D 프린팅을 이용하여 탄성체 내부에 비대칭 공압 채널을 형성하고, 이를 통해 소프트 로봇의 움직임을 정밀하게 제어하는 기술이 개발되었다. 탄성체 잉크와 제거 가능한 희생 잉크를 하나의 노즐에서 동시에 압출하는 과정에서 노즐의 회전과 잉크 유량을 조절함으로써 공압 채널의 위치와 단면적을 구간별로 제어할 수 있다. 이러한 방법을 통해 단일 필라멘트는 코일이나 입방체 골격으로 변형될 수 있다. 나아가 원하는 형상에 맞는 인쇄 경로를 자동으로 생성하는 알고리즘을 적용하면 꽃잎이 말려 올라가거나 로봇 손가락이 물체를 잡는 동작도 구현할 수 있다.

사람과 직접 접촉하거나 불규칙한 물체를 다루는 로봇에는 단단한 부품보다 유연한 소재가 유리하다. 탄성체 내부의 빈 채널에 공기를 주입해 움직이는 소프트 액추에이터는 큰 변형을 만들 수 있어 로봇 손과 웨어러블 장치 등에 활용된다. 그러나 기존 제작법은 금형에 탄성체를 붓고 여러 층을 접합해야 하므로 공정이 복잡하고, 하나의 구조 안에서 굽힘 방향과 크기를 세밀하게 바꾸기 어렵다.

연구진은 이러한 한계를 해결하기 위해 회전식 다중소재 3D 프린팅을 적용하였다. 자체 제작한 노즐로 광경화성 탄성체 잉크와 제거 가능한 희생 잉크를 동시에 압출하면서 노즐의 방향과 잉크 유량을 조절하였다. 인쇄물을 자외선으로 경화한 뒤 열음물로 냉각해 희생 잉크를 씻어내면 탄성체 내부에 비대칭 공압 채널이 남는다.

채널의 위치는 공기를 주입했을 때 필라멘트가 굽는 방향을 결정한다. 노즐을 180°씩 돌리면 하나의 필라멘트 안에 서로 반대 방향으로 굽는 구간을 만들 수 있다. 노즐을 연속적으로 회전시켜 인쇄한 필라멘트는 83 kPa에서 코일 형태로 말리며 끝부분이 최대 880°까지 회전할 수 있다. 희생 잉크의 유량을 바꿔 채널의 크기를 구간별로 조절하면 원하는 위치에서만 크게 접히는 공압 힌지도 만들 수 있다. 나아가 여러 힌지를 연결한 단일 필라멘트는 공기압에 따라 평면에서 입방체 골격으로 변형될 수 있다.

이 방법은 넓은 면과 복잡한 형상의 구조에도 적용될 수 있으며, 필라멘트 내부 공압 채널의 위치를 영역별로 달리해 일부는 위쪽으로, 다른 부분은 아래쪽으로 굽는 표면을 제작할 수 있다. 연구진은 원하는 형상에 맞춰 인쇄 경로를 자동으로 생성하는

알고리즘을 이용해 꽃과 사람 손 형태의 구조도 만들었다. 공기압이 높아질수록 꽃잎은 안쪽으로 말려 올라갔으며, 로봇 손은 각 손가락을 독립적으로 구부려 구형 물체를 감싸 쥔 뒤 들어 올렸다. 단일 필라멘트는 103 kPa에서 10.3 mN의 힘을 냈으며, 네 개의 필라멘트를 병렬로 배치했을 때에는 52 mN까지 증가하였다.

이번 연구는 3D 프린팅 단계에서 구조의 외형과 내부 공압 채널을 함께 설계함으로써 소프트 로봇의 움직임을 원하는 방향으로 구현할 수 있음을 보여 주었다. 별도의 금형 제작과 접합 공정을 줄일 수 있다는 점에서 맞춤형 그리퍼와 웨어러블 보조기기, 전개형 구조물 등 다양한 분야에 활용될 것으로 기대된다. 다만 현재 사용한 탄성체는 높은 압력에서 변형이 누적되거나 파열될 수 있으므로, 실제 응용을 위해서는 반복 구동에 강한 소재를 적용하고 각 작동 영역 사이의 간섭을 최소화하는 설계가 필요하다.

본 연구 결과는 *Advanced Materials*에 "Rotational Multimaterial 3D Printing of Soft Robotic Matter With Embedded Asymmetrical Pneumatics"의 제목으로 2025년 11월에 게재되었다(DOI: 10.1002/adma.202510141).

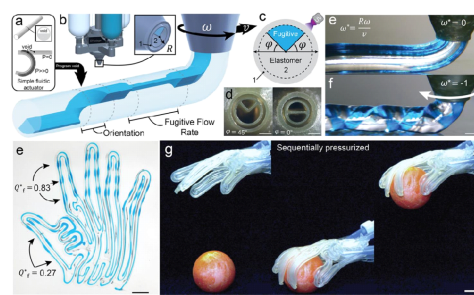


그림 1. (상) 회전식 다중소재 3D 프린팅을 이용한 비대칭 공압 채널의 형성 원리. (하) 제작된 소프트 로봇 손과 손가락 별 순차 가압을 통한 구형 물체의 파지 과정.