

PLA 단일 출력 모듈을 활용한 소프트 그리퍼 Lo-Fi 프로토타이핑 사례 연구

디지털 공유 가능한 소프트 로보틱스 프로토타이핑 방법을 중심으로

A Case Study on Lo-Fi Prototyping of Soft Grippers Using PLA-Printed Modules

Toward Shareable Soft Robotics Prototyping Methods

주 저 자 : 윤지환 (Yoon, Ji Hwan) 서울과학기술대학교 산업디자인학과 석사과정

교 신 저 자 : 김원섭 (Kim, Won Sup) 서울과학기술대학교 산업디자인학과 교수
wskim@seoultech.ac.kr

<https://doi.org/10.46248/kids.2026.2.94>

접수일 2026. 06. 09. / 심사완료일 2026. 06. 12. / 게재확정일 2026. 06. 15. / 게재일 2026. 06. 30.

Abstract

This study aims to propose a Lo-Fi prototyping method for soft grippers using a PLA single-print module by addressing the high fabrication barriers and limitations of digital file-based sharing in soft robotics. Conventional soft robotic systems often rely on silicone casting, specialized equipment, and complex manufacturing processes, making them difficult for non-experts to access and reproduce through digital file sharing. To address these limitations, two representative soft gripper cases provided by the Soft Robotics Toolkit were analyzed to identify their common structural principles, which were then translated into a PLA-based spring module that can be fabricated through a single printing process. A soft gripper prototype was subsequently developed using the proposed module, and its application process was presented as a design case. The results showed that the proposed module could be designed and fabricated using a single STL file and utilized to implement a prototype that mimics the bending behavior of soft grippers. This study contributes by suggesting the potential of a Lo-Fi prototyping approach that enhances accessibility to soft robotics design and supports digital file-based sharing environments.

Keyword

Soft Robotics(소프트로보틱스), Lofi-prototyping(로우파이 프로토타이핑), 3d printing(3d 프린팅)

요약

본 연구는 소프트 로봇의 높은 제작 장벽과 디지털 파일 기반 공유의 한계에 주목하여, PLA 단일 출력 모듈을 활용한 소프트 그리퍼 Lo-Fi 프로토타이핑 방법을 제안하는 데 목적이 있다. 기존 소프트 로봇은 실리콘 캐스팅, 전용 장비, 복잡한 제작 공정에 대한 의존도가 높아 비전문가의 접근과 디지털 파일 기반 공유에 어려움이 있다. 이를 위해 본 연구는 Soft Robotics Toolkit에서 제공하는 두 가지 소프트 그리퍼 사례를 분석하여 공통 구조를 도출하고, 이를 PLA 단일 출력 기반 스프링 모듈로 대응하였다. 또한 제안한 모듈을 활용하여 소프트 그리퍼 프로토타입을 제작하고 적용 과정을 사례로 제시하였다. 연구 결과 제안한 모듈은 단일 STL 파일 기반 설계와 제작을 할 수 있었으며, 소프트 그리퍼의 굽힘 거동을 모방한 프로토타입 구현에 활용될 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 본 연구는 소프트 로봇 설계의 접근성을 높이고 디지털 파일 기반 공유 환경에서 활용 가능한 Lo-Fi 프로토타이핑 방법의 가능성을 제시하였다는 점에서 의의를 가진다.

목차

1. 서론

1-1. 연구 배경 및 목적

2. 이론적 배경

2-1. 오픈 이노베이션과 메이커 운동

2-2. 소프트 로봇의 등장과 한계

2-2-1. 소프트 로보틱스 기술의 등장

2-2-2. 소프트 로봇의 디자인 진입 장벽

2-3. 선행사례 분석: Soft Robotics Toolkit(SRT)

2-3-1. 개발 배경과 목표

2-3-2. 한계: 파일 공유 생태계 관점에서의 공백

3. 연구방법 및 설계

3-1. 연구 대상 선정: 소프트 그리퍼

- 3-1-1. 소프트 그리퍼의 정의
- 3-1-2. 대상 선정 근거
- 3-2. 연구 방법
- 3-3. SRT 사례 분석 및 공통 구조 도출
- 3-4. 3D 프린팅 스프링 모듈 대응 설계
 - 3-4-1. 설계 원칙
 - 3-4-2. 구성 요소와 기능적 대응
 - 3-4-3. 모듈 작동 원리

4. 제작 및 결과

- 4-1. 단위 모듈 제작

- 4-1-1. 재료 및 도구
- 4-1-2. 단위 모듈 설계 및 출력
- 4-1-3. 형상 변수에 따른 굽힘각 측정
- 4-2. 모듈 직렬 조립 및 거동 확인
- 4-3. 소프트 그리퍼 프로토타입 제작
- 4-4. 공유 가능한 형식으로서의 정리

5. 결론

- 5-1. 연구의 의의
- 5-2. 연구의 한계와 향후 과제

참고문헌

1. 서론

1-1. 연구의 배경 및 목적

Thingiverse(2008), Printables(2019), MakerWorld(2023)로 이어지는 3D 프린팅 공유 플랫폼의 등장은 디자이너의 작업 방식을 근본적으로 바꾸었다. 디자이너는 자신의 3D 모델 파일을 STL 단위로 배포하고, 다른 디자이너의 작업물을 그대로 출력해 활용하거나 자신의 의도에 맞게 변형하여 재배포한다. 이러한 흐름은 단순한 파일 교환을 넘어, 한 디자이너의 결과물이 다른 디자이너의 출발점이 되는 변주와 파생의 순환 구조를 형성해 왔다.

그러나 이 순환 구조 안에 자리 잡기 어려운 디자인 영역이 있다. 소프트 로보틱스는 STL 파일만 공유받아서는 동일한 결과를 재현하기 어려운 대표적인 사례이다. 소프트 로보틱스의 거동을 만들어내는 실리콘 캐스팅, 연질 FDM 출력, 후처리 공정 등은 형상 파일에 인코딩되지 않는 다수의 변수를 포함하며, 같은 STL 파일을 받아도 사용하는 실리콘의 종류, 진공 탈포 여부, 경화 시간, 인쇄 온도, 핵심 액추에이터에 따라 전혀 다른 결과물이 만들어진다. 형상 파일만으로 작동하지 않는 디자인은 공유에 적합하지 않으며, 공유되지 않는 디자인은 변주와 파생의 생태계를 형성하지 못한다.

본 연구는 이러한 거리를 좁힐 수 있는 한 가지 방법으로, 압축 스프링을 포함한 모든 구성 요소를 PLA 단일 필라멘트로 출력하는 방식을 탐구하였다. 이 제작법에서는 소프트 로보틱스의 거동을 만들어내는 핵심

요소(구조와 액추에이터)가 모두 STL 파일 안에 인코딩되므로, 형상 파일 밖에 존재하던 공정 변수가 제거되고 거동을 좌우하는 정보가 형상 데이터 내부로 옮겨진다. 이로써 파일 공유만으로 거동 재현을 시도할 수 있는 형식적 조건이 갖추어진다. 다만 동일 파일로 출력된 모듈 사이의 실제 거동 일관성은 별도의 반복 검증을 요하는 문제이며, 본 연구는 이러한 형식적 조건의 성립을 하나의 사례로 제시하는 데 목적을 둔다. 디자이너는 재료 공학적·엔지니어링적 지식을 깊이 학습하지 않고도, 아이디어이션과 프로토타이핑 단계에서 원하는 형태를 떠올린 뒤 그에 맞는 파일을 출력하는 방식으로 소프트 그리퍼를 다룰 수 있다.

본 연구의 목적은 이러한 가능성을 하나의 디자인 프로젝트 사례로 살펴보는 것이다. 스프링 모듈을 기본 단위로 한 소프트 그리퍼 디자인에서 디자이너가 조작 가능한 형상 변수가 모듈의 거동에 어떤 영향을 미치는지 실물 제작을 통해 검토하고, 이를 STL 파일 단위로 공유 가능한 형식으로 정리할 수 있는지를 사례를 통해 살펴본다.

2. 이론적 배경

2-1. 오픈 이노베이션과 메이커 운동

오픈소스 소프트웨어 운동(GNU 프로젝트, 1983)에서 출발한 개방형 협업의 원리는 2009년 FDM 특허 만료와 함께 데스크톱 3D 프린터의 보급, 그리고 Thin

giverse(2008), Printables(2019), MakerWorld(2023)와 같은 공유 플랫폼의 등장으로 디자인-하드웨어 영역에까지 확장되었다¹⁾. 디자인은 더 이상 개인의 완결된 결과물이 아니라 여러 사람의 손을 거치며 다시 만들어지는 열린 과정으로 인식되기 시작했으며, 이러한 플랫폼들은 단순한 파일 저장소를 넘어, 형상 파일 하나의 공유만으로 결과의 동등한 재현이 가능하다는 전제 위에 작동하고 있다. 이는 본 연구가 다루고자 하는 공유 가능한 디자인이 자리잡을 수 있는 토대가 되었다.

[표 1] 오픈 이노베이션과 메이커 운동

사례	시작연도	영역	공유단위	변주-파생구조
GNU	1983	운영체제-소프트웨어	소스 코드, GNU GPL 라이선스	자유로운 수정·재배포 허용. Linux 커널(1991) 등 전 세계 협업 생산 모델의 토대
Git Hub	2008	코드 협업 플랫폼	Git 저장소(repository)	Fork-Pull Request 구조로 원본-파생본 관계를 가시화. 1억 명 이상 개발자 활동
Blender	1998	3D 그래픽 소프트웨어	오픈소스 SW + 무료 3D 자산	Free Blender 캠페인(2002)으로 GPL 전환. Project Orange(2005)에서 단편 애니메이션과 모델·텍스처 자산 공동 제작·공개
Maker World	2023	3D 프린팅 모델 공유	STL 파일 + 인쇄 프로파일	Remix 구조로 원작-파생본 계보 자동 추적, 출력 설정까지 함께 공유

이들 사례가 공통적으로 보여주는 것은, 공유 가능한 단위(파일)가 명확히 정의되어 있고, 완결된 공유단위를 공유함으로써 해당 단위만 공유받으면 결과가 안정적으로 재현된다는 점이다. 이것이 변주-파생 생태계

를 가능하게 하는 핵심 조건이다.

최근에는 이러한 공유 단위가 한 단계 더 확장되는 양상을 보인다. MakerWorld의 Parametric Model Maker는 디자이너가 모델에 사용자 조작 가능한 변수(치수, 개수, 폰트, 색상 등)를 노출시킬 수 있게 하며, 다운로드 사용자는 웹 브라우저상의 슬라이더와 입력창만으로 자신의 용도에 맞게 형상을 조절한 뒤 STL/3MF 파일을 즉시 생성할 수 있다. 사용자는 원본 형상을 그대로 출력하는 것을 넘어, 자신의 디자인 의도에 맞게 변수를 정밀하게 조정한 파생본을 만들 수 있게 된 것이다. Gridfinity 수납 시스템, 커스텀 키체인, 파라메트릭 주사위 등 다양한 사례가 이 방식을 통해 공유확장되고 있음을 확인 할 수 있다. 이는 공유의 단위가 '고정된 형상 파일'에서 '변수 조작 가능한 설계 공간'으로 확장되고 있음을 보여준다. 본 연구가 제안하는 모듈 역시 스프링 길이와 구속축 길이 등 형상 변수가 STL 파일에 인코딩되어 있어, 디자이너가 자신의 제작물에 맞게 변주하기 쉽도록 되어있다.

그러나 소프트 로보틱스는 컴플라이언트 메커니즘 등의 일부 메커니즘 사례를 제외하고서는 이러한 흐름에서 거의 소외되어 왔다. 같은 STL 파일을 받아도 사용하는 실리콘의 종류, 진공 탈포 여부, 경화 시간 등 형상 파일에 인코딩되지 않는 다수의 공정 변수에 따라 전혀 다른 결과물이 만들어지기 때문이다. 형상 파일만으로 작동하지 않는 디자인은 공유에 적합하지 않으며, 공유되지 않는 디자인은 변주와 파생의 생태계를 형성하지 못한다. 다음 절에서는 이 한계가 어디에서 비롯되는지를 소프트 로보틱스 기술의 특성 차원에서 살펴본다.

2-2. 소프트로봇의 등장과 한계

2-2-1. 소프트로보틱스 기술의 등장

소프트 로봇은 유연한 재료로 구성되어, 전통적인 경직된 움직임을 보여주는 로봇과 달리 다양한 형태로 변형하며 움직일 수 있는 시스템이다. 자율적 거동이 가능하며, 주로 연성 생체 재료와 유사한 탄성 계수 범위의 재료로 구성된 시스템으로 정의한다.²⁾ 의료, 재활, 물체 조작, 탐사 등 인간과의 상호작용이 요구되는 영역에서 응용 가능성이 높으며, 특히 소프트 그리퍼는 부드러운 파지 메커니즘을 통해 섬세한 물체를 손상

1) Chris Anderson, 『Makers: The New Industrial Revolution』, Crown Business, 2012, p.41-58.

2) Daniela Rus & Michael T. Tolley, 'Design, Fabrication and Control of Soft Robots', Springer Nature, Nature, Vol.521, No.7553, 2015. 05, pp.467-475.

없이 조작할 수 있어 생산 및 물류 분야에서도 주목받고 있다³⁾.

2-2-2. 소프트로봇의 디자인 진입 장벽

소프트 로봇은 디자인 분야에서 매력적인 소재이지만, 디자이너가 이를 디자인 초기 단계의 탐색 도구로 활용하기에는 다음 세 가지 차원에서 진입 장벽이 존재한다.

첫째, 소재의 다양성과 특성이다. 소프트 로봇 제작에는 실리콘, 엘라스토머, 직물 등 서로 다른 물성을 가진 다양한 재료가 동시에 사용되며, 각 재료의 특성과 한계를 이해하지 못하면 설계 단계에서부터 어려움이 발생한다⁴⁾. 디자이너가 익숙한 종이·폼보드·플라스틱과 달리, 이러한 재료들은 일상적 환경에서 직관적으로 다루어 본 경험이 부족하다.

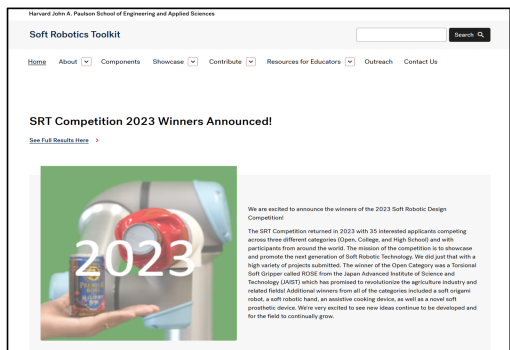
둘째, 거동의 비직관성이다. 소프트 로봇의 움직임은 재료의 탄성 특성과 구동력의 상호작용에 의해 결정되며, 비선형적 대변형과 복잡한 접촉 역학을 수반한다. 잘 정의된 운동학적 체인을 따라 유한한 자유도로 기술되는 전통 로봇과 달리, 소프트 로봇은 무한한 자유도와 복잡한 설계 공간을 가지므로 사전에 거동을 직관적으로 예측하기 어렵다.

셋째, 공유 가능한 방법론의 부족이다. 전통 로봇 설계에서는 기성 모터, 전원 공급 장치, 구조 부품으로 이루어진 모듈형 방법론이 확립되어 있어 단계적 접근이 가능하다. 그러나 소프트 로봇 분야에서는 다양한 재료 및 구동방식 특성상 범용적으로 사용가능한 방법론이 정리되지 않았다. 특히 최종 모델을 공유하는 디지털 공유 플랫폼의 일반적인 방식과도 차이가 있다. 같은 STL 파일을 받아도 사용하는 실리콘 종류, 진공 탈포 여부, 경화 시간 등에 따라 전혀 다른 결과가 만들어지므로, 메이커 플랫폼의 변주-파생 구조가 작동하기 어렵다⁵⁾.

이 세 가지 장벽 중 첫째와 둘째는 소프트 로봇 자체의 본질적 특성에서 비롯되며 단기간에 해소되기 어렵다. 그러나 셋째 장벽은 디자이너가 거동을 다루는 방식과 결과를 공유하는 방식을 어떻게 매개해 주느냐에 따라 좁혀질 수 있다. 본 연구는 이 세 번째 장벽으로 지적되는 부분 중 프로토타이핑 방법론의 공백과 형상 파일 공유의 일반적인 방법을 한 사례로서 제시하는 것을 목표로 한다.

2-3. 선행사례분석: Soft Robotics Toolkit(SRT)

소프트 로봇에 대한 접근성을 높이려는 시도 중 가장 널리 알려진 것은 Harvard University와 Trinity College Dublin이 공동으로 개발하여 운영해 온 Soft Robotics Toolkit(SRT)이다⁶⁾. 본 절에서는 SRT의 개발 배경과 운영 방식을 정리하고, 디지털 공유 생태계 관점에서 SRT가 가지는 구조적 공백을 도출한다.



[그림 1] Harvard University에서 운영하는 Soft Robotics Toolkit 웹사이트

2-3-1. 개발 배경과 목표

소프트 로봇에 대한 접근성을 높이려는 시도 중 가장 널리 알려진 것은 Harvard University와 Trinity College Dublin이 함께 개발한 Soft Robotics Toolkit(SRT)이다. SRT는 소프트 로봇 제작에 관한 세부 정보가 부족하다는 학생들의 필요에서 출발하여, 학부·대학원생이 참여하는 프로젝트 기반 의료가기 설계 수업의 교육 자료로 발전하였다.

3) Chiwon Lee, Myungjoon Kim, Yoonjae Kim, Nhayoung Hong, 'Soft Robot Review', Springer, International Journal of Control, Automation and Systems, Vol.15, No.1, 2017. 01, pp.3-15.

4) Getachew Ambaye, Enkhsaikhan Boldsai Khan, Krishna Krishnan, 'Soft Robot Design, Manufacturing, and Operation Challenges: A Review', MDPI, Journal of Manufacturing and Materials Processing, Vol.8, No.2, 2024. 04, p.79

5) François Schmitt, Olivier Piccin, Laurent Barbé, Bernard Bale, 'Soft Robots Manufacturing: A

Review', Frontiers, Frontiers in Robotics and AI, Vol.5, 2018. 07, p.84.

6) Soft Robotics Toolkit, (2026.05.20.)
www.softroboticstoolkit.com

SRT의 목표는 소프트 로봇 하드웨어의 광범위한 보급을 가로막는 장벽을 극복하는 데 있다. 웹사이트를 통해 설계 파일, 멀티미디어 제작 가이드, 소프트웨어 튜토리얼을 공개하며, 국제적인 연구자·디자이너 커뮤니티를 운용한다. 대상 사용자는 K-12 학생부터 로봇 공학 연구 그룹에 이르기까지 폭이 넓으며, 낮은 비용과 접근 가능한 재료만으로 제작 가능한 새로운 방법을 개발하여 진입 장벽을 낮추고자 한다.

[표 2] Soft Robotics Toolkit(SRT) 개요

항목	내용
개발 주체	Harvard University, Trinity College Dublin
시작 배경	소프트 로봇 제작 세부 정보 부족이라는 학생들의 필요
발전 경로	프로젝트 기반 의료기기 설계 수업의 교육 자료로 확장
핵심 목표	소프트 로봇 하드웨어 보급을 가로막는 장벽 극복
대상 사용자	K-12 학생부터 로봇공학 연구 그룹까지
운영방식	웹사이트 기반 자료 공개, 국제 연구자·디자이너 커뮤니티 운용

[표 3] SRT가 제공하는 자원 구성

구성요소	형식	역할
프로젝트별 제작 가이드	영상·이미지·텍스트	숙련도별 난이도 분류, 단계별 지침 제공
부품목록	텍스트·표	필요 부품의 사양과 구매 정보 명시
CAD 및 설계파일	디지털 파일	몰드 설계도 등 제작 도면 제공
제어보드설계	회로도·코드	하드웨어 제어 인프라
하드웨어·소프트웨어 튜토리얼	영상·텍스트	제어·구동 기술 학습 자료
메커니즘 해석 가이드	텍스트·다이어그램	액추에이터 거동의 원리 설명

2-3-2. 한계: 파일 공유 생태계 관점에서의 공백

SRT는 학습자의 숙련도에 따라 난이도를 나눈 프로젝트별 제작 가이드를 영상·이미지·텍스트 형태로 제공한다. 각 프로젝트에는 필요한 부품 목록과 사양, 구매 정보를 명시한 부품 목록이 함께 제공되며, 제작에 필요한 CAD 및 설계 파일 또한 공개된다. 이에 더해 제

어 보드 설계와 하드웨어·소프트웨어 튜토리얼, 그리고 액추에이터의 거동을 이해하기 위한 메커니즘 해석 가이드까지 포괄적으로 제시된다.

이는 교육적 측면에서 의의가 크지만, 디지털 공유 관점에서는 다음 세 가지 한계를 가진다. 첫째, 모든 그리퍼 가이드가 실리콘 캐스팅을 전제로 하여 진공 챔버·오븐 등 전용 장비를 요구하고 수작업 의존으로 제작 편차가 발생한다. 둘째, 공개되는 CAD 파일은 액추에이터 형상이 아닌 몰드 설계도이기 때문에 사용자가 별도의 캐스팅 공정을 거쳐야 하므로 Thingiverse·MakerWorld와 같은 "출력하면 끝" 공유 모델과 맞지 않는다. 셋째, 정해진 하나의 프로젝트 완성을 목표로 하는 매뉴얼식 구조는 디자이너의 자유 탐색·변주·파생 위한 모듈 단위 접근을 지원하지 않는다.

본 연구는 이러한 한계점을 해결하는 방안 중 하나의 방법으로, 3D 프린터와 PLA 필라멘트만으로 출력 가능하며 STL 파일 하나로 변주·공유가 가능한 단위 모듈을 제안한다. 다음 장에서는 모방 대상으로 소프트 그리퍼를 선정한 근거를 밝히고, SRT가 제공하는 두 가지 대표 그리퍼 사례인 SDM Finger Gripper와 Soft Gripper의 제작 방식을 분석한 뒤, 두 사례 모두에 대응하는 단일한 PLA 출력 스프링 모듈을 설계한다.

3. 연구 방법 및 설계

3-1. 연구 대상 선정: 소프트 그리퍼

3-1-1. 소프트 그리퍼의 정의

그리퍼(gripper)는 잡기, 이동, 분류, 또는 물체의 물리적 특성에 대한 감각 정보를 수집하는 등의 동작을 수행하는 로봇 말단 효과기(robot end effector)를 가리킨다. 이 가운데 소프트 그리퍼는 유연한 소재로 구성된 파지 장치로, 단단한 링크와 조인트로 이루어진 경직된 그리퍼와 달리 구조 자체의 탄성 변형을 통해 파지 동작을 수행한다. 형상이 불규칙하거나 부서지기 쉬운 물체에 대해 별도의 센서나 복잡한 제어 알고리즘 없이도 적응적 파지가 가능하다는 점에서 소프트 로봇의 가장 대표적인 응용 분야로 자리 잡고 있다.

3-1-2. 대상 선정 근거

본 연구가 소프트 로봇의 다양한 형태 중 소프트 그리퍼를 모방 대상으로 선정한 근거는 다음 세 가지이다.

첫째, 대표성이다. 그리퍼는 속도, 유연성, 민첩성을 요구하는 동시에 부드럽고 변형 가능한 물체를 다루어야 하는 작업 환경을 위해, 첨단 연성 부품을 활용하여 가볍고 단순한 구조로 범용성을 확보하는 방향으로 발전해 왔다. 소프트 로보틱스 메커니즘이 가장 적극적으로 채택된 영역이 바로 소프트 그리퍼이다.

둘째, 작동의 명확한 관찰 가능성이다. 소프트 그리퍼의 굽힘 동작은 손가락 형태의 구조가 한 방향으로 휘어지며 물체를 감싸는 단순하고 직관적인 거동으로, 움직임의 방향과 정도가 육안으로 명확하게 드러난다. 이는 비전문가가 거동의 발생 원리를 직관적으로 이해하고, 설계 변경에 따른 거동의 변화를 즉각적으로 확인하는 데 적합한 조건을 제공한다.

셋째, 목적 중심의 다양한 구현 가능성이다. 소프트 그리퍼는 '물체를 잡는' 단일한 목적을 가지면서도, 이를 구현하기 위한 재료와 구동 방식은 매우 다양하게 채택된다. SRT가 제공하는 두 가지 대표 사례만 보더라도 SDM Finger Gripper는 이중 실리콘과 케이블의 결합으로, Soft Gripper는 실리콘과 직물의 결합과 공기압 주입으로 동일한 굽힘 거동을 구현한다. 즉 소프트 그리퍼는 재료와 구동 방식이 달라도 결과적인 거동의 목적이 일치하는 분야이며, 이는 본 연구가 의도하는 '서로 다른 사례에 대응 가능한 단일 모듈'이라는 접근에 가장 잘 맞는 대상으로 판단하였다.

3-2. 연구 방법

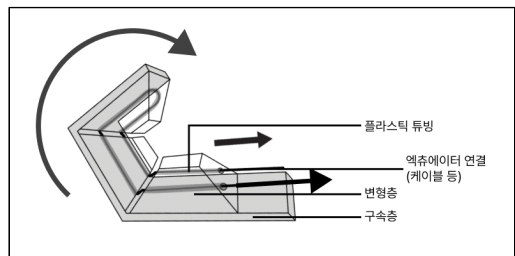
본 연구의 분석 자료는 Soft Robotics Toolkit이 2017년에 공개한 두 가지 교육용 그리퍼 가이드, SDM Finger: An Educator's Guide와 Soft Gripper: An Educator's Guide이다. 두 가이드는 각 사례의 제작 부품, 매뉴얼, 작동 원리를 동일한 형식으로 제공하므로, 두 사례를 직접 비교하여 공통 구조를 도출하기에 적합한 자료이다.

연구는 다음의 순서로 진행된다. 첫째, 두 사례를 개별적으로 분석하여 각 그리퍼가 어떤 부품으로 구성되며 어떤 원리로 굽힘 거동을 발생시키는지 정리한다. 둘째, 두 사례를 비교하여 구동 방식의 차이에도 불구하고 공유되는 공통 구조를 도출한다. 셋째, 이 공통 구조에 기능적으로 대응하는 단일 PLA 출력 스프링 모듈을 구성해보고, 두 사례 모두에 대응 가능한 형태로 STL 파일 하나로 공유 가능한 모듈형 프로토타이핑 도구를 하나의 사례로 정리한다.

3-3. SRT 사례 분석 및 공통 구조 도출

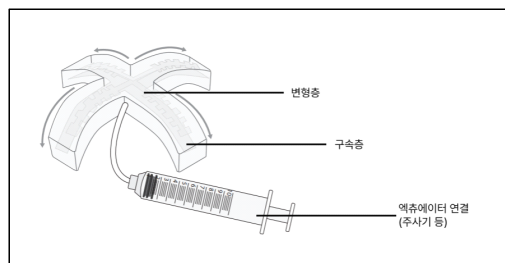
SRT가 공개한 두 가이드를 분석하여 그 작동원리를 정리해, 모듈화 시키기위한 변수 요소를 선정하였다.

SDM Finger Gripper는 두 종류의 실리콘을 순차적으로 캐스팅한 이중 레이어 구조에 케블라 코드를 매립하여, 사용자가 코드를 당기면 더 유연한 하단층이 크게 변형되고 더 경질인 상단층은 적게 변형되어 손가락 전체가 유연한 층 방향으로 굽혀지는 텐던 구동 방식을 채택한다.



[그림 2] SDM Finger Gripper의 굽힘 움직임 분석

Soft Gripper는 신축성 실리콘과 비신축성 직물을 결합한 비대칭 구조의 본체에 주사기로 공기를 주입하여, 위쪽 실리콘 층은 부풀어 늘어나는 반면 아래쪽 직물 층은 늘어나지 않으면서 손가락이 직물 방향으로 굽혀지는 공압 구동 방식을 채택한다. 사용자의 액추에이팅 방식과 부품 구성에서 차이가 있지만, 두 사례 모두 (1) 변형이 크게 일어나는 유연층, (2) 변형이 적게 일어나는 구속층, (3) 두 층 사이에 변형을 유도하는 외부 구동 요소라는 동일한 세 요소의 결합으로 굽힘을 만들어낸다.



[그림 3] Soft Gripper의 굽힘 움직임 분석

두 사례는 물성이 서로 다른 두 층의 비대칭 변형이라는 공통 구조 위에서 작동하며, 두 층의 차이를 활성

화시키는 구동 요소만 다르다. 이 공통 구조는 구체적인 재료의 종류나 구동 방식의 형태와 무관하게 기술 가능한, 디자인 수준에서 다루기 위한 추상화된 틀로 볼 수 있다. 본 연구는 이 추상화된 원리를 출발점으로 삼아, 실리콘 캐스팅 없이도 동일한 구조를 PLA 단일 출력만으로 유사한 구조를 구성해 볼 수 있는 모듈을 설계한다.

[표 4] SRT 두 사례의 공통구조

기능적 역할	SDM Finger	Soft Gripper
변형층	연질실리콘	신축성 실리콘
구속층	경질 실리콘	비 신축성 직물
구동요소	케이블 (텐션구동)	주입된 공기 (공압구동)

3-4. 3D 프린팅 스프링 모듈 대응 설계

3-4-1. 설계 원칙

3-3에서 정리한 공통 구조를 살펴보면, 굽힘 거동을 발생시키기 위해 갖추어야 할 조건은 다음 세 가지이다.

- (1) 변형을 크게 받아들이는 층
- (2) 변형을 적게 받아들이는 층
- (3) 두 층 사이에 변형을 유도하는 구동 요소

본 연구의 스프링 모듈은 이 세 가지 역할을 PLA 단일 필라멘트로 출력 가능한 형태로 각각 대응시킨다. 설계의 모든 결정은 다음 두 가지 원칙을 만족하도록 이루어졌다.

- (1) 두 사례의 어느 쪽 구동 방식(텐션 또는 공압)에도 적용될 수 있도록 구동 요소를 외부화한다.
- (2) 모든 구성요소를 단일 STL 파일 묶음으로 출력 가능하게 하여, 형상 파일 공유만으로 거동을 재현해 볼 수 있는 형식적 조건을 갖추도록 한다.

3-4-2. 구성 요소와 기능적 대응

본 연구의 스프링 모듈은 PLA 헬리컬 스프링, PLA 베이스 플레이트, PLA 비신축성 스트립, PLA 텐션 스트랩으로 구성되며, 네 부분 모두 동일한 STL 파일 묶음 안에 포함된다.

- (1) PLA 헬리컬스프링: 변형층

두 사례에서 변형이 크게 일어나는 층은 SDM

Finger의 연질 실리콘 또는 Soft Gripper의 신축성 실리콘이 담당하며, 그 본질은 외부 자극에 대해 큰 변형을 허용하는 재료라는 점이다. 본 연구에서는 이 역할을 PLA로 출력한 헬리컬 코일 스프링으로 대응시킨다. 헬리컬 구조는 PLA의 강성에도 불구하고 기하학적 형상을 통해 압축 변형을 허용한다. 외부 자극이 가해지지 않은 상태에서는 자유장을 유지하다가, 외부에서 압축이 가해지면 그만큼 길이가 줄어들고, 자극이 해제되면 원래 길이로 복원된다.

PLA 헬리컬 스프링은 두 가지 추가 가치를 제공한다. 첫째, 실리콘과 달리 형상이 STL 파일에 완전히 인코딩되므로, 동일한 파일을 공유받으면 유사한 강성의 스프링을 얻을 수 있다. 둘째, 코일 간격·와이어 두께·코일 수의 변경만으로 강성을 디자인할 수 있어, 디자인이 거동을 변형해 볼 수 있는 직관적 변수를 제공한다.

- (2) PLA 비신축성 스트립: 구속층

두 사례에서 변형이 적게 일어나는 층은 SDM Finger의 경질 실리콘 또는 Soft Gripper의 비신축성 직물이 담당하며, 그 본질은 단방향으로 변형을 제한하는 재료라는 점이다. 본 연구에서는 이 역할을 PLA로 출력한 비신축성 스트립으로 대응시킨다. PLA 스트립은 길이 방향으로는 거의 늘어나지 않아 한쪽 방향의 거리를 일정하게 유지하면서도, 굽힘 방향으로는 자유롭게 휘어지므로 모듈의 굽힘 자체를 방해하지 않는다. 스트립을 모듈의 어느 위치에 배치하느냐에 따라 굽힘이 일어나는 방향과 곡률이 달라진다.

- (3) PLA 베이스 플레이트: 두 요소를 일관된 방향으로 작용하게 하는 베이스 구조

3-3의 두 사례에서 두 층은 모두 캐스팅 과정에서 자연스럽게 한 덩어리로 결합되어, 변형의 방향이 일관되게 유지된다. 본 연구의 모듈에서는 이 일관성을 상하단 베이스 플레이트가 담당한다. 베이스 플레이트는 스프링의 양 끝을 거치하여 스프링이 한쪽으로 쏠리지 않게 하며, 모듈 간 결합 시 기준면을 제공한다.

- (4) PLA 텐션 스트랩: 외부화된 구동 요소

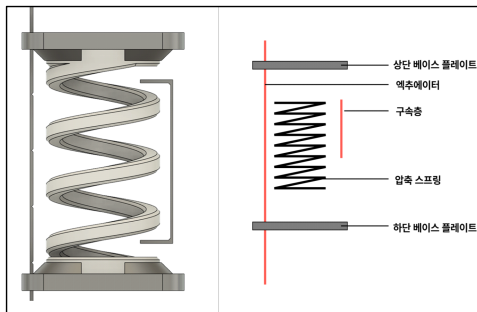
구동 요소는 사례에 따라 케이블 또는 공압으로 달라지므로, 모듈 자체에는 내장하지 않고 외부 인터페이스만 제공한다. PLA로 출력된 스트랩이 베이스 플레이트의 한쪽 면을 따라 배치되어, 텐션 구동 시 외부에서 당기는 부재로 작동한다. 공압 구동의 경우 베이스 플레이트 사이의 공간이 챔버 역할을 하므로 스트랩 없이도 작동 가능하다.

[표 5] SRT 두 사례와 본 연구 모듈의 기능적 대응

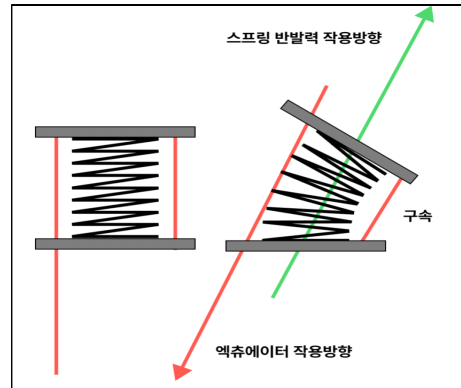
기능적 역할	SDM Finger	Soft Gripper	본 연구 모듈
변형층	연질실리콘	신축성 실리콘	PLA 헬리컬 스프링
구속층	경질 실리콘	비 신축성 작물	PLA 비신축성 스트립
베이스 구조	캐스팅 시 일체화	캐스팅 시 일체화	PLA 베이스 플레이트(상·하)
구동요소	케이블 (텐던구동)	주입된 공기 (공압구동)	PLA 스트랩 외부 인터페이스 (텐던·공압 모두 대응)

3-4-3. 모듈 작동 원리

단위 모듈은 한 쌍의 베이스 플레이트와 그 사이에 거치된 헬리컬 스프링, 그리고 한쪽 면을 따라 배치된 비신축성 스트립으로 구성된다. 외부에서 텐던 스트랩을 당기거나 베이스 플레이트 사이의 공간에 공기를 주입하여 스프링이 압축되면, 비신축성 스트립이 배치된 면은 길이를 유지하고 반대 면은 스프링의 복원에 따라 거리를 유지하므로, 모듈은 스트립이 배치된 방향으로 굽혀진다. 이는 SRT 두 사례에서 두 층의 비대칭 변형으로 굽힘이 발생하는 원리와 동일한 구조이다.



[그림 4] 모듈 모델링 및 구성요소



[그림 5] 모듈 작동 원리

4. 제작 및 결과

이 장에서는 3장에서 설계한 PLA 단일 출력 스프링 모듈을 실제로 제작하여 그 거동을 확인하고, 단위 모듈을 결합하여 소프트 그리퍼 프로토타입까지 완성하는 과정을 정리한다. 4-1에서는 단위 모듈의 재료·도구·설계·측정을 다루고, 4-2와 4-3에서는 모듈 조립과 그리퍼 제작 과정을, 4-4에서는 전체 구성 요소를 공유 가능한 형식으로 정리한 결과를 제시한다.

4-1. 단위 모듈 제작

4-1-1. 재료 및 도구

본 제작에 사용된 재료는 일반 보급형 PLA 필라멘트 한 종류이다. 시중에서 가장 광범위하게 유통되는 표준 PLA를 사용하였으며, 색상이나 브랜드의 특이성에 따른 영향을 배제하기 위해 일반 화이트 PLA를 선택하였다. 출력 장비로는 bambu의 보급형 데스크톱 P1S FDM 3D 프린터를 사용하였으며, 노즐 직경 0.4mm, 베드 크기 약 256×256mm의 일반적인 사양을 갖춘 모델이다. 모듈 간 결합과 베이스 허브 고정에는 일반 시판 본드를 사용하였다.

별도의 후처리 장비(진공 챔버, 오븐, 자외선 경화기 등)는 일절 요구되지 않으며, 필라멘트 외에 추가 재료나 기성품 부품도 사용하지 않는다. 도구는 3D 프린터 한 대와 본드 하나이며, 이는 일반 메이커스페이스나 디자이너의 작업실에서 흔히 갖추어진 환경에 해당한다.

[표 6] 단위 모듈 제작 환경

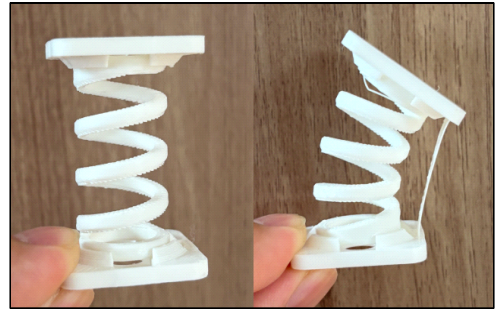
항목	내용
사용 재료	Bambu Basic PLA 화이트 1종 + 일반 시판 본드
사용 장비	Bambu P1S FDM 3D 프린터 1대 (노즐 0.4mm)
제작 단위	하나의 STL 파일 묶음
출력 시간	단위 모듈 1개당 약 33분
후처리 시간	없음 (즉시 조립 가능)
거동 확인	텐던 인장 시 구속층 방향으로 굽힘, 해제 시 탄성 복원
설계 검증	3장 기능적 대응 관계가 실제 제작물에서 성립

4-1-2. 단위 모듈 설계

단위 모듈은 하나의 STL 파일 묶음으로 설계되었으며, 다음 네 부분으로 이루어진다. 첫째, 헬리컬 코일 형태의 PLA 스프링이다. 외경 약 21mm, 자유장은 원하는 모듈 크기에 따라 자유롭게 정의 가능하도록 설정하였고, 코일 간격과 와이어 두께는 PLA의 탄성 거동을 확보할 수 있는 최소 조건에 따라 설정하였다. 둘째, 비신축성 스트립 형태의 PLA 구속층으로, 모듈의 한쪽 면을 따라 배치되어 굽힘 방향을 결정한다. 셋째, 단단한 판 형태의 PLA 베이스 플레이트로, 스프링의 양 끝을 거치하고 모듈 간 결합의 안정성을 확보한다. 넷째, 거동 및 액추에이터를 담당하는 스트랩으로, 추가 설계에 맞춰 액추에이터에 연결하여 구동을 담당한다.

네 부분은 모두 같은 STL 파일 묶음에 포함되어 있어, 사용자는 슬라이서 소프트웨어에서 한 번에 출력 배치를 잡아 인쇄할 수 있다. 출력 시간은 단위 모듈 하나 기준 약 33분이며, 인쇄 후 별도의 경화나 후처리 없이 즉시 조립이 가능하였다. 베이스 플레이트의 끼움 구조와 글루건으로 네 부분을 결합하면 단위 모듈이 완성되며, 외부에서 압축하면 헬리컬 스프링이 압축되어 구속층이 배치된 방향으로 굽혀지는 거동을 확인하였다.

이후 디자이너가 모델링 단계에서 변수를 조정할 수 있도록 디자이너가 가장 직관적으로 조작할 수 있는 두 가지 형상 변수인 스프링 자유장과 구속층 길이를 변수화하여 추후에 모듈의 형상 변수를 STL 파일에 인코딩하는데 사용할 수 있도록 굽힘각에 미치는 영향을 정량적으로 측정했다.



[그림 6] 최소 단위 모듈 제작 및 구동확인

4-1-3. 형상변수에 따른 굽힘각 측정

디자이너가 모델링 단계에서 변수를 조정할 수 있도록 STL 파일을 출력하기만 하면 원하는 거동을 얻을 수 있도록, 가장 직관적으로 조작 가능한 두 가지 형상 변수(스프링 자유장과 구속층 길이)가 굽힘각에 미치는 영향을 정량적으로 측정하였다.

측정 방법은 다음과 같이 설정했다. 스프링 자유장을 4cm부터 8cm까지 1cm 간격으로, 구속층 길이를 1cm부터 7cm까지 1cm 간격으로 변화시켜 조합별 단위 모듈을 출력·조립하였다. 각 모듈에 대해 텐던 스트랩을 모듈이 최대로 굽혀질 때까지 당긴 상태에서 측면 사진을 촬영하고, 베이스 플레이트 두 면이 이루는 각을 각도 측정 도구로 계속하였다. 구속층 길이가 스프링 자유장과 같거나 더 긴 조합은 구속층이 늘어진 상태로 배치되어 정상적인 굽힘 거동이 성립하지 않으므로 측정 대상에서 제외하였으며, 표에서는 "-"로 표기하였다.

[표 7] 자유장 × 구속층 길이 조건별 굽힘각 (단위: °)

스프링 구속층	4cm	5cm	6cm	7cm	8cm
1cm	87	-	-	-	-
2cm	64	85	-	-	-
3cm	38	63	84	-	-
4cm	-	38	63	81	-
5cm	-	-	35	62	81
6cm	-	-	-	33	61
7cm	-	-	-	-	30

결과를 해석하면 다음과 같다. 굽힘각은 자유장 대비 구속층 길이의 비율에 따라 체계적으로 변화하였다. 자유장과 구속층 길이가 거의 동일할수록 굽힘각이 작

아지는 경향(예: 4cm/3cm 조합 38°, 5cm/4cm 조합 38°)을 보였으며, 두 변수의 차이가 커질수록 굽힘각이 크게 증가하였다(예: 4cm/1cm 조합 87°, 5cm/2cm 조합 85°). 동일한 비율의 조합은 자유장 크기와 무관하게 유사한 굽힘각을 나타내어, 디자이너가 모듈의 절대 크기와 굽힘 정도를 어느 정도 분리하여 조절할 수 있는 여지가 있음을 시사한다. 측정된 굽힘각은 약 30°에서 87°의 범위에서 분포하였다.

4-2. 모듈 직렬 조립 및 거동 확인

설계된 단위 모듈을 출력하여 실제로 조립을 진행하였다. 단위 모듈을 두 개 직렬로 결합하여 손가락 한 마디를 구성하였고, 이 상태에서 외부 스트랩을 당기는 것만으로 손가락이 굽혀지는 거동이 발생함을 관찰하였다. 스트랩에서 손을 떼면 PLA 헬리컬 스프링의 탄성에 의해 원래 형태로 복원되었다. 이는 3장에서 설계한 PLA 단일 출력 구조가 굽힘 원리의 세 요소를 형상만으로 구성하는 방식이 실제 거동으로 이어질 수 있음을 보여준다.



[그림 7] 모듈 직렬 조립 모습

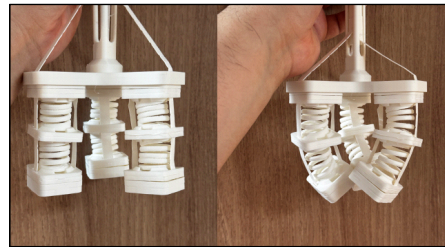
4-3. 소프트 그리퍼 제작

설계된 단위 모듈을 결합하여 소프트 그리퍼 프로토타입을 추가로 제작하였다. 모듈의 치수를 기반으로 하여, 3D 프린터만을 활용해 제작하는 전체 프로세스에 맞추어, 베이스 허브 역시 PLA로 출력하였다. 단위 모듈 4cm, 구속층 3cm를 직렬로 연결시킨 손가락을 세 개를 사용하도록 PLA 베이스 허브에 120° 간격으로 부착하여 세 손가락 그리퍼를 조립하였다.

각 손가락에는 끝부터 베이스 허브까지 이어지는 스트랩이 배치되어 있으며, 사용자가 베이스 허브 쪽에서 세 스트랩을 동시에 당기면 세 손가락이 동시에 안쪽으로 굽혀지며 물체를 감싼다. 스트랩을 놓으면 PLA

스프링의 탄성에 의해 원래 펴진 상태로 복원된다. 이로써 본 연구의 PLA 단일 출력 모듈이 형상 데이터의 조합만으로 소프트 그리퍼 프로토타입의 형태로 조합 가능함을 제작을 통해 확인하였다.

전체 그리퍼는 모듈 출력 → 베이스 허브 출력 → 스트랩 출력 → 조립의 단계를 거쳐 완성되며, 모든 STL 파일은 하나의 묶음으로 공유 가능하다. 이는 디자이너가 STL 파일을 받아 자신의 보급형 3D 프린터로 출력하여 의도한 형태로 조립해 보는 방식으로 소프트 로봇 프로토타입을 제작해 볼 수 있는 하나의 경로를 보여준다.



[그림 8] 소프트 그리퍼 제작 및 구동확인

4-4. 공유 가능한 형식으로서의 정리

제작검증된 단위 모듈, 베이스 허브, 스트랩 등 전체 구성 요소를 단일 STL 파일 묶음으로 정리하였다. 모든 파일은 보급형 FDM 3D 프린터에서 별도의 서포트 설계 없이 출력 가능한 형태로 배치되었으며, 디자이너가 슬라이서 소프트웨어에서 한 번에 인쇄 배치를 잡을 수 있도록 구성하였다.

본 묶음은 향후 Thingiverse, MakerWorld 등 3D 프린팅 공유 플랫폼에서 다루어질 수 있는 형식적 조건—즉 모든 결과 결정 변수가 형상 파일 내부에 인코딩되어 있다는 조건—을 갖추도록 설계되었다. 실제 플랫폼 게시 및 디자이너 사용자에게 의한 재현 사례 분석은 본 연구의 범위를 벗어나며, 후속 연구의 과제로 둔다.

5. 결론

5-1. 연구 의의

본 연구는 소프트 로보틱스가 디지털 제작 시대의 공유 문화 안에서 자리를 잡기 어려운 이유는 무엇이

며, 디자이너가 이 영역에 접근할 수 있는 한 가지 방법은 무엇인가를 확인하기 위해 PLA 단일 재료로 모든 구성 요소를 출력하는 스프링 모듈 방식을 살펴보았다. 이 방식이 의미를 가지는 지점은 두 가지 차원에서 정리할 수 있다.

먼저, 공유 가능성의 차원이다. 소프트 로보틱스의 결과를 결정하는 변수가 실리콘의 종류, 진공 탈포 여부, 경화 시간 등 형상 파일에 인코딩되지 않는 다수의 공정 변수에 분산되어 있는 한, Thingiverse나 Maker World가 형성해 온 변수-파생 생태계가 작동하기 어렵다. 본 연구는 이 변수들을 STL 파일 내부에 인코딩 가능한 형상 요소들—헬리컬 스프링, 비신축성 스트립, 베이스 플레이트—로 치환함으로써, 소프트 로보틱스의 결과물이 단일 STL 파일 묶음을 공유하는 것만으로 거동 재현을 시도할 수 있는 형식적 조건을 갖춘 형태로 정리될 수 있다는 한 가지 사례를 제시하였다. 이는 그동안 실리콘 캐스팅 공정 변수에 묶여 있던 소프트 로보틱스 결과물을 변수-파생 가능한 디지털 공유 단위로 재구성해 본 시도로 위치한다.

다음으로, 비공학자 디자이너의 접근성 차원이다. 본 연구의 모듈은 보급형 3D 프린터 한 대, PLA 필라멘트, 본드만으로 누구나 출력-조립할 수 있으며, 진공 챔버나 오븐 같은 전용 장비를 일절 요구하지 않는다. 디자이너가 자신의 작업실에서 별도의 재료 공학적 지식 없이도 소프트 로보틱스 프로토타이핑을 시도해 볼 수 있는 진입 경로가 마련되는 셈이다. 그동안 연구실 환경에 머물러 있던 이 분야가 디자이너의 손에 닿을 수 있는 매체로 옮겨 올 수 있는 한 가지 가능성을 본 연구는 구체적인 제작물을 통해 보여주었다.

본 연구의 세 단계 작업—SRT 두 사례의 공통 구조 추상화, PLA 모듈 설계와 변수-거동 실험, 소프트 그리퍼 프로토타입 완성 및 공유 가능 형식으로서의 정리—은 이 두 차원의 의의를 뒷받침하는 구체적 근거에 해당한다. 특히 스프링 자유장과 구속층 길이라는 두 형상 변수에 따른 굽힘각 변화(약 30°에서 87° 범위) 데이터는 디자이너가 STL 파일 수준에서 거동을 조정할 수 있는 변수-형태 매핑의 초기 자료로서 의의를 가진다.

5-2. 연구한계 및 향후 과제

본 연구는 프로젝트성 탐색의 성격을 띠며, 그 범위와 검증의 깊이에서 다음과 같은 한계를 함께 지닌다.

첫째, 본 연구가 제시한 '형상 파일 공유만으로 거동

을 재현할 수 있는 형식적 조건'은 아직 실증적으로 검증되지 않았다. 본 연구는 결과를 좌우하던 공정 변수를 형상 데이터 내부로 옮긴다는 구조적 조건을 하나의 사례로 보였을 뿐, 동일 STL을 반복 출력했을 때 거동이 실제로 얼마나 일관되게 재현되는지(출력 간 굽힘각의 편차와 오차 범위 등)는 측정하지 않았다. 측정 또한 단일 연구자에 의한 단발성 실험으로 이루어져 통계적 검증을 거치지 않았다. 나아가 프린터 기종·필라멘트 브랜드·출력 배치에 따른 차이, 그리고 디자이너가 실제 활용 시 중요하게 고려할 반응 강도·파지력, 반복 구동에 따른 내구성과 수명 등의 거동 지표 역시 측정 대상에서 제외되었다. 본 연구의 '비교적 일관된 거동'이라는 명제가 진정한 의미에서 성립하기 위해서는, 동일 조건의 반복 출력-계측을 통한 편차 정량화, 다기준·다배치 비교, 내구성·파지력·반복 구동 수명 등 거동 지표의 확장이 후속 연구에서 수행되어야 한다.

둘째, 구동 방식의 범위가 좁다. 본 연구의 모듈은 3-4에서 밝힌 바와 같이 텐던 구동과 공압 구동 모두에 대응 가능하도록 외부 인터페이스만을 제공하는 방식으로 설계되었으나, 실제 제작 및 거동 검증은 외부 스트랩을 당기는 텐던 구동에 한정되었다. 공압 구동이나 SMA 구동 등 다른 구동 방식에 대한 실제 작동 검증은 본 연구의 범위를 벗어난다. PLA 단일 출력 구조가 다양한 구동 방식과 어떻게 결합 가능한지를 모색하는 작업은 향후 연구에서 다루어져야 할 부분이다.

셋째, 공유 생태계 내 작동에 대한 실증이 부재하다. 본 연구는 전체 구성 요소를 단일 STL 파일 묶음으로 정리하여 디지털 공유 플랫폼에서 다루어질 수 있는 형식적 조건을 갖추는 단계까지를 다루었다. 그러나 이 묶음이 실제 공유 플랫폼에 게시된 이후 다른 디자이너에 의해 다운로드·출력·재현·변형되는 과정에 대한 실증은 본 연구의 범위에 포함되지 않았다. 본 연구가 "공유 가능한 디자인"이라는 명제를 진정한 의미에서 입증하기 위해서는, 실제 플랫폼 게시 후 일정 기간의 사용 데이터(다운로드 수, Remix 사례 등)를 분석하거나, 디자이너를 대상으로 한 워크숍과 STL 파일 배포 후 재현 실험을 통해 도구로서의 실효성을 확인하는 후속 연구가 필요하다.

이러한 한계는 본 연구가 프로젝트성 탐색이라는 성격을 가지는 데서 비롯되는 것이며, 이를 분석해 후속 연구의 방향을 구체적으로 설정할 수 있도록 한다. 본 연구가 제안한 PLA 단일 출력 모듈과 그 작동 방식이, 디지털 제작 시대의 공유 문화 안에서 소프트 로보틱스를 다루는 비공학자 디자이너 관점의 후속 연구로

이어지는 작은 출발점이 되기를 기대한다.

참고문헌

1. Chris Anderson, 『Makers: The New Industrial Revolution』, Crown Business, 2012.
2. Chiwon Lee, Myungjoon Kim, Yoonjae Kim, Nhayoung Hong, 'Soft Robot Review', Springer, International Journal of Control, Automation and Systems, Vol.15, No.1, 2017.
3. Daniela Rus, Michael T. Tolley, 'Design, Fabrication and Control of Soft Robots', Springer Nature, Nature, Vol.521, No.7553, 2015.
4. François Schmitt, Olivier Piccin, Laurent Barbé, Bernard Bale, 'Soft Robots Manufacturing: A Review', Frontiers, Frontiers in Robotics and AI, Vol.5, 2018.
5. Getachew Ambaye, Enkhsaikhan Boldsaikhan, Krishna Krishnan, 'Soft Robot Design, Manufacturing, and Operation Challenges: A Review', MDPI, Journal of Manufacturing and Materials Processing, Vol.8, No.2, 2024.
6. www.softroboticstoolkit.com