ISSN 2508-2817 KiDRS Korea Institute of Design Research Society 통권 40호, 2026. Vol.11, No.3

AI 생성 이미지의 조작 변수 번역을 통한 다이얼형 탠저블 UI 물리화 프로세스 연구

기성 다이얼 조작부의 형태 및 치수 고정성 보완을 중심으로

A Study on the Physicalization Process of Dial-Type Tangible UI through Interaction-Variable Translation of AI-Generated Images

Addressing the Fixed Form and Dimensional Constraints of Commercial Dial Controls

주 저 자 : 이재호 (Lee, Jae Ho) 신한대학교 디자인예술대학 산업디자인학과 겸임교수
iconlava@gmail.com

https://doi.org/10.46248/kidrs.2026.3.19

접수일 2026. 07. 21. / 심사완료일 2026. 09. 09. / 게재확정일 2026. 09. 11. / 게재일 2026. 09. 30.

Abstract

This study addresses the limitation that commercial dial controls have fixed forms and dimensions, making it difficult to independently modify interaction variables such as dial diameter, height, grip pattern, button position, and finger-contact structure. To address this issue, this study proposes a physicalization process that interprets AI-generated images as interaction-related form cues, translates them into OpenSCAD-based parametric variables, and implements them through FDM 3D printing. Six design concepts were generated, and three representative models were selected: tactile-rhythm, finger-position-guidance, and action-integration types. The selected concepts were implemented as parametric OpenSCAD models, reviewed in Bambu Studio, and fabricated by FDM for a preliminary researcher-led review of physical operability. To supplement researcher-dependent evaluation, three experts in product/interaction design and digital prototyping conducted a complementary review, supporting the appropriateness of the Pin Grip Tower, Petal Dial, and Arc Bridge Dial. Within the exploratory scope of this study, AI image generation supported the exploration of form alternatives, while OpenSCAD converted visual features into editable interaction variables. FDM printing provided physical mock-ups for preliminary examination. The contribution of this study lies in proposing a design process that connects AI-generated form cues with editable parametric structures and physical prototypes.

Keyword

Tangible UI (탠저블 UI), Interaction-Variable Translation (조작 변수 번역), Parametric Design (파라메트릭 디자인), Generative AI (생성형 AI)

요약

본 연구는 AI 생성 이미지에 나타난 형태적 특징을 조작 경험과 관련된 단서로 해석하고, 이를 OpenSCAD 기반의 파라메트릭 변수로 전환한 뒤 FDM 3D 프린팅으로 물리화하는 프로세스를 제안한다. 연구 과정에서는 다이얼형 탠저블 UI 조작부의 주요 설계 변수를 정의하고, AI 이미지 생성을 통해 6개의 시안을 도출하였다. 이후 조작 경험의 차별성, 변수화 가능성, FDM 출력 가능성 및 사용자 조건 조정 가능성을 기준으로 촉각 리듬형, 손가락 위치 유도형, 행위 결합형의 세 가지 대표 모델을 선정하였다. 선정된 시안은 OpenSCAD 기반의 파라메트릭 모델로 구현하고 Bambu Studio에서 빌드 플레이트 배치, 출력 방향 및 슬라이싱 조건을 검토한 뒤 FDM 방식으로 출력하였다. 제작된 목업은 연구자가 직접 파지하고 조작하면서 그립 접촉성, 회전부의 물리적 조작 가능성 및 버튼 접근 동선을 예비적으로 검토하였다. 또한 시안 선정과 출력물 검토에서 발생할 수 있는 연구자 단독 판단의 주관성을 보완하기 위해 관련 분야 전문가 3인을 대상으로 독립적인 보완 검토를 실시하였다. 전문가 3인 모두 핀 그립 타워, 페탈 다이얼 및 아크 브리지 다이얼을 대표 모델로 동일하게 판단하여 연구자의 1차 선정 결과와 일치하였다.

프로세스 적용 결과, AI 이미지 생성은 기성 다이얼의 표준적 형상과 구분되는 형태 대안을 탐색하는 초기 발산 도구로 활용되었다. OpenSCAD 모델링은 이미지에서 추출한 형태 요소를 지름, 높이, 그립 수 및 버튼 위치와 같은 편집 가능한 변수로 구성할 수 있게 하였으며, FDM 출력은 이러한 변수 구조를 물리적 목업으로 확인하는 단계로 기능하였다. 본 연구는 AI 생성 이미지의 형태 단서를 파라메트릭 변수와 물리적 목업으로 연결하는 구조화된 디자인 프로세스를 제안하였다는 점에서 의의가 있다. 다만 본 연구의 결과는 사용자 집단을 대상으로 한 사용성 효과의 검증이 아니라, 제안한 프로세스의 적용 가능성을 탐색한 결과로 한정된다.

목차

1. 서론

1-1. 연구 배경 및 목적

1-2. 연구 범위 및 방법

2. 이론적 배경

2-1. 탠저블 UI와 사용자조건 조정형 조작 변수

2-2. 생성형 AI와 파라메트릭 프로토타이핑

3. 연구 프로세스 설계

3-1. 사용자 조건 조정형 조작 변수 정의

3-2. AI 이미지 생성과 시안 선정

3-3. OpenSCAD 기반 모델링 및 FDM 출력

4. 프로세스 적용 및 결과 분석

4-1. AI 생성 시안과 최종 모델 선정

4-2. 변수-형상 전환 및 슬라이싱 검토

4-3. FDM 출력 결과의 예비 조작 검토

5. 논의

5-1. 기성품 구매 방식과의 차별성

5-2. AI의 역할과 프로세스의 의의

5-3. 연구의 한계 및 후속 연구 방향

6. 결론

참고문헌

1. 서론

1-1. 연구 배경 및 목적

사용자 인터페이스는 화면 기반 그래픽 UI를 넘어 음성, 제스처, 촉각 및 물리적 조작을 포함하는 다양한 형태로 확장되고 있다. Ishii와 Ullmer는 디지털 정보를 일상적인 물리 객체와 결합하여 사용자가 직접 잡고 조작할 수 있도록 하는 'Tangible Bits'의 개념을 제안하였으며[1]. 이후 Ullmer와 Ishii는 물리적 표현, 디지털 정보 및 물리적 제어 사이의 관계를 설명하는 탠저블 UI의 개념적 틀을 제시하였다[2]. 이러한 관점에서 탠저블 UI는 사용자가 손으로 직접 만지고 움직이는 물리적 대상물을 통해 디지털 정보와 상호작용하도록 한다는 점에서 중요한 디자인 연구 대상이다.버튼, 슬라이더, 조이스틱, 다이얼과 같은 물리적 조작부는 사용자가 조작 방식을 직관적으로 이해하도록 하며, 화면만으로는 얻기 어려운 촉각적 피드백과 조작 안정감을 제공한다.

그중 다이얼형 조작부는 회전이라는 단순하고 명확한 신체 행위를 통해 연속적인 값을 조절할 수 있는 대표적인 물리적 UI이다. 다이얼은 조명 밝기, 음량, 온도, 속도, 확대·축소, 단계 조절 등 다양한 상황에서 활용되며, 사용자는 손가락으로 다이얼을 잡고 돌리는 행위를 통해 조절량을 직접 인식할 수 있다. 그러나 다이얼형 조작부의 사용 경험은 회전 기능만으로 설명하기 어렵다. 다이얼의 지름, 높이, 표면 패턴, 그립 간격, 버튼 배치 및 베이스 형태와 같은 물리적 변수는 사용자의 파지 방식, 손가락 접촉 및 버튼 접근 동선과 관련되며 주요 설계 요소로 볼 수 있다. 이러한 회전형 조작부의 구체적인 적용 맥락으로 카메라의 조그다이얼을 들 수 있다. 카메라 조그다이얼은 손가락 회전을 통해 촬영 설정값을 탐색하거나 조절하는 물리 조작부로, 다이얼의 지름, 높이, 표면 그립 및 손가락 접촉 위치와 같은 설계조건을 검토할 수 있는 대표 사례이다. 본 연구에서는 이를 대표 적용 맥락으로 상정하되, 특정 카메라 제품을 재현하거나 성능을 비교하는 것이 아니라 회전형 조작부에 공통적으로 적용할 수 있는 변수 번역 및 프로토타이핑 프로세스를 다룬다. 시중에는 다양한 다이얼, 노브 및 컨트롤러 제품이 존재하므로 기성품을 구매하여 사용성을 평가하는 방식도 가능하다. 그러나 기성품은 완성된 형태와 고정된 치수를 가지므로 연구자가 원하는 조작 변수를 독립적으로 조정하기 어렵다. 예를 들어 다이얼 지름만 45 mm에서 55 mm로 바꾸거나, 그립 홈의 개수만 12개에서 20개로

1) Ishii, H. & Ullmer, B., 'Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms', Proceedings of CHI '97, 1997, p.234.

2) Ullmer, B. & Ishii, H., 'Emerging Frameworks for Tangible User Interfaces', IBM Systems Journal, 39(3-4), 2000, p.915.

변경하거나, 버튼 위치만 손가락 동선에 맞추어 조정하는 실험은 기성품만으로 수행하기 어렵다. 또한 기성품 A와 B를 비교할 경우 크기, 재질, 무게, 내부 구조, 표면 마감, 버튼 감도 등이 동시에 달라져 조작감 차이의 원인을 특정 변수로 분리하기 어렵다.

따라서 본 연구는 완성된 기성품의 사용성을 비교하는 접근과 구별된다. 목적은 기성 다이얼을 대체할 완제품을 제작하는 것이 아니라, 기성품에서는 독립적으로 통제하기 어려운 물리적 조작 변수를 생성·수정하고 이를 목업으로 구현하여 검토하는 프로세스를 제안하는 데 있다. 특히 AI 생성 이미지를 최종 설계안으로 직접 사용하는 것이 아니라, 이미지의 촉각적·행위적 형태 단서를 추출하여 편집 가능한 설계 변수로 전환하는 과정에 주목한다. 본 연구에서 '조작 변수 번역'은 AI 생성 이미지의 시각적 요소를 촉각 및 동작 경험과 관련된 형태 단서로 해석하고, 이를 OpenSCAD에서 수정 가능한 수치 변수와 형상 규칙에 대응시키는 과정을 의미한다. '물리화'는 번역된 변수 구조를 3D 모델과 FDM 출력물로 구현하여 파지, 회전 및 버튼 접근과 같은 물리적 조작 가능성을 검토하는 단계이다. 따라서 연구 산출물은 특정 다이얼 완제품이 아니라 이미지의 형태 단서를 파라메트릭 모델과 물리적 목업으로 연결하는 반복 수정 가능한 디자인 프로세스이다.



[그림 1] 사용자 조건 조정형 다이얼 탠저블 UI 연구의 문제 구조

1-2. 연구 범위 및 방법

본 연구의 범위는 전자회로와 센서가 포함된 기능형 제품 개발이 아니라, 다이얼형 물리 조작부의 형태와 조작 변수를 검토하기 위한 프로토타입 제작 과정으로 한정한다. 따라서 본 연구에서 제작한 프로토타입은 디지털 신호를 입력하는 완성형 탠저블 UI가 아니라, 사용자가 손으로 파지한 상태에서 회전부의 조작 가능성, 표면 접촉 특성 및 버튼 위치까지의 접근 동선을 검토하기 위한 연구용 목업이다. 즉 본 연구는 전자적 상호작용이 구현되기 이전 단계에서 다이얼형 물리 조작부의 형태와 변수 구조를 탐색하는 데 초점을 둔다.

연구 방법은 다음과 같다. 첫째, 탠저블 UI, 다이얼형 물리 조작부, 생성형 AI, 3D 프린팅 및 파라메트릭 모델링과 관련된 선행연구를 검토한다. 둘째, 다이얼형 탠저블 UI 조작부의 주요 설계 변수를 정의한다. 셋째, AI 이미지 생성을 활용하여 6개의 조작부 시안을 도출한다. 넷째, 기존 다이얼과 구분되는 조작 경험 단서, OpenSCAD 변수화 가능성, FDM 출력 가능성 및 사용자 조건 조정 가능성을 기준으로 3개의 대표 모델을 선정한다. 다섯째, 선정된 시안을 OpenSCAD 기반의 파라메트릭 모델로 구현하고 STL 형식으로 변환한다. 여섯째, STL 모델을 Bambu Studio로 불러와 크기, 빌드 플레이트 배치, 출력 방향, 접지 상태 및 슬라이싱 조건을 검토한 뒤 PLA 소재로 FDM 출력한다. 일곱째, 제작된 목업을 연구자가 직접 파지하고 조작하면서 각 모델의 표면 접촉 특성, 회전부 조작 가능성 및 버튼 접근 동선을 예비적으로 검토한다. 여덟째, 시안 선정과 출력물 검토 과정에서 발생할 수 있는 연구자 단독 판단의 주관성을 보완하기 위해 관련 분야 전문가 3인을 대상으로 독립적인 보완 검토를 실시한다. 전문가에게는 6개 AI 시안의 대표 모델 선정 적절성과 선정된 3개 출력 목업의 형태적 조작 단서 및 변수-형상 대응 적합성을 검토하도록 하였다.

본 연구의 전체 흐름은 요구사항 및 조작 변수 정의, AI 콘셉트 생성, 시안 선정, OpenSCAD 모델링, Bambu Studio 기반 슬라이싱 검토, FDM 출력, 연구자에 의한 예비 조작 검토, 전문가 보완 검토 순서로 구성된다. 이 흐름에서 AI는 형태적 대안을 발산하고, OpenSCAD는 시각적 특징을 조작 변수로 변환하며, Bambu Studio는 출력 전 모델 배치와 적층 조건을 검토하는 역할을 담당한다. FDM 출력은 변환된 조작 변수를 실제 손 조작 조건에서 확인하는 물리화 단계로 기능한다.



[그림 2] 연구 절차 및 프로토타이핑 워크플로우

2. 이론적 배경

2-1. 탠저블 UI와 사용자 조건 조정형 조작 변수

탠저블 UI는 사용자가 물리적 대상물을 직접 조작하며 디지털 정보와 상호작용하도록 하는 인터페이스 개념으로, 손, 촉각 및 신체 움직임을 인터페이스 경험의 일부로 포함한다. 국내에서도 이준·황주선·최원석은 인터랙티브 디지털 스토리텔링과 물리 객체의 직접 조작을 결합한 StoryCube를 제안하여 탠저블 인터페이스의 적용 사례를 제시하였다[3].

다이얼형 조작부는 회전 조작을 기반으로 값의 증가와 감소, 단계 이동, 강도 조절 및 범위 탐색 등에 활용되는 대표적인 물리적 UI 요소이다. 다이얼형 조작부는 특히 연속적인 조절 상황에 적합하다. 그러나 다이얼형 조작부의 사용 경험은 회전 기능만으로 결정되지 않는다. 사용자가 어떤 손가락으로 다이얼을 파지하는지, 표면과 손가락 사이에 어떠한 접촉이 형성되는지, 회전 과정에서 반복적인 촉각 접촉이 나타나는지, 보조 버튼 위치까지 손을 얼마나 이동해야 하는지와 같은 물리적 조건도 함께 고려할 필요가 있다. 이와 관련하여 Øvergård et al.은 서로 다른 노브 크기와 토크 조건이 조작 수행에 미치는 영향을 실험적으로 비교하여, 회전형 조작부의 물리적 조건이 수행 특성과 관련될 수 있음을 보고하였다. 이는 다이얼 크기와 조작조건을 독립적인 설계변수로 다룰 필요성을 뒷받침한다[4].

본 연구에서 '사용자 조건 조정형 조작 변수'란 사용자의 신체 조건과 조작 목적에 따라 값을 변경할 수 있도록 파라메트릭화된 물리적 설계 요소를 의미한다. 이는 특정 사용자에게 최적화가 완료된 맞춤형 결과를 의미하는 것이 아니라, 손 크기, 파지 방식, 조작 습관 및 버튼 접근 동선과 같은 사용자 조건에 따라 치수를 조정할 수 있는 설계 구조를 뜻한다. 본 연구에서는 다이얼 지름, 다이얼 높이, 그립 수, 그립 깊이, 베이스 폭, 베이스 두께, 버튼 위치 및 버튼 크기를 주요 변수로 설정하였다. 이러한 요소는 기성품에서는 고정되어 있지만, 파라메트릭 모델링 환경에서는 연구 목적에 따라 독립적으로 변경할 수 있는 실험 변수로 구성할 수 있다. 이와 관련하여 3D 프린팅 제품의 형태구조와 패러메트릭 디자인 기법을 다룬 선행연구에서도 제품 형태를 조정 가능한 설계 구조의 관점에서 접근하고 있다[5].

기성품 기반 평가는 기존 제품의 사용성을 비교하는 데에는 유용하다. 그러나 사용자 조건 조정형 조작 변수 연구에서는 한계가 있다. 기성품은 이미 형태가 결정되어 있기 때문에 특정 변수만 분리하여 바꾸기 어렵다. 예를 들어 다이얼 지름이 큰 제품과 작은 제품을 비교한다고 해도, 실제로는 재질, 무게, 높이, 표면 질감, 회전 저항 등이 동시에 달라질 수 있다. 따라서 본 연구는 기성품 평가가 아니라, 변수를 통제하고 수정할 수 있는 물리화 프로세스를 제안하는 방향을 취한다.

2-2. 생성형 AI와 파라메트릭 프로토타이핑

생성형 AI는 텍스트 프롬프트를 기반으로 다양한 시각적 형태를 빠르게 생성할 수 있다[6]. 디자인 과정에서 AI 이미지 생성은 초기 아이디어 발산, 형태 탐색, 스타일 비교에 활용될 수 있다. 그러나 본 연구에서 AI

3) 이준·황주선·최원석, '스토리큐브: 인터렉티브 디지털 스토리텔링을 위한 탠저블 인터페이스에 관한 프레임 워크', 디지털디자인학연구, 6(2), 2006, p.431.

4) Øvergård, K. I., Fostervold, K. I., Bjelland, H. V. & Hoff, T., 'Knobology in Use: An Experimental Evaluation of Ergonomics Recommendations', Ergonomics, 50(5), 2007, p.694.

5) 김관배·정도성·장중식, '제품디자인의 형태구조가 사용자에게 미치는 영향에 관한 연구: 3D프린팅 제품 패러메트릭 디자인 기법을 중심으로', 산업디자인학연구, 10(1), 2016, p.9.

6) 이용혁·나건, '생성AI를 이용한 디자인 리서치 방법론 제안: 더블 다이아몬드 모델을 중심으로', 한국디자인리서치, 9(2), 2024, p.412.

의 역할은 단순히 새로운 이미지를 만드는 데 있지 않다. 본 연구에서 AI는 기성 다이얼 제품의 표준적 형태에서 벗어나 다양한 조작 가능성을 가진 형태 단서를 탐색하는 도구로 활용된다. 또한 선행연구에서는 3D 프린팅과 AI 기술을 결합한 제품 디자인 프로세스가 제안되는 등, AI 기반의 형태 탐색과 물리적 프로토타이핑을 연계하려는 접근이 이루어져 왔다[7].

AI가 생성한 이미지에는 수직 핀 구조, 꽃잎형 굴곡, 아치형 베이스, 버튼 결합 구조, 슬라이더 결합 구조와 같은 조형 요소가 나타날 수 있다. 이러한 요소는 단순한 장식으로만 볼 수도 있지만, 본 연구에서는 이를 조작 경험의 단서로 해석한다. 수직 핀 구조는 회전 과정에서의 반복적인 표면 접촉과 관련될 수 있고, 꽃잎형 굴곡은 손가락 접촉 위치의 구분과 관련될 수 있으며, 버튼 결합 구조는 회전부에서 보조 입력 위치까지 이어지는 접근 동선과 관련될 수 있다. 따라서 AI 이미지 생성은 최종 설계안을 자동으로 완성하는 과정이 아니라, 디자이너가 조작 경험과 관련된 형태적 단서를 발견하고 재해석하는 과정으로 이해되어야 한다[8].

본 연구에서 활용한 AI 산출물은 2D 이미지이므로 이를 직접 FDM 출력에 사용할 수 없으며, 출력 가능한 3D 데이터로 재구성하는 중간 단계가 필요하다. 3D 데이터의 후속 제조 활용과 관련한 선행연구에서도 메쉬의 개폐 상태, 법선 방향 및 다양체 구조 등의 데이터 유효성을 검증하고 있다[9]. 따라서 본 연구에서는 AI 생성 이미지를 직접 출력 결과로 사용하는 대신, OpenSCAD를 통해 이미지의 형태적 특징을 제작 가능한 수치형 3D 모델로 재구성하였다. OpenSCAD는 코드 기반 3D 모델링 도구로, 모델의 형태를 수치 변수와 명령어로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 OpenSCAD를 활용하여 AI 이미지에서 추출한 조형 요소를 편집 가능한 파라메트릭 변수로 전환한다. 예를 들어 핀 그립 구조는 grip_count와 grip_depth로, 다이얼 크기는 dial_d와 dial_h로, 버튼 구조는 button_d와 button_x, button_y로 정의할 수 있다.

FDM은 파라메트릭 3D 모델을 물리적 프로토타입으로 구현할 수 있는 적층 제작 방식 중 하나이다[10]. 본 연구에서는 PLA 소재를 활용하여 초기 형태와 물리적 조작 특성을 검토하였으며, FDM 출력을 최종 제품 생산이 아닌 조작 변수의 물리적 검토를 위한 반복 제작 수단으로 활용하였다. 이러한 반복 제작 중심의 활용은 3D프린팅이 제품디자인의 제작 환경과 디자인 연구 영역을 확장해 온 흐름과도 연결된다[11][12].

3. 연구 프로세스 설계

3-1. 사용자 조건 조정형 조작 변수 정의

본 연구에서 제안하는 프로세스는 기존 제품을 구매하여 평가하는 방식과 다르다. 기성품 평가가 이미 존재하는 제품의 사용성을 확인하는 방식이라면, 본 연구는 사용자 조건에 따라 값을 조정할 수 있는 조작 변수를 생성하고 물리적으로 검토하는 제작 기반 연구이다.

다이얼형 탠저블 UI 조작부의 설계 변수는 사용자가 다이얼을 파지하고 회전부와 버튼 위치에 접근하는 과정과 관련된 요소를 중심으로 정의하였다. 다이얼 지름은 사용자가 파지하는 회전부의 크기를 나타내며, 손의 크기와 회전 반경을 고려하기 위한 변수이다. 다이얼 높이는 베이스에서 회전부가 돌출된 정도를 나타내며, 손가락의 접촉 면적과 파지 방식에 따라 조정할 수 있다. 그립 수와 그립 깊이는 다이얼 외곽에 형성되는 반복 구조를 결정하며, 표면 접촉 간격과 촉각적 리듬을 조정하기 위한 변수로 설정하였다. 베이스 폭과 베이스 두께는 출력물의 접지 상태와 구조적 지지를 검토하기 위한 요소이며, 버튼 위치와 버튼 크기는 회전부 조작 이후 버튼 위치까지 이어지는 손가락 접근 동선을 구성하는 변수로 설정하였다.

7) 배은준·최웅, '3D 프린팅과 AI 기술 기반의 제품 디자인 프로세스 제안', 산업디자인학연구, 16(1), 2022, p.49.

8) 윤예찬·주대원, '제품디자인을 위한 이미지 생성형 AI 프롬프트 구성요소 사례 연구', 한국디자인리서치, 9(4), 2024, p.784.

9) 강혜림, 'AI 데이터 프롬프팅 기반 주얼리 3D 디자인 연구', 한국디자인리서치, 10(3), 2025, p.38.

10) 한정엽, '3D프린팅을 활용한 프로토타입 모델링 제작기법 연구', 상품문화디자인학연구, 34, 2013, p.97.

11) 장중식, '3D프린터 사용에 따른 디자인 환경 변화에 관한 연구', 산업디자인학연구, 10(1), 2016, p.27.

12) 김도엽, '3D프린팅디자인에 대한 다학제적 연구동향 분석', 한국과학예술융합학회, 40(4), 2022, p.33.



[그림 3] 핵심 설계 변수

3-2. AI 이미지 생성과 시안 선정

AI 이미지 생성 단계에서는 기성 다이얼의 표준적 형상과 구분되는 물리 조작부의 형태 대안을 탐색하는 것을 목표로 하였다. 이미지 생성에는 ChatGPT의 이미지 생성 기능을 사용하였으며, 생성은 2026년 6월에 수행하였다. 기본 프롬프트에는 '사용자 조건에 따라 조정 가능한 다이얼형 탠저블 UI 조작부', '촉각적 그립 구조', 'FDM 방식으로 구현 가능한 PLA 프로토타입', '회전 조작부와 보조 버튼의 결합' 및 '물리적 인터페이스'와 같은 조건을 포함하였다. 기본 프롬프트와 수정 프롬프트를 적용하여 총 6개의 이미지를 생성하였다. 생성된 6개 시안은 조작 경험 단서의 차별성, 변수화 가능성, FDM 출력 가능성 및 사용자 조건 조정 가능성을 기준으로 분석하였다.

분석 대상으로 선정한 6개 시안은 오비탈 다이얼, 핀 그립 타워, 페탈 다이얼, 아크 브리지 다이얼, 다이얼+슬라이더 및 클러스터 패널로 구성하였다. 각 시안은 서로 다른 형태적 조작 단서를 제시한다. 오비탈 다이얼은 중심 회전과 외곽 링 구조를, 핀 그립 타워는 반복 핀 구조를, 페탈 다이얼은 비원형 굴곡을, 아크 브리지 다이얼은 회전부와 보조 버튼의 결합을, 다이얼+슬라이더는 회전과 직선 조작의 결합을, 클러스터 패널은 다중 버튼과 중앙 조작부의 통합 구조를 특징으로 한다.

[표 1] 다이얼형 탠저블 UI의 조작 변수

조작 변수	의미	조작 경험과의 관련성	OpenSCAD 변수 예시
다이얼 지름	사용자가 잡는 회전부의 크기	손 크기, 회전 반경, 힘 전달	dial_d
다이얼 높이	베이스에서 다이얼이 돌출된 정도	손가락 접촉성, 잡기 안정성	dial_h
그립 수	다이얼 외곽 반복 구조의 개수	반복적 표면 접촉, 접촉 간격	grip_count
그립 깊이	홈 또는 핀의 깊이	표면 접촉성, 촉각적 구분	grip_depth
베이스 폭	조작부가 놓이는 바닥 구조	안정성, 설치 면적	base_w
베이스 두께	출력물의 구조적 두께	내구성, 출력 안정성	base_h
버튼 위치	보조 버튼이 놓이는 좌표	회전 후 버튼 접근 동선	button_x, button_y
버튼 크기	보조 버튼의 지름과 높이	버튼 접근성, 위치 인식성	button_d, button_h



[그림 4] 이미지 생성 결과 6개 시안

본 연구에서는 6개 시안을 대상으로 조작 경험의 차별성, OpenSCAD 변수화 가능성, FDM 출력 가능성 및 사용자 조건 조정 가능성을 정성적으로 검토하였다. 조작 경험의 차별성은 기존 원형 다이얼과 구분되는 형태적 조작 단서를 제시하는 정도를 의미하며, 변수화 가능성은 주요 형상 요소를 독립적인 수치 변수로 전환할 수 있는 정도를 의미한다. FDM 출력 가능성은 본 연구에서 설정한 출력 조건으로 별도의 대규모 구조 변경 없이 제작할 수 있는 정도를 뜻하며, 사용자 조건 조정 가능성은 손 크기, 파지 방식 및 버튼 접근 동선에 따라 치수를 조정할 수 있는 정도를 의미한다. 각 기준은 연구자가 1차적으로 정성 검토하였으며, 후속 모델링 대상을 선정하기 위한 탐색적 판단으로 활용하였다. 이후 연구자 단독 판단의 주관성을 보완하기 위해 관련 분야 전문가 3인을 대상으로 독립

적인 보완 검토를 실시하였다. 전문가 보완 검토에서도 연구자의 1차 검토와 동일한 네 가지 기준인 조작 경험의 차별성, OpenSCAD 변수화 가능성, FDM 출력 가능성 및 사용자 조건 조정 가능성을 제시하고, 6개 시안의 대표 모델 선정 적합성을 독립적으로 판단하도록 하였다. 그 결과 전문가 3인 모두 핀 그립 타워, 페탈 다이얼 및 아크 브리지 다이얼을 대표 모델로 선정하여 연구자의 1차 선정 결과와 동일하게 나타났다.

연구자 1차 검토와 전문가 보완 검토 결과는 [표 2]와 같다. 전문가 구성은 E1(제품·산업디자인, 경력 11년), E2(UX·인터랙션디자인, 경력 9년), E3(디지털 프로토타이핑/3D 프린팅, 경력 12년)으로 구성하였으며, 개인정보와 소속은 익명 처리하였다.

선정된 세 모델은 각각 다음과 같은 조작 경험을 의도한 연구용 유형으로 재정의하였다.

[표 2] AI 이미지 생성 시안의 연구자 1차 검토 및 전문가 보완 검토 결과

연구자 1차 검토						
안	유형	조작 경험 차별성	변수화 가능성	FDM 출력 가능성	사용자 조건 조정 가능성	선정 여부
A	오비탈 다이얼	중간	중간	높음	중간	제외
B	핀 그립 타워	높음	높음	높음	높음	선정
C	페탈 다이얼	높음	높음	높음	높음	선정
D	아크 브리지 다이얼	높음	높음	높음	높음	선정
E	다이얼+슬라이더	높음	중간	중간	중간	제외
F	클러스터 패널	높음	중간	중간	중간	제외
전문가 보완 검토						
안	유형	연구자 1차 선정	전문가1	전문가2	전문가3	최종선정
A	오비탈 다이얼	제외	제외	제외	제외	제외
B	핀 그립 타워	선정	선정	선정	선정	선정
C	페탈 다이얼	선정	선정	선정	선정	선정
D	아크 브리지 다이얼	선정	선정	선정	선정	선정
E	다이얼+슬라이더	제외	제외	제외	제외	제외
F	클러스터 패널	제외	제외	제외	제외	제외

연구자의 1차 검토에서는 핀 그립 타워, 페탈 다이얼 및 아크 브리지 다이얼이 대표 모델로 선정되었다. 이후 실시한 전문가 3인의 독립적 보완 검토에서도 세 전문가 모두 동일한 세 모델을 대표 모델로 선정하여 연구자의 1차 결과와 일치하였다. 이에 핀 그립 타워, 페탈 다이얼 및 아크 브리지 다이얼을 OpenSCAD 기반 파라메트릭 모델링 및 FDM 출력 대상으로 최종 확정하였다. 반면 오비탈 다이얼은 FDM 출력 가능성은 높았으나 기존 원형 다이얼과의 조작 경험 차별성과 사용자 조건 조정 가능성이 상대적으로 제한적이었다. 다이얼+슬라이더와 클러스터 패널은 조작 경험의 차별성은 높았으나, 복수의 조작부를 결합하는 과정에서 변수 구조와 출력 구성이 복잡해지고 본 연구의 범위를 복합 제어기로 확대할 가능성이 있어 제외하였다.

[표 3] 최종 선정 3개 모델의 조작 경험 유형

모델명	연구용 유형명	핵심 조작 경험	주요 변수
핀 그립 타워	촉각 리듬형 다이얼	반복 핀 구조를 통해 회전 과정에서 반복적인 표면 접촉을 형성	그립 수, 그립 깊이, 다이얼 높이
페탈 다이얼	손가락 위치 유도형 다이얼	꽃잎형 굴곡을 통해 구분된 손가락 접촉 지점을 형성	페탈 수, 페탈 깊이, 다이얼 지름
아크 브리지 다이얼	행위 결합형 다이얼	회전부와 보조 버튼의 위치 관계를 하나의 접근 동선으로 구성	버튼 위치, 버튼 크기, 다이얼-버튼 간격



[그림 5] 최종 선정 3개 AI 생성 시안

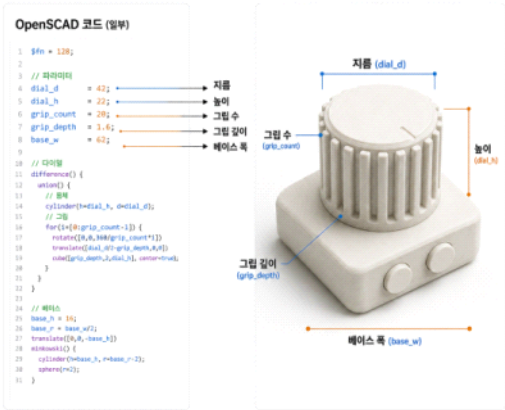
3-3. OpenSCAD 기반 모델링 및 FDM 출력

AI 이미지에서 추출한 형태 요소는 OpenSCAD의 파라메트릭 변수 구조로 전환하였다. 핀 그립 타워는 다이얼 지름, 다이얼 높이, 핀 수, 핀 깊이, 베이스 폭 및 베이스 두께를 주요 변수로 설정하였다. 페탈 다이얼은 페탈 수, 페탈 깊이 및 다이얼 지름을 주요 변수로 설정하였으며, 아크 브리지 다이얼은 중앙 다이얼 지름, 버튼 지름, 버튼 위치 및 다이얼과 버튼 사이의 간격을 주요 변수로 설정하였다. 각 변수는 치수값 또는 반복 구조의 개수로 정의하였으며, 모델별 주요 변수와 기본 설정값은 [표 4]와 같다.

[표 4] 대표 모델별 OpenSCAD 주요 변수와 설계 적용값

모델명	변수명	의미	기본값	단위
핀 그립 타워	dial_d	다이얼 지름	42	mm
핀 그립 타워	dial_h	다이얼 높이	22	mm
핀 그립 타워	grip_count	외곽 핀의 개수	20	개
핀 그립 타워	grip_depth	핀의 돌출 깊이	1.6	mm
핀 그립 타워	base_w	베이스 폭	62	mm
핀 그립 타워	base_h	베이스 두께	16	mm
페탈 다이얼	dial_d	다이얼 지름	46	mm
페탈 다이얼	petal_count	페탈의 개수	8	개
페탈 다이얼	petal_depth	페탈 굴곡의 깊이	4	mm
아크 브리지 다이얼	dial_d	중앙 다이얼 지름	36	mm
아크 브리지 다이얼	button_d	버튼 지름	14	mm
아크 브리지 다이얼	button_x	버튼 중심의 가로 위치	±26	mm
아크 브리지 다이얼	button_y	버튼 중심의 세로 위치	0	mm
아크 브리지 다이얼	button_gap	다이얼과 버튼 사이의 간격	8	mm

이 과정에서 AI 이미지의 형상을 그대로 복제하지는 않았다. AI 이미지는 조작 경험과 관련된 형태 단서를 제공하고, OpenSCAD 모델링은 이를 제작과 반복 수정이 가능한 수치 구조로 전환하는 역할을 한다. 예를 들어 핀의 개수와 깊이, 페탈의 수와 굴곡 깊이, 버튼의 위치와 간격은 각각 독립적인 변수로 정의되어 서로 다른 형상 조건의 모델을 생성할 수 있다. 따라서 본 연구에서 OpenSCAD는 단순한 3D 모델링 도구가 아니라, 시각적 콘셉트를 편집 가능한 조작 변수로 전환하는 중간 매개로 기능한다.

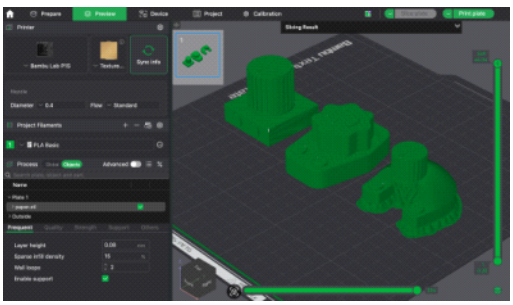


[그림 6] 핀 그립 타워의 OpenSCAD 파라메트릭 코드와 변수-형상 매핑

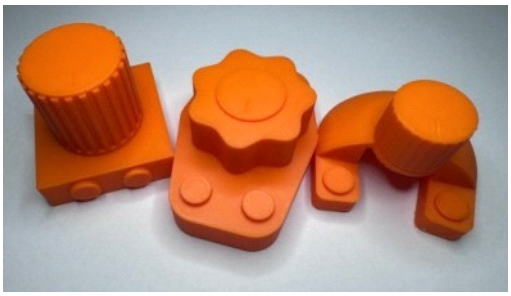
OpenSCAD에서 생성된 모델은 STL 파일로 내보낸 뒤 Bambu Studio로 불러와 빌드 플레이트에 배치하였다. 이 과정에서 모델의 크기, 출력 방향, 베이스 접지 상태, 적층 경로와 서포트 필요 여부를 검토하였다. 출력 방식은 FDM, 소재는 PLA로 설정하였으며, 레이어 높이, 내부 채움률과 서포트 등의 세부 조건은 Bambu Studio에서 지정하였다. 본 연구에서 FDM 출력은 최종 제품 제작이 아니라, 조작 변수를 실제 손 조작 조건에서 확인하기 위한 연구용 제작 단계이다.

[표 5] Bambu Studio 기반 FDM 출력 조건

항목	설정값	설정 이유
소프트웨어	Bambu Studio	뱀부랩 장비와 출력 조건 연계
출력 방식	FDM	반복 제작과 저비용 검토에 적합
소재	PLA	출력 안정성이 높고 형태 확인에 적합
레이어 높이	0.08 mm	반복 핀과 곡면의 세부 형상을 확인하기 위한 적층 해상도 확보
노즐 직경	0.2 mm	얇은 핀 구조와 세부 곡면을 표현하기 위해 적용
내부 채움률	15%	조작 검토용 기본 강도 확보
출력 방향	베이스 하단을 빌드 플레이트에 배치	서포트 최소화 및 안정성 확보
서포트	필요한 구조에 한해 적용	출력 시간 단축
검토 목적	표면 접촉 특성, 회전부 조작 가능성, 버튼 접근 동선	사용성 검증이 아닌 물리적 목업의 예비 검토
프린터	Bambu Lab P1S	세 모델의 동일 조건 출력



[그림 7] Bambu Studio를 활용한 STL 모델 및 슬라이싱 검토



[그림 8] FDM 출력 프로토타입

4. 프로세스 적용 및 결과 분석

4-1. AI 생성 시안과 최종 모델 선정

AI 이미지 생성 결과, 기존 다이얼 제품과 유사한 단순 원형 노브뿐 아니라, 조작 경험을 다르게 해석할 수 있는 다양한 형태가 도출되었다. 본 연구에서 중요한 것은 AI가 새로운 완제품을 자동으로 제안했다는 점이 아니다. 중요한 것은 AI가 디자이너에게 다양한 조형적 가능성을 제시하고, 그중에서 조작 변수로 전환 가능한 형태 단서를 발견할 수 있게 했다는 점이다.

오비탈 다이얼은 중심 다이얼과 외곽 링 구조를 통해 손가락 접촉면을 넓히는 가능성을 보여주었다. 그러나 표준 원형 다이얼과의 차별성이 상대적으로 약해 최종 모델에서는 제외하였다. 다이얼+슬라이더와 클러스터 패널은 기능 확장 가능성이 높지만, 본 연구의 범위를 넘어서는 복합 제어기 형태로 확장될 위험이 있어 제외하였다. 반면 핀 그립 타워, 페탈 다이얼 및 아크 브리지 다이얼은 각각 촉각 리듬, 손가락 위치 유도 및 행위 결합이라는 서로 다른 조작 경험 유형을 의도한 형태로 해석할 수 있었으며, OpenSCAD 변수화와 FDM 출력 가능성도 높게 판단되어 연구자의 1차 대표 모델로 선정하였다. 이후 실시한 전문가 3인의 독립적 보완 검토에서도 동일한 세 모델이 대표 모델로 선정되어 연구자의 1차 판단과 일치하였다.

핀 그립 타워는 반복적인 수직 핀을 통해 회전 과정에서 손가락과 표면 사이에 일정한 간격의 접촉이 형성되도록 설계한 모델이다. 핀의 수와 깊이를 변경하면 접촉 간격과 돌출 정도가 달라지므로, 반복적인 표면 접촉의 차이를 검토하기 위한 기준형으로 활용할 수 있다. 다만 본 연구에서는 실제 사용자가 느끼는 촉각 효과나 선호도를 측정하지 않았으므로, 이를 촉각 리듬을 의도한 형태로 한정하여 해석하였다.

페탈 다이얼은 반복적인 꽃잎형 굴곡을 통해 원형 외곽에 구분된 손가락 접촉 지점을 형성하도록 설계한 모델이다. 기존의 균질한 원형 외곽과 달리, 페탈의 굴곡을 통해 여러 접촉 지점을 형태적으로 구분할 수 있다. 또한 페탈 수와 페탈 깊이를 변수화함으로써 접촉 지점의 수와 굴곡 정도가 서로 다른 파생 모델을 제작할 수 있다. 다만 이러한 형태가 실제 사용자의 손가락 위치 안정성이나 조작 편의성을 향상하는지는 본 연구에서 검증하지 않았으며, 후속 사용자 평가를 통해 확인할 필요가 있다.

아크 브리지 다이얼은 중앙 회전부와 양측 보조 버튼을 가까운 위치에 배치하여 회전부에서 버튼 위치까지 이어지는 접근 동선을 형상화한 모델이다. 버튼의 위치, 크기 및 중앙 회전부와의 간격을 변수화함으로써 서로 다른 손 크기와 접근 조건에 대응하는 배치 대안을 생성할 수 있다. 본 연구에서는 버튼 입력에 따른 실제 기능이나 모드 전환을 구현하지 않았으므로, 이 모델은 회전부와 보조 입력 위치 사이의 공간적 관계 및 손가락 접근 동선을 검토하기 위한 기준형으로 한정하여 해석하였다.

[표 6] 최종 선정 모델별 설계 의미

모델	연구용 유형	설계 의미	기성품과의 차별성
핀 그립 타워	촉각 리듬형	반복 핀 구조를 통해 회전 과정에서 반복적인 표면 접촉을 형성	핀 수와 깊이를 변수화하여 접촉 간격과 돌출 정도 조정 가능
페탈 다이얼	손가락 위치 유도형	꽃잎형 굴곡을 통해 구분된 손가락 접촉 지점을 형성	페탈 수와 페탈 깊이를 사용자 조건에 따라 조정 가능
아크 브리지 다이얼	행위 결합형	회전부와 보조 버튼의 위치 관계를 하나의 접근 동선으로 구성	다이얼-버튼 거리와 위치를 손 동선에 맞게 조정 가능

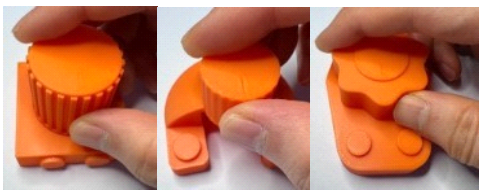
4-2. 변수-형상 전환 및 Bambu Studio 슬라이싱 검토

OpenSCAD 모델링 단계에서는 AI 이미지 속 조형 특징을 수치 변수로 전환하였다. 예를 들어 핀 그립 타워의 수직 핀은 grip_count와 grip_depth로 정의되었다. 이는 핀의 개수와 깊이를 변경하여 반복적인 표면 접촉의 간격과 돌출 정도를 조정할 수 있게 한다. 페탈 다이얼의 꽃잎형 외곽은 petal_count와 petal_depth로 설정할 수 있으며, 아크 브리지 다이얼의 버튼 위치는 button_x, button_y와 같은 좌표 변수로 정의할 수 있다. 이러한 변수화는 기성품 기반 실험과 본 연구의 중요한 차이를 만든다. 기성품에서는 다이얼 지름과 버튼 위치를 원하는 방식으로 바꿀 수 없지만, OpenSCAD 모델에서는 특정 변수만 수정해 여러 버전을 생성할 수 있다. 따라서 본 연구의 프로토타입은 단순히 3개의 형태가 아니라, 여러 사용자 조건에 따라 파생 가능한 모델군의 기준형으로 볼 수 있다.

OpenSCAD에서 생성한 세 모델은 STL 형식으로 내보낸 후 Bambu Studio에 불러와 슬라이싱 조건을 검토하였다. 이 단계에서는 모델의 크기, 출력 방향, 빌드 플레이트 접지 상태, 적층 경로와 서포트 필요 여부를 확인하였다. 촉각 리듬형 다이얼은 외곽 핀의 두께와 간격이 설정된 노즐 조건에서 안정적으로 출력되는지 검토하였고, 손가락 위치 유도형 다이얼은 꽃잎형 굴곡에서 과도한 돌출부가 발생하지 않는지 확인하였다. 행위 결합형 다이얼은 U자형 베이스의 접지 상태와 중앙 다이얼 및 보조 버튼 주변의 출력 공간을 검토하였다.

4-3. FDM 출력 결과의 예비 조작 검토

Bambu Studio에서 설정한 슬라이싱 조건을 적용하여 세 모델을 FDM 방식으로 출력하였다. 제작된 목업은 연구자가 직접 파지하고 회전부와 버튼 위치에 접근하면서 각 형상이 의도한 물리적 조작 특성이 구현되었는지를 예비적으로 확인하는 데 활용하였다. 검토 항목은 반복 구조와 손가락 사이의 접촉, 회전부의 물리적 조작 가능성, 손가락 접촉 지점 및 회전부에서 버튼 위치까지의 접근 동선으로 설정하였다. 이 과정에서는 과업 수행 시간, 오류율, 만족도 또는 선호도와 같은 정량적 사용성 지표를 측정하지 않았으므로, 결과는 사용자 효과의 검증이 아닌 연구자 중심의 탐색적 검토로 해석하였다.



[그림 9] 연구자에 의한 출력물의 예비 조작 검토

핀 그립 타워에서는 반복 핀 구조가 손가락과 접촉하는 형태와 핀 사이의 간격을 확인하였다. 페탈 다이얼에서는 꽃잎형 굴곡에 따라 손가락이 접촉할 수 있는 지점이 구분되는지를 확인하였다. 아크 브리지 다이얼에서는 중앙 회전부와 양측 버튼 위치 사이의 공간적 관계 및 손가락 접근 동선을 확인하였다. 이러한 검토를 통해 세 모델이 서로 다른 형태적 조작 단서를 물리적 목업으로 구현하고 있음을 확인하였으나, 해당 형태가 실제 사용성과 선호도를 향상하는지는 본 연구의 결과만으로 판단할 수 없다. 연구자 중심의 예비 검토에서 발생할 수 있는 판단 편향을 보완하기 위해 동일한 전문가 3인을 대상으로 출력 목업에 대한 보완 검토를 실시하였다. 전문가는 핀 그립 타워, 페탈 다이얼 및 아크 브리지 다이얼의 형태적 조작 단서, 주요 파라메트릭 변수와 실제 형상의 대응성, 연구용 목업으로서의 적합성을 검토하였다. 전문가 3인의 검토에서도 세 모델 모두 연구자가 의도한 형태적 조작 단서와 주요 변수의 대응이 적절한 것으로 판단되었다. 다만 이러한 전문가 검토는 실제 사용자의 수행 성능이나 선호도를 검증하는 사용성 평가가 아니라, 제안된 프로세스를 통해 의도된 형태 단서가 물리적 목업으로 구현되었는지를 확인하는 보완적 적합성 검토로 한정하였다.

[표 7] 프로토타입별 물리적 조작 특성 및 전문가 보완 검토

비교 항목	촉각 리듬형 다이얼	손가락 위치 유도형 다이얼	행위 결합형 다이얼
대표 모델	핀 그립 타워	페탈 다이얼	아크 브리지 다이얼
의도된 조작 특성	반복 핀에 의한 표면 접촉	굴곡에 따른 구분된 접촉 지점	회전부와 버튼 사이의 접근 동선
주요 조정 변수	핀수, 핀 깊이, 다이얼 높이	페탈 수, 페탈 깊이, 다이얼 지름	버튼 위치, 버튼 크기, 다이얼-버튼 간격
출력상 주의 요소	얇은 핀 구조의 출력 안정성	깊은 굴곡의 적층 경로	베이스 면적 및 부품 간 공간
검토 범위	물리적 접촉 특성	접촉 지점의 형상 구분	버튼 위치까지의 접근 동선
사용자 조건 조정 요소	핀 수, 핀 깊이, 다이얼 높이	페탈 수, 페탈 깊이, 다이얼 지름	버튼 위치, 버튼 크기, 간격
한계	핀이 얇으면 파손 가능	굴곡 과다 시 출력 경로 복잡	베이스 크기 증가
전문가 보완 검토	적합(3/3)	적합(3/3)	적합(3/3)

따라서 본 연구에서 제작한 다이얼형 프로토타입은 기성품을 대체하는 제품이 아니라, 사용자의 조건과 조작 목적에 따라 변형 가능한 물리적 UI 연구 모델이다.

5. 논의

5-1. 기성품 구매 방식과의 차별성

본 연구의 가장 중요한 논점은 기성 다이얼 제품을 구매하여 테스트하는 방식과의 차별성이다. 기성품 구매 방식은 빠르고 간단하지만, 이미 결정된 형태 안에서만 평가가 가능하다. 반면 본 연구의 방식은 다이얼 지름, 높이, 그립 수, 그립 깊이, 버튼 위치와 같은 변수를 연구자가 직접 정의하고 조정할 수 있다.

[표 8] 기성품 구매 방식과 본 연구 프로세스의 비교

비교 항목	기성품 구매 방식	본 연구의 AI·OpenSCAD·FDM 방식
연구 목적	제품 사용성 평가	조작 변수 생성과 물리화 프로세스 제안
형태 수정	완제품 단위에서는 제한적	변수값 변경을 통해 가능
사용자 조건 조정	제조사가 제공한 규격 내에서 제한적	손 크기, 파지 방식, 접근 동선에 따라 조정 가능
변수 통제	개별 변수의 독립적 변경이 어려움	지름, 높이, 반복 구조, 버튼 위치 등을 분리하여 조정 가능
반복 실험	다른 치수 비교 시 별도 제품 확보 필요	변수값 변경 후 후속 모델 제작 가능
AI 활용 의미	일반적으로 적용하지 않음	형태 대안 탐색과 재해석에 활용
연구 산출물	제품 비교 결과	편집 가능한 파라메트릭 모델과 물리적 목업

이러한 비교에서 기성품 구매 방식은 현재 판매되는 제품의 완성도와 사용성을 비교하는 데 적합한 반면,

본 연구의 방식은 특정 물리적 변수를 독립적으로 변경한 모델을 제작하는 데 초점을 둔다는 차이가 있다. 따라서 본 연구의 목적은 기성품 평가를 대체하는 것이 아니라, 기성품만으로는 통제하기 어려운 다이얼 지름, 높이, 반복 그립 구조 및 버튼 위치 등의 변수를 분리하여 구현하고 검토할 수 있는 보완적 연구 방법을 제안하는 데 있다. 본 연구는 새로운 다이얼 제품의 개발 결과보다, AI 생성 이미지에서 형태 단서를 추출하고 이를 편집 가능한 변수와 물리적 목업으로 연결하는 과정에 연구의 초점을 둔다.

5-2. AI의 역할과 프로세스의 의의

본 연구에서 AI 이미지 생성을 활용한 목적은 장식적이거나 시각적으로 흥미로운 다이얼을 제작하는 데 있지 않다. 형태 대안은 스케치나 일반적인 CAD 모델링으로도 탐색할 수 있으나, 본 연구에서는 서로 다른 형태 요소의 조합을 초기 단계에서 탐색하고 조작 경험과 관련된 형태 단서를 확보하기 위한 발산 도구로 AI 이미지 생성을 활용하였다. 따라서 본 연구는 AI가 기존 디자인 방법보다 우수하거나 반드시 필요하다는 점을 검증하는 것이 아니라, AI 생성 이미지의 형태 요소를 디자이너가 조작 경험의 관점에서 재해석하고 편집 가능한 변수로 전환하는 방법에 초점을 둔다.

예를 들어 반복 핀 구조는 회전 과정의 반복적인 표면 접촉으로, 꽃잎형 굴곡은 구분된 손가락 접촉 지점으로, 버튼 결합 구조는 회전부와 보조 입력 위치 사이의 접근 동선으로 해석하였다. 이후 이러한 형태 단서를 OpenSCAD의 수치 변수로 구성하고, Bambu Studio에서 모델 배치와 출력 조건을 검토한 뒤 FDM 목업으로 구현하였다. 이 과정에서 AI는 최종 설계안을 자동으로 결정하는 도구가 아니라 형태 대안을 제시하는 역할을 담당하였으며, 형태의 해석, 선정 및 변수화는 연구자의 판단을 통해 수행하였다[13].

본 연구의 의의는 네 가지로 정리할 수 있다. 첫째, AI 생성 이미지의 형태 요소를 조작 경험과 관련된 설계 변수로 해석하는 과정을 제안하였다. 이는 AI 이미지를 시각적 발상 결과로 사용하는 데서 나아가 이후 파라메트릭 모델링에 활용할 형태 단서를 추출하는 접근이다. 둘째, OpenSCAD 기반 모델링을 통해 이미지의 시각적 특징을 지름, 높이, 반복 구조의 수 및 버튼 위치와 같은 편집 가능한 수치 변수로 구성하였다. 이를 통해 이미지와 물리적 목업 사이에 반복 수정이 가능한 중간 구조를 마련하였다. 셋째, Bambu Studio를 통해 STL 모델의 배치와 출력 조건을 검토하고 FDM 방식으로 물리적 목업을 제작함으로써 화면상 형상을 실제 크기와 접촉 조건에서 예비적으로 검토하였다. 다만 이 과정은 사용자 경험의 효과를 검증한 것이 아니라, 형태가 의도한 조작 단서를 목업으로 구현할 수 있는지를 확인한 단계이다. 넷째, 완성된 기성품의 사용성을 비교하는 연구와 달리, 특정 물리적 변수를 독립적으로 변경한 후속 모델을 제작할 수 있는 프로세스를 제안하였다.

따라서 본 연구의 차별성은 생성형 AI를 디자인 도구로 활용했다는 사실 자체에 있지 않다. 생성형 AI 기반 디자인 도구는 이미지 생성과 디자인 작업 지원 등 다양한 방식으로 활용되고 있다[14]. 또한 AI와 3D프린팅을 연계한 제품디자인 프로세스 역시 선행연구에서 제안된 바 있다[15]. 본 연구의 기여는 생성 이미지의 조형 요소를 촉각 리듬, 손가락 위치 유도, 행위 결합과 같은 조작 경험 단서로 해석하고, 이를 OpenSCAD 변수로 전환하여 기성품으로는 통제하기 어려운 조작 변수를 실험 가능한 물리적 모델로 구성했다는 점에 있다.

5-3. 연구의 한계 및 후속 연구 방향

본 연구는 초기 프로세스 제안 연구이므로 몇 가지 한계를 가진다. 첫째, 본 연구의 프로토타입은 전자회로와 센서가 포함되지 않은 물리적 목업이다. 따라서 실제 입력 장치로 작동하기 위해서는 로터리 엔코더, 마이크로컨트롤러, 블루투스 모듈, 소프트웨어 인터페이스와의 연동이 필요하다.

둘째, 시안 선정과 제작된 목업의 물리적 조작 특성에 대한 연구자 단독 판단의 주관성을 보완하기 위해 관련 분야 전문가 3인의 독립적 보완 검토를 실시하였다. 전문가 검토에서 6개 시안의 대표 모델 선정 결과와 세 출력 목업의 형태·변수 대응 적합성이 연구자의 1차 판단과 동일하게 나타났으나, 이러한 전문가 검토는 설계 및 프로토타이핑 관점의 적합성을 확인하기 위한 것으로 실제 사용자 집단을 대상으로 한 정량적·

13) 김권호·김종하·Choi Ryan Jongwoo, '생성형 AI 도구와 디자이너의 협업 프로세스 개발: 이미지를 통한 아이디어 확산에서 고해상도 렌더링까지', 예술·디자인학연구, 27(2), 2024, p.93.

14) 윤병권, '생성형 AI 기반 디자인 툴의 사용자 경험(UX) 비교·분석: Adobe Firefly, Canva Magic Design, Figma AI 디자인 툴을 중심으로', 한국디자인리서치, 10(3), 2025, p.534.

15) 배은준·최웅, Op. cit. 2022, p.49.

정성적 사용성 평가를 대체하지 않는다. 따라서 본 연구에서 제시한 촉각 리듬, 손가락 위치 유도 및 행위 결합은 검증된 사용자 효과가 아니라 각 모델이 의도한 조작 경험의 유형으로 해석해야 한다. 후속 연구에서는 손 크기, 연령, 주사용 손, 조작 능력 및 촉각 민감도가 다른 참여자를 대상으로 과업 수행 시간, 오류율, 주관적 편안함 및 선호도 등을 비교할 필요가 있다.

셋째, FDM 출력은 빠른 반복 제작에는 적합하지만 표면 품질과 내구성에는 한계가 있다. 실제 제품화 단계에서는 소재, 내구성, 표면 마감, 전자부품 결합 방식에 대한 추가 검토가 필요하다.

넷째, AI 이미지 생성 결과는 프롬프트 구성에 따라 달라진다. 따라서 후속 연구에서는 프롬프트 설계 방식과 생성 결과 평가 기준을 체계화할 필요가 있다.

6. 결론

본 연구는 AI 생성 이미지의 조작 변수 번역을 통한 다이얼형 탠저블 UI 물리화 프로세스를 제안하였다. 본 연구는 기성 다이얼 제품을 대체하기 위한 새로운 완제품 개발이 아니라, 기성품으로는 통제하기 어려운 다이얼 지름, 높이, 그립 수, 그립 깊이, 버튼 위치와 같은 조작 변수를 생성하고, 수정하고, 물리적으로 검토하는 과정에 초점을 두었다.

연구 과정에서는 AI 이미지 생성을 통해 6개의 다이얼형 조작부 시안을 도출하였다. 이후 조작 경험의 차별성, OpenSCAD 변수화 가능성, FDM 출력 가능성 및 사용자 조건 조정 가능성을 기준으로 핀 그립 타워, 페탈 다이얼 및 아크 브리지 다이얼을 대표 모델로 선정하였다. 이 세 모델은 각각 촉각 리듬형 다이얼, 손가락 위치 유도형 다이얼 및 행위 결합형 다이얼로 재정의하였다. 선정된 시안은 OpenSCAD 기반의 파라메트릭 모델로 구현하여 주요 형태 요소를 수치 변수로 전환하였으며, Bambu Studio에서 STL 모델의 배치, 출력 방향 및 슬라이싱 조건을 검토한 뒤 FDM 방식으로 물리적 목업을 제작하였다. 또한 시안 선정 및 출력물 검토 과정의 연구자 의존성을 보완하기 위해 관련 분야 전문가 3인의 독립적 보완 검토를 실시하였다. 전문가 3인은 모두 핀 그립 타워, 페탈 다이얼 및 아크 브리지 다이얼을 대표 모델로 동일하게 선정하였으며, 출력 목업에서도 의도된 형태적 조작 단서와 주요 변수의 대응이 적절한 것으로 판단하였다. 이를 통해 연구자의 1차 선정 및 예비검토 결과를 전문가 관점에서 보완적으로 확인하였다.

프로세스 적용 과정에서 AI 이미지 생성은 기성 다이얼의 표준적 형상과 구분되는 형태 대안을 탐색하는 초기 발산 도구로 활용되었다. OpenSCAD 모델링은 이미지에서 추출한 형태 요소를 다이얼 지름, 높이, 핀 수, 페탈 깊이 및 버튼 위치와 같은 편집 가능한 변수로 구성할 수 있게 하였다. Bambu Studio는 STL 모델의 빌드 플레이트 배치, 출력 방향, 접지 상태 및 적층 조건을 검토하는 단계로 활용되었으며, FDM 출력물은 연구자가 반복 구조의 접촉, 회전부의 물리적 조작 가능성 및 버튼 접근 동선을 예비적으로 확인하기 위한 목업으로 활용되었다. 다만 본 연구에서는 실제 사용자 집단을 대상으로 한 사용성 평가를 수행하지 않았으므로, 이러한 결과는 각 모델의 사용성 효과를 입증한 것이 아니라 제안한 프로세스의 구현 가능성을 탐색한 결과로 한정된다.

본 연구의 핵심 기여는 AI와 3D 프린팅을 활용하여 다이얼을 제작했다는 사실 자체에 있지 않다. AI 생성 이미지에 나타난 형태 요소를 조작 경험과 관련된 단서로 해석하고, 이를 OpenSCAD의 수치 변수와 FDM 기반 물리적 목업으로 연결하는 구조화된 디자인 프로세스를 제안하였다는 점에 의의가 있다. 향후에는 카메라 조그다이얼과 같은 구체적인 제품 맥락에서 실제 사용자 과업을 설정하여 변수별 사용성을 비교하고, 로터리 엔코더와 버튼 센서 등 전자부품을 결합하여 실제 디지털 인터페이스와 연동되는 기능형 프로토타입으로 발전시킬 필요가 있다. 이후에는 제안한 프로세스를 버튼형, 슬라이더형 및 조이스틱형 조작부에 적용하여 다른 탠저블 UI 유형으로의 확장 가능성을 검토할 수 있다.

참고문헌

1. 강혜림, ‘AI 데이터 프롬프팅 기반 주얼리 3D 디자인 연구’, 한국디자인리서치학회, 한국디자인리서치, 2025.
2. 김관배·정도성·장중식, ‘제품디자인의 형태구조가

사용자에게 미치는 영향에 관한 연구: 3D프린팅 제품 패러메트릭 디자인 기법을 중심으로', 한국인더스트리얼디자인학회, 산업디자인학연구, 2016.

3. 김권호·김종하·Choi Ryan Jongwoo, '생성형 AI 도구와 디자이너의 협업 프로세스 개발: 이미지를 통한 아이디어 확산에서 고해상도 렌더링까지', 경희대학교(국제캠퍼스) 예술디자인연구원, 예술·디자인학연구, 2024.
4. 김도엽, '3D프린팅디자인에 대한 다학제적 연구동향 분석', 한국전시산업융합연구원, 한국과학예술융합학회, 2022.
5. 배은준·최웅, '3D 프린팅과 AI 기술 기반의 제품 디자인 프로세스 제안', 한국인더스트리얼디자인학회, 산업디자인학연구, 2022.
6. 윤병권, '생성형 AI 기반 디자인 툴의 사용자 경험(UX) 비교·분석: Adobe Firefly, Canva Magic Design, Figma AI 디자인 툴을 중심으로', 한국디자인리서치학회, 한국디자인리서치, 2025.
7. 윤예찬·주대원, '제품디자인을 위한 이미지 생성형 AI 프롬프트 구성요소 사례 연구', 한국디자인리서치학회, 한국디자인리서치, 2024.
8. 이용혁·나건, '생성AI를 이용한 디자인 리서치 방법론 제안: 더블 다이아몬드 모델을 중심으로', 한국디자인리서치학회, 한국디자인리서치, 2024.
9. 이준·황주선·최원석, '스토리큐브: 인터렉티브 디지털 스토리텔링을 위한 탠저블 인터페이스에 관한 프레임 워크', 한국디지털디자인학회, 디지털디자인학연구, 2006.
10. 장중식, '3D프린터 사용에 따른 디자인 환경 변화에 관한 연구', 한국인더스트리얼디자인학회, 산업디자인학연구, 2016.
11. 한정엽, '3D프린팅을 활용한 프로토타입 모델링 제작기법 연구', 한국상품문화디자인학회, 상품문화디자인학연구, 2013.
12. Ishii, H. & Ullmer, B., 'Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms', ACM, Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '97), 1997.
13. Øvergård, K. I., Fostervold, K. I., Bjelland, H. V. & Hoff, T., 'Knobology in Use: An Experimental Evaluation of Ergonomics Recommendations', Taylor & Francis, Ergonomics, 2007.
14. Ullmer, B. & Ishii, H., 'Emerging Frameworks for Tangible User Interfaces', IBM, IBM Systems Journal, 2000.