

가상현실 3D 프린팅 학습 환경의 안내 체계에 따른 교육적 효과성 비교 연구: AI 에이전트와 텍스트 가이드를 중심으로

권슬희¹ · 황동욱^{2*}¹광운대학교 메타버스융합학과 석사과정²광운대학교 미디어커뮤니케이션학과 조교수

Comparing the Educational Effectiveness of Guidance Systems in a VR-Based 3D Printing Learning Environment: AI Agents vs. Text Guides

Seulhee Kwon¹ · Dongwook Hwang^{2*}¹Master's Course, Department of Metaverse Convergence, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea²Assistant Professor, School of Media and Communication, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

[요약]

본 연구는 VR 기반 3D 프린팅 학습 환경에서 안내 유형(텍스트 기반 가이드 vs. AI 에이전트 가이드)과 지지대 유무가 학습자의 인지적·심리적 경험에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 2×2 혼합요인설계를 통해 대학생 30명을 대상으로 실험을 실시한 결과, 모든 조건에서 높은 수준의 현존감과 사용성이 확인되어 VR 기반 3D 프린팅 교육의 매체 적합성을 입증하였다. 작업 부하 분석 결과, AI 에이전트 가이드는 학습자의 주관적 노력을 유의미하게 낮추어 인지적 효율성을 제공하는 것으로 나타났다. 반면, 텍스트 기반 가이드는 상대적으로 높은 노력이 요구됨에도 불구하고 학습자로 하여금 더 높은 성과를 인식하게 하는 상호작용 효과를 보였다. 이는 학습자의 숙련도와 과업 특성에 따라 안내 유형을 차별화해야 함을 시사하며, 특히 초보 학습자에게는 구조화된 절차 안내가 인지적 안정감과 성취감을 고취하는 데 핵심적인 역할을 수행함을 확인하였다.

[Abstract]

This study investigates how guidance type (text-based vs. AI agent) and support structure conditions influence learners' sense of presence, perceived usability, and cognitive workload in a VR-based 3D printing learning environment. Using a 2×2 mixed-factorial design with 30 university students, the results demonstrate consistently high levels of presence and usability across all conditions, thereby confirming the pedagogical viability of the VR environment. Although overall workload did not differ markedly between conditions, AI agent guidance significantly reduced learners' perceived effort, thereby enhancing cognitive efficiency. In contrast, text-based guidance was associated with higher perceived performance, despite requiring greater mental exertion. A significant interaction effect on performance suggests that the presence of support structures moderates the effectiveness of guidance types. These findings provide empirical evidence that structured procedural guidance plays a critical role in ensuring cognitive stability and fostering a sense of achievement among novice learners in immersive learning environments.

색인어 : 3D 프린팅, 작업부하, 가상현실, 교육 콘텐츠, AI 에이전트**Keyword** : 3D Printing, Workload, Virtual Reality, Educational Content, AI Agents<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2026.27.5.1283>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 05 March 2026; Revised 07 April 2026

Accepted 22 April 2026

***Corresponding Author; Dongwook Hwang**

Tel: +82-2-940-8453

E-mail: dongwookkr@kw.ac.kr

1. 서론

3D 프린팅은 디지털 모델을 바탕으로 재료를 한 층씩 쌓아 올려 실제 물체를 만드는 기술로, 공학·의료·환경 등 다양한 분야에서 빠르게 활용이 늘고 있다[1]. 3D 프린팅은 교육 현장에서도 학생이 직접 설계하고 제작하는 과정을 경험할 수 있게 해주기 때문에, 창의성이나 문제 해결 능력 같은 역량을 기르는 활동으로 자주 활용된다[2]. 실제로 최근에는 3D 프린팅을 수업이나 프로젝트에 적용하는 사례가 늘어나면서, 학습자가 출력 과정을 이해하고 따라 할 수 있도록 돕는 학습 콘텐츠도 함께 발전해 왔다[3]. 하지만 3D 프린팅 학습은 빠르게 숙련되기 어려운 특성을 지닌다. 왜냐하면 출력 과정에서 오류가 발생할 경우에는 출력에 투입된 시간과 재료가 그대로 손실되고, 성공적인 출력을 위해서는 사용자가 반복적으로 수정하고 시도하는 과정을 거쳐야 하기 때문이다[4]. 또한 출력 품질은 슬라이싱 설정과 장비 상태에 크게 의존하며, 레이어 두께, 노즐 온도, 냉각 조건 등 다양한 요소가 동시에 작용해 결과가 달라질 수 있다[5]. 이러한 특성을 고려할 때, 이론적 지식의 습득만으로 3D 프린터를 능숙하게 활용하기에는 일정한 한계가 있을 수 있다. 특히 초보자의 경우 실제 출력 과정에서 발생하는 다양한 변수와 오류 상황을 직접 경험하지 않으면 공정 전반을 이해하기 어려울 가능성이 있다. 따라서 출력 실패를 점검하고 원인을 수정해 나가는 트러블슈팅 과정을 반복적으로 경험하는 것이 학습에 중요한 역할을 할 것으로 보인다.

이와 같은 문제를 완화하기 위한 접근으로 가상현실 (VR; virtual reality) 기반 3D 프린팅 학습 콘텐츠가 제안되고 있다. 실제로 VR 환경에서 적층제조 과정을 단계별로 체험할 수 있도록 구성된 학습 콘텐츠가 개발됐으며, 이는 학습자가 공정의 흐름과 장비 조작 과정을 시각적으로 이해하도록 돕는다[6]. VR 환경에서는 실제 장비나 재료를 직접 사용하지 않기 때문에, 출력 실패로 인한 시간과 재료 손실에 대한 부담을 상대적으로 줄인 상태에서 절차를 반복적으로 연습할 수 있으며, 복잡한 실험이나 공정을 가상 공간에서 수행하도록 설계된 VR 학습 환경은 학습자가 과정을 여러 번 경험하며 이해를 높일 수 있다[7]. 이러한 특성은 실제 3D 프린팅 환경의 한계를 보완하며, 반복적 실습이 요구되는 학습 활동에서 의미 있는 대안이 될 수 있다. 정리하면, VR 환경에서의 반복적 시뮬레이션은 학습자가 실제 공정에서 마주할 수 있는 기술적 위험 요소를 사전에 인지, 기억시켜 시행착오와 자원 손실을 최소화하고 감정 조절 및 돌발 대처 능력을 향상시켜 트러블슈팅을 용이하게 한다[8].

그러나 VR 환경에서 학습자가 절차를 체험할 수 있다고 해도, 3D 프린팅은 여러 단계가 유기적으로 연결되는 복잡한 활동이기 때문에 스스로 길을 찾기 어려운 측면이 있다. 이런 상황에서는 학습자가 단계별 수행 흐름을 따라가며 오류를 줄이고 학습 과정을 안정적으로 이어가도록 돕는 안내가 중요하다[9]. 따라서 학습 콘텐츠에서 사전에 설계된 텍스트 기

반 가이드 방식은 학습자가 절차를 일정한 흐름으로 따라가도록 돕는 동시에, 장기기억에 저장되는 지식 구조로서 정보를 범주화하는 스키마의 형성을 촉진하여, 결과적으로 작업 기억 부담을 줄이는 방식으로 기능해 왔다[10].

최근 인공지능(AI; artificial intelligence) 기술의 발전과 함께 AI 기반 에이전트가 학습 가이드의 새로운 형태로 주목받고 있다. 특히 대규모 언어 모델(LLM; large language model)을 기반으로 한 에이전트는 학습자의 요구와 수준에 맞추어 내용과 피드백을 조정하고, 실시간 상호작용을 통해 즉각적인 지원을 제공할 수 있다는 점에서, 사전에 정해진 절차를 일방적으로 제시하는 텍스트 기반 가이드와는 구별되는 특성을 지닌다[11]. 그러나 AI 에이전트가 언제나 학습에 유리한 결과로 이어지는 것은 아니다. 에이전트의 표정, 제스처, 말투와 같은 시각적·사회적 단서가 과도하게 제시될 경우, 학습자가 핵심 정보 외의 요소에도 주의를 배분하게 되어 추가적인 인지적 부담이 발생할 수 있다[12]. 또한 학습자가 AI의 안내를 그대로 받아들이기만 하고 스스로 생각하는 과정이 줄어들 수 있다는 우려도 존재한다[13].

이러한 두 안내 방식의 차이는 구성주의 학습 이론(constructivist theory)과 간섭 이론(interference theory)이라는 상반된 이론적 관점에서 서로 다른 방식으로 해석될 수 있으며, 이는 두 가이드를 비교해야 할 필요성에 대한 중요한 근거를 제공한다[14]. 구성주의 관점에서는 학습자가 에이전트와의 상호작용을 통해 능동적으로 의미를 구성하고 학습 과정에 깊이 관여하게 된다고 보며, 이러한 특성은 학습자의 상태에 맞추어 유연하게 정보와 피드백을 제공하는 AI 에이전트 가이드에 유리하게 작용할 수 있다. 반면, 텍스트 기반 가이드는 사전에 구조화된 정보를 일관되게 제공함으로써 학습자가 안정적인 인지 구조를 형성하도록 지원하지만, 상호작용을 통한 의미 구성 측면에서는 상대적으로 제한적일 수 있다. 반대로 간섭 이론에서는 추가적인 시각·청각 정보와 상호작용 요소가 학습자의 인지 자원을 분산시켜 작업 기억에 부담을 줄 수 있다고 보며, 이는 다양한 사회적 단서를 포함하는 AI 에이전트 가이드에서 더 크게 나타날 가능성이 있다. 이 관점에서 텍스트 기반 가이드는 불필요한 자극을 최소화하고 핵심 정보에 집중하도록 하여 인지 부하를 효과적으로 관리하는 데 유리한 방식으로 해석된다. 이처럼 동일한 안내 방식에 대해 상반된 이론적 예측이 공존한다는 점은, 두 가이드가 학습자의 인지 처리와 수행에 미치는 효과를 실증적으로 비교·검증할 필요성을 시사한다. 따라서 VR 기반 3D 프린팅 학습 콘텐츠에서도 텍스트 기반 가이드와 AI 에이전트 가이드가 학습자의 수행 과정에 어떠한 차이를 만드는지 비교하는 연구가 필요한 시점이다.

또한 3D 프린팅 과정에서는 출력 조건과 설정에 따라 오류가 발생할 수 있으며, 이를 해결하기 위한 반복적인 트러블슈팅은 시간과 노력이 많이 요구되어 학습자의 수행 과정과 학습 경험에 영향을 미칠 수 있다[15]. 출력물의 지지대는 오버행이나 브리지와 같은 구조적 특성에서 형상의 안정성을 확

보하기 위한 요소로, 적절히 설정되지 않을 경우 출력 실패나 품질 저하로 이어질 수 있다[16]. 따라서 지지대의 설정 여부와 설계 방식은 출력 과정에서 학습자가 마주하는 문제 해결 과정의 복잡성과 트러블슈팅의 난이도에도 영향을 미칠 수 있다. 특히 지지대 설정은 3D 프린팅의 성패를 좌우하는 중요한 변수임에도 불구하고, 기존 연구들은 주로 알고리즘적 최적화에 초점을 맞춰왔다[16]. 본 연구는 지지대 유무라는 환경적 조건이 학습자가 느끼는 인지 부하와 트러블슈팅 경험에 미치는 영향을 탐색함으로써, 기술적 성패를 넘어 학습자의 심리적·인지적 반응을 고려한 콘텐츠 설계 지침을 제시하고자 한다. 이에 VR 기반 3D 프린팅 학습 콘텐츠에서는 가이드 유형의 효과를 비교하는 것뿐 아니라, 지지대 여부와 같은 대표적인 트러블슈팅 조건이 학습자의 수행 과정과 경험에 어떠한 차이를 유발하는지도 함께 검토할 필요가 있다. 본 연구는 이러한 문제의식을 바탕으로 VR 기반 3D 프린팅 학습 콘텐츠에서 텍스트 기반 가이드와 AI 에이전트 가이드의 차이를 비교하고, 지지대 조건을 포함한 출력 환경 변인이 학습자의 수행 및 경험에 미치는 영향을 탐색하고자 한다.

II. 이론적 배경

2-1 3D 프린팅과 트러블슈팅

적층제조(AM; additive manufacturing)라고도 불리는 3D 프린팅은 디지털 모델을 물리적 객체를 생성하는 기술로, 비교적 낮은 비용으로 맞춤형 제작에 장점이 있다[17]. 이러한 특성 때문에 3D 프린팅은 다양한 산업 분야뿐 아니라 교육 현장에서도 비판적 사고, 창의적 문제해결력 등을 촉진하는 도구로 주목받고 있다[18]. 그러나 이러한 교육적 잠재력에도 불구하고, 초보자가 3D 프린터를 독립적으로 운용하기에는 여전히 높은 진입 장벽이 존재한다. 출력 과정은 장비의 구조적 이해, 재료 특성 파악, 슬라이싱 단계에서의 세부 파라미터 설정 등 다양한 기술적 판단을 요구하기 때문에, 충분한 선행 지식이 없는 초보자에게는 진입 자체가 어려운 경우가 많다[15]. 특히 레이어 두께, 온도 등 다양한 파라미터 설정은 출력 안정성에 영향을 미치며[5], 수많은 변수가 복합적으로 작용하는 공정 제어는 인지적 자원을 과도하게 소모할 수 있다[19]. 이처럼 파라미터 조합이 민감하고 최적값이 상황에 따라 달라질 수 있기 때문에, 초보자는 원하는 출력 품질을 얻기 위해 여러 차례의 시도와 조정을 거칠 수밖에 없으며, 반복되는 시도와 조정은 학습 지속 의미를 저해하는 심리적 부담으로 작용할 수 있다.

초보 학습자의 인지적 자원을 과도하게 소모하게 만드는 여러 공정 변수 중에서도, 지지대 설정은 학습자의 과업 수행 경험과 직결되는 핵심적인 변인이다. 지지대 설정은 모델의 오버행이나 브리지 구조를 안정적으로 형성하기 위한 필수

요소이지만[16], 지지대가 적절히 설정되지 않으면 출력물이 내려앉거나 중간 단계에서 붕괴하는 문제가 발생하며, 반대로 불필요하게 많은 지지대가 생성되면 제거 과정에서 표면 손상이 나타나는 등 후처리 부담을 증가시키는 부정적 결과가 초래된다[20]. 따라서 지지대 설정은 3D 프린팅 과정 전반에서 빈번히 등장하는 핵심적인 트러블슈팅 영역이며, 초보자가 안정적이고 성공적인 출력을 위해 반드시 이해해야 할 중요한 요소라 할 수 있다.

종합적으로, 3D 프린팅 과정에서 지지대 설정은 출력 성공 여부를 좌우하는 필수 요소이지만, 초보자에게는 적절한 설정 기준을 판단하기 어렵고 실패 가능성을 높이는 요인으로 작용한다. 이러한 기술적 특성은 지지대의 유무가 사용자 경험과 출력 결과에 실질적인 차이를 만들어 낼 수 있음을 시사하며, 나아가 지지대 조건이 사용자의 심리적·인지적 반응에 어떻게 영향을 미치는지 검증하는 것이 연구적으로 중요한 의미를 갖는다. 따라서 본 연구는 이러한 맥락을 바탕으로, 지지대 조건이 사용자의 경험과 과업 수행 과정에 어떠한 방식으로 반영되는지를 탐색하는 데 의의를 두고자 한다.

2-2 AI 에이전트와 교육 콘텐츠

3D 프린팅은 교육 현장에서 학습자가 설계와 제작의 전 과정을 직접 경험하도록 함으로써 실천적 학습을 촉진하는 도구로 활용되어 왔으며, 학습자의 참여도와 개념 이해를 높이는 데 긍정적인 영향을 주는 것으로 보고되고 있다[21]. 교육 현장에서는 3D 프린팅 프로젝트를 통해 학생들이 창의성, 문제 해결력 등 21세기 핵심 역량을 발달시키고자 노력해 왔으며[2], 이에 발맞춰 학습자가 3D 프린팅 과정 전반을 이해하고 실습할 수 있도록 지원하는 전용 학습 콘텐츠가 점차 발전해 왔다. 초기의 콘텐츠는 주로 학습자가 직접 모델링 파일을 수정하거나 출력 조건을 반복적으로 조정하는 등 단순 출력 체험이 일반적이었다[22]. 이후 디지털 기반 교육 접근이 확산되면서, AM 공정 전반을 단계별로 시뮬레이션하여 학습자의 반복적 실습과 절차적 이해를 지원하는 구조화된 콘텐츠가 등장했다[3]. VR 환경을 기반으로 공정 원리와 장비 조작 방식을 시각적으로 제시하는 몰입형 AM 학습 모듈도 개발되며[6], 3D 프린팅 콘텐츠는 설계부터 공정 이해까지 아우르는 상호작용적이고 지능적인 형태로 발전하고 있다.

그럼에도 불구하고, 3D 프린팅 학습은 모델링, 슬라이싱, 장비 운용 등 여러 기술적 요소가 유기적으로 얽혀 있어 학습자가 스스로 문제를 파악하고 해결하기가 쉽지 않으며, 상당한 시간과 노력이 요구된다는 점에서 교육 현장에서도 우려가 제기되고 있다[23]. 디지털 제작 활동을 다룬 선행연구들도 학생들이 기술적 어려움이나 과제 수행 과정에서 교사의 충분한 안내와 형성적 피드백이 없으면 활동이 쉽게 좌절로 이어지고, 결과적으로 3D 프린팅의 교육적 잠재력이 충분히 발휘되기 어렵다고 보고한다[24]. 이는 3D 프린팅 학습 콘텐츠를 설계할 때, 활동의 맥락과 지시사항, 안내를 명확히 구조

화하고 학습자의 숙련도에 따라 지원 수준을 조정하는 전략이 학습 지속과 기술 습득을 촉진하는 데 중요한 역할을 한다는 점을 보여준다[25]. 즉, 3D 프린팅 학습 환경에서 어떤 메커니즘을 통해 학습자에게 가이드와 피드백을 제공하느냐는 학습 경험의 질을 결정짓는 핵심 설계 변인이 된다.

한편, 3D 프린팅 학습 콘텐츠에서는 전통적으로 텍스트 기반 가이드나 구조화된 설명 자료가 주요한 안내 수단으로 활용되어 왔으며 학습자가 각 단계에서 수행해야 할 행동을 명확히 인식하도록 하여 불필요한 탐색이나 시행착오를 줄이고 과제 수행의 예측 가능성을 높여왔다[26]. 또한 문제 해결 절차가 명시적으로 제시될 경우 학습자는 기술 습득의 초기 단계에서도 과제 수행에 필요한 인지적 부담을 상대적으로 적게 경험하며, 단계별 수행 흐름을 안정적으로 익히는 경향을 보인다[27]. 텍스트 기반 가이드는 사람이 사전에 학습 흐름과 콘텐츠 구조를 설계한 결과물이라는 점에서 학습자가 제시된 지침을 순차적으로 따라가도록 구성된다. 이러한 사전 설계된 절차 안내는 불필요한 인지 부하를 줄여 작업 기억 자원을 학습에 필요한 핵심 활동에 집중시키는 방식으로 작동하며, 스키마가 충분히 형성되지 않은 초보 학습자에게 안정적인 학습 경험을 제공하는 데 유리하게 작용하는 역할을 수행해 왔다[28]. 따라서 복잡한 도구 조작과 절차적 판단이 요구되는 3D 프린팅과 같은 활동에서 초기 좌절을 완화하는데 도움이 될 수 있다. 다만 텍스트 기반 가이드는 학습자의 이해 수준이나 수행 맥락에 따라 안내 내용을 즉각적으로 조정하기 어렵고, 학습 과정에서 발생하는 예기치 않은 오류나 질문에 유연하게 대응하기에는 구조적 한계를 지닌다[29].

이러한 한계를 보완하기 위한 대안으로, 최근에는 학습 콘텐츠 내에 AI 에이전트를 가이드로 도입하려는 시도가 활발히 이루어지고 있다. AI 에이전트 가이드는 고정된 텍스트 안내와 달리, 학습자의 진행 상황이나 반응에 따라 설명을 조정하거나 추가적인 피드백을 제공할 수 있다는 점에서 주목받고 있으며 적절히 설계된 AI 에이전트는 학습자의 긍정적 정서와 내재적 동기를 증진시키고, 궁극적으로 학습 성과 향상에 기여할 수 있음을 보고하고 있다[30]. 특히 음성, 제스처, 얼굴 표정과 같은 사회적 단서를 활용하는 에이전트는 학습자가 컴퓨터 기반 학습 환경을 보다 사회적인 상호작용 맥락으로 인식하게 만들어, 불안을 감소시키고 자기조절 학습을 촉진하는 경향을 보인다[31]. 특히, 3D 프린팅과 같이 복잡한 조작이 동반되는 환경에서 AI 에이전트는 학습자의 상태를 반영하여 적절한 피드백을 제공할 수 있다. 이러한 에이전트의 실시간 지원은 학습자가 과제 수행 중 마주하는 부담을 완화하며, 특히 지지대 제거와 같은 트리블슈팅 상황에서 학습자가 당황하지 않고 과업을 완수할 수 있도록 유도하는 기제로 작용할 수 있다[32]. 그러나 AI 에이전트의 도입이 항상 긍정적인 효과만을 보장하는 것은 아니다. 일부 연구에서는 에이전트의 과도한 시각적 자극이나 불필요한 사회적 신호가 학습자의 인지 부하를 유발하여 학습 효율이나 정보 유지 수준을 저하시킬 수 있음을 지적한다[33]. 또한, AI 에이

전트가 학습자의 수행을 지원할 때 적절한 설계가 이루어지지 않으면, 학습자가 AI 결과를 무비판적으로 받아들이게 되어 인지 참여가 줄고, 결과적으로 학습 효율과 정보 유지가 저하될 수 있다[13].

이러한 두 가이드 방식의 특성은 3D 프린팅 공정의 단계별 요구사항과 결합하여 차별적인 학습 지원 효과를 나타낼 수 있다. 슬라이딩 설정과 같이 정교한 수치 입력과 절차적 엄밀성이 요구되는 단계에서 텍스트 기반 가이드는 학습자가 필요할 때마다 반복적으로 참조할 수 있는 안정적인 정보 제공의 역할을 한다. 반면, 실제 조작 과정에서 학습자마다 서로 다른 의문이나 트리블 슈팅과 같이 예기치 못한 상황을 마주할 때는 정해진 설명 외에도 자유로운 질의응답이 가능한 AI 에이전트의 유연한 안내가 필수적이다. 이는 학습자가 기술적 어려움으로 인해 흐름이 끊기는 것을 방지하고, 필요한 순간에 맞춤형 정보를 제공함으로써 과업을 포기하지 않고 완수하도록 돕는 중요한 기제가 된다

종합하면, 텍스트 기반 가이드는 사람이 사전에 설계한 명확한 절차와 흐름을 제공함으로써 학습자의 인지적 부담을 줄이고 안정적인 수행을 지원하는 전통적인 안내 방식으로 기능해 왔다. 반면, AI 에이전트 가이드는 학습자의 상태와 맥락에 따라 설명과 피드백을 조정할 수 있는 유연성을 지니며, 정서적·사회적 지원을 통해 학습 경험의 질을 확장할 수 있는 가능성을 제시한다. 따라서 3D 프린팅 학습 콘텐츠에서 가이드를 설계할 때에는, 고정된 절차 안내에 강점을 지닌 텍스트 기반 가이드의 장점과, 상호작용성과 적응성을 갖춘 AI 에이전트 가이드의 특성을 비교·검토하는 이론적 논의가 필요하다. 이러한 비교는 향후 3D 프린팅 콘텐츠 환경에서 어떤 형태의 가이드가 학습자의 이해, 수행, 그리고 지속적인 학습에 보다 효과적으로 기여할 수 있는지를 탐색하기 위한 중요한 이론적 토대를 제공한다.

2-3 사용성 평가(System Usability Scale)

사용성은 특정 사용자가 특정 사용 맥락에서 목표를 얼마나 효과적이고 효율적이며 만족스럽게 달성할 수 있는지를 나타내는 개념으로 정의된다[34]. 이 개념은 학습 용이성, 효율성, 기억 용이성, 오류, 주관적 만족감과 같은 다차원적 요소로 구성되며, 이를 시스템 품질을 판단하는 핵심 기준으로 제시했다[35]. Rubin과 Chisnell은 사용성 평가를 대표 사용자가 실제 과업을 수행하는 과정에서 시스템을 평가하는 절차로 설명하며, 이를 통해 사용 중 발생하는 문제점과 오류를 식별하는 것을 핵심 목적으로 제시한다[36]. 이들은 사용성 테스트가 시스템의 효과성과 효율성을 평가할 뿐 아니라, 사용 과정에서 발생하는 혼란이나 오류 지점을 식별하는 데 유용하다고 강조한다. 이러한 평가 결과는 인터페이스 설계의 문제를 구체적으로 파악하고, 설계 개선을 위한 객관적 근거를 제공하는 데 활용될 수 있다고 설명한다.

사용성 평가 척도(SUS; system usability scale)는

Brooke가 제안한 간단하고 범용적인 설문 기반 사용성 평가 도구로, 총 10개의 문항을 통해 시스템의 전반적인 사용성을 평가한다[37]. 각 문항은 시스템의 사용 용이성, 복잡성, 사용 중 느끼는 자신감 등 다양한 측면을 포괄적으로 반영하도록 구성되어 있다. SUS의 가장 큰 특징은 시스템 유형에 관계없이 적용 가능하며, 짧은 시간과 적은 비용으로 전반적인 사용성 수준을 파악할 수 있다는 점에서 실무와 연구 모두에서 널리 활용되고 있다. 이후 연구들은 SUS의 신뢰도와 타당성을 검증해왔으며, Bangor 등은 SUS가 다양한 산업군과 기술 환경에서도 일관된 결과를 제공하고 사용자의 주관적 만족도를 효과적으로 반영한다고 보고했다[38]. 더 나아가 SUS 점수는 사용성 수준을 정량적으로 측정할 수 있는 지표로 제시하며, 이를 활용해 서로 다른 인터페이스 설계나 사용 조건 간 사용성 차이를 통계적으로 비교할 수 있음을 설명한다[39].

한편, 3D 프린팅은 설계, 슬라이싱, 출력, 후처리로 이어지는 다단계 공정을 포함하며, 각 단계에서 사용자의 설정에 따라 결과 품질과 사용성에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 기존 연구에 따르면, 이러한 공정은 높은 수준의 전문 지식과 이해를 요구하며, 비전문 사용자는 출력 조건 설정이나 출력 실패 원인을 파악하는 데 어려움을 겪는 것으로 보고됐다[40]. 또한, Rayna와 Striukova는 개인용 3D 프린팅 기술이 아직 성숙 단계에 이르지 못했으며, 이로 인해 일반 소비자가 기술을 쉽게 이해하고 활용하기 어렵다는 점에서 기술 채택이 제한적으로 이루어지고 있다고 지적한다[41]. 그들은 현재의 사용자층이 주로 취미 사용자나 공학 전공자에 한정되어 있다는 점을 들어, 적층 제조 기술이 비전문 사용자에게 여전히 높은 진입 장벽과 제한된 사용성을 제공하고 있음을 지적한다. 이러한 기술적 복잡성과 접근성의 한계는 적층 제조 기술의 광범위한 수용과 지속적 활용을 저해하는 요인으로 작용할 수 있다.

3D 프린팅 과정에서 제공되는 가이드 방식은 사용자가 작업을 이해하고 수행하는 데 중요한 역할을 한다. 텍스트 기반 가이드는 튜토리얼 형태로 콘텐츠와 함께 사전 제작되는 사용자 지원 방식이다. 이 방식은 동일한 절차와 정보를 일관되게 전달할 수 있고, 사용자가 안내된 단계에 따라 과업을 수행하도록 설계되기 때문에 초기 학습과 실행을 용이하게 한다. 특히 Parasuraman이 제시한 기술 수용도 개념에 따르면 새로운 기술을 받아들이려는 심리적 준비 수준이 낮을수록 [42], 그리고 Compeau와 Higgins의 자기효능감 개념에 따르면 해당 기술을 성공적으로 사용할 수 있다는 개인의 신념이 약할수록 [43], 명시적으로 구조화된 안내는 추가적인 탐색 부담을 줄여주어 과업 수행에 대한 심리적 장벽을 완화하는 데 효과적일 수 있다. 단, 두 개념은 본 연구에서 직접 측정된 변인이 아니라 결과 해석을 위한 이론적 참조 틀로 활용된다. 그러나 제공 정보가 사전에 고정되어 있어, 사용자의 현재 상태나 작업 맥락, 또는 오류 발생 지점을 실시간으로 반영해 맞춤형 피드백을 제공하는 데에는 한계가 있다[44]. 반

면, AI 에이전트 가이드는 사용자의 선택과 상태에 따라 적응적으로 정보를 제공할 수 있다는 장점을 지니지만, 초기 사용자는 에이전트의 활용 방식에 대한 단서를 충분히 얻지 못해 어떤 질문을 해야 할지 혼란을 겪을 수 있으며, 에이전트가 사용자의 작업 맥락을 정확히 반영하지 못하는 경우 상호작용 과정에서 추가적인 조정과 노력이 요구되는 한계가 있다 [45]. Cowan 등은 대화형 에이전트가 특정 상황에서는 편리함과 친숙함을 제공하지만, 기능의 불투명성, 맥락 이해의 한계, 상호작용을 위한 추가적 노력 등으로 인해 초기 사용자에게 사용 장벽으로 인식된다고 보고한다[46].

이와 함께 3D 프린팅 과정에서 지지대 구조도 사용성에 영향을 미칠 수 있다. 선행 연구에 따르면, 지지대는 출력 안정성을 확보하는 데 기여하지만 출력 후 제거 과정에서 표면 품질 저하를 유발할 수 있고, 추가적인 시간과 노력을 요구하기 때문에 지지대 사용이 증가할수록 작업 효율성과 사용자 만족도가 저하될 수 있다[47],[48]. 특히 지지대 구조에 사용되는 재료는 최종 산출물의 일부가 아니라 재활용이 어려워, 적절한 적층 방향 설정을 통해 지지대를 최소화하는 것이 바람직하다고 보고되고 있다[40]. 이러한 지지대 최소화 전략은 출력 성공률뿐만 아니라 작업 효율성과 사용자 부담을 완화하는 측면에서 중요한 의미를 갖는다. 따라서 지지대의 존재 여부에 따라 사용자가 지각하는 3D 프린팅 과정의 전반적인 사용성 평가가 달라질 가능성을 고려할 필요가 있다.

종합하면, 본 연구에서는 3D 프린팅 과정에서 제공되는 가이드 방식 또는 지지대 조건에 따라 사용자가 인식하는 시스템 사용성을 비교하고자 한다. 사용성 평가는 SUS를 통해 측정되며, 이는 서로 다른 조건이 사용자의 작업 이해도, 수행 편의성, 전반적 만족도에 미치는 영향을 정량적으로 검증하는 종속변인으로 활용된다. 해당 접근은 3D 프린팅 사용자 경험을 체계적으로 분석하고, 보다 직관적인 지원 시스템 설계를 위한 이론적 근거를 제공할 것으로 기대된다.

2-4 작업부하

작업부하(workload)는 특정 수준의 성과를 달성하기 위해 인간에게 요구되는 정신적, 인지적, 물리적 비용의 총량을 의미한다[49]. 인간공학 연구에서는 작업부하를 과업 수행 과정에서 요구되는 자원의 수준이 개인의 제한된 인지 자원 용량에 비해 얼마나 부담을 주는지 나타내는 개념으로 설명했으며, 이러한 요구가 자원 용량을 초과할 경우 수행 저하나 수행 붕괴로 이어질 수 있다고 보았다[50]. 이는 단순한 과업 난이도가 아니라, 사용자가 과업을 처리하기 위해 투입해야 하는 인지 자원의 수준을 포함하는 개념으로 이해된다[51]. 콘텐츠를 이용하는 상황에서도 작업부하는 사용자가 콘텐츠를 탐색하고 이해하는 과정에서 경험하는 인지적 부담을 반영하는 지표로 활용될 수 있다[52]. 콘텐츠에 담긴 정보의 구성과 상호작용 방식에 따라 사용자가 투입해야 하는 인지 자원의 수준은 달라질 수 있으며, 이러한 차이는 사용자 경험

평가에서 중요한 요인으로 작용할 수 있다[53].

인지 자원 사용의 한계를 설명하기 위한 이론으로 인지 부하 이론(CLT; cognitive load theory)이 사용된다. 해당 이론은 인간의 작업 기억이 제한된 용량을 지니며, 학습 과정에서 이 한계를 초과할 경우 정보 처리가 비효율적으로 이루어진다는 가정에 기반한다[54]. 인지 부하 이론은 인지 부하를 내재적 부하(intrinsic load), 외재적 부하(extraneous load), 학습 관련 부하(germane load)의 세 가지 범주로 설명한다[55]. 내재적 부하는 과제나 콘텐츠 자체가 지니는 정보의 복잡성에서 비롯되며, 외재적 부하는 정보가 제시되는 방식이나 인터페이스 및 설명 구조와 같이 설계상의 요인에서 발생하는 인지적 부담을 의미하며, 학습 관련 부하는 사용자가 정보를 조직하고 이해하여 스키마를 형성하는 데 투입하는 인지적 노력을 의미한다[56]. 인지 부하 이론에서는 인지 부하를 측정 가능한 개념으로 파악할 수 있으며, 특히 정신적 노력은 과업 요구를 처리하기 위해 실제로 투입되는 인지 용량을 반영해 '실제 인지 부하'를 나타낼 수 있다[56]. 이에 따라 인지 부하를 경험적으로 평가하기 위한 방법으로 주관적 작업부하 측정 도구가 널리 사용되고 있다.

이러한 작업부하를 측정하기 위한 대표적인 도구로 NASA-TLX (task load index)가 널리 활용되고 있으며, 이 척도는 과업 수행 중 사용자가 경험하는 작업부하를 정신적 요구(mental demand), 신체적 요구(physical demand), 시간적 요구(temporal demand), 성과 인식(performance), 노력(effort), 좌절감(frustration)의 여섯 가지 차원으로 평가하는 주관적 척도이다[49]. 이 척도는 다양한 과업 및 인터페이스 환경에서 사용자의 인지적 부담과 노력 수준을 민감하게 반영할 수 있어, 인간공학 연구에서 신뢰도 높은 작업부하 측정 도구로 인정받아 왔다[57]. 특히 NASA-TLX는 다양한 작업 및 시스템 맥락에서 널리 활용되어 왔으며, 주관적 평가를 통해 사용자가 경험하는 정신적 작업부하와 인지적 부담을 평가하는 대표적인 도구로 활용되고 있다[58].

작업부하는 여러 단계의 판단과 선택을 요구하는 절차적 콘텐츠에서 두드러지게 나타날 수 있다. 이는 단계마다 정보를 해석하고 다음 행동을 결정하는 과정에서 지속적인 작업 기억 자원과 인지적 노력을 요구하기 때문이다[59]. 3D 프린팅 콘텐츠는 설계, 출력 설정, 결과 예측 등 복합적인 절차를 포함하는 콘텐츠로, 작은 이해 오류나 판단 착오가 전체 수행 실패로 이어질 수 있기 때문에, 사용자가 체감하는 작업부하를 고려한 콘텐츠 설계가 중요하다[60]. 따라서 3D 프린팅 콘텐츠를 이용하는 과정에서 사용자가 경험하는 작업부하는 콘텐츠의 이해 가능성과 수행 결과를 좌우하는 핵심 요인으로 작용할 수 있다.

콘텐츠에서 기술적 과업을 지원하는 가이드는 사용자가 복잡한 절차와 규칙을 이해하고 적용하도록 돕는 역할을 하며, 이 과정에서 작업부하 관리가 중요한 설계 요소로 작용한다[10]. 가이드의 설명 순서, 정보의 분절화, 정보 제공 형태 등의 요소가 사용자가 투입해야 하는 인지 자원의 수준에 직접

적인 영향을 미치며, 부적절한 가이드는 불필요한 인지적 부담을 증가시킬 수 있다[61]. 특히 사람이 설계한 텍스트 기반 가이드가 단순 명확하고 설득력 있게 제공되지 않을 경우 인지적 부하가 쉽게 증가할 수 있다[62]. 반면 AI 에이전트가 가이드는 주의를 분산시키는 환경이거나 작업이 복잡한 경우, 상호작용 과정에서 정보 처리 부담이 커져 작업부하가 증가할 수 있다[63]. 이처럼 가이드의 형태는 사용자가 체감하는 작업부하와 수행 효율을 결정하는 중요한 요인으로 이해될 수 있다.

3D 프린팅 과정에서 지지대 구조물은 복잡한 형상의 출력 안정성과 형상 유지를 위해 필수적이지만, 출력 시간 증가와 재료 소모, 그리고 제거를 위한 후처리 부담을 동반한다[64]. 또한 지지대 구조물의 생성 여부, 배치 위치, 밀도 등을 최적화하는 과정은 출력 결과를 예측하면서 적절한 설정값을 결정해야 하는 과제로 작용한다. 특히 경험이 부족한 사용자는 각 설정이 출력 결과에 미치는 영향을 예측하는 데 더 많은 정신적 노력을 요구받기 때문에, 높은 인지적 부담을 느낄 가능성이 크다[65]. 따라서 지지대 구조물에 대한 가이드 콘텐츠는 사용자가 경험하는 작업부하를 이해하고 조절하는 데 중요한 분석 대상이 된다.

이에 본 연구는 VR 기반 3D 프린팅 학습 환경에서 안내 방식과 지지대 제공 여부가 학습자의 현존감, 사용성 평가, 작업부하에 미치는 영향을 종합적으로 검증하고자 하며, 나아가 각 안내 방식 조건에서의 사용자 경험 수준을 구체적으로 탐색하고자 한다. 이를 위해 다음과 같이 연구문제를 설정했다:

- 연구문제 1-1. 3D 프린팅 안내 방식(텍스트 기반 가이드 vs. AI 에이전트 가이드)과 지지대 유무에 따라 현존감에 상호작용 효과가 있는가?
- 연구문제 1-2. 3D 프린팅 안내 방식과 지지대 유무에 따라 사용성평가에 상호작용 효과가 있는가?
- 연구문제 1-3. 3D 프린팅 안내 방식과 지지대 유무에 따라 작업부하에 상호작용 효과가 있는가?
- 연구문제 2-1. 3D 프린팅 콘텐츠에서 텍스트 기반 가이드를 활용한 사용자의 현존감은 어떠한가?
- 연구문제 2-2. 3D 프린팅 콘텐츠에서 AI 에이전트 가이드를 활용한 사용자의 현존감은 어떠한가?
- 연구문제 3-1. 3D 프린팅 콘텐츠에서 텍스트 기반 가이드를 활용한 사용자의 사용성 평가는 어떠한가?
- 연구문제 3-2. 3D 프린팅 콘텐츠에서 AI 에이전트 가이드를 활용한 사용자의 사용성 평가는 어떠한가?
- 연구문제 4-1. 3D 프린팅 콘텐츠에서 AI 에이전트 가이드를 활용한 사용자의 작업부하는 어떠한가?
- 연구문제 4-2. 3D 프린팅 콘텐츠에서 텍스트 기반 가이드를 활용한 사용자의 작업부하는 어떠한가?

III. 연구방법

3-1 실험참여자 와 측정

본 연구는 서울 소재 대학교에 재학 중인 학부생을 대상으로 자발적 참여를 받아 진행됐다. 실험 참여자는 교내 온라인 게시판 및 공지를 통해 모집하였으며, 총 30명이 참여했다. 참여자 간 사전 지식 차이에 따른 변수를 통제하기 위해, 모집 단계에서 사전 스크리닝을 실시하여 3D 프린터 장비 및 관련 장비 사용 경험이 전혀 없는 미경험자만을 선별했다. 이 중 남성은 14명(47%), 여성은 16명(53%)이었으며, 평균 연령은 23세(SD = 2.08)이었다. 모든 참여자는 사전 실험에 앞서 연구 목적과 절차를 충분히 안내받고, 개인정보 활용 및 실험 참여 동의서를 작성했다. 본 연구에서는 안내 방식과 지지대 여부에 따른 현존감, 사용성 평가, 그리고 작업부하의 차이를 알아보고자 했다. 학습 콘텐츠에 대한 기저 수준을 동일하게 유지하기 위해 미경험자 선별 과정을 거쳐 별도의 사전 지식 측정은 실시하지 않았다. 설문은 전부 5점 리커트(Likert) 척도를 기준으로 현존감, SUS, 작업부하 변인을 사용했다. 현존감은 ‘사용자가 가상환경 속에 있다고 느끼는 주관적 경험’으로 해석될 수 있다. 이를 측정하기 위해 Schubert 등의 연구를 참고해 문항을 재구성했으며, 총 16문항을 통해 측정했다[66]. 본 연구에서 현존감 척도의 신뢰도(Cronbach’s α)는 .95으로 나타났다. 사용성 평가는 Brooke이 개발한 10문항의 표준화 척도인 SUS를 적용했다[37]. 본 연구에서 사용성 평가 척도의 신뢰도는 .85으로 나타났다. 마지막으로 작업부하는 NASA에서 개발하여 타당도가 입증된 표준 도구인 NASA-TLX를 활용하여 측정했다[49]. 본 척도는 정신적 요구, 신체적 요구, 시간 압박, 성과 인식, 노력, 좌절감 등 서로 독립적인 6개 차원의 부하를 단일 문항으로 측정하는 다차원 지표의 특성을 지닌다. 따라서 개별 문항 간의 내적 일관성을 산출하는 대신, 검증된 표준 척도의 내용 타당도를 바탕으로 분석을 진행했다. 본 연구에서는 실험 조건에 따른 전체 작업부하의 총합 점수뿐만 아니라, 각 하위 요인별 차이 분석을 병행하여 구체적인 인지적·신체적 부하의 원인을 파악하고자 했다.

3-2 실험처치물

본 연구에서는 3D 프린팅 교육에서 안내 방식과 출력물 지지대 유무에 따른 학습자의 현존감, 시스템 사용성, 작업부하 변화를 분석하고자 가상현실 기반 실험 처치물을 직접 제작했다. 실험 콘텐츠는 Kwon과 Hwang의 가상현실 기반 3D 프린팅 트러블슈팅 가이드라인을 기반으로 개발했으며, Unity 게임엔진을 활용했다[6]. 가상환경은 실제 3D 프린팅 실습 공간을 모사한 형태로 구성됐으며, 3D 프린터 장비, 작업 공간, 슬라이싱 프로그램 화면 등은 실제와 유사하게 구현

했다. 참여자는 모델링 파일 확인, 슬라이싱 설정, 출력 실행, 결과물 점검에 이르는 전체 절차를 순차적으로 수행하도록 설계됐다. 모든 콘텐츠는 오쿨러스 퀘스트 2(Oculus Quest 2)와 같은 HMD(Head-Mounted Display) 기기를 통해 1인칭 시점에서 체험할 수 있도록 구성했으며, 현실과 유사한 공간감과 상호작용 구조를 제공하여 학습자가 실제 작업 환경에 있는 듯한 몰입감을 경험할 수 있도록 설계했다.

안내 방식은 연구 목적에 따라 텍스트 기반 가이드와 AI 에이전트 가이드의 두 가지 조건으로 구분하여 구현했다. 텍스트 기반 가이드에서는 사람이 사전에 설계한 단계별 안내문이 가상 공간 내 패널 형태로 제공됐다. 해당 가이드는 각 단계에서 수행해야 할 절차, 개념 설명, 주의사항 등을 제공하는 방식으로 구성됐다. 참여자는 제시된 안내문을 읽고 해당 절차를 수행하는 방식으로 진행됐다. 텍스트 기반 가이드는 정보 제공의 순서와 양을 고정하여 모든 참여자에게 동일한 학습 흐름을 제공하도록 통제됐다. 반면, AI 에이전트 조건에서는 Unity Asset Store의 Convai를 활용하여 각 공간에 대화형 에이전트를 배치했다. Convai는 게임엔진과 통합이 용이한 대화형 AI 플랫폼으로, 음성 및 텍스트 입력을 통해 사용자와 실시간으로 자연어 상호작용이 가능하다. 또한, 에이전트는 실시간 응답, 립싱크, 표정, 행동 애니메이션을 활용하여 사용자의 접근을 감지하고 맥락에 맞는 응답과 행동을 수행할 수 있도록 설계했다. 이를 통해 사용자는 이동 중에도 자유롭게 질문하고 피드백을 받을 수 있으며, 몰입형 상호작용 경험을 할 수 있도록 했다. 두 안내 방식은 동일한 3D 프린팅 작업 시나리오를 기반으로 구성됐으며, 정보의 양과 제공 순서, 과업의 난이도는 일정하게 통제됐다. 텍스트 기반 가이드와 AI 에이전트 가이드의 시각적 구현 차이는 그림1에 제시했다. 그림1의 (a)는 텍스트 기반 가이드가 가상 공간 내 패널에 단계별 절차와 설명을 제공하는 장면이며, (b)는 AI 에이전트 가이드가 사용자와 상호작용하는 장면이다.

각 안내 방식 조건 내에서는 출력물에 지지대가 있는 경우와 지지대가 없는 경우를 모두 포함했다. 지지대 조건은 3D 프린팅 과정에서 빈번하게 발생하는 트러블슈팅 상황을 반영하기 위한 핵심 조작 변인으로 설정됐다. 본 연구에서는 동일한 모델을 기반으로 하되, 슬라이싱 단계에서의 설정과 출력 후 처리 과정에 차이를 두어 지지대 유무를 구현했다. 지지대가 없는 조건에서는 슬라이싱 과정에서 모델의 적층 방향을 조정하는 과정이 필수적으로 요구되도록 설계했다. 참여자는 모델을 회전시키며 별도의 지지대 없이도 구조적으로 안정적인 출력이 가능하도록 설정하는 과정을 경험했다. 이는 출력 실패 가능성을 사전에 예측하고 설정을 조정하는 트러블슈팅 과정을 포함하도록 설계된 것이다. 반면, 지지대가 있는 조건에서는 슬라이싱 단계에서 지지대를 활성화하도록 설계했으며, 출력 과정에서 지지대가 함께 생성되도록 구현했다. 해당 조건에서는 출력 완료 후 생성된 지지대를 제거하는 후처리 중심의 트러블슈팅 과정이 포함됐다. 이는 출력 성공 이후에도 추가적인 물리적·인지적 처리가 요구되는 상황을 반영한

다. 이와 같이 두 조건은 단순히 출력 성공 여부를 대비하는 것이 아니라, 트러블슈팅이 발생하는 시점을 출력 이전 단계(설정 조정)와 출력 이후 단계(지지대 제거)로 구분하여 설계됐다. 지지대 유무 조건의 시각적 구현 차이는 그림 2에 제시했다. 그림 2의 (a)는 지지대 없이 모델의 방향을 조정하여 안정적으로 출력된 결과물을 보여주는 장면이며, (b)는 지지대가 포함된 상태로 출력이 완료된 결과물을 나타낸다. 두 조건 모두 최종적으로는 안정적인 출력 결과를 제시하되, 출력에 이르는 과정과 후처리 경험에서 차이가 발생하도록 설계됐다. 모든 실험 참여자는 각 안내 방식 내에서 두 가지 상황을 모두 경험하도록 설계되었으며, 이를 통해 지지대 유무가 학습자의 경험에 미치는 주요효과와 안내 방식과의 상호작용 효과를 분석할 수 있도록 했다.

3-3 실험 과정

본 연구는 2 × 2 혼합요인설계(mixed-factorial design)에 따라 실험을 설계했다. 안내 방식은 실험자 간 요인(between-subject factor)으로, 출력물 지지대 유무는 실험자 내 요인(within-subject factor)으로 설정했다. 참여자는 사전에 무작위 배정되어 두 안내 방식 중 하나에 할당됐으며, 각 조건 내에서는 지지대 유무 상황의 제시 순서를 역균형(counterbalancing)하여 순서 효과를 최소화했다.

실험 시작 전, 연구자는 참여자에게 실험의 전체 절차와 오클러스 퀘스트 2의 착용 방법에 대해 간단히 안내했다. 이후 참여자는 배정된 안내 방식에 따라 가상현실 환경에 입장했으며, 사전 제작된 텍스트 기반 가이드 또는 AI 에이전트 가이드를 통해 3D 프린팅 작업 절차를 단계별로 학습했다. 두 안내 조건 간 정보의 양과 단계 순서는 동일하게 유지됐다. 참여자는 VR 환경 내에서 모델링 파일 다운로드, 슬라이싱 설정, 출력 실행, 결과물 확인 등의 각 단계를 능동적으로 조작 및 체험했다. 구체적으로, 본 실험의 과업은 3D 프린팅의 전 과정을 단계별로 이행하도록 구성했다. 참여자는 가상 환경 입장 직후 가이드의 안내에 따라 전체 공정에 대한 개요를 학습한 후, 공간을 이동하며 각 단계를 순차적으로 수행한다. 첫 번째 단계인 ‘모델링 파일 다운로드’에서는 외부 공유 플랫폼(Thingiverse)을 모사한 인터페이스 내에서 모델링 다운로드 버튼을 활성화하여 출력 데이터를 획득한다. 이어 데이터가 저장된 매체(USB)를 지참하여 ‘슬라이싱 설정’ 공간으로 이동하고 적층 제조를 위한 경로 생성 과정을 시각 자료를 통해 학습한다. 학습 완료 후, 참여자는 최종적으로 ‘출력 실행’ 공간 내 3D 프린터에 매체를 연결하고 정해진 절차에 따라 출력 명령을 수행한다. 과업의 마지막 단계는 ‘결과물 확인’으로, 출력된 모델을 수거하여 최종 형상을 검토 및 후처리하는 과정을 포함했다. 이때 지지대가 포함된 조건에서는 참여자가 모델링이 완성됨과 동시에 제공되는 도구를 통해 상호작용하여 구조물을 제거하는 추가 공정을 수행함으로써 실제 트러블슈팅 및 후처리 경험을 모의했다.

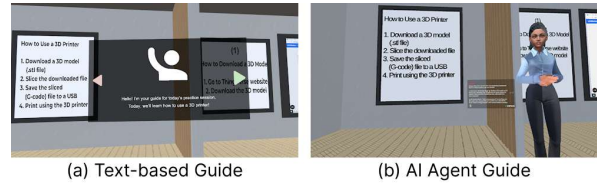
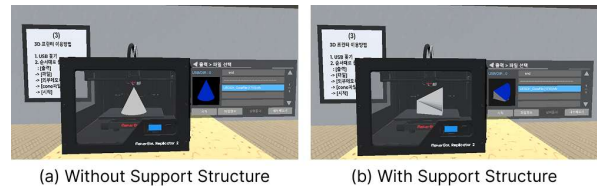


그림 1. 안내 방식 조건의 시각적 구현
Fig. 1. Visual implementation of guidance type conditions



*The text of the content is written in Korean to convey enough information.
그림 2. 지지대 구조 조건
Fig. 2. Support structure conditions

지지대 유무 조건은 두 차례에 걸쳐 제시됐으며, 각 조건에서 출력물의 제작 방식 및 특징을 비교할 수 있도록 구성됐다. 모든 체험은 현실과 유사한 가상 작업 환경에서 수행되어, 높은 몰입감을 유지한 상태에서 절차를 수행할 수 있도록 설계했다. 실험 종료 후, 참여자는 HMD를 제거하고 즉시 설문 응답했다. 측정 항목에는 현존감, SUS, NASA-TLX가 포함됐으며, 각 지지대 조건 체험 직후 설문이 이루어져 회상 편향을 최소화했다. 실험의 전체 소요 시간은 사전 안내와 사후 설문을 포함하여 약 30분이었다.

IV. 결 과

본 연구에서는 연구문제에 따라 각 변수 간의 차이 및 상호작용을 검증하기 위해 적절한 통계 분석을 수행했다. 우선, 안내 방식과 지지대 유무에 따른 상호작용 효과를 분석하기 위해 혼합 반복 측정 변량분석(Mixed Repeated Measures ANOVA)을 실시했다. 이후 각 안내 방식 조건에서의 종속변인을 독립적으로 평가하기 위해 일표본 t-검정(one-sample t-test)을 추가로 수행하였다. 이 분석은 상호 비교가 아닌, 각 조건별 평균이 기준값과 유의한 차이를 보이는지를 확인하기 위함이다. 반복측정 설계로 인해 동일 참여자(n=30)가 두 조건(지지대 유무)에 대해 응답하여 이에 대한 분석을 진행하였다. 일표본 t-검정의 기준값은 척도 특성에 따라 설정했다. 5점 리커트 척도로 측정된 변인의 경우 중립값인 3점, SUS의 경우 보통 수준으로 간주되는 70점을 기준으로 분석을 수행했다.

연구문제 1-1인 3D 프린팅 안내 방식과 지지대 유무에 따른 현존감 차이를 분석한 결과, 그룹간 상호작용 효과는 통계적으로 유의미하지 않은 것[$F(1, 28) = .89, p > .05, \eta p^2 =$

.03]으로 나타났다. 또한, 안내 방식 및 지지대 유무의 주효과 모두 통계적으로 유의미하지 않았다. 연구문제 1-2인 3D 프린팅 안내 방식과 지지대 유무에 따른 사용성 평가 차이를 분석한 결과, 그룹간 상호작용 효과는 통계적으로 유의미하지 않은 것 [$F(1, 28) = .77, p > .05, \eta p^2 = .03$]으로 나타났다. 또한, 안내 방식 및 지지대 유무의 주효과 모두 통계적으로 유의미하지 않았다. 연구문제 1-3인 3D 프린팅 안내 방식과 지지대 유무에 따른 작업부하 차이를 분석한 결과, 전체 점수 기준에서 유의미하지 않은 것 [$F(1, 28) = 1.99, p > .05, \eta p^2 = .07$]으로 나타났다. 그러나 하위 요인 중 Performance에서는 유의미한 상호작용 효과 [$F(1, 28) = 4.20, p < .05, \eta p^2 = .13$]가 확인됐다. 네 가지 조건을 확인했을 때, 지지대가 있는 텍스트 기반 가이드($M = 4.80, SE = 0.20$), 지지대가 없는 AI 에이전트 가이드($M = 4.47, SE = 0.18$), 지지대가 없는 텍스트 기반 가이드($M = 4.40, SE = 0.18$), 지지대가 있는 AI 에이전트 가이드($M = 4.27, SE = 0.20$) 순으로 나타났다. 또한, Effort 하위 요인에서는 안내 방식에 따른 주효과가 통계적으로 유의미한 것 [$F(1, 28) = 7.19, p < .05, \eta p^2 = .20$]으로 나타났다. 텍스트 기반 가이드 조건($M = 2.97, SE = 0.24$)보다 AI 에이전트 가이드 조건($M = 2.07, SE = 0.24$)에서 더 낮은 Effort가 보고됐다.

연구문제 2-1인 3D 프린팅 콘텐츠에서 텍스트 기반 가이드를 활용한 사용자의 현존감을 일표본 t -검정으로 분석한 결과 평균 4.59($SD = .55$)으로 기준값 3보다 유의하게 높았다 ($t(29) = 15.83, p < .001$). 연구문제 2-2인 3D 프린팅 콘텐츠에서 AI 에이전트 가이드를 활용한 사용자의 현존감을 일표본 t -검정으로 분석한 결과 평균 4.44($SD = .54$)으로 기준값 3보다 유의하게 높았다($t(29) = 14.71, p < .001$) (그림 3).

연구문제 3-1인 3D 프린팅 콘텐츠에서 텍스트 기반 가이드를 활용한 사용자의 사용성 평가를 일표본 t -검정으로 분석한 결과 평균 78.17($SD = 13.06$)으로 기준값 70보다 유의하게 높았다($t(29) = 3.42, p < .05$). 연구문제 3-2인 3D 프

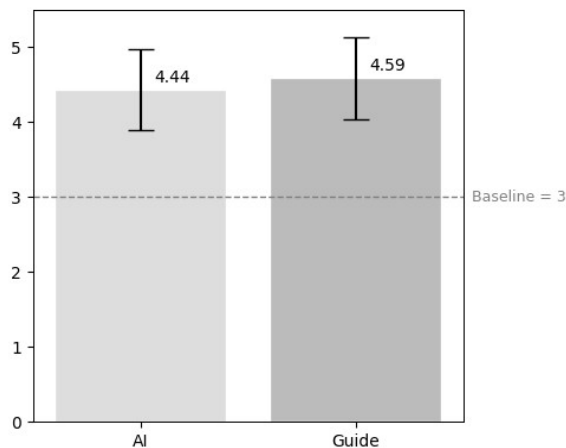


그림 3. 안내 유형에 따른 현존감 효과
Fig. 3. Effect of guidance type on presence

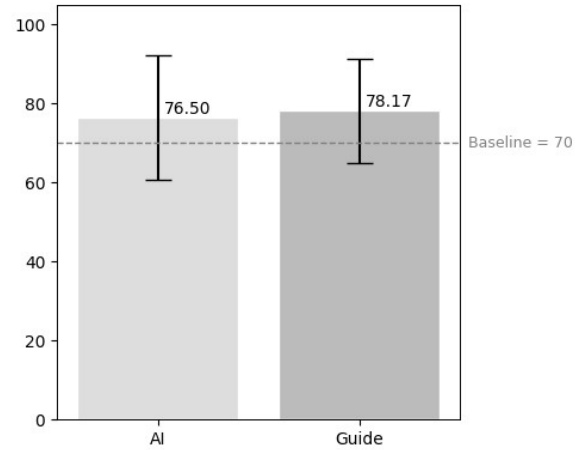


그림 4. 안내 유형에 따른 사용성 평가 점수
Fig. 4. Effect of guidance type on usability scores

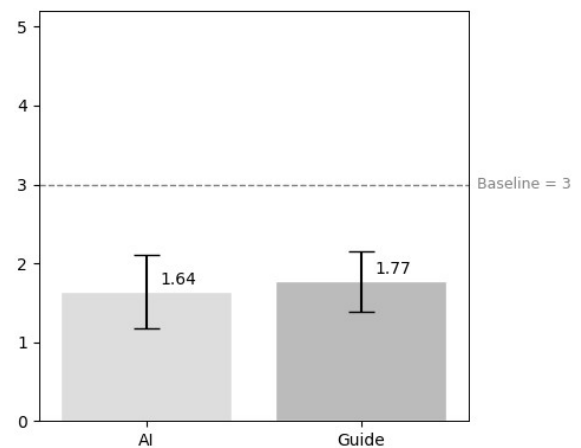


그림 5. 안내 유형에 따른 작업부하 수준
Fig. 5. Effect of guidance type on workload

린팅 콘텐츠에서 AI 에이전트 가이드를 활용한 사용자의 사용성 평가를 일표본 t -검정으로 분석한 결과 평균 76.50($SD = 15.79$)으로 기준값 70보다 유의하게 높았다($t(29) = 2.25, p < .05$) (그림 4).

연구문제 4-1인 3D 프린팅 콘텐츠에서 텍스트 기반 가이드를 활용한 사용자의 작업부하를 일표본 t -검정으로 분석한 결과 평균 1.77($SD = .38$)으로 기준값 3보다 유의하게 낮았다($t(29) = -17.62, p < .001$). 연구문제 4-2인 3D 프린팅 콘텐츠에서 AI 에이전트 가이드를 활용한 사용자의 작업부하를 일표본 t -검정으로 분석한 결과 평균 1.64($SD = .46$)으로 기준값 3보다 유의하게 낮았다($t(29) = -16.11, p < .001$) (그림 5).

V. 논 의

본 연구의 분석 결과를 종합해 볼 때, VR 기반의 3D 프린

팅 학습 환경에서 제공되는 안내 방식과 문제 상황의 유무는 현존감이나 사용성 평가에서 통계적으로 유의미한 차이를 만들어내지 않았다. 그러나 주목할 점은 두 가지 안내 방식 모두에서 현존감과 사용성 점수가 기준값을 유의하게 상회하며 전반적으로 높은 수치를 기록했다는 사실이다. 이는 안내 방식의 차이와 관계없이 본 연구에서 설계된 VR 학습 콘텐츠 자체가 학습자에게 충분한 몰입감을 제공하며, 시스템을 조작하고 활용하는 데 있어 안정적인 품질을 갖추고 있음을 의미한다. 즉, 텍스트 중심의 고전적인 방식이나 최신 AI 에이전트 방식 모두 초보 학습자가 VR 교육 도구로서 가치 있게 수용하고 몰입할 수 있는 대등한 효용성을 지니고 있다고 해석할 수 있다.

작업부하 측면에서도 의미 있는 결과가 관찰됐다. 우선 모든 조건에서 측정된 작업부하 점수가 기준값을 유의하게 하회하며 전반적으로 낮은 수치를 기록했는데, 이는 본 연구의 가이드 방식들이 초보 학습자가 VR 콘텐츠를 이용하기에 인지적으로 적절한 수준이었음을 시사한다. 비록 안내 방식과 문제 상황에 따른 전체적인 상호작용 효과는 통계적으로 유의미하지 않았으나, 하위 요인들을 구체적으로 살펴보면 학습자가 체감하는 심리적 기체에 있어 흥미로운 경향성이 발견된다.

먼저 Effort 요인에서 AI 에이전트 가이드 조건이 텍스트 기반 가이드보다 유의하게 낮은 수치를 보인 결과는, 표면적으로는 AI와의 상호작용이 학습자의 인지적 노력을 덜어준 것으로 보일 수 있다. 그러나 해당 결과는 학습자가 AI 에이전트를 적극적으로 활용하지 못했거나 상호작용의 깊이가 충분히 형성되지 않았음을 반영할 가능성이 크다. 이는 이론적 배경에서 소개한 기술 수용도와 자기효능감의 관점에서 해석될 수 있다[42],[43]. 기술 숙련도와 자기효능감이 낮은 사용자는 새로운 인터페이스를 자율적으로 탐색하고 활용하는 데 심리적 부담을 느낄 가능성이 높으며, 특히 스스로 질문을 구성하고 상호작용을 주도해야 하는 환경에서 무엇을 물어야 할지 모르는 상태는 기술 활용에 대한 확신 부족과 연결되어 수동적인 태도로 이어질 수 있다. 결과적으로 낮은 노력 점수는 인지적 효율의 향상이라기보다, 적극적인 탐색과 심층적 상호작용이 이루어지지 않아 발생한 현상으로 이해된다.

이와 연결되어 Performance 요인에서 나타난 양상은 학습자가 느끼는 성취감의 결이 안내 방식에 따라 다를 수 있음을 보여준다. 구체적으로 지지대가 있는 환경의 텍스트 기반 가이드에서 성과 인식이 가장 높게 나타난 반면, 동일하게 지지대가 있는 환경임에도 AI 에이전트 가이드를 사용했을 때 가장 낮은 성과 인식을 보이는 경향이 나타났다. 이는 학습자가 더 많은 노력을 투입하더라도 명확하고 선형적인 절차를 제공받을 때 자신의 수행을 가장 확신하는 경향이 있음을 뒷받침한다. 즉, CLT의 관점에서 볼 때, 3D 프린팅의 복잡한 절차를 익혀야 하는 본질적 부하가 높은 상황에서는 학습자가 스스로 질문을 구성해야 하는 AI 에이전트의 개방형 구조

가 외재적 부하를 더했을 가능성이 있다[54]. 반면 정해진 경로를 따라가는 텍스트 가이드의 명확한 구조가 초보 학습자에게 더 높은 심리적 안도감과 성과 인식을 제공했을 가능성이 있다.

VI. 결 론

본 연구는 3D 프린터 학습 과정에서 텍스트 기반 가이드와 AI 에이전트 가이드가 학습자에게 미치는 영향을 비교하고, 트러블슈팅 상황(지지대 유무)에 따른 효과를 함께 분석하고자 수행했다. 이를 위해 기존의 3D 프린터 VR 학습 콘텐츠를 기반으로, 학습자가 텍스트 기반 가이드의 절차를 따르는 환경과 AI 에이전트를 자율적으로 활용하는 환경으로 나누어 실험을 설계했다.

실험 결과, 텍스트 가이드와 AI 에이전트 가이드 방식 모두 현존감과 사용성 측면에서 기준치를 상회하는 점수를 기록하며 VR 학습 도구로서의 기초 품질과 교육적 활용 가능성을 보였다. 또한 전체적인 작업부하 역시 학습자가 수용 가능한 적절한 수준으로 유지되고 있음을 확인했다. 비록 두 안내 방식 간의 통계적인 유의미한 차이는 모든 변인에서 일관되게 나타나지 않았으나, 작업부하의 하위 요인 분석을 통해 초보 학습자가 새로운 인터페이스를 수용할 때 겪는 심리적 기체의 차이를 확인할 수 있었다는 점에서 본 연구의 의의가 있다. 또한, 작업부하의 세부 요인을 통해 확인된 학습자의 심리적 기체는 향후 지능형 학습 환경 설계를 위한 실무적인 시사점을 제공한다. AI 에이전트 환경에서 나타난 낮은 노력 점수는 기술적 편의성으로 해석될 여지도 있으나, 상호작용의 깊이가 충분히 형성되지 않았거나 초보 학습자의 기술 수용도 및 자기효능감 부족으로 인한 수동적 태도를 반영할 가능성이 있다. 실제로 텍스트 가이드가 제공하는 구조화된 안내는 학습자가 복잡한 절차 속에서도 자신이 수행해야 할 과업을 명확히 인식하게 함으로써 결과적으로 더 높은 성취감과 수행 자신감을 이끌어내는 경향을 보였다. 결론적으로, 초기 학습 단계에서는 AI의 자율적 기능을 강조하기보다 학습자가 길을 잃지 않도록 돕는 구체적이고 체계적인 지원이 병행되어야 함을 확인했다.

다만 본 연구는 몇 가지 한계점을 지니며, 이를 보완하기 위한 후속 연구가 필요하다. 첫째, 논의 과정에서 AI 에이전트 상호작용의 차이를 해석하기 위해 기술 수용 의도와 자기효능감의 개념을 도입하였으나, 해당 변인들을 실험 설계 단계에서 직접 측정하거나 분석 데이터에 포함하지 못했다. 이로 인해 인지적 노력과 성과 인식의 차이가 실제 기술 수용 수준이나 개인의 신념에 기인한 것인지에 대한 직접적인 근거는 충분치 않으며, 후속 연구에서는 이러한 심리적 매개 변인들을 정량적으로 측정하여 논리적 타당성을 보완할 필요가 있다. 둘째, 실험 참여자가 특정 연령대와 대학생 집단으로 국

한되어 있고 규모가 제한적이라는 점에서 연구 결과를 전 연령대나 다양한 교육 현장으로 일반화하기에는 한계가 있다. 특히 자발적 참여 신청을 통해 표집이 이루어짐에 따라 기술 수용에 적극적인 학습자들 위주로 표본이 구성되었을 가능성을 배제하기 어렵다. 또한 실험 전 참여자의 기저 수준을 동일하게 유지하기 위해 미경험자만을 선별하였으나, 사전 측정을 통해 인지적·행동적 초기 능력을 엄밀하게 통제하지 못한 점은 결과 해석 시 주의가 필요하다. 따라서 향후에는 참여 집단의 범위를 확대하고 다양한 배경 변인을 고려한 반복 연구가 수행되어야 할 것이다. 마지막으로, 단기적인 실험 참여에 따른 결과이므로 장기적인 학습 효과와 기술 숙달에 따른 인지 부하의 변화를 추적하는 중단적 연구를 통해 AI 기반 학습 시스템의 지속 가능성을 검증할 필요가 있다.

종합하면, 본 연구는 초보 학습자의 맥락에서 AI 에이전트가 반드시 학습 부담을 줄이고 효율을 높이는 것은 아님을 보여준다. 오히려 학습자가 명확한 절차와 구조 속에서 학습할 수 있는 텍스트 기반 가이드 중심의 안내 방식이 더 높은 수행감과 학습 효과를 제공할 수 있음을 확인했다. 따라서 향후 VR 기반 학습 환경 설계에서는 학습자의 숙련도와 인지적 부하 수준을 고려하여, AI 에이전트의 자율성을 유지하되 입력 부담을 완화하는 구조적 인터랙션 설계(예: 예시 질문 제시, 단계별 안내 프롬프트 제공)가 필요하다. 이는 AI 기반 학습 시스템이 단순한 정보 제공 도구를 넘어, 학습자의 인지적 특성에 적응하는 인지 지원형 에이전트로 발전하기 위한 방향성을 제시한다.

감사의 글

본 논문은 2022년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 인문사회분야 신진연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2022S1A5A8050473).

참고문헌

[1] S. H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, and L. Hou, "Additive Manufacturing and Its Societal Impact: A Literature Review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67, No. 5-8, pp. 1191-1203, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>

[2] T. Trust and R. W. Maloy, "Why 3D Print? The 21st-Century Skills Students Develop While Engaging in 3D Printing Projects," *Computers In the Schools*, Vol. 34, No. 4, pp. 253-266, October 2017. <https://doi.org/10.1080/07380569.2017.1384684>

[3] I. Singhal, G. R. Satsangee, L. Bhardwaj, G. S. Sharma, A. S. Chandrakar, H. Gupta, ... and R. S. Sharma, "3D-Printing

Virtual Simulation Lab," *IEEE Transactions on Learning Technologies*, Vol. 17, pp. 1504-1517, April 2024. <https://doi.org/10.1109/TLT.2024.3384556>

[4] R. Song and C. Telenko, "Causes of Desktop FDM Fabrication Failures in an Open Studio Environment," *Procedia CIRP*, Vol. 80, pp. 494-499, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.12.007>

[5] M. Baechle-Clayton, E. Loos, M. Taheri, and H. Taheri, "Failures and Flaws in Fused Deposition Modeling (FDM) Additively Manufactured Polymers and Composites," *Journal of Composites Science*, Vol. 6, No. 7, 202, July 2022. <https://doi.org/10.3390/jcs6070202>

[6] S.-H. Kwon and D. Hwang, "Development of 3D Printing Troubleshooting Guidelines in Virtual Reality," *Journal of Digital Contents Society*, Vol. 25, No. 7, pp. 1977-1988, July 2024. <https://doi.org/10.9728/dcs.2024.25.7.1977>

[7] M. Dodevska, E. Zdravevski, I. Chorbev, M. Kostoska, F. Branco, P. J. Coelho, I. M. Pires, and P. Lameski, "Virtual Reality as a Learning Tool: Evaluating the Use and Effectiveness of Simulation Laboratories in Educational Settings," *Social Sciences & Humanities Open*, Vol. 12, 101742, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ssho.2025.101742>

[8] L. Jensen and F. Konradsen, "A Review of the Use of Virtual Reality Head-Mounted Displays in Education and Training," *Education and Information Technologies*, Vol. 23, No. 4, pp. 1515-1529, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10639-017-9676-0>

[9] J. Bacca-Acosta, J. Tejada, R. Fabregat, Kinshuk, and J. Guevara, "Scaffolding in Immersive Virtual Reality Environments for Learning English: An Eye Tracking Study," *Educational Technology Research and Development*, Vol. 70, No. 1, pp. 339-362, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11423-021-10068-7>

[10] J. Sweller, J. J. van Merriënboer, and F. G. Paas, "Cognitive Architecture and Instructional Design," *Educational Psychology Review*, Vol. 10, No. 3, pp. 251-296, 1998. <https://doi.org/10.1023/A:1022193728205>

[11] D.-M. Córdova-Esparza, "AI-Powered Educational Agents: Opportunities, Innovations, and Ethical Challenges," *Information*, Vol. 16, No. 6, 469, May 2025. <https://doi.org/10.3390/info16060469>

[12] T. W. Liew, N. A. Mat Zin, and N. Sahari, "Exploring the Affective, Motivational and Cognitive Effects of Pedagogical Agent Enthusiasm in a Multimedia Learning Environment," *Human-Centric Computing and Information Sciences*, Vol. 7, 9, 2017. <https://doi.org/10.1186/s13673-017-0089-2>

[13] C. Zhai, S. Wibowo, and L. D. Li, "The Effects of

- Over-Reliance on AI Dialogue Systems on Students' Cognitive Abilities: A Systematic Review,” *Smart Learning Environments*, Vol. 11, 28, 2024. <https://doi.org/10.1186/s40561-024-00316-7>
- [14] R. Moreno, R. E. Mayer, H. A. Spires, and J. C. Lester, “The Case for Social Agency in Computer-Based Teaching: Do Students Learn More Deeply When They Interact with Animated Pedagogical Agents?,” *Cognition and Instruction*, Vol. 19, No. 2, pp. 177-213, 2001. https://doi.org/10.1207/S1532690XC11902_02
- [15] N. Kwon, T. S. Sun, Y. Gao, L. Zhao, X. Wang, J. Kim, and S. R. Hong, “3DPFIX: Improving Remote Novices' 3D Printing Troubleshooting through Human-AI Collaboration Design,” *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, Vol. 8, No. CSCW1, 11, April 2024. <https://doi.org/10.1145/3637288>
- [16] J. Jiang, X. Xu, and J. Stringer, “Support Structures for Additive Manufacturing: A Review,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 2, No. 4, 64, 2018. <https://doi.org/10.3390/jmmp2040064>
- [17] Y. Huang, M. C. Leu, J. Mazumder, and A. Donmez, “Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 137, No. 1, 014001, February 2015. <https://doi.org/10.1115/1.4028725>
- [18] H. A. Pearson and A. K. Dubé, “3D Printing as an Educational Technology: Theoretical Perspectives, Learning Outcomes, and Recommendations for Practice,” *Education and Information Technologies*, Vol. 27, No. 3, pp. 3037-3064, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10733-7>
- [19] N. H. Tran and N. D. M. Phan, “Analyzing the Impact of Process Parameters on Surface Roughness and Mechanical Properties in FDM 3D Printing Using Machine Learning,” *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, Vol. 19, No. 12, pp. 8709-8728, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12008-025-02313-7>
- [20] A. M. Mirzendehtdel and K. Suresh, “Support Structure Constrained Topology Optimization for Additive Manufacturing,” *Computer-Aided Design*, Vol. 81, pp. 1-13, December 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.08.006>
- [21] Ö. Özeren, E. B. Özeren, S. M. Top, and B. S. Qurraie, “Learning-by-Doing Using 3D Printers: Digital Fabrication Studio Experience in Architectural Education,” *Journal of Engineering Research*, Vol. 11, No. 3, pp. 1-6, September 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100135>
- [22] P. Blikstein, Digital Fabrication and ‘Making’ in Education: The Democratization of Invention, in *FabLabs: of Machines, Makers and Inventors*, Bielefeld, Germany: Transcript Publishers, pp. 203-222, 2013.
- [23] E. Buehler, N. Comrie, M. Hofmann, S. McDonald, and A. Hurst, “Investigating the Implications of 3D Printing in Special Education,” *ACM Transactions on Accessible Computing*, Vol. 8, No. 3, 11, May 2016. <https://doi.org/10.1145/2870640>
- [24] T. Leinonen, M. Virnes, I. Hietala, and J. Brinck, “3D Printing in the Wild: Adopting Digital Fabrication in Elementary School Education,” *International Journal of Art and Design Education*, Vol. 39, No. 3, pp. 600-615, August 2020. <https://doi.org/10.1111/jade.12310>
- [25] A. N. Antle and A. F. Wise, “Getting Down to Details: Using Theories of Cognition and Learning to Inform Tangible User Interface Design,” *Interacting with Computers*, Vol. 25, No. 1, pp. 1-20, January 2013. <https://doi.org/10.1093/iwc/iws007>
- [26] J. Sweller and G. A. Cooper, “The Use of Worked Examples as a Substitute for Problem Solving in Learning Algebra,” *Cognition and Instruction*, Vol. 2, No. 1, pp. 59-89, 1985. https://doi.org/10.1207/s1532690xci0201_3
- [27] C. A. Barbieri, D. Miller-Cotto, S. N. Clerjuste, and K. Chawla, “A Meta-Analysis of the Worked Examples Effect on Mathematics Performance,” *Educational Psychology Review*, Vol. 35, No. 1, 11, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10648-023-09745-1>
- [28] F. Paas and T. van Gog, “Optimising Worked Example Instruction: Different Ways to Increase Germane Cognitive Load,” *Learning and Instruction*, Vol. 16, No. 2, pp. 87-91, April 2006. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.02.004>
- [29] P. D. Antonenko, K. Dawson, L. Cheng, and J. Wang, Using Technology to Address Individual Differences in Learning, in *Handbook of Research in Educational Communications and Technology*, Cham: Springer International Publishing, pp. 99-114, 2020.
- [30] Y. Wang, S. Gong, Y. Cao, Y. Lang, and X. Xu, “The Effects of Affective Pedagogical Agent in Multimedia Learning Environments: A Meta-Analysis,” *Educational Research Review*, Vol. 38, 100506, February 2023. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2022.100506>
- [31] D. Han and J. Ryu, “Exploring Embodied Conversational Agents in Extended Reality for Language Learning,” in *Practitioner Proceedings of the 11th International Conference of the Immersive Learning Research Network*, Chicago: IL, pp. 38-42, June 2025. <https://doi.org/10.5619/8/8r82g517>

- [32] W. L. Johnson and J. C. Lester, "Face-to-Face Interaction with Pedagogical Agents, Twenty Years Later," *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 26, No. 1, pp. 25-36, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40593-015-0065-9>
- [33] Z. Chang, H. Bai, L. Zhang, K. Gupta, W. He, and M. Billinghurst, "The Impact of Virtual Agents' Multimodal Communication on Brain Activity and Cognitive Load in Virtual Reality," *Frontiers in Virtual Reality*, Vol. 3, 995090, November 2022. <https://doi.org/10.3389/frvir.2022.995090>
- [34] International Organization for Standardization, Ergonomic Requirements for Office Work with Visual Display Terminals (VDTs) — Part 11: Guidance on Usability, ISO, Geneva, Switzerland, ISO 9241-11:1998, pp. 22-44, March 1998.
- [35] J. Nielsen, *Usability Engineering*, San Diego, CA: Morgan Kaufmann, 1994.
- [36] J. Rubin and D. Chisnell, *Handbook of Usability Testing: How to Plan, Design, and Conduct Effective Tests*, Indianapolis, IN: Wiley Publishing, 2008.
- [37] J. Brooke, SUS: A Quick and Dirty Usability Scale, in *Usability Evaluation in Industry*, 1st ed. London, UK: Taylor & Francis, pp. 189-194, 1996.
- [38] A. Bangor, P. T. Kortum, and J. T. Miller, "An Empirical Evaluation of the System Usability Scale," *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 24, No. 6, pp. 574-594, July 2008. <https://doi.org/10.1080/10447310802205776>
- [39] J. Sauro and J. R. Lewis, *Quantifying the User Experience: Practical Statistics for User Research*, 2nd ed. Cambridge, MA: Morgan Kaufmann, 2016.
- [40] S. Ford and M. Despeisse, "Additive Manufacturing and Sustainability: An Exploratory Study of the Advantages and Challenges," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 137, pp. 1573-1587, November 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>
- [41] T. Rayna and L. Striukova, "From Rapid Prototyping to Home Fabrication: How 3D Printing Is Changing Business Model Innovation," *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 102, pp. 214-224, January 2016. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023>
- [42] A. Parasuraman, "Technology Readiness Index (TRI): A Multiple-Item Scale to Measure Readiness to Embrace New Technologies," *Journal of Service Research*, Vol. 2, No. 4, pp. 307-320, May 2000. <https://doi.org/10.1177/109467050024001>
- [43] D. R. Compeau and C. A. Higgins, "Computer Self-Efficacy: Development of a Measure and Initial Test," *MIS Quarterly*, Vol. 19, No. 2, pp. 189-211, June 1995. <https://doi.org/10.2307/249688>
- [44] P. A. Akiki, "CHAIN: Developing Model-Driven Contextual Help for Adaptive User Interfaces," *Journal of Systems and Software*, Vol. 135, pp. 165-190, January 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2017.10.017>
- [45] E. Luger and A. Sellen, "Like Having a Really Bad PA: The Gulf Between User Expectation and Experience of Conversational Agents," in *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, San Jose: CA, pp. 5286-5297, May 2016. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858288>
- [46] B. R. Cowan, N. Pantidi, D. Coyle, K. Morrissey, P. Clarke, S. Al-Shehri, D. Earley, and N. Bandeira, "What Can I Help You with?: Infrequent Users' Experiences of Intelligent Personal Assistants," in *Proceedings of the 19th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, Vienna, Austria, pp. 1-12, September 2017. <https://doi.org/10.1145/3098279.3098539>
- [47] S. Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurens, and M. A. Donmez, "An Additive Manufacturing Test Artifact," *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 119, pp. 429-459, October 2014. <https://doi.org/10.6028/jres.119.017>
- [48] D. Thomas, The Development of Design Rules for Selective Laser Melting, Ph.D. Dissertation, University of Wales Institute, Cardiff, Cardiff, UK, 2009.
- [49] S. G. Hart and L. E. Staveland, Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, in *Human Mental Workload*, Amsterdam, Netherlands: North-Holland Press, pp. 139-183, 1988.
- [50] C. D. Wickens, "Multiple Resources and Mental Workload," *Human Factors*, Vol. 50, No. 3, pp. 449-455, June 2008. <https://doi.org/10.1518/001872008X288394>
- [51] R. A. B. Prasetyo and H. Iridiastadi, "Mental Workload: Definition and Measurement Review," *International Journal of Technology*, Vol. 16, No. 5, pp. 1854-1876, September 2025. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v16i5.7072>
- [52] G. Serra, F. D. Falco, P. Maggi, R. D. Piano, and F. D. Nocera, "Website Complexity and Usability: Is There a Role for Mental Workload?," *International Journal of Human Factors and Ergonomics*, Vol. 9, No. 2, pp. 182-199, 2022. <https://doi.org/10.1504/IJHFE.2022.122393>
- [53] L. T. De Paolis, C. Gatto, L. Corchia, and V. De Luca, "Usability, User Experience and Mental Workload in a

- Storytelling in Cultural Heritage,” *Virtual Reality*, Vol. 27, No. 2, pp. 1117-1143, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10055-022-00712-9>
- [54] J. Sweller, “Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning,” *Cognitive Science*, Vol. 12, No. 2, pp. 257-285, April 1988. [https://doi.org/10.1016/0364-0213\(88\)90023-7](https://doi.org/10.1016/0364-0213(88)90023-7)
- [55] J. Sweller, “Cognitive Load Theory,” *Psychology of Learning and Motivation*, Vol. 55, pp. 37-76, 2011.
- [56] F. Paas, A. Renkl, and J. Sweller, “Cognitive Load Theory and Instructional Design: Recent Developments,” *Educational Psychologist*, Vol. 38, No. 1, pp. 1-4, 2003. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_1
- [57] P. Ø. Braarud, “Investigating the Validity of Subjective Workload Rating (NASA TLX) and Subjective Situation Awareness Rating (SART) for Cognitively Complex Human-Machine Work,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 86, 103233, November 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103233>
- [58] B. Cain, A Review of the Mental Workload Literature, Defence Research and Development Canada, Toronto, Canada, DTIC_ADA474193, pp. 1-35, July 2007.
- [59] W. Pouw, G. Rop, B. de Koning, and F. Paas, “The Cognitive Basis for the Split-Attention Effect,” *Journal of Experimental Psychology: General*, Vol. 148, No. 11, pp. 2058-2075, 2019. <https://doi.org/10.1037/xge0000578>
- [60] S. Kwon and D. Hwang, “Understanding and Resolving 3D Printing Challenges: A Systematic Literature Review,” *Processes*, Vol. 13, No. 6, 1772, June 2025. <https://doi.org/10.3390/pr13061772>
- [61] R. E. Mayer and R. Moreno, “Nine Ways to Reduce Cognitive Load in Multimedia Learning,” *Educational Psychologist*, Vol. 38, No. 1, pp. 43-52, 2003. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_6
- [62] S. Gupta, N. Rai, O. Bhattacharyya, A. Y. Y. Cheng, K. A. Connelly, L.-P. Boulet, A. Kaplan, M. C. Brouwers and M. Kastner, “Optimizing the Language and Format of Guidelines to Improve Guideline Uptake,” *Canadian Medical Association Journal*, Vol. 188, No. 14, pp. E362-E368, October 2016. <https://doi.org/10.1503/cmaj.151102>
- [63] P. Haghghat, T. Nguyen, M. Valizadeh, M. Arvan, N. Parde, M. Kim, and H. Jeong, “Effects of an Intelligent Virtual Assistant on Office Task Performance and Workload in a Noisy Environment,” *Applied Ergonomics*, Vol. 109, 103969, May 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2023.103969>
- [64] S. Asapu and Y. Ravi Kumar, “Design for Additive Manufacturing (DfAM): A Comprehensive Review with Case Study Insights,” *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 77, No. 5, pp. 3931-3951, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11837-025-07164-x>
- [65] H. D. Budinoff, S. McMains, and S. Shonkwiler, “Exploring the Impact of Design Tool Usage on Design for Additive Manufacturing Processes and Outcomes,” *Design Science*, Vol. 10, e1, 2024. <https://doi.org/10.1017/dsj.2023.34>
- [66] T. Schubert, F. Friedmann, and H. Regenbrecht, “The Experience of Presence: Factor Analytic Insights,” *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Vol. 10, No. 3, pp. 266-281, June 2001. <https://doi.org/10.1162/105474601300343603>

권슬희(Seulhee Kwon)



2024년 : 광운대학교 미디어커뮤니케이션학부 (학사)

2024년~현재 : 광운대학교 메타버스융합학과 석사과정
※ 관심분야 : HCI, UX/UI, VR/AR, AI

황동욱(Dongwook Hwang)



2019년 : 서울대학교 산업공학과 (박사)

2021년~현재 : 광운대학교 미디어커뮤니케이션학부 조교수
※ 관심분야 : 인간공학, HCI, VR/AR, 3D 프린팅, UX/UI