

디지털 적층 제조 장비의 사용자 중심 HMI 디자인 가이드 제안

PBF 방식 금속 적층 제조 장비를 중심으로

Proposing User-Centered HMI Design Guide for Digital Manufacturing

Focusing on PBF Metal Additive Manufacturing Machine

주 저 자 : 원가은 (Won, Ga Eun) 국민대학교 테크노디자인전문대학원
제품이노베이션디자인학과 석사과정

교 신 저 자 : 권효선 (Kwon, Hyosun) 국민대학교 공업디자인학과 조교수
hyosun.kwon@kookmin.ac.kr

<https://doi.org/10.46248/kidrs.2024.1.151>

접수일 2024. 02. 25. / 심사완료일 2024. 03. 03. / 게재확정일 2024. 03. 13. / 게재일 2024. 03. 30.
본 논문은 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학연협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다. 또한 본 논문은 일부 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 2022R1C1C1010883)

Abstract

With the advancement of metal additive manufacturing technology and the digitization of equipment, the need for user-centered design in HMI (Human-Machine Interface) has become increasingly apparent. However, research on design guides and usability test for industrial equipment has been lacking. Therefore, this study applied user-centered design principles to design and manufacture a prototype HMI for metal additive manufacturing equipment, followed by a usability test of the HMI prototype. Based on usability testing and in-depth interview analysis, this study proposes UX/UI design guidelines for user-centered industrial equipment HMI. The usability evaluation highlighted the need to improve the visibility of the system's real-time status, enhance interface intuitiveness for error prevention, and address emergency situations. It is crucial that the interface reflects both the visible and invisible states of the equipment, considering that the operation targets are mechanical equipment but the operating devices are HMI screens. Furthermore, for industrial equipment with numerous complex functions, it is essential to restrict or guide user actions through permission settings. Through the industrial PBF (Powder Bed Fusion) method metal additive manufacturing equipment HMI design guides proposed by this study, we anticipate the development of user-friendly and productivity-enhancing HMI designs.

Keyword

Human-Machine Interface(인간-기계 상호작용), Additive Manufacturing(적층 제조), Usability test(사용성 평가)

요약

금속 적층 제조 기술의 발전과 장비의 디지털화에 따라 HMI의 사용자 중심 디자인 필요성이 대두되고 있다. 그러나 산업용 적층 제조 장비의 디자인 가이드 및 사용성 평가에 관한 연구는 미흡하였다. 따라서 본 연구는 사용자 중심 디자인 원칙을 적용하여 금속 적층 제조 장비 HMI 프로토타입을 디자인 및 제작한 뒤, HMI 프로토타입에 대한 사용성 평가를 진행하였다. 사용성 평가와 심층 인터뷰 분석을 토대로 사용자 중심의 산업용 장비 HMI 디자인을 위한 UX/UI 디자인 가이드를 제안하였다. 사용성 평가를 통해 시스템의 실시간 상태에 대한 가시성을 높이고 오류 방지 및 긴급 상황에 대한 대처를 위한 인터페이스 직관성을 향상할 필요가 있음을 확인하였다. 특히, 조작 대상은 기계 장비지만 조작 기기는 HMI 스크린인 상황을 고려해 인터페이스 장비의 가시적, 비가시적 상태를 모두 반영하는 것이 중요하다. 또한 다수의 복합적 기능이 많은 산업용 장비일수록 권한 설정을 통해 사용자의 행동을 제한하거나 유도할 수 있어야 한다. 본 연구에서 제안한 산업용 PBF 방식의 금속 적층 제조 장비 HMI 디자인 가이드를 통해, 사용자 친화적이고 제조 생산성 향상을 위한 기계 장비 디자인 및 개발 분야에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

목차

1. 서론

1-1. 연구 배경 및 목적

2. 이론적 배경

2-1. 인간-기계 상호작용의 개념

2-2. 선행연구 분석

3. 연구 설계

3-1. 사용자 중심 인간-기계 상호작용 프로토타입 디자인

3-2. 휴리스틱 평가

3-3. 사용성 평가

4. 사용성 평가 결과 분석

4-1. 성취도 및 태스크 수행 시간

4-2. 관찰 및 심층 인터뷰 결과 분석

1. 서론

1-1. 연구의 배경 및 목적

적층 제조(Additive Manufacturing-AM)는 고밀도 열원으로 소재를 조사하여 3차원의 형상을 쌓아 만드는 대표적 디지털 제조기법으로, 대중적으로는 '3D프린팅'이라고 불린다. 가공이나 주조와 같은 전통적인 방법으로 제작이 어려운 복잡한 형상의 구현이 가능하며¹⁾, 4차 산업혁명을 주도할 기술로 주목받는다. 적층 제조는 사물인터넷(IoT), 인공지능(AI), 빅데이터와 같은 기술들과 함께 제조업의 디지털 전환을 통한 산업 구조와 제품 생산의 변화를 이끌고 있다.²⁾ 특히 2013년 이후 등장한 금속 분말 소재를 활용한 적층 제조 기술은 고부가가치의 기능성 부품을 제조하며 그 기술이 급격히 성장하였다. 금속 적층 제조기법 중 Powder Bed Fusion(PBF) 기법은 타 적층 제조기법 대비 높은 해상도와 정밀도를 지닌다. 2019년 기준 PBF(Powder Bed Fusion) 방식이 금속 적층 제조 산업 중 가장 높은 시장 점유율을 차지하였으며³⁾, 그 사용 범위가 거대 기계 장비를 사용한 부품 제작에서 작고 정밀한 공법을 요구하는 산업(예. 주얼리, 치과 보형물 제조)으로 확대되고 있다. 따라서 폭넓은 사용자 군을 위한 높은 접근성과 편의성을 가진 사용자 중심의 산업용 장비 디자인이 필요한 상황이다.

- 1) 황인석, 신창섭, Powder Bed Fusion 방식 금속 적층 제조 방식 기술 분석, 제21권, 제7호, 한국기계공학회지, 2022, p.10-20.
- 2) 홍명표, 성지현, 김영석, 금속 적층제조 기술 연구동향 및 이슈, 소성·가공, 제31권, 제5호, 2022, p.309-328.
- 3) A. Vafadar, F.Guzzomi, A. Rassau., & K. Hayward, Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges, Vol.11, No.3, Applied Sciences, 2021, p.1213

5. 논의 및 제언

5-1. 사용자 중심 HMI 개발을 위한 UX/UI 디자인 가이드 제안

6. 한계 및 후속 연구

7. 결론

참고문헌

디지털 제조 공정의 대표적 방식인 적층 제조에 도입되고 있는 자동화 및 디지털 전환은 제조업의 혁신적 변화를 주도하며, 관련 소프트웨어의 개발과 연구가 활발히 진행되고 있다. 디지털 제조 및 생산 효율 향상을 위해서는 소프트웨어의 편리한 조작이 매우 핵심적이며 이때, 인간-기계 상호작용(Human-Machine Interface, HMI)이 중요한 역할을 한다. 산업용 기계 장비에 적용된 HMI는 단순한 조작 인터페이스를 넘어서, 작업의 효율성을 높이고 생산성을 극대화할 수 있으며 산업현장의 안전을 보장하는 핵심 요소로 여겨지고 있다. 따라서, 사용자의 안전과 편의를 최우선으로 고려한 사용성 높은 HMI 디자인에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있다. HMI는 장비 내의 시각적 요소뿐만 아니라 사용자의 안전, 생산 효율성과 관련된 다양한 비가시적 기계 운용에 대한 피드백 및 사용자가 기계와 상호작용하는 총체적 경험이 고려되어야 한다. 본 연구의 목적은 PBF 방식의 금속 적층 제조 장비 HMI에 사용자 중심 디자인 원칙을 적용한 프로토타입을 제안하고, 그 사용성을 검증하는 것이다. 이를 위해 상용화된 PBF 방식의 적층 제조 장비 HMI를 분석하고 그 사용성을 개선한 프로토타입을 디자인하였다. 또한, 프로토타입의 사용성을 평가하여 향후 PBF 방식 적층 제조 장비 및 기타 디지털 제조 공정 분야에 적용될 수 있는 HMI 디자인 가이드를 도출하였다. 본 연구에서 도출된 디자인 가이드가 적층 제조 장비를 넘어 향후 스마트 제조업 분야의 대형 산업 장비 관리를 위한 사용자 경험 디자인과 인터페이스 개발에 도움이 될 것으로 예상된다.

2. 이론적 배경

2-1. 인간-기계 상호작용(HMI)의 개념

사용자와 기계 장비의 소통을 매개하는 수단을 인간

-기계 상호작용(Human-Machine Interface), 일반적으로는 HMI라고 부른다. HMI는 기계 작동을 위한 태스크 명령 수단이며, 유사한 개념인 그래픽 유저 인터페이스(GUI)와 함께 사용자 인터페이스(UI, User Interface) 영역에 속한다. GUI는 주로 컴퓨터 기기의 조작을 위해 스크린을 구성하는 그래픽 요소로 발전하였고⁴⁾ HMI는 물리적 버튼을 조작하여 기계 장비를 제어하는 방식에서 진화하였다. HMI는 사용 편의성 증진을 목적으로 기계 또는 장비의 시스템 자동화와 함께 더욱 진화하였으며, 그 과정은 [그림 1]과같이 4 단계로 분류할 수 있다.⁵⁾ HMI의 시초는 물리적 버튼을 사용하여 장비를 제어하는 수준이었다(HMI 1.0). 이후 데스크탑이나 터치패널과 같은 디지털 인터페이스를 활용한 장비 제어가 가능해졌다(HMI 2.0). 인터넷의 발전으로 원격제어가 가능해지며 데스크탑, 스마트폰, 태블릿 PC 등의 다양한 스마트기기를 하나의 플랫폼을 사용하여 제어할 수 있게 되었다(HMI 3.0). 본 연구의 대상인 금속 적층 제조 장비의 HMI는 유연한 로컬-원격제어 및 상호작용을 고려하는 3.0 단계에 속한다. 현재 활발히 연구 및 개발 중인 HMI 4.0 단계는 가상현실과 혼합현실을 사용한 장비 제어를 제안한다. 이처럼, 제조 및 생산 설비의 디지털화가 진행됨에 따라 GUI는 HMI를 이루는 하나의 요소로 볼 수 있다.

HMI는 사용자가 기계 장비를 조작할 때 가장 먼저 접촉하고 장비 상태를 직접 확인할 수 있는 수단으로, 정확한 상태 정보와 조작 방식을 표현해야 한다.⁶⁾ 특히, 산업용 기계 장비는 사용자의 안전과 직결되므로 간결하고 올바른 정보가 다양한 사용자에게 직관적으로 이해될 수 있도록 표현되어야 한다. 최근 적층 제조 장비를 포함한 제조업 분야에서 활용하는 장비가 급격히 디지털화되면서 원격 생산 관리 서비스를 제공하는 HMI의 사용성 또한 점차 중요해지고 있다.⁷⁾ 이에, 본

4) J. Reimer, A History of the GUI, Ars Technica, Vol.5, 2005, p.1-17.

5) P. Papcun, E. Kajati., & Koziorek, J., Human Machine Interface in Concept of Industry 4.0, World Symposium on Digital Intelligence for Systems and Machines, DISA, 2018, p.289-296.

6) K. Wucherer, HMI, the Window to the Manufacturing and Process Industry, IFAC Proceedings, Vol.34, No.16, IFAC, 2001, p.101-108.

7) 선복근, 한광록, 임기욱, PLC 모니터링을 위한 임베디드 HMI 시스템의 개발에 관한 연구, 전자공학회논문지-CI, 제42권, 제4호, 2005, p.1-10.

연구는 높은 사용성을 갖춘 HMI에 대한 산업적 수요를 기반으로 계획되었으며 그중, 산업용 디지털 제조 공정의 대표적 방식인 금속 적층 제조 장비 조작을 위한 HMI 디자인 가이드 제안을 목표로 수행되었다.



[그림 1] HMI의 진화

2-2. 선행 연구 분석

디지털 제조 기술이 발전함에 따라 HMI 디자인 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 적층 제조 기술과 관련된 소프트웨어 개발에 관한 선행연구를 모니터링, 범용장비 HMI, 산업용 장비 HMI, 세 가지로 분류해 볼 수 있다. 모니터링 소프트웨어 개발에 집중된 적층 제조 장비 관련 소프트웨어 연구는 디지털 체인⁸⁾, 사물인터넷(IoT)⁹⁾, 가상현실(VR)¹⁰⁾과 같은 최신 디지털 기

8) R. Bonnard, P. Mognol, & J. Y. Hascoët, A new digital chain for additive manufacturing processes, Virtual and Physical Prototyping, Vol.5, No.2, 2010, p.75-88.

9) M. Salaman, A. Elkaseer, M. Saied, H. Ali, & Scholz, S., Industrial internet of things solution for real-time monitoring of the additive manufacturing process, Proceedings of 39th International Conference on Information Systems Architecture and Technology, Part.1, ISAT, 2018, p. 355-365.

10) A. Malik, H. Lhachemi, J. Ploennigs, A. Ba, & R. Shorten, An application of 3D model reconstruction and augmented reality for real-time monitoring of

술을 활용한 연구가 속한다. 이러한 선행연구들은 새로운 기술의 통합에 중점을 두었지만, 사용자 중심 디자인에 대한 명확한 가이드 제공은 미흡하다. 또한 적층 제조 장비 디자인 관련 연구 중 일반 사용자를 대상으로 한 조작기 인터페이스 디자인¹⁶⁾ 또는 GUI 디자인 가이드에 관한 연구¹⁷⁾는 주로 FDM(Fused Deposition Modeling) 방식의 범용 적층 제조 장비를 중심으로 진행되었다. 범용성이 높은 FDM 장비는 일반 사용자의 접근성이 높아 사용성 관련 연구가 다수 행해진 바 있다. Berman et al.은 디자인 프로브를 사용하여 비숙련자에게 3D프린팅 과정을 안내하고, 3D프린팅 커뮤니티의 참여를 유도하는 방안을 탐구했다.¹¹⁾ 해당 선행연구는 프로브 제공이 비숙련자들에게 3D프린팅과 관련된 지식을 쉽게 습득할 수 있는 유용한 방법임을 시사했다. 많은 선행연구에서 다루었던 FDM 방식의 적층 제조 장비는 금속 적층 제조 장비와는 작동 방식이나 기능, 소재가 달라 선행연구에서 제안된 디자인 가이드를 적용하는 것에 한계가 있다.

한편, 제조 산업 분야에서의 HMI 디자인은 적층 제조 장비 외 산업용 장비 개발과 관련된 디자인 가이드 선행연구를 다수 확인할 수 있었다. Hossain과 Zaman은 자동화 장비 디스플레이를 분석한 뒤 색, 레이아웃 등의 GUI 디자인 가이드를 제시했다.¹²⁾ Peng-fei 외 연구자들은 정량적 분석을 통해 원자력 발전소(NPP)의 계측 및 제어 시스템에서의 배경색 선택에 대한 가이드를 제안했다.¹³⁾ 또한, Normanyo 외 연구자들은 사용자가 수동 및 자동으로 조작할 수 있는 자동화 보일러 HMI 디자인 가이드를 제안했다. 디지털 산업용 장비의 HMI 디자인 관련 연구 분야에서도 금속 적층 제조 장비에 대한 논의는 부족함을 발견하였고 특히, 디자인에 대한 사용성 평가를 진행한 최근 연구는 매우 부족함을 알 수 있었다.

additive manufacturing, Vol.81, Procedia Cirp, 2019, p.346-351.

- 11) A. Berman, K. Thakare, J. Howell, F. Quek, & J. Kim, How DIY: Towards Meta-Design Tools to Support, 26th International Conference on Intelligent User Interfaces, IUI '21, 2021, p.491-503.
- 12) A. Hossain, & T. Zaman, HMI design: An analysis of a good display for seamless integration between user understanding and automatic controls, ASEE Annual Conference & Exposition, 2012, p. 25-69.
- 13) P. Gu, W. Xi, W. Ye, J. Shi, & J. Zhao, Extenics matter-element analysis on dilemma problem in HMI design of nuclear power plant, Nuclear Engineering and Design, Vol.350, 2019, p.176-181.

따라서, 본 연구진은 디지털 제조 공정에서 PBF 금속 적층 제조 장비의 산업적 파급력을 고려할 때 사용자 중심의 HMI 디자인 가이드에 대한 필요성이 있음을 확인하였다. 본 논문에서는 현재 상용화된 금속 적층 제조 장비의 HMI 디자인을 분석하고 사용자 경험 디자인 원칙을 적용하여 개선한 프로토타입으로 실증 연구를 진행하였다.

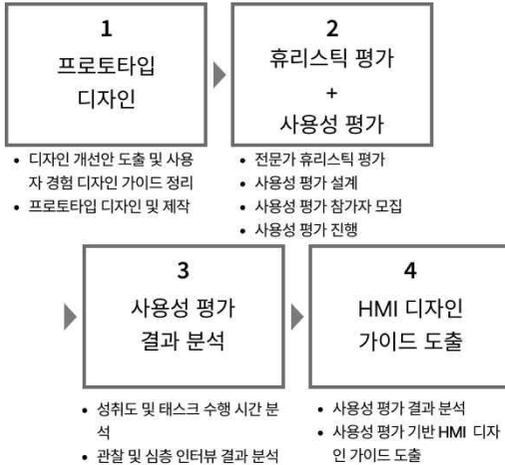
[표 1] HMI에 관련된 선행연구

분류	연구내용	저자
적층 제조 장비 모니터링 소프트웨어	G 코드 생성과 프린팅의 복합적 기능을 수행하는 디지털 체인 제안 연구	Lee et al(2010) ¹⁴⁾
	사물인터넷 기술(IoT)을 결합한 모니터링 소프트웨어 제안 연구	Salaman et al(2019) ⁹⁾
	증강현실 기술을 활용한 모니터링 방법을 제안하는 연구	Malik 외(2019) ¹¹⁾
범용(소비자용) FDM 적층 제조 장비 HMI 디자인 및 가이드 제안 연구	가정 내 사용자의 특성과 상황을 고려한 FDM 장비 조작기 인터페이스 디자인 연구	Li et al(2019) ¹⁵⁾
	적층 제조의 메타 디자인과 초보 사용자 참여에 관한 연구	Berman et al(2021) ¹¹⁾
	작업 수행 시간 단축과 오류 발생 빈도 절감을 위한 GUI 디자인 가이드 제안 연구	이재원 외(2017) ¹⁶⁾
산업용 장비 HMI 디자인 가이드 제안	자동화 장비 디스플레이 분석에 기반한 GUI 디자인 가이드 제시	Hossain & Zaman(2012) ¹²⁾
	원자력 발전소(NPP)의 계측 및 제어 시스템에서의 배경색 선택 가이드를 제시	Peng-fei et al(2019) ¹³⁾
	사용자 중심의 자동화 보일러 HMI 디자인에 관한 연구	Normanyo et al(2014) ¹⁷⁾

- 14) G. Lee, C. M. Eastman, T. Taunk, & C. H. Ho, Usability principles and best practices for the user interface design of complex 3D architectural design and engineering tools, International journal of human-computer studies, Vol.68, No.1-2, 2010, p.90-104.
- 15) X. Li, D. Zhao, & J. Zhao, J, A Design Case Study: 3D Printer Software Interface Design Based on Home Users Preferences Knowledge, Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design, Vol.1, No.1, 2019, p.639-648.
- 16) 이재원, 손석우, 정도성, FDM 3D 프린트를 위한 슬라이스 프로그램 GUI 디자인 연구. Journal of Integrated Design Research, 제16권, 제1호, 2017,

3. 연구 설계

본 연구는 현재 국내에서 생산되고 있는 PBF 방식의 금속 적층 제조 장비 HMI를 대상으로 약 11개월간 진행되었다. 연구를 위해 기존 장비 HMI를 분석하여 디자인 개선안을 도출했다. 그리고 개선안을 적용하여 HMI 프로토타입을 디자인 및 제작하였다. 마지막으로 HMI 프로토타입은 휴리스틱 평가와 원격 사용성 평가를 통해 그 사용성을 검증하고 디자인 가이드를 도출하였다.



[그림 2] 연구 과정

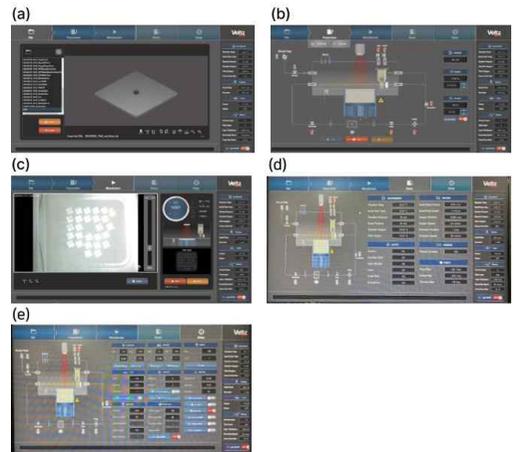
3-1. 사용자 중심 인간-기계 상호작용 프로토타입 디자인

본 연구는 2012년부터 3D 솔루션 사업부를 설립하여 다양한 적층 제조 장비를 개발하고 있는 헵시바(주)의 PBF 방식의 금속 적층 제조 장비를 대상으로 진행하였다. 연구 대상 장비는 운용에 많은 부속 부품 및 추가 기기가 필요하고 안전한 사용을 위해 필수 교육을 이수한 사용자만 작동할 수 있다. 따라서 해당 장비를 사용하고 있는 국립 한밭대학교의 3D프린팅 센터에 방문하여 사용 과정을 관찰하였다. 또한, 장비를 사용 및 관리하는 연구원과 인터페이스의 세부적인 요소에 대한 인터뷰를 약 30분간 진행하였다.

p.21-30.

17) E. Normanyo, F. Husinu, & O. R. Agyare, Developing a human machine interface (HMI) for industrial automated systems using siemens simatic WinCC flexible advanced software, Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences, Vol.5, No.2, 2014, p.134-144.

[그림 3]은 연구 대상 장비의 HMI 인터페이스를 나타낸다. 오른쪽에 장비 상태를 보여주는 모니터링 패널이 있고, 사용자가 정보를 조작할 수 있다. 다섯 가지 상위 메뉴 중 프린팅 과정에서 직접 조작이 필요한 부분은 File, Preparation, Manufacture이며 Status(장비의 상태 확인)와 Setting(장비 설정) 두 메뉴 간에 다수의 중복 기능을 발견하였다. 또한 파라미터값을 입력하는 조작부가 산재해 있어 해당 장비를 처음 다루어 보는 사용자는 조작해야 하는 요소를 모두 기억해야 하거나 특정 요소를 설정하지 않고 프린팅을 시작하는 오류를 범할 가능성이 매우 높았다. 안전을 위한 장비 점검 역시 사용자의 기억에 의존하기 때문에 항상 관리자의 점검이 필요하다. 기존 HMI에서 발견한 문제들을 개선안을 도출하는 과정에서 UX 디자인 가이드를 정리했다.

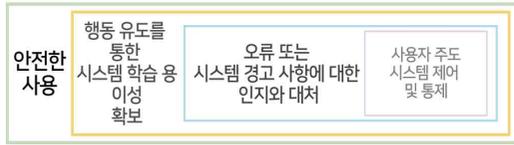


[그림 3] 연구 대상 장비의 HMI 메뉴별 화면 캡처. (a) File Uploading, (b) Machine Preparation, (c) Manufacturing (d) Status, (e) Setting.

기존 장비 분석을 기반으로 발견한 문제에 대한 디자인 개선안을 도출하였다. 개선안 도출 과정에서 산업용 장비의 HMI 개발에 적용할 수 있는 상위 레벨의 UX 디자인 가이드를 정리하였다. HMI UX 디자인 가이드는 안전에 대한 UX를 가장 상위 목적으로 고려하고 있으며 이를 위한 하위 레벨의 항목을 제시한다 [그림 4]. [표 2]의 6가지 디자인 개선안을 반영하여 메뉴 체계를 재정비하고 메뉴별 디자인 요구 사항을 정리하였다. 또한 연구자들은 HMI의 사용 과정이 실제 프린팅 과정과 유사하도록 정보 구조(information architecture)를 설계하여 연구자 간 공유하였다. 금속 적층 제조 장비를 처음 사용하더라도 인터페이스가 제

시한 순서에 따라 조작하면, 프린팅을 진행할 수 있도록 디자인하였다. 도출된 디자인 개선안과 정보 구조를 반영하여 HMI 프로토타입을 디자인하였다. 인터페이스의 구성과 프로토타입의 세부적인 내용은 사용자 테스트 및 분석 부분에서 더 자세히 설명하도록 한다.

HMI UX 디자인 가이드



[그림 4] 금속 적층 제조 장비 HMI 사용자 경험 디자인 가이드 간의 포함 관계

[표 2] 디자인 개선안과 HMI 사용자 경험(UX) 디자인 가이드

디자인 개선안	HMI 사용자 경험 디자인 가이드	금속 적층 제조 장비 HMI 사용자 경험(UX) 디자인 가이드
1 안전한 사용을 위한 행동 유도, 가이드 및 인터페이스 조작 제한	안전한 사용	안전한 사용
2 프로그램 전체의 레이아웃과 지시 방식의 일관성 유지	일관성 유지를 통한 사용 행위 유도	행동 유도를 통한 시스템 학습 용이성 확보
3 실제 장비 및 부품의 형태를 반영한 아이콘의 직관성 향상	정확한 정보 전달을 통한 사용 행위 유도	확보
4 메뉴 간 불필요한 중복 기능의 통합	메뉴에 대한 학습 용이성 증진	
5 정확한 피드백을 통한 오류 발생 최소화	오류 최소화 및 대처 방안 제공	오류 또는 시스템 경고 사항에 대한 인지와 대처
6 일반 사용자와 관리자 계정을 구분하여 설정(Setting) 가능 정도를 다르게 부여	사용 권한 분리	사용자 주도 시스템 제어 및 통제

3-2. 휴리스틱 평가

휴리스틱(heuristic) 평가는 제품이나 시스템의 사용성을 사전에 검사하는 방법으로 일련의 사용성 원칙, 즉 휴리스틱에 따라 전문가들이 상호작용 요소들을 평가하는 방법이다. 이 과정은 비교적 짧은 시간 안에 문제 대부분을 발견할 수 있으며, 사용성 평가 전에 인터페이스의 문제점을 예측하고 개선할 기회를 제공한다.²⁰⁾ 사용성 평가를 위한 휴리스틱은 기존의 표준 원

칙을 기반으로 필요에 따른 새로운 원칙을 추가하여 맞춤화할 수 있다.¹⁸⁾

본 연구에서는 제이콥 닐슨의 10가지 휴리스틱 원칙 중에, HMI 사용성 평가에 적합하다고 판단된 7가지 원칙: 시스템 상태 가시성(visibility of system status), 시스템과 현실 간의 일치(match between interface and the real machine), 사용자 제어 및 자유도(user control and freedom), 오류 방지(error prevention), 기억보다는 인지(recognition rather than recall), 사용 유연성 및 효율성(flexibility and efficiency of use), 사용자들이 오류를 쉽게 인식 및 진단, 복구하도록 지원(recognize, diagnose, and recover from errors)을 선정하고, ‘직관성과 학습 용이성(straightforward and easy to learn)’을 추가하여 총 8가지 휴리스틱 원칙으로 평가하였다. 직관성과 학습 용이성 원칙은 PBF 방식의 금속 적층 제조 장비가 향후 범용성을 갖출 것을 예상하여 반영한 항목이다. 휴리스틱 평가에는 UI/UX 디자인 분야에서 13년 경력을 가진 전문가 1인과 산업디자인을 전공한 전문가 2인이 참여하였다. 평가는 각 항목을 리커트 척도(1점: 매우 낮음, 5점: 매우 높음)로 평가하였다. 휴리스틱 평가에서 3점 이하를 받은 문항에 대해서는 사용성 평가에서 더욱 집중적으로 관찰하였다.

3-3. 사용성 평가

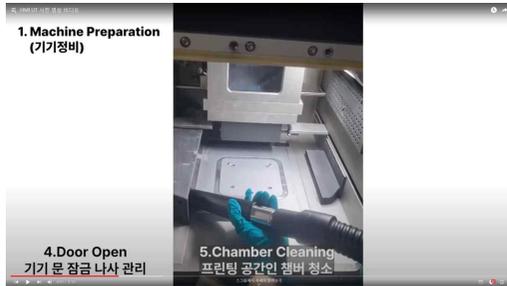
3-3-1. 사용성 평가 설계

본 연구는 HMI 소프트웨어를 개발하여 실제 산업용 장비에 완전하게 구현하기 전 단계인 HMI 디자인 및 평가 과정에 해당한다. 따라서, 사용성 평가는 장비의 모든 개발이 완료되기 전, HMI의 편의성 및 안전한 사용 유도, 학습 용이성 등을 알아보기 위해 설계되었다. 이를 위해 연구 대상 장비를 연구기관으로 운반하기보다는 원격 사용성 평가 방식에 착안하여 사용성 평가를 기획하고 시행하였다. 원격 사용성 평가 방법은 COVID-19 팬데믹으로 현장 연구를 진행할 수 없었던 많은 연구자가 화상통화나 비디오 에스노그래피 등의 방식으로 활용한 바 있다.¹⁹⁾ 연구자들은 사용성 평가

18) D. Quinones, & C. Rusu, How to develop usability heuristics: A systematic literature review, Computer Standards & Interfaces, Vol.53, 2017, p.89-122.

19) Watson, A., & Lupton, D., Remote Fieldwork in Homes During the COVID-19 Pandemic: Video-Call Ethnography and Map Drawing Methods, International Journal of Qualitative

에 앞서 해당 장비를 사용하는 모든 과정을 녹화하여 참가자들에게 적응 제조 과정을 안내하는 사전 영상 ([그림5])으로 제공하였다. 또한, 평가에 사용할 시나리오에 맞게 편집하여 장비로부터의 시각적 피드백이 필요한 경우 제공하였다. 이러한 영상 활용으로 HMI의 기능과 상호작용을 모방할 수 있는 시뮬레이션 환경을 구축할 수 있었다.



[그림 5] 금속 적층 제조 장비 사용 영상 캡처
<https://www.youtube.com/watch?v=Pd1Ua6GcnJw&list=PLCDKDYrKh4v2Dj6PsFp1Ti8M69nX0pcZV>

또한, 연구자들의 휴리스틱 평가 결과를 바탕으로 사용성 평가에서 사용될 태스크를 작성([표 5])하였다. 사용성 평가 결과는 학습 효과에 영향을 받을 수 있는데²⁰⁾, 이를 태스크 제공 순서에 적용하여 HMI에 대한 사용자의 학습 용이성을 검증할 수 있도록 설계하였다.

3-3-2. 사용성 평가 참가자 모집

본 연구는 산업용으로 개발되기 시작한 금속 적층 제조 장비의 적용 범위가 교육 및 연구, 의료기관 등에서 사용될 다양한 범용장비로도 고도화되고 있는 상황에서 비숙련 사용자에게도 높은 사용성을 제공할 수 있는 HMI 개발 필요성에서 시작되었다. 따라서, 소재나 제조 방식에 상관없이 적층 제조 장비를 사용한 경험과 이해를 가진 사용자라면 향후 범용 PBF 장비의 최종 사용자가 될 것으로 예상하였다. 따라서 PBF 장비 사용 경험 및 FDM 장비 사용 경력이 다양한 19세 이상의 성인을 대상으로 참가자를 모집하였다. 모집 과정은 연구자들의 소셜 네트워크 서비스(SNS)와 개인 네트워크를 활용하여 진행되었으며, 총 6명의 참가자가 선정되었다. 닐슨에 따르면 5명 내외의 참가자를 통해 84% 이상의 시스템 사용성 문제를 발견할 수 있

Methods, 21, 2022.

20) 이동연, 송복희, 윤한경, 박영목, 사용성 평가에 있어서 반복적 평가에 의한 학습효과와 고찰, Archives of Design Research, 1997, p.695-700.

다.²¹⁾ 이를 기반으로 본 연구진은 6명의 참가자가 프로토타입의 사용성을 검증하는데 적절한 것으로 판단하였다. [표 3]와 같이 모집된 참가자들의 인구통계학적 정보와 적층 제조 장비 사용 경력이 다양했으며 비숙련 사용자를 포함하는 넓은 사용자군을 대표한다.

[표 3] 사용성 평가 참가자 정보

참가자 ID	A	B	C	D	E	F
연령/성별	20대/ 남	20대/ 남	20대/ 여	30대/ 남	20대/ 여	20대/ 남
직업	대학생	대학생	대학원 생	연구원	대학생	대학생
FDM 장비 사용 경력	2년 이상	1년 이상	2년 이상	8년 이상	6년 이상	5년 이상
PBF 장비 사용 경험	무	무	무	유	무	무

3-3-3. 사용성 평가 진행

실험실 환경에서 진행되는 사용성 평가는 특히 원격 시스템, 위험을 수반하는 시스템, 또는 사용성의 변화를 고의로 조작해야 하는 시스템에 대한 사용성을 평가할 때 적합하다.²²⁾ 본 연구의 사용성 평가는 실험실 환경에서 약 35분간 진행되었다 [그림 6]. 사용성 평가는 [표 4]와 같이, 세션별로 약 5분, 25분, 5분 동안 소요되었다. 음성 녹음에 대한 안내는 모집 시에 안내했지만, 평가 수행 전 다시 한번 동의를 획득하였다.

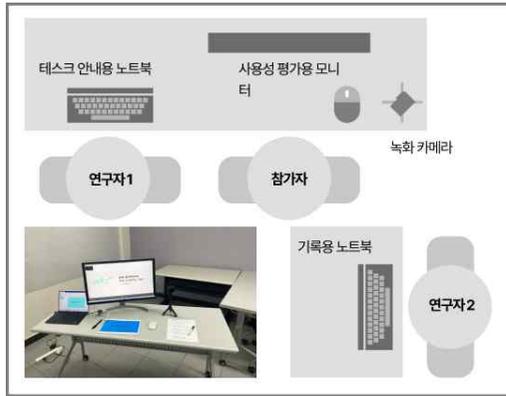
[표 4] 사용성 평가 진행

세션 설명	진행 시간	진행자
참가자 도착 및 동영상 활용한 UT 개요 설명	약 5분	연구자 1- 진행
UT 진행	약 25분	연구자 1- 진행 연구자 2- 관찰 및 기록
후속 인터뷰 및 참가자 질의응답	약 5분	연구자 1- 인터뷰 연구자 2- 관찰 및 기록

사용성 평가에 앞서 두 명의 참가자를 대상으로 진행된 파일럿 평가를 바탕으로 태스크 성공과 실패 기준을 설정하였다. 연구자들은 태스크의 난이도에 따라 수행 소요 시간을 10초 이상 25초 이내로 예상하였다. 그러나 사용자의 빠른 행동이 요구되는 태스크에 대한 시간은 5초로 축소하고, 공통으로 어려움을 표한 태스크의 예상 소요 시간을 30초로 연장하였다. 예상 시간

21) J. Nielsen,
<https://www.nngroup.com/articles/why-you-only-need-to-test-with-5-users/>, 2000

을 초과하거나 연구자의 도움을 받은 후에 태스크를 완료한 경우는 미완료, 연구자의 도움을 받고도 태스크를 완료하지 못한 경우는 실패로 평가하였다.



[그림 6] 사용성 평가 환경

4. 사용성 평가 결과 분석

4-1. 성취도 및 태스크 수행 시간

[표 5]는 태스크별 성취도와 예상 소요 시간과 함께 참가자들의 평균 수행 시간을 나타낸다. 참가자 한 명당 태스크 성취도 1점을 부여하여 최대 6점으로 기록하였다. 그리고 태스크의 평가 기준이 수행 시간과 무관한 항목들은 수행 시간을 기록하지 않았다.

[표 5] 태스크별 성취도 및 수행 시간

태스크	태스크 내용	성취도	예상 소요 시간 (초)	평균 수행 시간 (초)
T1	- 장비의 사용을 위해 다섯 가지 안전 점검이 모두 완료되었음을 확인하십시오. - Confirm 버튼을 눌러 다음 단계로 넘어 가십시오.	4/6	25	46.5
T2	- 해당 시뮬레이션 뷰를 확대해 주세요.	6/6	15	13.8
T3	- 플레이트의 위치를 가장 상단으로 옮겨주십시오.	6/6	15	13
T4	- 리코터의 위치를 0.0으로 옮기십시오. - 아이콘 버튼을 이용해 가장 우측으로 이동시키십시오.	2/6	15	33.7
T5	- 온도를 100도로 설정하여 히팅을 시작하세요. - Heating이 다 되었는지 확인되나요?	2/6	15	21.2

T6	- 깜박이는 민트색 원이 무엇을 의미한다고 생각하나요? - 파우더를 공급(Supply)한 뒤, 리코팅 (Recoating)을 진행하십시오.	2/6	-	-
T7	- 레이저를 준비한 뒤 (=Ready) 다음 단계로 넘어가세요.	6/6	10	11.7
T8	- 어느 단계 오류라고 생각하시나요? - 원인이 무엇일까요? - 최종 확인 단계로 되돌아가십시오.	5/6	-	-
T9	- 오류를 해결하였는데 인터페이스 화면에서 확인이 가능한가요?	6/6	-	-
T10	- 장비 내부의 가스 모드를 자동 (AUTO)로 변경하여 보십시오. - 가스가 공급되고 있는 게 확인되시나요?	6/6	15	16.7
T11	- 프린팅되는데 걸리는 총 시간은 얼마인가요? - 현재까지 진행된 정도는 얼마인가요?	6/6	-	-
T12	- 장비를 멈추십시오. - 장비에 오류가 발생하여 멈추게 되었는데 원인을 찾아보세요.	5/6	5	3.5
T13	- 현재 Layer는 2500 레이어 중 몇 레이어인가요? - 파우더의 잔량(Remaining Powder)은 몇입니까?	4/6	-	-
T14	- 장비 내부의 조명을 on/off 해보십시오.	1/6	15	22.6
T15	- 경고(Warning) 사항을 확인 후 해당 내용을 기입해주십시오.	1/6	30	28.3
T16	- 아래 <유의 사항>을 확인하여 조형물을 꺼내십시오(= Remove Build).	5/6	30	42.2
T17	- 아이콘 버튼을 통해 관리자 (Administer) 계정으로 로그인 후 장비의 각종 설정을 변경할 수 있는 Setting 페이지로 들어가십시오.	4/6	30	29
T18	- 모든 패널을 한 번에 열어보십시오. - Fume Filter 패널을 접어보십시오.	3/6	15	28.5
T19	- Fume Filter의 남은 사용기한은 며칠입니까?	6/6	10	4.7
T20	- Inert Gas의 설정값을 아래 <조건>에 맞게 변경해 주십시오. - Inert Gas Mode를 변경 후 달라진 점은 무엇인가요?	5/6	30	24.3
T21	HOME으로 돌아가십시오.	6/6	5	3

사용성 평가에서 참여자들은 대체로 높은 성공률을 보였다. 반면 T1, T4, T5, T6, T13, T14, T15, T17, T18 태스크에서 다소 낮은 성공률을 기록하거나 인터페이스의 의미를 확신하지 못하며 수행시간이 지체되었다. 해당 태스크들이 도출되었던 휴리스틱 항목에 대응하여 정리해 보면 [표 6]과 같다.

[표 6] 사용성 평가 태스크와 휴리스틱 대응 관계

Task No.										Heuristics
T1	T4	T5	T6	T13	T14	T15	T17	T18		
										시스템 상태 가시성
										시스템과 현실 간의 일치
										오류 방지 기억보다는 인지
										사용 유연성 및 효율성
										직관성과 학습 용이성

총 8가지 휴리스틱 항목 중 6개의 부분에 있어 여전히 다소 낮은 사용성을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 해당 태스크 수행 과정에서의 관찰 내용과 심층 인터뷰 결과를 분석하여 프로토타입 개선 방안과 향후 HMI 디자인에 고려되어야 하는 사항을 도출하고자 하였다.

4-2. 관찰 및 심층 인터뷰 결과 분석

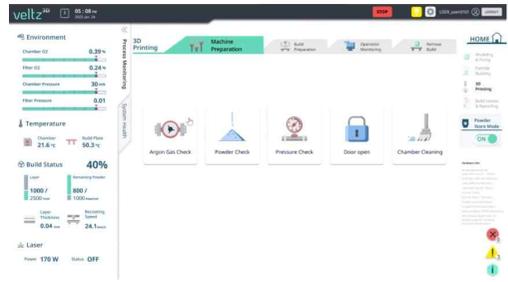
4-2-1. 프린팅 장비와 부품의 형태를 나타내는 GUI

본 연구에서 개선한 HMI 디자인에서 가장 먼저 고려한 사용자 경험은 안전한 사용이다. 따라서, Machine Preparation에서 해당 장비를 사용하기 전 점검해야 하는 다섯 개의 점검 항목 제시한다 ([그림 7]-(a)). 첫 번째 터치 이후 장비의 상태 확인을 유도하는 메시지를 'CHECK'로 나타내고, 완료 메시지는 글로잉 효과를 동반한 'Complete'로 표기하여 다음 단계로 넘어갈 수 있음을 암시하였다 ([그림 7]-(b)). 모든 점검이 완료되면 화면 오른쪽 아래 Confirm 버튼이 나타나([그림 7]-(c)) 다음 단계로 넘어갈 수 있다. T1 태스크 수행 중에 모든 참가자가 두 번의 터치 완료에 어려움을 겪었다. 참가자들이 첫 번째 터치와 두 번째 터치 사이 버튼 형태와 메시지 변화를 인지하지 못하는 것을 관찰하였다. 이는 디자인 의도였던 안전 점검

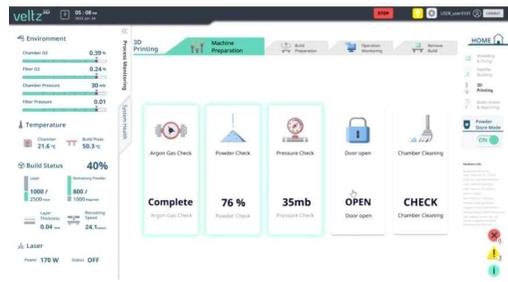
이 완료되지 않았을 때 장비 사용이 불가능하도록 제한을 두었던 점에 대해서는 효과적으로 작용하였지만, 인터페이스 가시성이 떨어지는 문제가 있음을 발견했다. PBF 장비 사용 경험이 있던 참가자 D는 장비를 직접 정비한다면 HMI가 제안하는 점검 방식의 이해가 더 용이할 것을 예상했다.

“(...) 개인적으로는 처음에 했던 부분, 넘어가는 스텝 스텝이 가장 어려웠다고 생각해요. 왜냐하면 어떤 메커니즘인 줄은 알지만, 내가 직접(장비를 다루어) 보지 않았으니까”(D, T1)

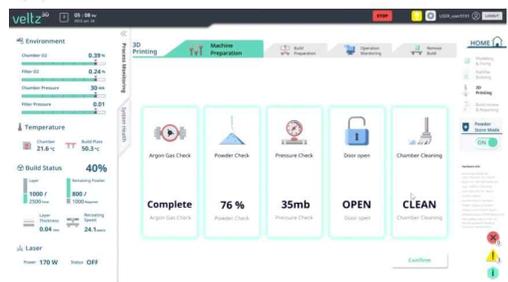
(a)



(b)



(c)

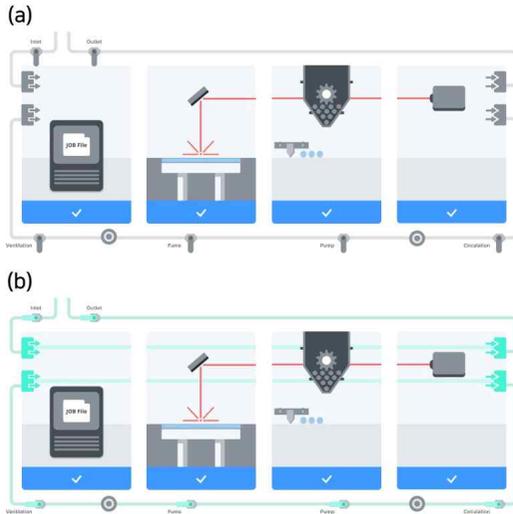


[그림 7] Machine Preparation 인터페이스의 인터랙션에 따른 변화

4-2-2. 비가시적 시스템 상태에 대한 시각적 피드백

기계 장비 시스템의 실시간 상태를 사용자들에게 시각적으로 보여주는 것은 매우 중요하다. 인터페이스 조작에 대한 피드백(feedback)이 사실상 기계 작동 반응으로 나타난다. 이는 사용자가 집중하는 인터페이스 화면

이 아니기 때문에, 실시간 상태를 시각적 UI 피드백으로 나타내는 것이 사용자의 이해를 도울 수 있다.



[그림 8] Inert Gas 모드 변경에 따른 변화

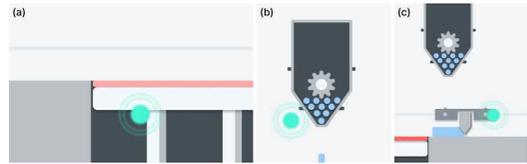
본 연구의 대상 장비는 가스, 온도, 압력과 같은 다양한 비물질적 속성을 표현한다. '가스 모드 변경 태스크(T10)를 제시하여 사용자가 HMI가 제공하는 시각적 피드백을 통해 장비의 비가시적 작동 상태를 알 수 있는지를 확인했다. 이에 대해 모든 참가자(n=6)가 가스 관 형태의 그래픽 요소의 색상이 변경되거나 밸브를 나타내는 그래픽 요소가 회전했음을 인지하였다(그림 8)). 또한 버튼 조작에 따라 플레이트의 움직임을 반영하는 시뮬레이션 뷰의 애니메이션을 HMI 프로토타입의 장점으로 언급한 참가자가 있었다. 이를 통해 가시적 작동 상태를 반영하는 시뮬레이션 뷰의 유효성을 확인했다.

"좋았던 점은 즉각적으로 시뮬레이션 뷰가 움직여서 과정을 이해하기는 쉬웠습니다." (E, T3)

4-2-3. 사용자 행동 유도

본 연구에서 개선한 HMI 디자인에서 안전만큼 중요하게 고려하였던 사용자 경험 요소는 기억에만 의존하지 않는 사용성이다. 즉, 사용자의 행동을 유도하고 쉽게 배울 수 있는 시스템 디자인을 지향하였다. 이를 위해 인터페이스 사용 과정을 장비 사용 과정에 맞추어 디자인하였고 각 단계별 기능을 사용하도록 유도하였다. [그림 9]는 프린팅 준비의 각 단계에서 설정 변경 또는 확인이 필요한 부분을 원형의 지시형 GUI로 나타

내고 있다 [그림 9)-(a) Build plate, (b) Hopper, (c) Recoater]. 따라서, 처음 사용하는 사용자들은 시스템이 유도하는 순서대로 프린팅을 준비하면서 사용 과정을 습득할 수 있다.



[그림 9] 사용자의 조작에 따라 움직이는 지시형 GUI

하지만 참가자 대부분이 해당 GUI가 터치(클릭)를 유도하는 요소로 인지하였으며 그 중 A, C 참가자는 오류를 안내하는 요소로 인지하였다. 하지만, 그 의미를 전달한 후에는 이해할 수 있었고 그 후 진행된 태스크에서는 해당 GUI에 대해 학습된 것을 바탕으로 막힘없이 진행하였다. 이처럼 사용자에게 주는 규칙적인 경험은 예측성의 효과를 주어 사용성을 향상한다.²²⁾

4-2-4. 에러(Error) 확인 및 대처

기계 장비의 안전한 사용과 행동 유도를 통한 시스템에 대한 학습 용이성 확보와 더불어, 발생한 오류 또는 시스템 경고 사항에 대한 인지와 대처 또한 HMI 디자인 시 고려해야 하는 중요한 사용자 경험 요소이다. 본 연구에서 디자인한 HMI 프로토타입은 오류의 수준에 따라 다른 인터페이스를 제공하였다. 최고 수준의 오류(예. HMI 조작을 멈추어야 하는 경우) 상황에서는 사용자의 빠른 대처가 요구되어 팝업(pop-up) 알림을 사용하였다(그림 10). T12는 T11을 진행하던 중에 예고 없이 나타나는 팝업창을 통해 장비를 멈추는 태스크로 팝업창이 모든 참여자의 즉각적인 반응을 유도할 수 있음을 확인했다. 그러나 A 참가자는 STOP 명령에 대한 옵션이 YES/NO인 것에 대한 망설임을 보였다. 따라서 명령어와 옵션 메시지가 더욱 직관적으로 개선되어야 함을 확인할 수 있었다.

²²⁾ K. Mullet, & D. Sano, Designing visual interfaces, Acm Sigchi Bulletin, Vol.28, No.2, 1996, p.82-83.



[그림 10] 최고 수준 오류 팝업창

“Stop을 yes, no로 고르는 과정에서 시간이 걸리는 것 같아요. 질문에 대한 답을 생각해야 하니까” (A, T12)

만약 장비 오작동과 사용자 실수로 오류가 발생했을 경우를 대비해 HMI는 사용자가 오류의 원인과 발생 지점을 인지하고 대처할 수 있도록 가이드 또는 방법을 제공한다. 이를 위해 오류와 에러 메시지를 다양한 방법으로 안내하였다(그림 11). Build Preparation 과정의 최종 확인 단계에서 오류가 발생할 경우(그림 11-(b)) 해당 오류의 원인을 상단 바의 아이콘을 통해 확인 할 수 있으며(그림 11-(a)), 우측 하단의 세 개의 버튼 중 오류 버튼을 터치하여 확인할 수도 있다(그림 11-(c)). 이는 사용자가 유연하게 오류를 해결할 수 있도록 하는 의도였다. 그러나 E 참가자의 응답을 통한 화면에서 중복되는 알림 요소는 사용자에게 혼란을 불러일으킬 수 있음을 발견하였다.

“오류, 경고 사인들이 항상 떠 있고 에러 표시가 중복되어서 뭘 눌러야 할지 몰랐습니다.” (E, T8)



[그림 11] Build Preparation 최종 확인 페이지와 오류 아이콘

4-2-5. 사용자 주도 시스템 제어 및 통제권

오류 상황에 대해 인지하게 하고 불가피한 상황에서 빠른 판단을 내리도록 돕는 것은 효율적인 HMI 디자인에 필수적이다. 이와 비슷한 성격의 사용자 경험 요

소로 사용자 중심의 시스템 통제권 부여가 있다. 시스템 관리자와 일반 사용자의 접근 권한을 분리하여 개별 사용자의 작업 방식을 반영하여 개인화하거나 불필요한 접근을 통제할 수 있다.

본 연구의 HMI 프로토타입은 관리자와 일반 사용자의 접근 권한을 분리하여 관리자는 시스템의 모든 부분을 설정하고 모니터링 할 수 있는 Setting 메뉴(그림 12)에 접근할 수 있도록 하였다. 사용성 테스트 과정에서 Setting 메뉴로 접근하여 몇 가지 설정을 변경하는 태스크는 가장 나중에 제시되었는데(T19, T20, T21) 이때는 HMI를 조작하고 입력하는 방식이 충분히 학습되어 참가자들 모두 무리 없이 수행하는 모습을 보였다.



[그림 12] Setting 페이지 디자인

5. 논의 및 제언

5-1. 사용자 중심 HMI 개발을 위한 UXUI 디자인 가이드 제안

본 연구에서 진행한 일련의 과정을 통하여 사용자 중심의 HMI 디자인 시 고려 해야 할 사항들을 도출할 수 있었다. 특히, 제안한 프로토타입에 대한 사용성 평가에서 참가자들이 공통으로 어려움을 표현한 특정 태스크 몇 가지를 통해 비숙련 사용자의 사용 방식을 미리 확인할 수 있었다.

본 연구에서 개선하고자 했던 적층 제조 장비의 HMI 분석을 통하여 사용자 경험 디자인 가이드를 도출하였고 이는 휴리스틱 평가 항목 도출에 사용되었다. 본 연구에서 사용된 8가지 휴리스틱을 적층 제조 장비 HMI의 UI 디자인 원칙으로 제안한다. 연구자들은 UI 디자인 원칙을 바탕으로 사용성 평가 항목과 문항을 만들어 사용성 평가를 수행하였다. UX 디자인 가이드와 UI 디자인 원칙을 적용하여 본 연구에서 도출한 적층 제조 장비 HMI의 UI 디자인 가이드를 정리하면 [그림 13]과 같다.



금속 적층 제조 장비 HMI UI 디자인 가이드

1. 장비의 가시적, 비가시적 상태를 모두 반영
2. 그룹별로 정리된 직관적 아이콘과 기능 표현을 통한 학습 용이성 향상
3. 오류 수준에 따른 시각적 정보 제공
4. 권한 설정을 통한 사용자의 행동 제한 또는 유도

[그림 13] 금속 적층 제조 장비 HMI UI 디자인 가이드

5-1-1. 장비의 가시적, 비가시적 상태를 모두 반영해야 한다.

금속 적층 제조 장비의 Human-Machine Interface(HMI)는 사용자에게 장비의 작동 상태에 관한 가시적 정보와 비가시적 정보를 모두 제공해야 한다. 가시적 상태는 빌드 플레이트의 위치, 적층 진행 상황 등이 포함되며, 사용자가 장비의 물리적 상태를 직관적으로 파악하도록 한다. 비가시적 상태는 가스 모드 및 온도 변화와 같은 눈에 보이지 않는 장비의 내부 조건을 나타낸다. 이러한 정보는 장비의 효율적인 작동을 위해 필수적이며, 사용자가 적절히 조치할 수 있도록 돕는다. HMI는 이 두 가지 유형의 정보를 효과적으로 통합하여 사용자에게 제공해야 한다. 이를 위해, 시뮬레이션 뷰와 같은 디자인 요소의 활용이 중요하다. 시뮬레이션 뷰는 장비의 실시간 작동 상태를 가시적으로 나타내며, 사용자가 장비 조작에 대한 즉각적인 피드백을 받을 수 있도록 함을 확인했다. 또한, 비가시적 작동 상태에 대한 시각적 피드백을 통해 사용자는 장비의 내부 상태에 대해 더 잘 이해하고 적절히 조정한다. 비가시적 상태의 시각적 표시는 사용자가 이

러한 중요한 작동 조건을 쉽게 인지하고 관리할 수 있게 한다.

따라서, 가시적 및 비가시적 상태 정보의 효과적인 전달은 조작 대상과 조작 기기가 분리된 HMI 스크린인 사용 상황에서 사용자가 장비를 보다 정확하고 효율적으로 제어할 수 있게 하여, 제조 과정의 안전성이 향상된다.

5-1-2. 그룹화한 직관적 아이콘과 기능 표현을 통하여 학습 용이성을 높여야 한다.

GUI 요소 그룹화는 사용자가 HMI가 제공하는 정보를 효과적으로 이해하도록 돕는다. 정보를 그룹화함으로써, 화면에 표시되는 정보의 양을 줄이고, 사용자가 필요한 정보를 쉽게 찾을 수 있도록 한다. 본 연구의 HMI 프로토타입은 중복되는 기능을 통합하고, 유사한 항목을 그룹화하여 메뉴를 구성했다. 또한, 정보의 중요도에 따라 상시 노출되는 정보와 그렇지 않은 정보를 구분하여 화면 크기가 제한적인 상황에서 화면 공간의 효율적 사용이 가능하다. 그리고 사용자는 기존에 산재해 있던 다양한 정보를 더욱 쉽게 이해하고 접근할 수 있었다. 따라서 GUI 요소를 그룹화하고 중복 기능을 통합하는 것은 사용자가 주로 사용하는 기능에 쉽게 접근할 수 있도록 함으로써, 작업 흐름을 개선하고 작업 효율성을 높일 수 있다.

또한 금속 적층 제조 장비의 다양한 기능에 대한 직관적인 아이콘 디자인이 중요하다. 아이콘은 공유된 경험과 인지적 휴리스틱에 기반하여 디자인해야 한다. 장비 부품의 형태를 반영하거나, 파일이나 돋보기 같이 보편적으로 인식되는 아이콘 형태를 활용하는 것이 직관적인 이해를 촉진하는 방법임을 입증했다. 다만 인터페이스 요소가 세대나 문화에 따라 다르게 인식될 수 있음을 고려할 때, HMI의 주 사용자 집단에 익숙한 표현을 사용하는 것이 바람직하다.²³⁾ 익숙한 표현의 제공은 사용자가 HMI와의 상호작용을 통해 필요한 정보를 빠르고 정확하게 접근할 수 있도록 한다.

5-1-3. 오류 수준에 따른 시각적 정보를 제공하여 상황에 맞는 대응 방법을 제시한다.

적층 제조 기술의 사용 범위 확장은 사용자의 다양화를 시사한다. 이는 제조 기술과 관련된 장소, 사용자,

²³⁾ 정혜경, 류한영, 사용자의 문화적 특성과 인터페이스 디자인의 상관관계에 관한 연구, 한국디자인포럼, 제14권, 2006, p.405-414.

환경이 제조업 공장 환경에서 벗어나 소규모 작업장이나 학교 등으로 확장됨을 의미한다.²⁴⁾ 사용자의 지식과 숙련도의 차이에 따라 같은 기술을 사용하더라도 오류 발생 가능성이 달라지므로, 사용자의 안전을 최우선 해야 한다. Dearden과 Harrison은 HMI 디자인 전 또는 디자인 중 인적 오류(human error)를 예측하고 방지하는 디자이너의 역할을 강조했다.²⁵⁾ 동시에 노먼은 시스템에서 발생할 수 있는 오류를 사용자가 쉽게 되돌릴 수 있어야 한다고 주장했다.²⁶⁾ PBF 방식의 금속 적층 제조 장비와 같은 산업용 기계 장비는 그 규모가 크고 고가의 소재를 사용한다. 따라서 조작 과정에서의 오류를 최소화하는 것은 제조업 생산성과 직결된다. 사용자 실수나 장비 오작동으로 인한 오류의 경우, 그 유형과 위험 수준이 다양하다. 성공적인 HMI 개발을 위해서는 오류 발생 후 사용자가 신속하게 판단하고 대처할 수 있도록 돕는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 오류의 유형과 심각도에 따라 다른 시각적 표현을 사용하여 사용자가 가장 심각한 문제를 먼저 해결할 수 있도록 도왔다. 사용성 평가 결과, 가장 중요한 오류를 팝업창으로 알리는 것이 사용자의 빠른 대응을 가능하게 하는 효과적인 방법임을 확인했다. 시각적 요소의 차별화를 통해 사용자는 오류의 심각도를 한눈에 파악할 수 있으며, 특히 긴급한 상황에서 빠른 대응이 필요할 때 중요하다. 그러나 'Stop' 명령어에 대한 응답 방식을 YES/NO에서 STOP/NO로 변경하여 질문에 대한 답을 판단하는 과정을 줄일 수 있다.

5-1-4. 적절한 통제권을 부여하여 사용자의 행동을 제한 또는 유도해야 한다.

적층 제조 과정을 안전하게 수행하기 위해 사용자가 조작할 수 있는 HMI 기능을 제한하거나 사용자의 행동을 유도하는 것이 필요하다. 사용성 평가를 통해 특정 조건 달성 후 다음 단계로 넘어갈 수 있는 버튼을

24) D. Rejeski, F. Zhao, & Y. Huang, Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing, Additive Manufacturing, Vol.19, 2018, p.21-28.

25) A. M. Dearden, & M. D. Harrison, Risk analysis, impact and interaction modelling, Design, Specification and Verification of Interactive Systems' 96: Proceedings of the Eurographics Workshop in Namur, 1996, p.229-247.

26) D. A. Norman, Design rules based on analyses of human error, Communications of the ACM, Vol.26, No.4, 1983, p.254-258.

활성화하는 기능이 사용자의 통제권을 제한하면서 동시에 조건 달성을 위한 행동을 유도하는 효과적인 방법으로 확인되었다. 이는 사용자의 실수를 줄이고 장비의 안전한 사용을 보장하는 데 도움이 된다. 그리고 관리자과 일반 사용자의 접근 수준을 구분하여 안전성이 보장된 기능만 접근하도록 했다. 일반 사용자가 실수로 중요한 기능을 변경하거나, 시스템에 해를 끼칠 수 있는 작업을 실행하는 것을 방지한다. 더 나아가 일반 사용자의 경우 자신에게 필요한 기능에 집중하며 시스템을 더 빠르게 배울 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구에서 제시한 디자인 가이드는 UX 디자인 가이드와 UI 디자인 원칙과 함께 종합적으로 고려되어야 한다. 이를 통해 사용자가 금속 적층 제조 장비를 더 효과적이고 안전하게 사용할 수 있도록 유도할 수 있으며, 비숙련 사용자의 학습 부담을 줄이고 제조 과정의 효율성을 높일 것으로 기대된다. [표 기]은 본 섹션에서 논의한 디자인 가이드에 따라 금속 적층 제조 장비에 적용할 수 있는 디자인 상세 전략을 제시하였다.

[표 기] 산업용 PBF 방식 금속 적층 제조 장비 디자인 가이드 및 디자인 상세 전략

디자인 가이드	디자인 상세 전략
장비의 가시적, 비가시적 상태를 모두 반영해야 한다.	온도, 가스 모드 변경과 같은 비가시적 장비 변화는 가스 밸브 아이콘의 색 변화, 움직임을 통해 사용자에게 안내한다. 플레이트의 이동, 적층 제조 상황과 같은 가시적 장비 변화에 대한 정보를 제공하는 시뮬레이션 뷰를 제공한다.
그룹별로 정리된 직관적 아이콘과 기능 표현을 통하여 학습 용이성을 높여야 한다.	메뉴 간 중복 되는 기능은 통일한다. 유사한 메뉴와 아이콘 항목은 그룹화한다. 항상 노출되는 정보와 그렇지 않은 정보를 구분하여 인터페이스 내에 적절한 양의 정보를 제공한다. 장비 부품의 형태를 유지한 아이콘 및 인터페이스의 시각적 요소를 제공한다. 파일, 돋보기와 같이 보편적으로 사용되는 아이콘 형태를 사용한다.
오류 수준에 따른 시각적 정보를 제공하여 상황에 맞는 대응 방법을 제시한다.	오류 유형과 심각도에 따라 색, 버튼의 등장 방식을 다르게 표현한다. 가장 긴박한 오류로 장비 작동을 멈출 시, 사용자의 사고 과정을 최소화할 수 있는 버튼을 제공한다.
적절한 통제권을 부여하여 사용자의 행동을 제한 또는 유도해야 한다.	특정 조건을 달성한 이후 다음 단계로 넘어가는 버튼을 활성화하여 사용자의 통제권을 제한한다. 특정 조건을 달성한 이후 다음 단

	계로 넘어가는 버튼을 활성화하여 조건 달성을 위한 사용자의 행동을 유도한다.
	관리자와 일반 사용자가 접근할 수 있는 메뉴의 수준을 구분하여 일반 사용자는 안전성이 보장된 기능만을 접근하도록 한다.

6. 한계 및 후속 연구

도출된 금속 적층 제조 장비의 HMI 디자인 가이드는 다양한 후속 연구에 사용될 수 있을 것으로 기대한다. 하지만 본 연구의 다양한 한계점을 보완하여 진행되어야 할 것이다. 우선, 실험실 환경에서 비숙련 잠재적 사용자 6명을 대상으로 진행한 연구로서 한계점이 있다. 다수의 사용자를 대상으로 평가한다면 결과의 객관성을 확보할 수 있고 다양한 피드백을 수집할 수 있을 것이다. 또한, 본 연구 과정에서 디자인한 HMI의 소프트웨어 개발이 완료된 후 실제 장비에 적용되었을 때의 사용성 평가를 후속 연구로 계획하고 있다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 디자인 가이드를 검증할 수 있을 것이다. 또한, 개발된 장비의 사용성 평가는 장비를 사용하는 실제 현장에서 적층 제조 분야 종사자들을 대상으로 진행할 수 있으며 더 많은 수의 참가자를 모집할 수 있을 것으로 예상된다. 다수의 참가자를 대상으로 수행된 사용성 평가에서는 정량적인 데이터를 수집할 수 있는데 이는 통계분석을 통하여 본 연구에서 진행한 정성적 분석 방법을 보완해 줄 수 있을 것이다. 그리고 본 연구에서 제안된 디자인 가이드는 특정 장비의 HMI 프로토타입 디자인과 사용성 평가 결과를 기반으로 하고 있다. 따라서 실제 사용자로부터 지속적인 피드백을 수집 및 반영하여 디자인 가이드를 개선할 수 있다.

7. 결론

본 연구는 금속 적층 제조 기술의 발전과 함께 적층 제조 장비 사용 범위의 확대에 따른 HMI 디자인 가이드의 필요성에서 시작되었다. 특히, 전통적 제조 방식으로는 불가능한 형상의 제작 및 원격 제조의 가능성을 포함하는 금속 적층 제조 기술의 발전이 산업의 디지털 전환을 촉진하고 있다는 점에서 금속 적층 제조 장비 HMI 디자인에 대한 가이드는 중요하다. 연구를 통해 도출된 핵심 발견 사항은, 적층 제조 기술의 이해와 활용을 극대화하기 위해 특별히 고려해야 할 HMI 디자인 가이드 제공이다.

연구에서 도출된 HMI 디자인 가이드는 안전한 사용을 위한 인터페이스를 우선하여 강조한다. 장비 내부의 부품이나 재료의 움직임과 같은 가시적 상태뿐만 아니라, 압력 및 온도, 가스 농도와 같이 비가시적이기 때문에 안전에 치명적일 수 있는 장비의 상태를 HMI에 표현하여 사용자가 제조 과정과 상황을 명확하게 이해할 수 있도록 해야 한다. 다양한 숙련도의 사용자가 사용할 수 있는 상황을 고려하여 텍스트 기반의 메뉴 이름과 시각적 아이콘을 활용하여 다양한 사용자 간의 원활한 소통과 직관적 이해를 도울 수 있어야 한다. 사용자의 통제권을 제한하거나 오류 수준에 따른 디자인을 제안하는 것 역시 사용자의 안전을 최우선으로 하는 방법임과 동시에 고가의 소재가 낭비되지 않도록 하여 경제적 손실을 최소화하는 방법이다.

본 연구는 금속 적층 제조 기술을 활용하는 산업 분야에 있어서 사용자 중심의 HMI 디자인이 안전하고 효율적인 제조 공정에 기여할 수 있음을 시사한다. 또한, 도출된 가이드와 발견 사항은 향후 스마트 제조업 분야의 연구에도 활용될 것으로 기대하며, 사용자의 안전과 장비 사용의 효율성을 증진하는 방향으로 제조 산업과 연구에 기여할 것으로 전망된다.

참고문헌

1. 선복근, 한광록, 임기욱, PLC 모니터링을 위한 임베디드 HMI 시스템의 개발에 관한 연구, 전자공학회논문지-C, 제42권, 제4호, 2005.
2. 이동연, 송복희, 윤한경, 박영목, 사용성 평가에 있어서 반복적 평가에 의한 학습효과의 고찰, Archives of Design Research, 1997.
3. 이재원, 손석우, 정도성, FDM 3D 프린트를 위한 슬라이스 프로그램 GUI 디자인 연구. Journal of Integrated Design Research, 제16권, 제1호, 2017.
4. 정혜경, 류한영, 사용자의 문화적 특성과 인터페이스 디자인의 상관관계에 관한 연구, 한국디자인포럼, 제14권, 2006.
5. 홍명표, 성지현, 김영석, 금속 적층제조 기술

- 연구동향 및 이슈, 소성가공, 제31권, 제5호, 2022.
6. 황인석, 신창섭, Powder Bed Fusion 방식 금속 적층 제조 방식 기술 분석, 제21권, 제7호, 한국기계공학회지, 2022.
 7. A. Berman, K. Thakare, J. Howell, F. Quek, & J. Kim., How DIY: Towards Meta-Design Tools to Support, 26th International Conference on Intelligent User Interfaces, IUI '21, 2021.
 8. A. Hossain, & T. Zaman, HMI design: An analysis of a good display for seamless integration between user understanding and automatic controls, ASEE Annual Conference & Exposition, 2012.
 9. A. M. Dearden, & M. D. Harrison, Risk analysis, impact and interaction modelling, Design, Specification and Verification of Interactive Systems' 96: Proceedings of the Eurographics Workshop in Namur, 1996.
 10. A. Malik, H. Lhachemi, J. Ploennigs, A. Ba, & R. Shorten, An application of 3D model reconstruction and augmented reality for real-time monitoring of additive manufacturing, Vol.81, Procedia Cirp, 2019.
 11. A. Vafadar, F. Guzzomi, A. Rassau., & K. Hayward, Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges, Vol.11, No.3, Applied Sciences, 2021.
 12. D. A. Norman, Design rules based on analyses of human error, Communications of the ACM, Vol.26, No.4, 1983.
 13. D. Quinones, & C. Rusu, How to develop usability heuristics: A systematic literature review, Computer Standards & Interfaces, Vol.53, 2017.
 14. D. Rejeski, F. Zhao, & Y. Huang, Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing, Additive Manufacturing, Vol.19, 2018.
 15. E. Normanyo, F. Husinu, & O. R. Agyare, Developing a human machine interface (HMI) for industrial automated systems using siemens simatic WinCC flexible advanced software, Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences, Vol.5, No.2, 2014.
 16. G. Lee, C. M. Eastman, T. Taunk, & C. H. Ho, Usability principles and best practices for the user interface design of complex 3D architectural design and engineering tools, International journal of human-computer studies, Vol.68, No.1-2, 2010.
 17. J. Reimer, A History of the GUI, Ars Technica, Vol.5, 2005.
 18. K. Mullet, & D. Sano, Designing visual interfaces, Acm Sigchi Bulletin, Vol.28, No.2, 1996.
 19. K. Wucherer, HMI, the Window to the Manufacturing and Process Industry, IFAC Proceedings, Vol.34, No.16, IFAC, 2001.
 20. M. Salaman, A. Elkaseer, M. Saied, H. Ali, & Scholz, S., Industrial internet of things solution for real-time monitoring of the additive manufacturing process, Proceedings of 39th International Conference on Information Systems Architecture and Technology, Part.1, ISAT, 2018.
 21. P. Gu, W. Xi, W. Ye, J. Shi, & J. Zhao, Extenics matter-element analysis on dilemma problem in HMI design of nuclear power plant, Nuclear Engineering and Design, Vol.350, 2019.
 22. P. Papcun, E. Kajati., & Koziorek, J., Human Machine Interface in Concept of Industry 4.0, World Symposium on Digital Intelligence for Systems and Machines, DISA, 2018.
 23. R. Bonnard, P. Mognol, & J. Y. Hascoët, A new digital chain for additive manufacturing processes, Virtual and Physical Prototyping, Vol.5, No.2, 2010.
 24. Watson, A., & Lupton, D., Remote

Fieldwork in Homes During the COVID-19 Pandemic: Video-Call Ethnography and Map Drawing Methods, *International Journal of Qualitative Methods*, 21, 2022.

25. X. Li, D. Zhao, & J. Zhao, J, A Design Case Study: 3D Printer Software Interface Design Based on Home Users Preferences

Knowledge, *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, Vol.1, No.1, 2019.

26. J. Nielsen,

<https://www.nngroup.com/articles/why-you-only-need-to-test-with-5-users/>, 2000