

금속 3D프린팅 통합 제어 및 모니터링 시스템 개발을 위한 프레임워크에 관한 연구

전병주¹, 이선규², 이승희², 장성호^{3*}, 정구상⁴
¹금오공과대학교 산업경영학과 박사과정, ²금오공과대학교 경영학과 교수
³금오공과대학교 산업공학과 교수, ⁴(주)컨셉션 대표이사

A Case Study on the Framework Development of the Metal 3D Printing Control & Monitoring System

Byung-Ju Jeon¹, Sun-Kyu Lee², Seung-Hee Lee²
Sung-Ho Jang^{3*}, Goo-sang Jung⁴

¹Ph.D Student, Department of Business Administration, Kumoh National Institute of Technology

²Professor, Department of Business Administration, Kumoh National Institute of Technology

³Professor, Department of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology

⁴CEO, Conception. co., Ltd.

요약 본 연구는 최근 새로운 제조 수단으로 각광받고 있는 3D프린팅 기술의 통합제어 시스템과 품질개선을 위한 모니터링 SW 기술개발을 위한 프레임워크 및 연구개발 방향을 제시하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 금속프린팅 기술로 조명되고 있는 DED와 PBF 3D프린팅 기술의 통합 제어기술 개발 Framework와 최근 반도체 장비 등에서 큰 관심을 받고 있는 음향센서를 이용한 모니터링 기술 등 품질 개선을 위한 4가지 모니터링 기술을 제안 소개하고자 한다. 본 연구를 위하여, 국내 3D프린팅 전문기업인 (주)컨셉션, 원광이엔텍(주), (주)디이엔티 등에서 개발 중인 국내 최신 금속 3D프린팅 시스템 장비를 활용하여 연구하였으며(1KW급 Dual Laser PBF 및 DED 프린팅 시스템), 2017년 이래 지속적인 연구개발을 수행해온 경험을 바탕으로 다음세대 3D프린팅 개발자를 위한 연구초안을 제시함으로써 국내 3D프린팅 기술 발전 및 연구개발 협력을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

주제어 : 3D프린팅, 모니터링시스템, 통합제어, 적층가공, SW개발

Abstract This study present to Framework & R&D direction of the 3d printing Integrated Control & Monitoring System. To ensure this purpose, we developed integrated 3d printing control system Framework for DED & PBF and we introduce 4 monitoring system include photo diode, gas flow, acoustic and spectrometer sensors. For this study, we utilize metal 3d printing system from Conception., OKE Tech and DE&T who are still developing Metal 3D Printing Technology since 2017. In the result, we represent the latest 3D Printing Control and Monitoring System for the next 3D Printing researcher and we hope this study will be used as a basic reference and data for Cooperation between mechanic, electronic and material fields.

Key Words : 3D Printing, Monitoring System, Integrated Control, SW Development

*This thesis is supported by research on the development of monitoring techniques and software for improving the quality of DED and PBF metal 3D printing processes(2019-0-01692).

*Corresponding Author : Sung-Ho Jang(ceo@conception.co.kr)

Received October 15, 2020

Revised November 2, 2020

Accepted November 20, 2020

Published November 28, 2020

1. 서론

최근 20년간 3D SW기술과 Laser 기술의 발전은 적층제조 및 금속3D프린팅 기술의 빠른 산업화를 주도해 오고 있다. 3D프린팅으로 알려진 적층 제조기술은 제조 공정에 보다 많은 옵션을 제공하며, 높은 수준의 소프트웨어를 기반으로 작동하기 때문에 복잡한 기하학적 모델을 생산할 수 있다. 그 외에도 적층 제조는 전통 제조업 대비 재고 감소와 제조프로세스 간소화를 통한 생산 분산 기능 또한 가능하게 한다. 뿐만 아니라, 3D프린팅은 시제품 제작이나 대량 맞춤화가 요구되는 제조 부품에 적용되는 등 이미 여러 기술과 산업에도 크게 기여해왔다[1].

하지만, 3D프린팅 관련 소재, 부품, SW 등 기술요소들의 발전 수준은 높은 편이지만, 금속3D프린팅을 이용한 제품 개발 및 제작 기술은 신뢰할 만한 수준으로 실현되지 못하고 있다. 이는 금속프린팅 출력물의 품질 경쟁력 향상을 위하여, 금속분말이 용융되면서 발생하는 기공 및 불량 최소화를 위한 모니터링 기술의 부재로 야기되었으며, 글로벌 선진기업들은 금속3D프린팅 기술요소뿐만 아니라, 모니터링 기술에 큰 관심을 가지고 품질향상을 통한 차세대 제조산업을 준비해나가고 있다.

이러한 공정 모니터링과 제품 품질 보장은 적층 제조 기술의 산업화 실현을 위하여 해결해야 할 중요한 사안으로 간주된다. 따라서 본 연구에서 제시하는 금속프린팅 시스템 최적화를 위한 모니터링 기술은 프린팅 공정의 오류와 결함을 감지하여 소재 및 시간 낭비를 줄이는데 도움이 될 것이다.

한편, 3D프린팅 출력의 기본 단계 중 오류 및 결함 감지 시 알람이 발생하거나 출력 사이클을 중단하여 다음 레이어 출력을 위한 교정조치를 취할 수 있다. 또한, 다양한 종류의 출력 오류 및 결함의 분류에 따라 출력 파라미터가 적절하게 변경될 수 있다. 예를 들어, 모니터링 시스템에서 레이저 출력밀도가 정상보다 낮은 것을 발견하면, 시스템은 출력밀도를 증가시킬 수 있다. 본 논문에서는 금속3D프린팅 출력과정을 모니터링하고 제어하기 위한 새로운 프레임워크를 제안하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 LabView를 활용하여 SW 프로그램 및 그래픽을 구현하였으며, PBF 및 DED 금속 프린팅 제어 패널 및 모니터링 시스템으로 구성하였다. 또한 모니터링 시스템은 데이터 수집을 위한 DAQ보드 및 분광기로 구성하였으며, 시스템은 머신 러닝 모델의 결과를 바탕으로 머신 러닝 과정에서의 오류와 결함을 분류하고 자동 리셋

이 가능하도록 구성하여, 머신러닝 기술 실험 및 데이터 수집에 특화될 수 있도록 하였다.

또한, 이 논문에서는 여러 센서(음향 센서, 가스 센서, 포토 레지스터, 광 센서, 분말 센서 및 분광기)를 사용하여 층별로 출력 프로세스를 제어하는 금속 3D프린팅 출력 공정 모니터링 모델을 제안했으며, 모든 분석은 데이터베이스에서 이루어진다.

2장에서는 금속 3D프린팅 방법과 공정 모니터링에 대한 간략한 배경을 설명한다. 3장에서는 통합 3D프린팅 SW 설계 및 개념도를 설명하며, 4장에서는 통합 SW 개발을 위한 Framework를 중점적으로 소개한다. 마지막으로, 5장에서는 향후 연구개발을 위한 시사점 및 결론을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 금속 3D프린팅

3D프린터는 합성고분자 폴리머 수지나 금속 부품을 프린팅 할 수 있다. 3D프린팅 활용의 기록을 보면, 플라스틱 계열 합성고분자는 약 40여년 전부터 3차원 형상을 구현해왔으며, 금속3D프린팅 기술은 약 20년 전부터 독일과 미국을 중심으로 3D프린팅 전문기업 EOS와 3D Systems社 등에서 구현해왔다[2]. 분명 합성고분자를 3차원 구현하는 3D프린팅 기술 또한 훌륭한 기술이지만, 다수 제조업 및 중공업 산업분야에서는 금속 부문 3D프린팅 기술에 크게 주목해왔으며, 금속분말을 고출력 레이저로 용융하여 3차원 형상을 만드는 방식에 주목하고 있는 점을 반영하여[3, 4], 본 연구에서는 고출력 레이저를 활용한 금속 3D프린팅 기술에 초점을 맞추고자 한다.

적층제조기술위원회(ASTM, American Society for Testing and Materials) F42는 7개 중 5개 분야에 금속 재료를 프린팅할 수 있는 적층 제조 용어 목록을 제공했다[5, 6]. DED(Direct Energy Deposition)과 PBF(Powder Bed Fusion) 두가지 방식이 금속프린팅을 대표하는 주요 기술들이며, 본 논문 또한 DED 및 PBF에서 구현되는 제어 SW 및 모니터링 기술을 다루고 있다.

PBF 시스템은 분말공급을 위한 리코팅(recoating) 메커니즘으로 구성된 분말 증착 방식을 사용하여 분말층을 적층부와 분말저장부에 분산시킨다. 가장 일반적인 PBF 시스템은 선택적 레이저 소결(SLS), 선택적 레이저 용융(SLM) 방식이 있으며, Fig. 2는 일반적인 SLM 프로세스를 나타낸 것이다. SLM의 과정에서는 50개 이상의

변수(레이저 및 광학 변수, XYZ 제어변수, 금속용융 제어 및 매개변수, 온습도 등 환경변수)가 프린팅 품질에 영향을 미칠 수 있으므로 프로세스 물리학과 프로세스 모니터링에 대한 이해가 매우 중요한 공정 기술 시스템이다[3].

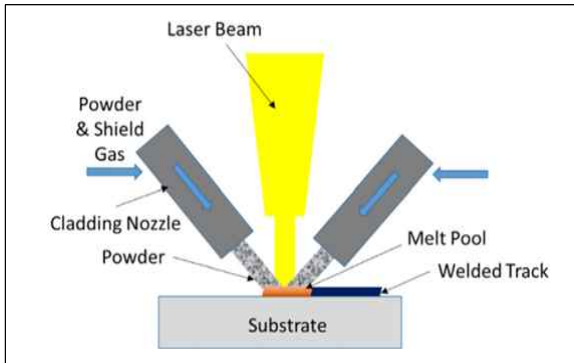


Fig. 1. Schematic of DED process with powder feeding mechanism

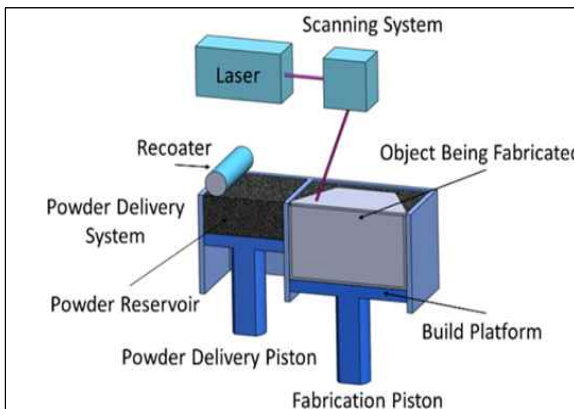


Fig. 2. An Example of a typical PBF process

반면 DED 공정은 금속 기반의 적층 제조 공정으로, 공급되는 대로 재료를 녹여 금속 3D부품을 만들 수 있다. DED 시스템은 PBF 시스템과 달리 파우더 베드에 미리 놓여져 있는 금속분말 소재를 녹이지 않고, 직접적으로 공급하면서 금속소재를 녹이는 데 사용된다. DED 시스템 이동 매커니즘에는 (1) 증착/노즐 헤드가 이동하는 동안 기판이 정지 상태를 유지하고, (2) 기판이 이동하는 동안 증착/노즐 헤드가 정지 상태를 유지하는 두 종류가 있다. 분말 공급 시스템이 있는 대표적인 DED는 Fig. 1 과 같이 Laser Engineered Net Shaping(LENS)이다. DED 공정이 기존의 용접공법과 유사하기 때문에 Melting Point와 Melting Zone의 온도 모니터링이 주요 연구 분야가 되어 왔다.

2.2 금속 3D프린팅 공정 모니터링

금속 3D프린팅 기술은 금속출력물의 형상, 강도, 밀도 등 일정한 상태를 유지한 출력물을 제작하여야 하기 때문에, 공정기술이 집약된 특성을 가지고 있으며, 금속 프린팅 생산공정의 품질 보장은 영구적으로 모니터링 되면서 가공정보에 대한 분석을 실시하여야 한다. 금속 3D프린팅 시스템의 복잡한 특성 때문에 프로세스 모니터링 및 제어는 다양한 생산 공정 및 모니터링 공정 프로세스를 필요로 하며[7,8], 효과적인 모니터링 시스템 개발을 위하여 데이터를 수집, 오류Data 추출 및 분석을 통하여 금속프린팅의 품질을 개선할 수 있다.

공정을 감시하는 첫 번째 단계는 프린팅 공정의 품질에 영향을 미치는 변수를 식별하는 것이다. 이러한 변수를 제어하지 않으면 내부기공 및 균열과 같은 결점이 발생할 수 있다. 프린팅 품질에 영향을 미치는 변수는 금속 분말의 특성, 레이저 빔, 프린팅 챔버 환경 등의 특징으로 분류할 수 있다. 변수는 사전 정의된 변수와 제어 가능한 변수로 더욱 분류되며, 두 번째 변수를 사용하여 폐쇄 루프 피드백 제어 시스템에서 공정을 조절할 수 있다.

또한, 공정 모니터링 기법을 극대화하기 위해서 레이저 다이오드, 포토 다이오드, 고속 카메라, 열화상카메라, 비전카메라, 고온 온도센서, 음향센서, 스펙트로미터, 레이저 스캐너를 공정 중에 생성되는 대부분의 물리량을 측정 후 분석하여 공정에 최적화된 파라미터를 확보하고 이를 기반으로 하여 출력물의 품질 및 신뢰성 향상시킬 수 있다.

3. 통합SW 개발 Framework 제안

3.1 제안 3D프린팅 모니터링 Framework

금속 기반 적층 제조 공정에서 모니터링과 제어 시스템을 개발하기 위해 제안된 프레임워크는 측정하고자 하는 Data의 공정특성과 금속 3D프린팅 출력 방식에 기반을 두며 시스템은 다음과 같은 5단계로 구성된다.

- (1) 출력 공정별 프로세스 매개변수 및 모니터링 Data 특성 정의,
- (2) 데이터 마이닝: 공정 프로세스별 데이터 획득
- (3) 데이터 처리,
- (4) 데이터 분석,
- (5) 오류 분류 및 분석

Fig. 3은 오류 등급에 따른 프린팅 매개변수 재설정 프로세스 및 Framework를 도식화 하였다.

첫 번째 단계에서는 PBF 및 DED 금속프린팅 방식에 따른 공정 매개변수를 정의하고, 획득하고자 하는 공정 특성별 데이터를 정의한다[10, 11].

이 단계에서 목표는 적층 제조 프로세스의 중요한 프로세스 매개 변수와 측정 Data를 정의함으로써 향후 측정되는 데이터의 양품, 불량 정보를 식별하기 위한 기초 자료로 사용된다. 두 번째 단계는 모니터링 시스템의 적절한 수단을 결정하는 것이다. 이 단계의 목표는 3D프린팅 프로세스에 따른 공정 데이터를 측정하고 프로세스 매개 변수와 측정된 모니터링 데이터 간의 상관관계를 설정하는 것이다. 데이터 마이닝 기술은 이 단계에서 상관관계를 식별하는 데 활용될 수 있다. 제안된 검사 장비는 위의 상관관계를 바탕으로 결정되며 이 단계는 데이터 마이닝 과정이라고도 한다[12,13].

3단계에서는 검사 시스템 수집 소프트웨어에 데이터를 저장한다. 4단계는 데이터를 미리 처리하고 머신러닝 기법으로 분석하며, 5단계는 오류검출로 머신러닝 기술 시스템이 오류유형을 검출하며, 3D프린팅 오류 파라미터의 종류에 따라 획득하고자 하는 데이터 정의를 적절하게 변경할 수 있도록 한다.

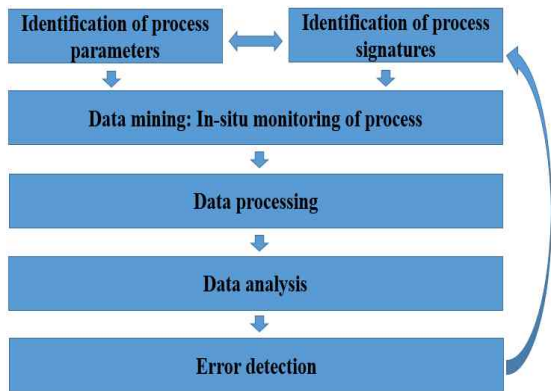


Fig. 3. Structure of the proposed framework

3.2 금속프린팅 모니터링 HW 설계

시스템의 하드웨어 섹션은 PBF 및 DED 금속 3D 프린터, DAQ 센서 및 분광기를 기반으로 한다. 이 시스템은 PBF 및 DED 금속 3D 프린터의 공정 매개변수에 따라 DAQ 센서(음향 센서, 광량 센서, 조명 센서, 가스 센서)와 분광기를 활용한다.

모든 DAQ 센서는 "National Instruments USB 6001" 장치를 사용하여 기계에 연결된다. USB 6001은 기본적인 다기능 데이터 수집 장치이며 아날로그 I/O, 디지털 I/O, 32비트 카운터를 제공한다. USB-6001은

데이터 로깅, 휴대용 측정 및 학술 실험과 같은 응용 프로그램에 사용하기 위한 기본 기능을 제공한다. 이 장치는 보호기능 포함하고 있으며 버스 전원이 공급되어 있어 휴대성이 뛰어나다. 센서와 신호는 나사 단자 연결을 통해 USB-6001에 편리하게 연결할 수 있다. 내장된 NI-DAQmx 드라이버와 구성 유틸리티는 구성과 측정을 단순화한다[14]. 또한 STS-VIS 분광기를 사용하여 스펙트럼 성분을 측정하는데, STS-VIS 분광기(350-800nm)는 저농도 흡광도 측정에서 고강도의 레이저 특성화에 이르는 용도에 적합한 옵션이다. 견고한 설계와 컴팩트한 크기, 유닛 대 유닛 재현성이 뛰어난 점들은 STS가 작은 설치 공간이 필요한 다른 장치 및 셋업과의 통합에 훌륭하다고 볼 수 있다. Fig. 4는 사용되는 장치를 보여주며 장치 사양은 Table 1에 제시되어 있다.



Fig. 4. Utilized Devices for Hardware Section

Table 1. Utilized Devices with Specifications

Device	Specifications
YWROBOT sound sensor	Size: 35x18mm Fixing hole: 3mm Weight: 4g Voltage: 5V
YWROBOT light sensor	Size: 28x24x2mm Color: white Brightness: Highlight Voltage: 5V
KEYES photo resistor	Material: FR4 Length:26mm Width:5mm OperatingVoltage:5vDC
KEYES smoke sensor	Material: FR4 Length:42.9mm Width: 21.5 mm OperatingVoltage:5vDC
STS-VIS Ocean optics spectrometer	Size: 40 x 42 x 24 mm Weight:60g Spectrometer : STS-VIS(350-800 nm) Entranceslit:50µm

한편, 본 연구에서는 효율적인 3D프린팅 공정 데이터를 획득하기 위하여, Fig 5.처럼 5가지 센서들을 통합한 통합 모니터링 센싱박스를 구성하였으며, 각 센서들을 통

합하여 관리할 수 있도록 센싱박스 HW를 설계-제작하여 적용하였다.

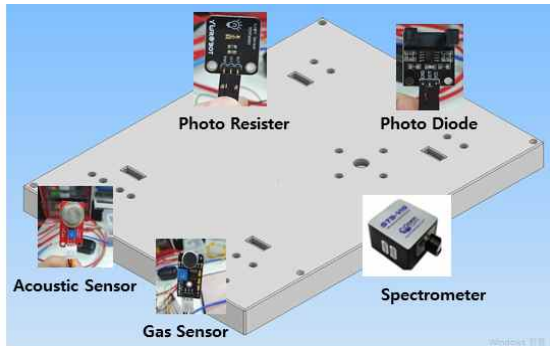


Fig. 5. Positioning of the Monitoring Sensors

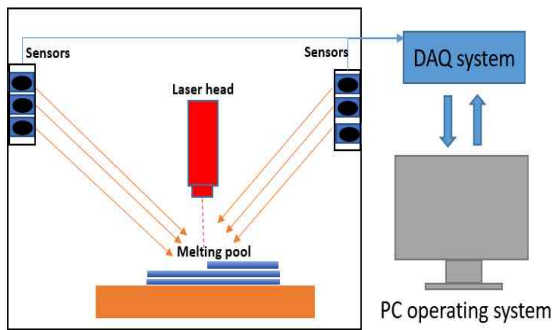


Fig. 6. Placement of set of sensors to the metal printer and type of used sensors

3.3 금속프린팅 통합 모니터링 SW 개발

제안된 시스템의 소프트웨어 섹션은 LabVIEW 2018 그래픽 프로그래밍 언어를 사용하여 개발되었다. LabVIEW는 시각 프로그래밍 언어를 위한 National Instruments의 시스템 설계 플랫폼 및 개발 환경이다. LabVIEW에서 사용되는 프로그래밍 패러다임은 데이터 가용성에 기초하며, subVI 또는 함수에 사용할 수 있는 데이터가 충분한 경우 해당 subVI 또는 함수가 실행된다. 실행 흐름은 프로그래머가 와이어를 그려 서로 다른 기능 노드를 연결하는 그래픽 블록 다이어그램(LabVIEW-소스 코드)의 구조에 의해 결정된다. 이 와이어들은 변수를 전파하며 모든 입력 데이터를 사용할 수 있게 되는 즉시 어떠한 노드도 실행할 수 있다.

이는 다수의 노드가 동시에 적용되는 경우일 수 있으므로 LabVIEW는 본질적으로 병렬로 실행할 수 있다.

다중 처리 및 다중 스레딩(Multi-Threading) 하드웨어는 실행 준비가 된 노드 위에 여러 OS 스레드를 멀티플렉싱하는 내장 스케줄러에 의해 자동으로 이용된다.[14] 모든 DAQ 센서에 LabVIEW는 기능이 내장되어 있지만, LabVIEW와 함께 분광기를 사용하려면 "Ocean optics" 소프트웨어의 추가 기능이 필요하다[15]. Fig. 7. 은 소프트웨어의 주요 인터페이스를 보여주며 인터페이스는 DED와 PBF 두 탭으로 구성하였으며, 두 탭 모두 제어 및 모니터링 패널을 포함하고 있다[16].

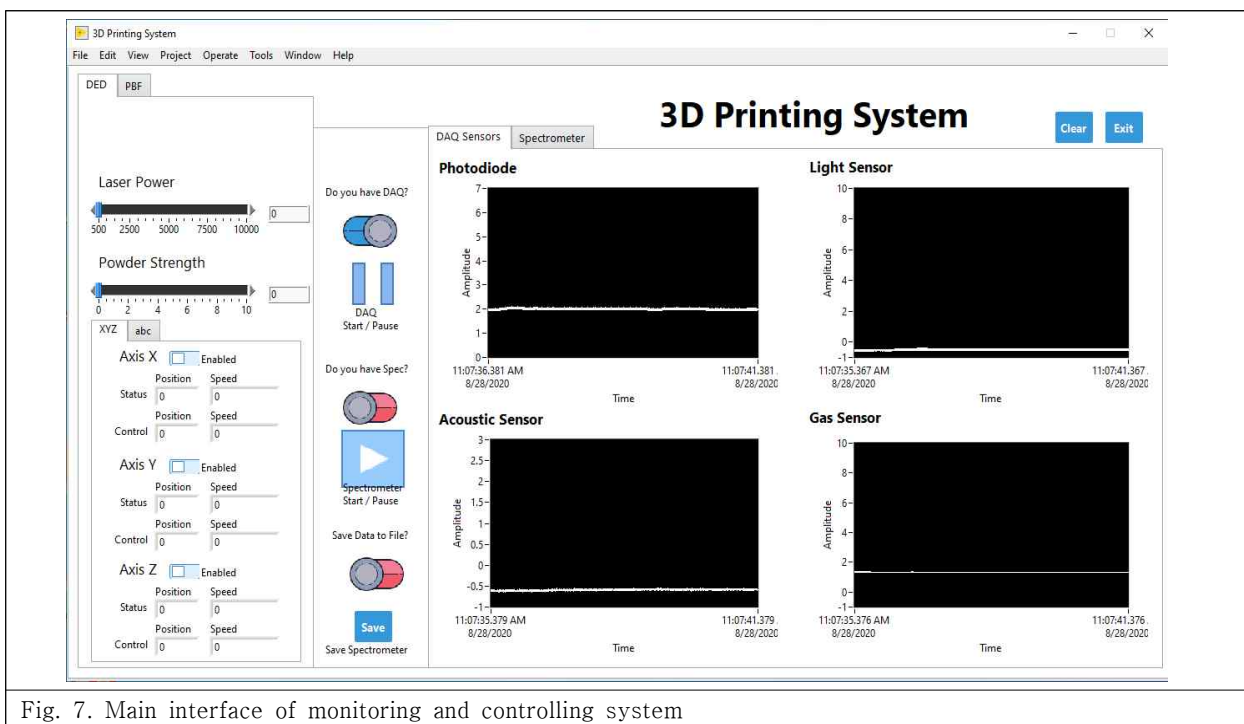


Fig. 7. Main interface of monitoring and controlling system

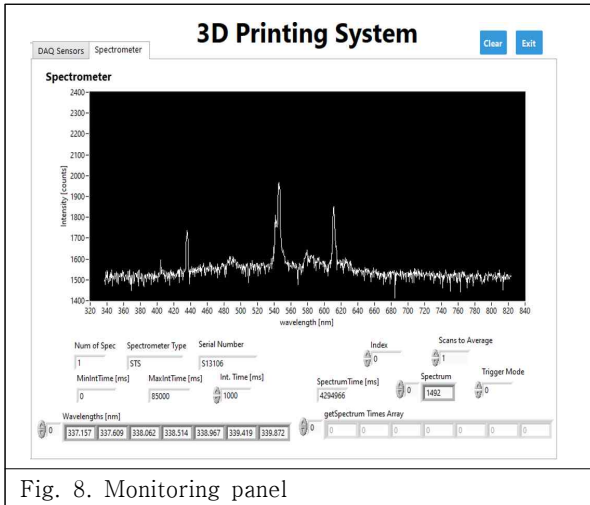


Fig. 8. Monitoring panel

	A	B	C	D	E	F	G
1	Date	No	Photodiode	Sound	Light	Gas	Spectromet
2	7/29/2020	1	0.963055	-0.50219	0.285299	1.359381	337.6093
3	7/29/2020	2	0.961764	-0.49961	0.28659	1.356799	338.0617
4	7/29/2020	3	0.960473	-0.48799	0.28659	1.355508	338.5141
5	7/29/2020	4	0.9566	-0.50348	0.284008	1.351635	338.9666
6	7/29/2020	5	0.957891	-0.49444	0.278844	1.349053	339.4191
7	7/29/2020	6	0.959182	-0.5151	0.276263	1.347762	339.8716
8	7/29/2020	7	0.963055	-0.5009	0.281426	1.347762	340.3242
9	7/29/2020	8	0.965637	-0.49315	0.278844	1.349053	340.7769
10	7/29/2020	9	0.965637	-0.50219	0.281426	1.347762	341.2296

Fig. 9. Saved data in "csv" file

제어 패널은 3D 프린터 파라미터로 구성되어 있으며, 모니터링 패널은 데이터 수집의 그래픽 일러스트를 포함하고 있다. 또한, 모니터링 패널은 Fig. 8과 같이 "DAQ 센서"와 "Spectrometer"을 포함한 2개의 탭으로 구성하였다. 이러한 모니터링 패널에는 Fig. 9와 같이 모니터링 시스템에서 지정된 경로로 가져온 데이터를 "csv"파일로 저장하기 위한 저장 버튼이 있다. "Clear" 버튼을 누르면, 모니터링 프로세스를 멈추고 모든 그래프를 지울 수 있으며, "Exit" 버튼을 누르면 시스템을 멈추고 프로그램이 종료할 수 있도록 설정하였다.

4. 결론

PBF, DED와 같은 금속 3D 프린팅 시스템은 매우 복잡한 과정을 수행한다. 이러한 복잡성은 금속프린팅산업

에서 프로세스 모니터링과 프린팅 신뢰성을 매우 어렵게 만든다. 금속 프린팅 품질 및 프린팅 프로세스에 영향을 미치는 다양한 매개변수가 존재한다. 이러한 매개변수의 상관관계는 여전히 알려져 있지 않으며, 현재 기술 상태에서는 효과적인 데이터 획득 과정을 통하여, 지속적인 오류현상을 학습하여, 금속프린팅 출력과정의 불량률을 최소화하기 위한 지속적인 SW개발 및 공정기술개발에 대한 연구가 요구된다.

최근 금속공학 분야에서는 금속분말의 용융과정에서 Melting Pool을 효과적으로 제어할 수 있으면 결함을 줄일 수 있다고 연구되어 왔으며, 이를 위해서는 추가적인 3D프린팅 통합 SW개발이 요구된다. 다시말해서, Deep Learning을 통해서 학습된 오류데이터 혹은 불량 정보를 반영하여, 실시간으로 레이저 및 광학 변수, XYZ 다축 제어변수, 질소-아르곤 가스 및 산소유량 변수, 내외부 환경변수 등을 제어하기 위해서는 최초 설정한 3D 프린팅을 위한 데이터를 현재 공정상태를 반영하여 즉각적으로 변경할 수 있어야하며, 이러한 장비 운영 SW와 모니터링 통합 SW의 지속적인 개발이 필요하다.

본 논문에서는 오류와 결함을 방지하기 위해 DED와 PBF 기술 등 금속 3D 프린팅에 대한 제어 및 모니터링 시스템을 제안했다. 이 시스템은 LabVIEW 그래픽 프로그래밍 언어와 여러 센서를 사용하여 개발되었다. 금속 3D 프린팅 기술의 공정 매개변수에 따라 광다이오드, 음향, 광량, 가스 센서 및 분광기를 사용할 것을 제안하였으며, 실험 수행과 데이터를 수집함으로써, 프린팅 과정에서 센서에 의해 수집된 데이터를 포함한 새로운 데이터 시트가 생성되는 과정을 소개하였다.

현재 시스템은 작업자 혹은 개발자의 통제 하에 원격으로 프로세스를 감시할 수 있지만, 향후 지속적인 연구 개발을 통하여 머신러닝 기법을 통한 데이터 학습 및 프린팅 과정의 오류와 결함을 분류하여, 금속프린팅의 품질 경쟁력을 극대화하고, 다양한 산업에 신속히 적용되어 新 부가가치를 창출해 나갈 수 있도록 노력해 나가야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] G. White. (2015). Industry analysis: The pros and cons of 3D printing . Retrieved from <http://www.manufacturingglobal.com/>
- [2] T. G. Spears and S. A. Gold. (2016). "In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive

manufacturing,” Integr. Mater. Manuf. Innov.

[3] J. Evans., (2014). “DMLS: A Bumpy Road in History,” Design & Motion, [Online]. Available: <https://designandmotion.net/design-2/manufacturing-design/dmls-a-little-history/>. [Accessed: 11-Oct-2017].

[4] T. Wohlers and T. Caffrey., (2015). Wohlers Report 2015: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report.

[5] American Society for Testing and Materials, “Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies – Scope,” ASTM, 2009. [Online]. Available:<https://www.astm.org/COMMIT/SCOPES/F42.htm>. [Accessed:01-Jan-2017].

[6] G. Tapia and A. Elwany., (2014). “A Review on Process Monitoring and Control in Metal-Based Additive Manufacturing,” J. Manuf. Sci. Eng., vol. 136, no. 6, p. 60801.

[7] H. S. Park, N. H. Tran, and D. S. Nguyen., (2017). “Development of a predictive system for SLM product quality,” IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 227, p. 12090.

[8] A. E. Patterson, S. L. Messimer, and P. A. Farrington., (2017). “Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need,” Technologies, vol. 5, no. 2, p. 15.

[9] Jacob, G., Donmez, A., Slotwinski, J., and Moylan, S., (2016). “Measurement of Powder Bed Density in Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Processes,” Measurement Science and Technology, Vol. 27, No. 11, Paper No. 115601.

[10] Lee, J. and Prabhu, V., (2016). “Simulation Modeling for Optimal Control of Additive Manufacturing Processes,” Additive Manufacturing, Vol. 12, pp. 197-203.

[11] Kamath, C., (2016). “On the Use of Data Mining Techniques to Build High-Density, Additively-Manufactured Parts,” in: Information Science for Materials Discovery and Design, Springer, pp. 141-155.

[12] Tapia, G., Elwany, A., and Sang, H., (2016). “Prediction of Porosity in Metal-Based Additive Manufacturing Using Spatial Gaussian Process Models,” Additive Manufacturing, Vol. 12, pp. 282-290.

[13] Jeffrey., Travis (2006). LabVIEW for everyone : graphical programming made easy and fun. Kring, Jim. (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. ISBN 0131856723. OCLC 67361308

[14] Alessandro Ceruti., Alfredo Liverani & Tiziano Bombardi. (2017). Augmented vision and interactive monitoring in 3D printing process, International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) volume 11, pp. 385-395.

[15] Xin Lin, Kunpeng Zhu, Jinxin Zhou, Jerry Ying Hsi

Fuh, (2020). Intelligent modeling and monitoring of micro-droplet profiles in 3D printing, ISA Transactions, The Journal of Automation, Volume 105, pp. 367-376

[16] Ugandhar Delli, Shing Chang., (2018), Automated Process Monitoring in 3D Printing Using Supervised Machine Learning, Procedia Manufacturing, Volume 26, pp. 865-870

전 병 주(Jeon, Byung Ju)

[정회원]



- 1984년 2월 : 금오공과대학 전자공학 (공학사)
- 2005년 2월 : 연세대학교 전자공학(공학석사)
- 2015년 1월 : KAIST 최고경영자과정 수료
- 2008년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 산업경영학과 박사과정
- 1986년 9월 ~ 2016년 6월 : 대통령경호실 본부장(1급)
- 2016년 7월 ~ 2018년 11월 : 한국승강기안전공단 상임감사
- 2019년 3월 ~ 현재 : 한국승강기안전공단 감사자문위원
- 2018년 1월 ~ 현재 : 사)3D프린팅산업협회 자문위원
- 관심분야 : ICT, Smart Factory, 3D프린팅
- E-Mail : jeonbjpss@hanmail.net

이 선 규(Lee, Sun Kyu)

[정회원]



- 1983년 2월 : 성균관대학교 석사
- 1990년 2월 : 성균관대학교 경영학(경영학박사)
- 1998년 3월 : 미국 Univ. of Michigan 객원교수
- 2003년 3월 : 미국 Editional Board of HFEM(SSCI)
- 1990년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 경영학과 교수
- 관심분야 : 경영전략, 조직/인사, R&D생산성
- E-Mail : sklee@kumoh.ac.kr

이 승 희(Lee, Seung Hee)

[중신학원]



- 1993년 8월 : 성균관대학교 대학원 경영학과(경영학박사)
- 2004년 2월 ~ 현재 : 금오공과대학교 교수
- 2009년 3월 ~ 현재 : 한국디지털정책학회 부회장
- 2018년 1월 ~ 2020년 2월 : 한국생산성본부(KPC) 혁신위원장(4차산업)
- 2015년 2월 ~ 2018년 10월 : 금오공과대학교 기획협력처장
- 2013년 2월 ~ 2015년 1월 : 금오공과대학교 산학협력단장
- 관심분야 : 산업정책, 디지털정책, 마케팅전략, 브랜드분석
- E-Mail : marketing@kumoh.ac.kr

장 성 호(Jang, Sung Ho)

[정학원]



- 1981년 2월 : 한양대학교 기계공학(공학사)
- 1999년 12월 : Univ. of Michigan 산업공학과(공학박사)
- 1992년 7월 ~ 현재 : 금오공과대학교 산업공학과 교수
- 2014년 1월 ~ 현재 : (사)3D프린팅산업협회 자문위원
- 관심분야 : 제조공학, 자동화, 시스템공학, 계측공학
- E-Mail : changsh@kumoh.ac.kr

정 구 상(Jung, Goo Sang)

[정학원]



- 2008년 2월 : 영남대학교 경제학부(경제학사)
- 2010년 2월 : 영남대학교 경영학과(경영학석사)
- 2015년 2월 : 금오공과대학교 산업공학과(공학박사)
- 2017년 1월 ~ 현재 : ㈜컨셉션 대표이사
- 2018년 6월 ~ 현재 : ISO TC261 국제3D프린팅 표준위원
- 2020년 2월 ~ 현재 : ASTM F42 수송기기분과 Asia Co-Organizer
- 2019년 5월 ~ 현재 : (사)한국3D프린팅협회 수석부회장
- 2014년 1월 ~ 2015년 12월 : (사)3D프린팅산업협회 사무처장
- 관심분야 : 3D프린팅, 기업가치평가, ICT 스마트자동창고
- E-Mail : ceo@conception.co.kr