

# 산업용 SFFS (Solid Freeform Fabrication System)을 위한 PC 기반 제어기

박남수,\* 황면중, 이두용 (한국과학기술원 기계공학과)

## PC-based Controller for Industrial Solid Freeform Fabrication System

Nam Soo Park, Myun Joong Hwang, Doo Yong Lee (Department of Mechanical Engineering, KAIST)

### ABSTRACT

This paper presents a PC-based controller of industrial SFFS(Solid Freeform Fabrication System). The SFFS has multiple sub-controllers for the building room, the powder room, the temperature, and the density of oxygen in the chambers. Hence the main PC-based controller should effectively and timely send commands to the sub-controllers, and monitor the overall SLS process. The required actuators and sensors are selected to optimize the overall performance of the SFFS.

**Key Words :** SFFS (임의형상 제작시스템), PC-based Controller (PC 기반 제어기)

### 1. 서론

임의형상 제작시스템(SFFS, Solid Freeform Fabrication System)은 제품의 CAD 데이터로부터, 플라스틱, 광경화성 수지 등의 재료를 사용해서 제품을 직접 만들 수 있는 공정시스템이다. 산업용 임의형상 제작시스템은 산업 현장에서 제품 개발 과정에서 3 차원 형상을 신속하게 제작할 수 있다는 장점이 있다[1]. 임의형상 제작시스템의 공정에는 SLA, LOM, SLS 등이 있는데, 이 중에서 SLS(Selective Laser Sintering) 방법이 정확도가 높은 장점이 있다.

SLS 공정을 이용한 임의형상 제작시스템은 파우더를 일정 두께로 적층하면서 레이저로 파우더를 소결시켜 제품의 형태를 얻게 된다. 따라서, 파우더 룸과 빌딩 룸의 위치제어, 파우더 적층을 위한 롤러의 제어, 파우더의 온도제어, 레이저제어, 내부 질소 환경 제어, 그리고 재료의 선택 등 많은 고려대상을 가지고 있는 복잡한 시스템이다[2][3]. 기존에도 SFFS 장비와 주변 장비들을 효율적으로 설계하고 제어하기 위한 연구들이 있었다[4]. 기존의 연구들은 SFFS 장비 보다는 SLS 공정, 재료 현상 등에 초점을 맞춘 것으로써 장비 자체의 공정 및 구동 메커니즘은 다루지 않았다.

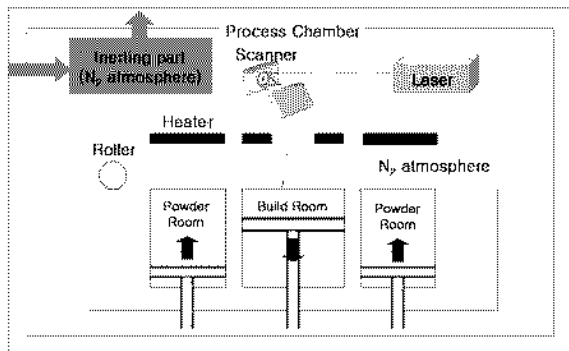


Fig. 1 Diagram of SFFS system

현재 개발 중인 임의형상 제작시스템은 표 1 과 같이 기존의 장비보다 큰 빌딩 룸을 가짐으로써 더 큰 제품을 제작할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 보다 나은 임의형상 제작시스템의 최적 성능을 위한 구동기들과, 시스템의 상태를 감지할 수 있는 센서들의 적절한 선정이 중요하다. 또한 실시간으로 공정 변수들을 모니터링 하고 작업 절차에 따라 시간 지연 없이 제어 명령을 줄 수 있는 효율적인 제어 구조와 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 산업용 임의형상 제작시스템의 개발에 필요한 구동기 및 센서들의 역할과 PC 기반 제어기의 구조에 대해 논한다.

Table 1 Specification of the current and the developed SFFS

	Vanguard (3D system)	개발 중인 SFFS 장비
장비 크기 (W*H*L) mm	1350*1980*2130	1500*2300*2300
Build 크기 (W*H*L) mm	320*445*370	500*800*500

## 2. 산업용 SFFS

산업용 임의형상 제작시스템은 크게 구동부, 질소 공급부, 히터부, 레이저부 등의 네 부분으로 나눌 수 있다. 현재 개발 중인 장비에서 레이저부는 별도의 PC 기반 제어를 사용하기 때문에, 본 논문에서는 고려하지 않고 나머지 세 부분을 위한 제어를 다룬다.

### 2.1 구동부

산업용 장비에서는 빌딩 룸의 파우더 한 층의 두께를 50  $\mu\text{m}$ 로 일정하게 하는 것을 목표로 한다. 파우더의 두께를 일정하게 하기 위해서 스테핑 모터를 사용하여 정밀한 제어가 가능하도록 한다. 스테핑 모터의 1 바퀴를 600 펄스로 나눈 후 Ball-Screw 방식의 20:1 감속기를 사용한다. Screw의 피치가 4 mm 이므로 식(1)에서와 같이 빌딩 룸이 모터의 한 펄스당 0.4  $\mu\text{m}$  이동한다는 것을 알 수 있다. 따라서 0.4  $\mu\text{m}$  단위로 제어가 가능하기 때문에 파우더의 두께를 충분히 정밀하게 제어할 수 있다.

$$\frac{1\text{rev}}{500\text{pulse}} \times \frac{1}{20} \times 4 = 0.0004 \text{ (mm)} \quad (1)$$

파우더 표면을 고르게 하기 위하여 파우더 룸을 한 층 위로, 빌딩 룸을 한 층 아래로 이동 시킨 후 파우더 위로 플러를 이동시킨다. 플러는 빠른 시간 안에 파우더를 고르게 적층할 수 있어야 한다. 플러의 수평 이송 메커니즘은 AC Servo 모터와 타이밍 벨트 구조로 이루어져 있다. 플러를 수평으로 이송시킬 때 플러의 수평 이송 가이드와 이송부 사이의 마찰이 매우 크므로 큰 토크를 만들어 주기 위해 25:1 감속기를 부착한다.

$$3000\text{rpm} \times \frac{1\text{min}}{60\text{sec}} \times \frac{1}{25} \times 100\pi = 628 \text{ (mm/s)} \quad (2)$$

AC 서보모터의 최대 속도가 3000 rpm 이고 타이밍 벨트 구조의 pulley 지름이 100 mm 이므로 식(2)와 같이 플러의 최대 수평 이송 속도가 628 mm/s 라는 것을 알 수 있다. 이 경우 파우더를 적층하는 데 약 2~3 초 정도 시간이 걸리게 되고 이것은 공정 상에서 충분한 시간이다.

플러를 회전시키기 위해서 별도의 모터를 사용하지 않고 와이어 메커니즘을 이용하여 플러가 수평방향으로 움직일 때 플러의 진행방향과 반대방향으로 회전하도록 하였다. 플러를 진행방향과 반대방향으로 회전시킴으로써 분말이 불필요하게 압축되는 것을 방지한다[3].

실제 장비 내부에서는 벨트와 풀리 사이, 플러 수평 이송 가이드와 바닥 사이에 기계적인 마찰이 존재한다. 이 원인에 의해서 실제 메커니즘을 구동하는 데 있어서 많은 토크가 필요하게 된다. 추후에 플러를 정밀하게 구동시키기 위해서 마찰을 고려한 구동 알고리즘에 대한 연구를 수행할 것이다.

### 2.2 질소 공급부

제품이 레이저로 소결되는 과정에서 산소에 의한 산화를 방지하기 위하여 장비 내부를 질소 환경으로 만들어야 한다[3]. 질소 공급부는 장비 내부를 질소 96%, 산소 5% 비율로 만들어 주는 역할을 한다. 질소와 산소의 비율을 측정하기 위해 장비 내부에 산소 센서를 두고 산소 비율에 따라 질소 가스 주입 여부를 판단한다. 질소 비율을 측정할 수 있는 방법 중에서 비교적 간단한 방법으로서 산소 비율 측정 후 질소 비율을 추정하는 방식을 택하였다. 산소 센서에서는 온도에 비례하여 4~20 mA의 전류 출력이 나오기 때문에 별도의 회로를 구성하여 전압 형태의 신호를 제어기에 보내준다. 이때, 정확한 값을 측정할 수 있도록 회로에 Low-pass 필터를 사용했다. 측정된 전압으로부터 식(3)을 이용하여 산소농도의 값으로 변환할 수 있다.

$$\text{농도} = \frac{100}{0.016} \times \frac{V}{R} - 25 \text{ (%) } \quad (3)$$

공정 시작 전에 질소 주입구의 솔레노이드 밸브와 배기 밸브를 열어서 질소를 주입시키고 산소 농도가 5% 근처가 되는 부분에서 밸브들을 닫는다. 주입되는 질소의 유량은 기존의 장비에서는 7~9 lpm 정도인데 개발되는 장비의 경우에는 크기가 더 큰 장비이므로 유량이 더 많아야 한다[5]. 정확한 유량은 실험적으로 결정한다.

질소 가스는 이 외에도 레이저 부분의 스캐닝 거울 부분에 주입되어 거울에 파우더가 부착되는

것을 방지한다.

### 2.3 히터부

파우더의 온도를 150℃ 내외로 조절하기 위해서 빌딩 룸과 파우더 룸 상부에 판형 히터를 두고 복사열을 이용하여 온도를 제어한다. 또한 파우더 룸 블레에도 히터를 두어 파우더의 온도를 일정하게 유지하도록 한다. 이러한 방법을 통하여 미리 파우더를 예열 함으로써 레이저 주사 시 파우더가 최적으로 소결될 수 있는 환경을 만들어 준다. SFFS 장비의 공정 특성 때문에 빌딩 룸의 표면 온도의 측정을 위하여 비접촉식 적외선 온도 센서를 사용한다. 적외선 온도 센서는 0-500℃ 의 온도 측정이 가능하며 온도에 따라 4-20 mA의 전류 출력이 나오게 된다.

산소 센서와 유사하게 회로를 구성하여 출력을 전압 형태로 변환한 후 제어기로 보낸다. 전압으로부터 식 (4) 를 이용하여 측정된 온도를 계산 할 수 있다.

$$\text{온도} = \frac{500}{0.016} \times \frac{V-0.05}{R} - 125 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4)$$

현재는 히터 부분에 별도의 PID 제어기를 두고 있어 주제어기로부터 직접적인 온도 제어는 되지 않는다. 추후에 RS232 통신 등을 사용하여 주제어기와 인터페이스 되도록 할 것이다.

### 3. PC 기반 제어기

각 하위 제어기에 들어온 센서들의 값을 이용하여 전체 공정 상황을 인식하고, 적절한 제어 명령을 만들어 줄 수 있는 PC 기반의 주제어기가 필요하다. 주제어기는 자동모드와 수동모드를 갖는다. 자동모드에서는 하나의 제품을 제작하기 위해 전체 SLS 공정을 제어하고, 수동모드에서는 테스트 및 사전에 필요한 준비 작업 등을 위하여 각 하위 부분을 개별적으로 제어한다.

그림 2 는 제품 제작을 위한 SLS 공정의 개략적인 흐름을 나타낸 것이다. 가장 먼저 질소를 주입하여 95% 질소 환경을 만들어 주고, 파우더의 온도를 150℃ 내외로 조절한다. 그 후 파우더 룸은 한 층 상승, 빌딩 룸은 한 층 하강 시키고, 파우더 적층을 위해 롤러를 이동시킨다. 이 상태에서 레이저를 주사하여 원하는 경로에 따라 파우더를 소결시키면 제품의 한 층이 완성된다. 이 과정을 반복하여 전체 제품을 제작한다.

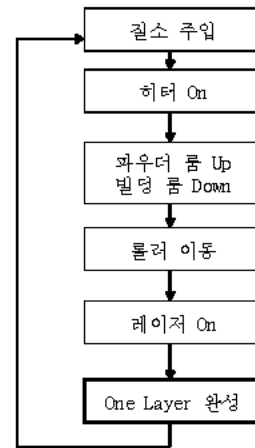


Fig. 2 Flow of overall SLS process

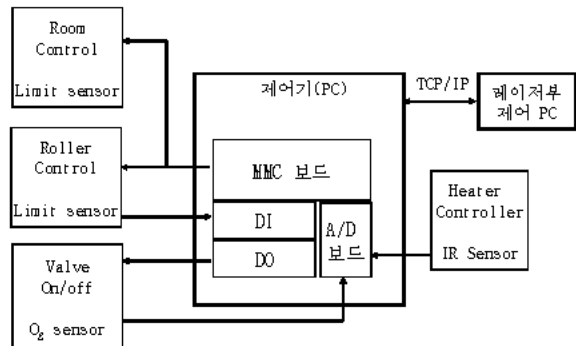


Fig. 3 Schematic of the controller

공정이 수행되는 동안에 구동부, 히터부, 질소 공급부, 히터부, 레이저부 등이 일정한 절차에 따라 제어되기 때문에, 주제어기는 각 구동기들의 개별 출력 및 센서 입력을 확인하고 전체 SLS 공정을 제어할 수 있는 구조를 가지고 있다.

그림 3 은 전체 제어구조를 나타낸다. 그림의 왼쪽은 빌딩 룸과 파우더 룸 부분, 롤러 부분, 그리고 질소 공급부를 나타낸다. 주제어기는 각 인터페이스 보드들을 이용하여 신호를 입력 받고 적절한 명령을 각 하위 제어기에 출력해준다. 그리고 전체 SLS 공정의 제어를 위하여 레이저부의 PC 기반 제어기와 TCP/IP 통신을 사용하여 정보를 주고 받는다. 향후에는 히터 제어기와도 통신을 통해서 명령을 주고 받게 될 것이다.

주제어기는 다축 모션 제어기 (Multi Motion Controller)와 A/D (Analog to Digital) Board 를 갖는다 [6]. 다축 모션 제어기는 DI/DO (Digital Input/Output) 모듈을 포함하고 있어 직접 리미트 센서 신호, 밸브 구동 명령 등의 출력이 가능하다. 표 2 는 제어기에서 사용되는 입력과 출력들을 나타내고 있다.

Table 2 Input and output of the main controller

부분	역할
MMC	각 모터의 운동 명령 출력 서보 모터의 엔코더 신호 입력
A/D 변환	산소 센서 신호 입력 IR 센서 신호 입력
DI	빌딩 룸, 파우더 룸의 리미트 센서 신호 입력
DO	질소 주입부 솔레노이드 밸브 On/Off 출력

#### 4. 산업용 SFFS 제어기 구동 프로그램

산업용 SFFS 제어기 구동 프로그램은 MFC Visual C++를 기반으로 만들어진다. 구동 프로그램은 크게 SFFS 장비 인터페이스 처리부, 데이터 처리부, 작업자 인터페이스 처리부 등으로 나누어진다. 장비 인터페이스 처리부는 다축 모션 제어기, 산소 센서, 적외선 온도 센서, 레이저 구동 제어기 등 외부기와 신호의 송수신, 모니터링 등의 역할을 하는 부분으로 윈도우 프로그램의 메인 프레임 객체가 수행한다. 데이터 처리부는 틀러 수평 이동 속도, 빌딩 룸 및 파우더 룸의 수직 이동 속도, 산소 농도, 빌딩 룸의 온도 등 SFFS 장비의 각종 변수 등을 저장, 호출, 분석 정리하는 등의 역할을 수행하며, 도큐먼트 객체가 수행한다. 작업자 인터페이스 처리부는 구동부, 질소 공급부, 히터부, 레이저부 등의 하드웨어 설정을 작업자가 수정하고자 할 때 사용하는 부분이다. 윈도우 메인 프레임 메뉴에서 수정하고자 하는 하드웨어 설정과 관련된 메뉴를 선택하면 다이얼로그 박스를 통해 대화형식으로 수정할 수 있도록 되어 있다.

본 프로그램은 자동모드와 수동모드의 두 가지 모드로 SFFS 제어기를 제어할 수 있다. 자동 모드는 STL 파일을 사용하여 레이저 주사 경로를 설정하고 실제 SLS 공정을 수행하여 부품을 제조하는 모드이고, 수동모드는 장비를 개발하는 과정에서 제어기의 각 구성 요소를 시험하거나, 자동모드로 부품을 생산하기 전에 필요한 준비작업을 할 때 사용하는 모드이다.

그림 4는 프로그램의 메인 화면을 나타낸 것이며, 그림 5는 빌딩 룸 및 파우더 룸을 구동하는 하드웨어의 변수를 설정할 수 있는 다이얼로그 박스를 나타낸다.

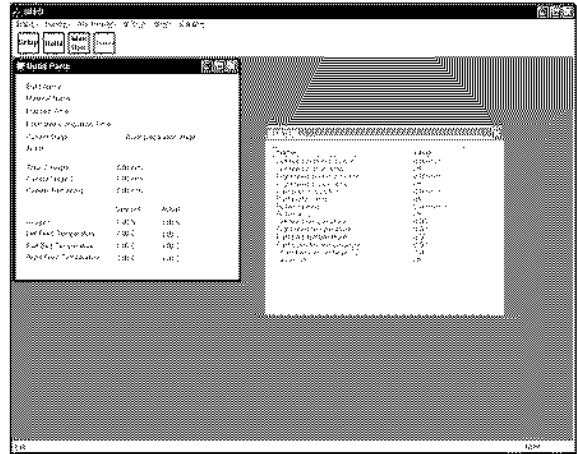


Fig. 4 Main view of the process program

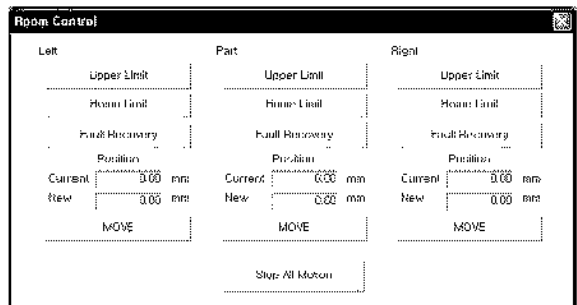


Fig. 5 Dialog box of the build and powder room control

#### 5. 결론

본 논문에서는 새로운 산업용 SFFS 를 위한 구동기 및 센서들의 사양과, 이것들을 제어하는 PC 기반 제어기의 구조에 대해 논하였다. 빌딩 룸과 파우더 룸의 높이는 0.4 μm 단위로 제어한다. 산소 센서와 적외선 온도 센서를 이용하여 장비 내부의 질소 농도와 파우더의 온도를 실시간으로 제어한다. 또한, 각 하위 제어기별로 개별 제어 또는 전체 SLS 공정의 제어가 가능하다.

산업용 SFFS 제어기의 프로그램은 객체 지향적 언어인 MFC Visual C++을 이용하여 구성하였다. 개발된 제어기를 실제 공정에 적용하여 SLS 공정을 분석하고 장비의 성능을 검증하는 연구가 수행될 예정이다. 아울러, 산업용 SFFS 를 최적화 하기 위해서 파우더의 효율적인 적층을 위한 틀러 수평 이동 속도 및 회전 속도, 표면 거칠기 제어 등에 대한 연구가 수행될 예정이다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부의 중기거점개발사업 중 “디지털 3 차원 실물복제기 요소기술 개발”의 위탁 과제로 수행되었다.

## 참고문헌

1. Crawford R. H. and Beaman J. J., “Solid Freeform Fabrication,” IEEE Spectrum, Vol. 36, Issue 2, pp. 34-43, 1999.
2. Suman D., “Physical Aspects of Process Control in Selective Laser Sintering of Metals,” Advanced Engineering Materials, Vol. 5, No. 10, 2003.
3. 김성중, 김광영, 주영철, 백영중, 박희성, “SLS 공정을 이용한 산업용 SFFS 개발,” 기계와 재료, 4월, 2004.
4. Taijoon U., Youngchel J., Yonghae K., Ingoon S., Seungwoo K., and Jaechel B., “Optimization of Design Parameters of a Pneumatic System for Solid Freeform Fabrication System Using Genetic Algorithm,” Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, Vol. 1, pp. 120-123, 2003.
5. DTM Corporation, “The SLS System: Reference Guide,” Software Ver 3.0, 2001.
6. Rockwell Samsung Automation, “Motion Controller Series, Multi Motion Controller 사용자 설명서,” Ver 1.4.