

유도가열을 이용한 DME (Direct Melting Extrusion) 방식의 금속3D프린팅에 관한 연구

이수연^{a*}, 김창수^b, 박진호^c, 이종범^d, 김수희^e, 한윤성^f, 이희성^f

Study on the Direct Melting Extrusion Metal 3D Printing Using Induction Heating

Su-Yeon Lee^{a*}, Chang-Soo Kim^b, Jean-Ho Park^c, Jong Beom Lee^d, Su-Hee Kim^e,
Yun-Sung Han^f, Hee-Sung Lee^f^a JungRok Co., Ltd.^b Department of IT Convergence and Application Engineering, Pukyong National University^c Korea Institute of Industrial Technology^d Korea Institute of Industrial Technology^e Advanced Manufacturing Research Center Korea^f Ulsan Ict Promotion Agency

ARTICLE INFO

Article history:

Received	12	August	2019
Revised	21	October	2019
Accepted	23	October	2019

Keywords:

Metal 3D printing
Induction heating
Direct melting extrusion
Extruder
Nozzle

ABSTRACT

The 3D printing market is growing rapidly as it enters the 4th industry; metal 3D printing, in particular, is showing remarkable growth. However, the market for metal 3D printing has become monopolistic due to its prevalence in developed countries. The cause of this is the expensive equipment and metal powder material it requires; as such, it is difficult to popularize metal 3D printers. In light of this, we have studied direct melting extrusion (DME) metal 3D printing technology using induction heating to solve this problem. DME metal 3D printing does not use expensive equipment and powder form materials. If these technologies are researched and developed, they can potentially lead the metal 3D printing market.

1. 서론

3D프린팅 기술은 기존의 2차원적인 출력물이 아닌 3D도면을 이용하여 삼차원 물체를 가공하는 기술을 의미한다. 수십에서 수천 가지 부품들을 제작 조립하는 형식의 제조 방법과는 다르게 3D프린팅 기술은 한 번에 완제품을 제작할 수 있다^[1]. 이러한 3D프린팅의 강점은 크게 두 가지가 있는데 첫 번째로, 단종의 개념이 없다는 점이다. 기존의 시장에서는 도태되고 잊히는 제품의 경우 단종이 되는 경우가 많은데 3D프린팅 기술은 설계 도면만 있다면 언제

든 재생산이 가능하다. 두 번째는 재료의 낭비가 적다는 점이다. 기존의 제품을 제작할 때는 낭비되고 재가공이 필요한 부산물들이 나오는데 3D프린팅은 필요한 부분에만 재료를 적층 시켜 제품을 만들기 때문에 원재료의 낭비가 적다. 또한 3D프린팅은 매우 다양한 재료를 이용하여 제품을 제작할 수 있다. 개발 초기에는 간단한 열가소성 고분자만 활용이 가능하였으나, 점차 엔지니어링 플라스틱, 금속 등 다양한 재료의 사용이 가능한 상태이다. 3D프린팅 기술에서는 다양한 재료를 활용하여 만들고자 하는 제품의 3차원 설계를 수행한 후 3D프린터에 전송하여 다양한 소재를 적층 가공

* Corresponding author. Tel.: +82-52-225-7478

E-mail address: sylee@jungrok.com (Su Yeon Lee).

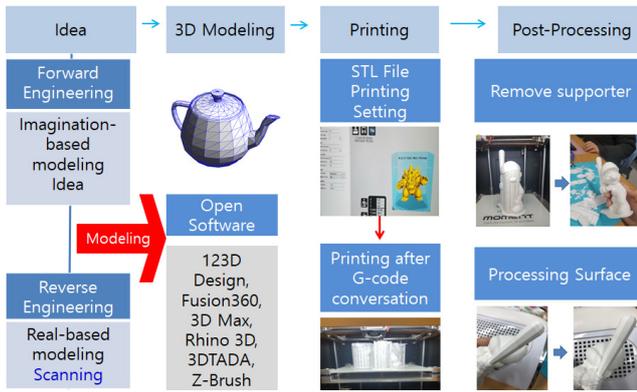


Fig. 1 Sequence of 3D Printing

(Additive Manufacture) 한다^[2].

이러한 우수성을 바탕으로 3D프린팅 기술은 미래 유망기술로 선정이 되어 각광을 받았지만, 느린 출력 속도, 제한된 출력물 크기, 높은 소재의 가격 등의 단점이 부각이 되면서 유입 초기에는 국내·외로 기대에 못 미치는 성장을 보여주었다. 그러나 3차 산업을 넘어 4차 산업사회에 들어서면서 3D프린터의 약점이었던 맞춤형 다품종 소량생산이 역으로 강점으로 부각이 되며 3D프린터 산업은 큰 성장을 이루었다^[3].

현재 3D프린팅 기술은 단순한 시제품 제작에서부터 의료, 항공 및 고부가 가치 산업에 활용이 되고 있다. 이러한 3D프린팅 산업이 변화 요인은 크게 ① 가격의 하락, ② 재료의 다양화, ③ 금속3D 프린터 확대, ④ 프린팅 속도 향상, ⑤ 의료/바이오 3D프린팅 확산, ⑥ 출력물 품질과 정확도 향상, ⑦ 3D프린팅의 대량생산 등이 있다.

Fig. 1과 같이 3D프린터는 기존 제품의 스캐닝을 통한 역설계 혹은 아이디어를 바탕으로 한 정설계를 통해 3D Modeling 프로그램 이용하여 모델링 파일을 제작 후 출력 프로그램을 이용하여 제품을 출력하며 필요시 후 가공 과정을 거친다.

초기 3D프린터는 주로 열가소성 고분자를 재료로 사용하였지만 최근에는 높은 내열성 및 물리적 우수성을 가진 엔지니어링 플라스틱, 금속 분말 등이 산업 분야에 재빠르게 확산이 되어 점차 사용되고 있다. 이 중 금속 소재를 사용한 3D프린터가 급격한 성장을 이루고 있다. 이는 엔지니어링 플라스틱 및 고분자를 사용한 3D프린팅은 시제품 제작 및 주문 제작을 통해 큰 활용도를 가지고 있지만 금속에 비해서는 낮은 강도로 인하여 산업용으로 사용하기에는 제한이 있기 때문이다^[4].

Table 1에는 3D프린터로 가능한 출력 방식, 재료, 서비스에 대한 자료가 기술되어 있다. 3D프린터의 출력 방식부터 매우 다양하게 존재한다. 파우더 형태의 재료를 평평하게 깎 후 접착제를 패턴 하듯이 분사하여 적층하는 접착제 분사 방식(Adhesive spray

Table 1 3D Printing Industry

Field	Main content
Print	- Adhesive spray method, Material spray method, Powder sintering method, High energy direct irradiation method, Extrusion method, Photo fabrication method, Sheet application method printer etc
Material	- Metal, Ceramic, Polymer, Biocompatible material, Hybrid material, Smart material etc
SW	- Topological optimization design, Lattice structure/ Dynamic debug design, Support production, Slice, Equipment controller, Virtual prototyping tool, Shape search SW, Embedded for printer SW, Hardware control technology etc
Service	- Prototype of Finished blueprint with 3D Printer, Print service that outputs finished product using scan file, Remove debris form printouts, Surface processing, Painting, Post-processing service etc

method), 반대로 재료와 접착재료를 동시 분사하여 적층하는 방식 재료 분사 방식(Material spray method), 광경화성 물질을 이용하여 선택적으로 빛을 조사하는 분말 소결 방식(Powder sintering) 등 다양한 방식이 존재한다. 사용하는 재료 또한 금속, 세라믹, 고분자 소재, 생체적합 소재를 사용하여 다양한 시제품 출력 서비스, 고부가 가치 산업 등을 특정 소프트웨어를 통해 단순 시제품부터 기능을 가진 시제품까지 다양한 영역대로 시장 확장이 가능한 기술이다.

금속3D프린터는 앞서 시장을 주도해왔던 고분자를 이용한 3D 프린팅 시장보다 더 빠른 성장세를 보여주고 있다. 2017년 판매된 금속3D프린터가 1,768개로 이는 전년도에 비해 80%가 증가한 수치이며, 이는 같은 기간 동안 성장한 3D프린팅 시장의 성장률이 21%인 것을 감안한다면 상당한 성장률의 차이가 있음을 알 수 있다. 금속3D프린팅 시장에서 사용되는 출력 방식은 대부분 고체 분말 형태의 금속재료를 레이저를 이용하여 소결 혹은 접착시키는 방식을 사용하는데, PBF (Powder Bed Fusion) 방식을 사용하는 독일의 Concept Laser, EOS 제조사와 DED (Direct Energy Deposition) 방식을 사용하는 미국의 3D Systems 제조사가 시장을 점유하고 있다. 금속3D프린터의 경우 제조 가능 크기, 출력 소스의 종류, 부대설비 등에 따라 가격이 크게 차이가 나지만 대부분의 경우 5억 원 이상의 가격에서 많게는 30억 원의 가격이 형성되어 있다^[5].

기존의 금속3D프린팅 장비가 높은 가격대에 형성되어 있어 보급 제품으로는 적용하기가 어려우며 사용되는 재료 또한 높은 분말 제조 난이도로 인한 원재료의 20~30배에 달하는 금속분말의 가격이 형성되어 있다. 게다가 분말 소재는 장비의 보증 문제로 인해 장비사에서 공급하는 소재만을 사용해야 해서 3D프린팅 독

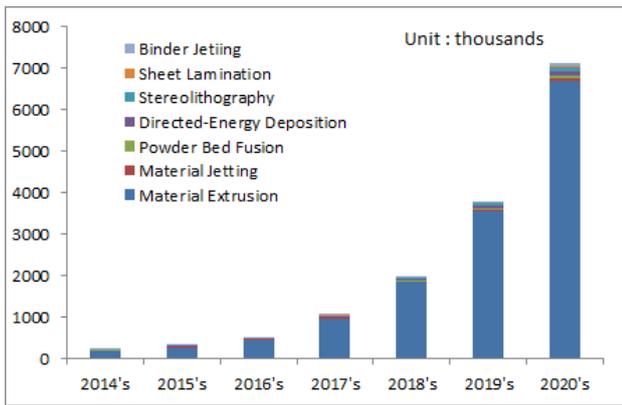


Fig. 2 Supply of 3D Printer according to type

자 기술 개발에는 항상 한계가 존재해왔다.

산업용 3D프린터 장비 공급업체의 경우 소수의 선두 기업들이 시장의 약 70% 이상을 점유하고 있으며, 장비 공급업체가 소재 공급까지 주도하고 있는 상황이다. Stratasys (USA) 외 상위 8개 기업의 매출은 전 세계 3D프린팅 시장의 약 48%가량을 차지하며 최근에는 구글, HP, 아마존 등 글로벌 기업이 신규 3D프린팅 분야에 진출함에 따라 시장 경쟁이 심화될 전망이다. 이러한 현황을 극복하고 미래의 3D프린팅 산업을 주도해가기 위해서는 새롭게 성장하고 있는 금속3D프린팅에 기존의 고가의 외국 기술이 아닌 저비용의 새로운 국내 고유의 기술이 필요하다^[6].

본 연구에서 개발한 DME (Direct Melting Extrusion) 방식의 금속3D프린팅 기술은 유도가열을 이용하여 금속재료를 국부적으로 가열시켜 용융시킨 후 배드 위에 적층 시키는 방식으로 고가의 레이저 장비가 필요 없으며, 사용되는 재료 역시 고가의 파우더 형태가 아닌 저가의 와이어 필라멘트 형식의 금속재료로 재료비 역시 절감이 가능하다^[7].

DME 방식은 기존의 열가소성수지를 사용하는 FDM 방식과 매우 유사한 방식의 출력방식이다^[8,9]. FDM (Fused Deposition Modeling) 방식은 가장 넓게 보급되어 사용되고 있는 3D프린팅 기술 중 하나로 DME 방식과 동일하게 필라멘트 형태의 재료를 노즐부에 용융시킨 후 압출시키는 방식의 3D프린팅 기술이다. 다른 방식에 비하여 매우 간단한 구조로 대형화에 용이하여 산업적인 측면에도 많이 사용되며 일반 가정 및 교육용으로도 압도적으로 보급되고 있는 3D프린터이다. Fig. 2와 같이 재료를 압출시켜서 적층하는 Material Extrusion 방식은 FDM에서 주로 사용하는 원리이며 이는 쉽게 적용이 가능하고 장비가 저렴하다는 장점이 있어 세계 3D프린터 보급량의 90% 이상이 FDM 방식의 3D프린터이다^[4,10].

유도가열을 이용하여 금속재료를 용융 압출시킬 수 있다면, 고부가 가치산업의 선두주자인 금속3D프린터 산업을 주도할 수 있

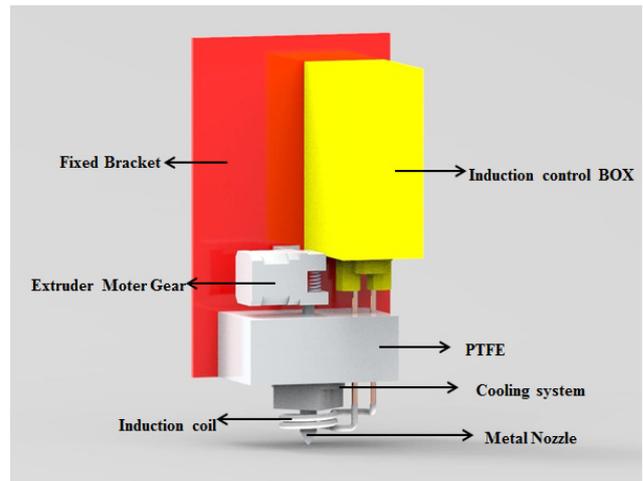


Fig. 3 Induction Extruder Nozzle system

을 것이다.

2. 장비 설계

2.1 개념 스케치

유도가열 압출기를 제작하기 위한 개발 개념

- ① 금속재료를 용융시킬 수 있는 온도에 안전하게 도달하여야 한다.
- ② 고온 압출 시 외부 열전도를 막아주는 냉각기능이 동반되어야 한다.
- ③ 금속재료 종류에 따른 노즐의 가공 재료 선정이 고려되어야 한다.
- ④ 소재 압출 시 정밀 제어가 가능한 구조여야 한다.

기초 개념을 바탕으로 금속재료를 용융시킬 수 있는 가열 온도 컨트롤러의 제작과 금속재료의 용융 온도에 안정한 노즐이 필요하며, 소재 압출 시 정밀제어가 가능한 컨트롤러가 구비되어야 한다.

Fig. 3에서는 인덕션 코일을 구비한 노즐과 일체형 압출기의 전체적인 구성도를 나타내고 있다. 금속 소재 필라멘트를 삽입시키면서 인덕션 코일을 구비한 노즐에서 고온의 금속 소재 Al4043 (Φ1.2) 등을 용융하고 적층할 수 있는 구조이며, 고주파로 1073 K 이상의 온도를 컨트롤하고 외부의 장치 및 노즐의 온도 유지 등을 위하여 일정 온도를 유지할 수 있는 Cooling System을 적용하였다. 해당 시스템의 고온 출력으로 인하여 외부 기계장치의 손상을 막고자 열 차단 역할을 하는 테프론 봉치를 사용하여 이중으로 보호하는 역할을 한다.

2.2 금속출력용 익스트루더 개발

금속재료가 압출되는 익스트루더부에는 직접적으로 금속재료

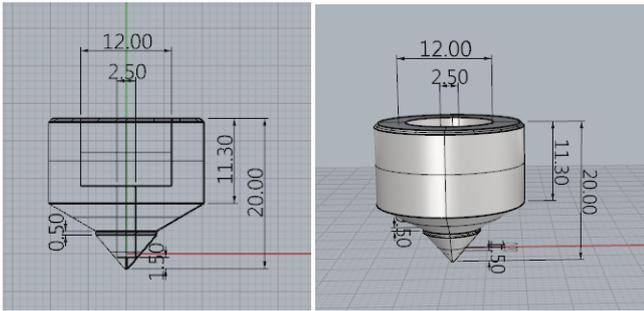


Fig. 4 Induction Extruder Nozzle Design

가 지나가며 열을 받아 용융되는 Nozzle, 유도가열로 인한 열이 외부로 유출되는 것을 방지해주는 Cooling system, 유도가열을 통해 노즐부에 열을 가해줄 Induction coil 3개부로 구분되어 있다.

노즐부는 금속이 용융이 될 때 열 변형이 발생하지 않는 안전한 출구의 역할을 해주어야 한다. 적재는 873 K 많게는 1073 K에서도 완전한 열 안전성을 띠어야 하며 설계 디자인 역시 금속재료로 인한 막힘 현상이 최소한으로 발생하도록 디자인하되 막힌 재료의 재 압출이 가능한 구조의 형성이 필요하다^[11].

유도가열 방식의 금속3D프린팅의 중요한 연구인 노즐을 Fig. 4과 같이 설계·제작하였다. 노즐의 머리 부위와 재료 투입 부분의 금속 튜브가 체결하도록 하였으며, 전체 노즐의 크기는 전체 지름 20.50 mm, 튜브 체결 부위 12.00 mm, 높이 20.00 mm, 와이어 재료 공급 직경은 2.5 μm 이며, 재료가 토출되는 노즐의 직경은 200~400 μm 이다. 사용된 재료는 SUS303F으로 100~850 K까지 열팽창계수가 20.8 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ 의 일정한 값을 보이며, 이는 사용될 금속재료 Al4043, Al5356의 용융점이 918 K, 910.7 K로 해당 적층 연구에 있어 최적의 조건을 가지고 있다.

익스트루더에서 금속 소재를 용융하기 위한 노즐부와 재료를 유입할 때 고온의 열이 전도되는 것을 방지해주는 냉각 부는 일체형으로 제작 하였다. 압출 뭉치는 높은 열에서 건디는 테프론을 사용 하였으며, Fig. 5와 같이 Cooling System은 냉각수가 298 K를 유지하면서 IN, OUT 할 수 있도록 구조·설계 되었다.

인덕션 코일은 6파이 지름으로 두 선으로 제작하고 노즐 20 mm를 감을 수 있도록 만들었으며, 고온으로 유지되는 노즐 부위의 안전성을 위해 실리콘으로 제작되었다. 제작된 압출기 뭉치에 인덕션 코일의 길이를 조절하여 제작하면 코일 내부에서 298 K 온도를 유지하도록 물 흐름 장치를 장착하였으며, 제작된 인덕션 코일을 고주파 장치 CTBOX와 연결하였다.

1차 테스트를 위하여 PCB 보드를 제작하여 테스트해본 결과 고주파의 출력이 낮아 고 용점의 금속재료의 용융이 어렵다고 판단하였다. 별도의 고주파 장치를 제작하여 1273 K이상도 컨트롤

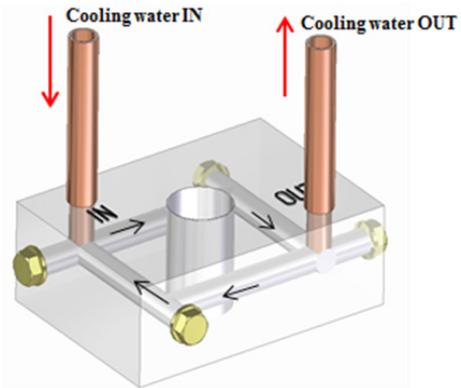


Fig. 5 Induction Extruder Cooler Design

할 수 있는 고주파 출력장치의 제작을 진행하였다.

냉각 칠러는 고주파 장치, CTBOX, 인덕션 코일, 압출기 냉각 Cooling System까지 연결되어 IN, OUT을 통해 온도를 유지할 수 있도록 해준다.

2.3 적층배드 제작

적층 배드는 노즐부에서 용융 압출되는 금속 출력물이 적층이 시작되는 매우 중요한 부품이다. 열가소성 수지를 이용하고 있는 FDM의 기기의 경우는 대표적으로 ABS, PLA 수지 등을 사용하여 출력물을 형성하는데, 이러한 재료는 보통 출력물의 용융 온도가 473 K로 압출되며 배드의 온도는 대략 338 K정도로 고온 압출되는 출력물의 상온에 적응 되어 발생하는 온도차에 의한 수축·팽창 현상을 방지하였다. 출력물과 배드와 접착력이 있어야 그 위로 추가적인 적층이 설계한 대로 이루어지기 때문에 특정 재료 출력 시 배드에 그 출력물과 이상적인 접착력을 가지는 물질을 도포하여 출력하기도 한다^[12].

금속 출력물의 경우에는 473 K 전·후반의 온도로 압출 시키는 기존의 FDM 방식과는 다르게 사용되는 재료가 적어도 1146 K을 웃도는 용융점을 가지고 있어 출력물과 상온과의 온도차가 매우 크다. 높은 강성을 지녔다고 하나 이러한 온도차로 인해 상온의 배드에 적층하게 되면 과도한 열차이로 인해 열 수축·팽창이 발생하게 되어 원하는 디자인의 출력물의 형성이 어렵게 된다. 이상적인 배드의 온도를 찾음과 동시에 여러 출력물들이 안전하게 도포될 수 있는 배드의 디자인과 재료를 시제품 제작 테스트를 통하여 Fig. 6와 같은 배드 표면에 특정 Patterning을 새겨 Fig. 7과 같이 적층 테스트를 진행하였다.

또한 안정한 재료의 압출을 위해 적외선 온도계를 이용하여 실시간으로 온도를 측정하여 고주파의 양과 열량을 조절하기 하며 일정한 온도를 유지해주었다. 온도 측정 범위는 523 ~ 1273 K이다.



Fig. 6 Bed Design

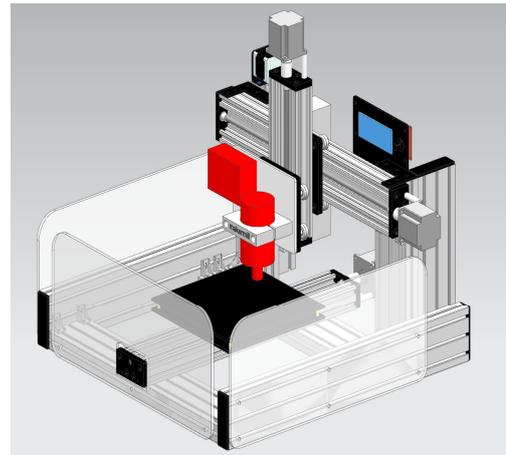


Fig. 8 3D Printer Design

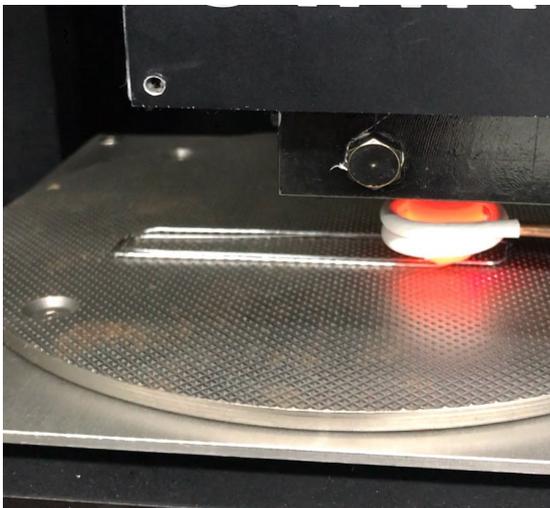


Fig. 7 Metal material Extruded on the Bed



Fig. 9 Prototype of metal 3D printer

2.4 3D프린터 설계

200 mm 이상의 적층이 가능한 X, Y, Z-axis Actuator 설계하였다. 본 장치는 금속재료의 접착력이 있는 구조의 사이즈를 200 mm 이상 적층이 가능한 베드 모델링으로 고정밀도 및 출력 진동의 최소화를 위한 Fig. 8과 같은 X, Y, Z-axis Actuator 구조형으로 제작하였다.

설계된 Actuator와 제작된 Extruder 및 냉각 칠러 장치를 CTBOX에 연결 설치 후 이러한 부분을 지탱할 수 있는 프레임과 이동을 고려하여 STEP MOTER23으로 이동 가능하도록 시제품을 제작하였다. Fig. 9와 같이 2층 구조로 설계하여 상부에는 3D프린터 하부에는 유도가열 컨트롤러 및 기타 장치를 설치할 수 있도록 제작 진행하였으며, 정면에 투명 블랙 PC판과 내부에 LED 램프를 설치하여 출력되는 내부를 볼 수 있도록 제작하였다. 하단에는 장비 이동을 고려하여 바퀴를 설치하였으며 뒷면은 칠러, 전원 연결선 등을 위한 후면 타공을 하였다.

3. 프린팅 테스트

인덕션 코일을 이용한 금속3D프린터의 열 안전성을 테스트를 진행하였다. 테스트 결과 Fig. 10(a)와 같이 사용한 두 금속재료 Al5356 과 Al4043은 각각 918.1 K, 910.7 K에서 용융 적층이 되었으며, Fig. 10(b) 노즐부의 재료인 SUS303은 두 용융온도인 946 K에서 열 변형이 일어나지 않고 더 높은 온도인 1123 K에도 열적 안전성을 보여 주었다.

노즐부의 열 변형에 대한 안전성에 확인 후 출력물의 적층 정밀도 테스트를 진행하였다. 정밀도 테스트는 3D스캐너를 사용하여 출력 결과물을 분석·진행하였다. Fig. 11와 같은 형태의 출력 샘플 설계도를 통해 출력하여 각각 모양의 Z 축의 정밀도를 관찰하였다.

정밀도 테스트는 출력물의 각각 꼭짓점과 사이점을 기준으로 기준점의 Z축 길이를 측정하여 비교·분석 하였다. Table 2와 같이 10 mm의 높이로 적층을 진행한 후 Z축 길이를 측정한 결과 10%

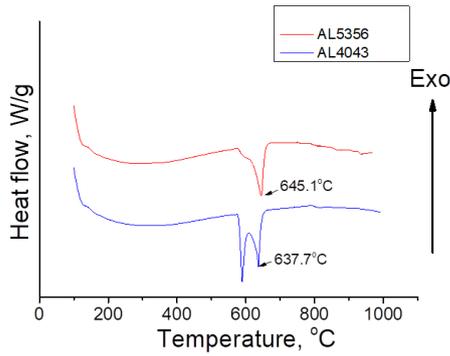


Fig. 10 (a) Heating Stability Test of Materials

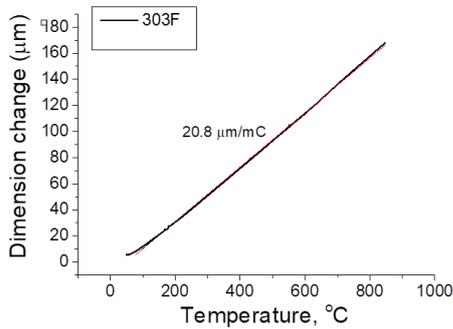


Fig. 10 (b) Heating Stability Test of Nozzle

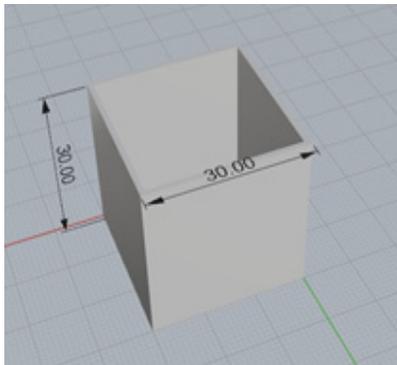


Fig. 11 Output sample

이내의 오차의 정밀도를 가지고 있음을 확인하였다.

인장강도 테스트를 진행하기 위하여 Fig. 12 규격에 맞추어 테스트 제품을 Al5356을 이용하여 5개의 시편을 제작하여 인장강도 시험기를 통하여 테스트를 진행하였으며 각각의 인장강도의 오차를 측정하였다. Al5356 시편의 인장 테스트 결과는 Fig. 13과 같이 5개의 테스트 시편 모두 약 0.86% 편차의 유사한 인장강도가 관찰되었다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 금속 소재를 고가의 레이저 장비나 파우더 형태

Table 2 Lamination precision

H (mm)	1	2	H (mm)	3	4
	9.69	9.47		9.43	9.39
AVG	9.57 mm		AVG	0.941 mm	
H (mm)	5	6	H (mm)	7	8
	9.62	9.57		9.64	9.35
AVG	0.960 mm		AVG	0.950 mm	

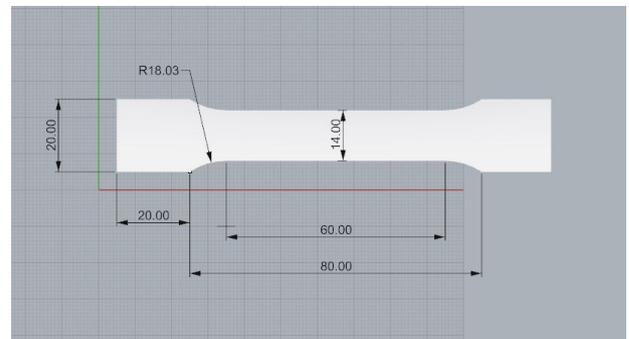


Fig. 12 Output sample for tensile strength test

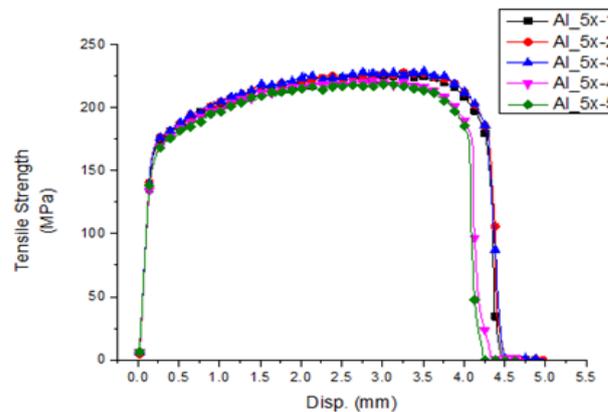


Fig. 13 Tensile Strength Test of Al5356

의 재료를 사용하지 않고 출력하기 위한 연구를 진행하였다. 유도 가열을 이용하여 금속 재료를 원하는 부분에 정밀 가열 후 압출하는 DME (Direct Melting Extrusion) 방식을 금속 알루미늄 선재에 적용하여 실험을 진행하였다. 실험 결과 단층으로 진행되는 배드위의 출력물은 원하는 형상을 이루었으나 여러 Layer가 적층이 되는 경우 출력물은 많은 빈공간과 5% 이상의 오차를 보였다. 이는 1146 K 이상에의 고온에서 용융이 되어 적층이 된 금속 Layer

가 상온에 노출이 되며 급격한 산화와 동시에 새로 압출되어 적층되는 금속 Layer와의 온도 차이로 인해 발생하는 접착문제인 것으로 추정된다^[13].

이러한 문제를 극복하기 위하여 추가적인 산화방지 가스 설계를 통해 적용되어 있는 금속 Layer의 산화를 방지할 필요성과 추가적인 연구·개발을 통해 새롭게 압출되어 나오는 금속 Layer와의 안정하고 정밀한 적층을 위한 추가적 설비가 필요한 것으로 생각된다.

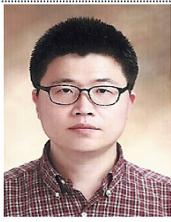
이처럼 유도가열을 이용한 초고온 용융을 통해 우수한 강성을 가진 금속재료를 DME 방식으로 압출하는 방식을 3D프린터는 금속재료뿐만 아니라, 뛰어난 열적 안정성과 강한 물성을 가진 엔지니어링 플라스틱을 재료로 제품을 출력할 수 있는 기술이 될 수 있다.

기존 방식의 금속3D프린트와 같이 고가의 레이저 장비와 파우더 재료를 사용하지 않는 유도가열을 이용한 저가의 DME 방식의 금속3D프린터는 급격히 성장해가는 3D프린팅 시장의 일본, 독일, 미국 이 세 개의 국가의 독점 형태의 시장을 반전시키기 위한 획기적인 기술이 될 것이다.

References

- [1] Berman, B., 2012, 3-D Printing: The New Industrial Revolution, *Business Horizons*, 52:2 155-162, <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>.
- [2] Chua, C., Leong, K., 2014, 3D Printing and Additive Manufacturing, World Scientific Publishing Company, Singapura.
- [3] Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., Hoffmann, M., 2014, *Industrie 4.0*, *Wirtschaftsinformatik*, 56 261-264, <https://doi.org/10.1007/s11576-014-0424-4>.
- [4] Lee, Y., 2016, Metal 3D Printer and CNC Manufacturing innovation, *Magazine of the IEEK*, 43:8 30-35.
- [5] Mat Web, n. d., viewed 2 October 2018, <<http://xxxx.wpcorona.com/archives/7878>>.
- [6] Ahn, G., 2018, viewed 5 February 2019, Trends and Implications of 3D Printing Industry in the Fourth Industrial Revolution, <<https://signal.sedaily.com/ReportView/1310>>.
- [7] Rudnec, V., Loveless, D., Cook, R., 2017, *Handbook of Induction Heating*, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- [8] Lee, S. Y., Lee, K. H., Kim, J. Y., Choi, J. W., Park, J. H., Lee, J. B., 2019, A Study on the Nozzle Characteristics of the Induction Heating Type Metal 3D Printing, *Proc. of the Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Autumn Conf.*, 80.
- [9] Yeon, S., 2017, A Study on the Flow Characteristics of the FDM Type Metal 3D Printing Process, *The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers an Academic Presentation*, 81.
- [10] Park, S., 2014, 3D Printing Industry Trends, *The International Promotion Agency of Culture Technology*, 2:1 30-32, <https://doi.org/10.17703/IJACT.2014.2.1.030>.
- [11] Chang, R., Nam, J., Sun, W., 2008, Effects of Dispensing Pressure and Nozzle Diameter on Cell Survival from Solid Freeform Fabrication-Based Direct Cell Writing, *Mary Ann Liebert*, 47:1, 17-24, <https://doi.org/10.1089/ten.a.2007.0004>.
- [12] Spoerk, M., Gonzalez-Gutierrez, J., Sapkota, J., Suhuschnigg, S., Holzer, C., 2017, Effect of the Printing Bed Temperature on the Adhesion of Parts Produced by Fused Filament Fabrication, *Plastics, Rubber and Composites*, 47:1 17-24, <https://doi.org/10.1080/14658011.2017.1399531>.
- [13] Over, H., Seitsonen, A. P., 2002, *Oxidation of Metal Surfaces*, American Association for the Advancement of Science, America.

	<p>Su Yeon Lee CEO Jung-Rok Co., Ltd. Her research interests are metal materials and 3D printing system. E-mail: sylee@jungrok.com</p>
	<p>Chang Soo Kim Professor in the Department of IT Convergence and Application Engineering, Pukyong National University. His research interests are smart factory, AI, disaster prevention, and system programming. E-mail: cskim@pknu.ac.kr</p>
	<p>Jean Ho Park Principal researcher in Korea Institute of Industrial Technology. His research interests are dynamic system modeling and control. E-mail: jeanho@kitech.re.kr</p>



Jong Beom Lee

Principal Reseacher in the Advanced Process and Materials R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology. His reseach interests are Materials Science, Characterization Technology, and Manufacturing System.
E-mail: lib01@kitech.re.kr



Su Hee Kim

Dr. NBIT, Korea Advanced Manufacturing Research Institute. Her research interest is 3D printing.
E-mail: s.kim@amrc.co.uk



Yun Sung Han

Dr. NBIT, Korea Advanced Manufacturing Research Institute. Her research interest is 3D printing.
E-mail: emxysh@uipa.co.kr



Hee Sung Lee

Doctor in the department of Dental Science, Kyungpook National University. His research interest is 3D printing.
E-mail: yhs6770@uipa.or.kr