

금속 3D 프린터 제작조건 변화에 의한 금속소재 물성변화연구

노용오*[†] · 이병호* · 박순홍** · 한영민*** · 배병현* · 김영준* · 조황래* · 현성윤* · 방정석*

Study of Mechanical Property of Metal by Changing the Conditions of Metal 3D Printing Parameter

Yong-oh Noh*[†] · Byung-ho Rhee* · Sun-hong Park,** · Yeoung-min Han*** · Byunghyun Bae*
· Young-june Kim* · Hwang-rae Cho* · Seong-yoon Hyun* · Jeong-suk Bang*

ABSTRACT

The development of a staged combustion cycle engine with higher performance is essential to provide higher transport capability of space launch vehicles. The combustor head of engine has a cone-shaped head and its manifold of combustor has a very complicated structure. The head and manifold have been manufactured by casting or machining method. Metal 3D printing technologies are recently known as one of promising methods to improve manufacturing process for them because they are possible to overcome limitations of the two methods. In this paper, a selective laser sintering method is used to make test materials and their physical properties are studying by changing its operation parameters to establish the better processing conditions. It is found that the 3D printing method is acceptable to manufacturing the head or manifold of combustor for staged combustion cycle engine.

초 록

우주 발사체의 운반능력을 향상시키기 위하여 고성능 다단연소사이클 엔진의 개발은 필수적이다. 그 중 연소기 헤드는 기체산화제의 유입을 위해 콘 형상으로 되어 있으며, 매니폴드는 매우 복잡한 구조를 가지고 있다. 이러한 헤드는 주조 방식이나 기계가공으로 제작되어 왔다. 기계가공의 한계나 주조재료의 특성과 재료의 한계성을 탈피하여 복잡하고 가공이 어려운 연소기 헤드의 제작 공정을 3D 금속 프린팅 공정을 이용하여 개선하는 기술을 확보하고자 한다. 현재 3D 금속 프린팅을 이용하여 주연소기에 사용할 수 있는 소재의 물성을 파악하고 프린팅 제작조건을 변화시키는 공정개발을 통하여 더욱 나은 물성을 확보하고, 이를 바탕으로 연소기 헤드를 제작하고, 접합공정을 개발하여 연소시험을 통해 그 성능을 입증하고 제작공정을 확립하고자 한다.

Key Words: Staged combustion Cycle Engine(다단연소사이클 엔진), Metal 3D Printing(금속 3D 프린팅), Selective Laser Sintering(선택적 레이저 소결)

1. 서 론

3D 프린팅 기술은 1981년 최초로 개발된 이후 [1] 2000년대 초반까지 단순히 제품 모형 및 시제품 제작등 일부 분야에 국한되어 사용됐으나 최근 들어 기술발전 및 경제성 확보의 이유로 다양한 사업 분야에 적용되고 있으며, 특히 고부가가치의 기능성 부품제조에 활용되고 있다.

특히 RP(rapid proto-typing)에서 AM(Additive Manufacturing)로의 지향 목표가 변화하고 있는 추세이다. 이러한 기술개발은 제조자 중심에서 소비자 중심의 기술개발로 가속화가 진행되고 있는 것을 나타내는 것이다. 이렇게 개발된 3D 프린팅 시스템은 각 산업의 중추적인 역할을 하게 되며 우주항공, 특수 부품 등의 소비자 중심의 연구 개발이 필수적이라 할 수 있다. 3D 프린팅 기술은 소비자 중심의 산업사회에서 발현되는 기술로써 차후 원료에서 생산품에 이르기까지 일관공정에 의한 기술개발이 필요한 연구이다[2].

엔지니어는 제품의 제조 설계단계에서 공정을 미리 전제로 하여 주조, 단조, 압출, 프레스 등의 공정을 염두에 두기 때문에 모든 디자인이나 기구 설계가 전통적인 제조공법을 고려한 설계가 중요하다. 그러나 3D 적층 제조 기술은 엔지니어가 설계한 그대로를 만들 수 있기 때문에 기존 전통공정에서 만들 수 없는 어떠한 제품도 제작이 가능하다. 특히 해외 우주 산업체들의 경우 프로토타입이나 시제품 생산시 필요한 금형 비용을 대폭 줄일 수 있어 도전적인 제품개발이 가능한 것도 큰 매력이다. 미국의 Rocket Lab은 뉴질랜드에서 로켓개발을 진행하며 AM기술을 적극적으로 도입하여 저비용화를 실현했다고 한

다. 로켓2단에 9대의 엔진을 장착하여 인젝터, 터보 펌프등의 주요 추진체 구성요소들을 타이타늄 합금으로 제조하여 로켓을 500만 달러 미만으로 발사할 수 있다고 밝히고 있다[3].



Fig.1 The Rutherford rocket engine(Rocket Lab)

우주 발사체 중에서 높은 추력과 효율을 제공하기 위하여 고성능의 다단연소 사이클 엔진의 개발은 필수적이며, 그중에서 주연소기 헤드 부품의 복잡형상을 주조 방식으로 제작하는 공정에서 탈피하여 새로운 공정을 개발하고 복잡하고 가공이 어려운 연소기 헤드의 제작공정을 3D 공정으로 개선하는 기술이 필요하다.

우선 금속 3D 프린팅기술의 제작 공정을 파악하여 제작하고자 하는 부품의 형상과 맞추어 3D 프린팅 방식을 선정하고, 연소기에 필요한 물성의 소재를 3D 프린팅으로 제조하여 제품의 성능을 검증해야 할 것이다. 일반적으로 3D 금속 프린팅 기술은 금속 powder를 먼저 유입하고 레이저 또는 전자빔의 열원을 이용하여 용융, 고화, 이송의 형태를 이용하여 제품을 제작하는 3D Selective Laser Sintering(SLS) 방식과 Direct Metal Deposition(DMD) 방식이 대표적이다. 본 연구에서는 항공우주 발사체의 다단연소사이클 엔진의 주연소기 헤드 부품을 3차원 적층 방식으로 제작하는 공정개발을 연구 목표로 하였으며 이에 대한 공정의 선정, 공급되는 Source의 선정, 기계적 특성 및 물성을 향상시키기 위한 공정 및 소재의 다양화 연구를 목표로 하였으며

* (주)비트로테크

** 포항산업과학연구원

*** 한국항공우주연구원

† 교신저자, E-mail: yonoh@vitzrotech.com

이를 통해 항공 우주 부품에 사용가능한 공정의 개발을 목표로 하고 있다.

2. 3D 프린팅 장비의 선정

본 연구에서 목표로 하는 연소기 헤드 부품의 제작 기술개발을 하기 위하여 부품형상의 제작을 가능케 하는 장비의 선정이 필요하다. 금속 3D 프린팅 장비의 경우 크게 두 가지 방식으로 구분할 수 있다. 금속 분말을 용융시키는 열원의 선택과 Table. 1에서와 같이 금속 파우더를 도포하고 원하는 부분만 용융시켜서 쌓아나가는 SLS 방식(Selective Laser Sintering)과 레이저 열원과 동시에 직접 파우더를 분사하여 용융 적층하는 DMD방식(Direct Metal Deposition)으로 나눌 수 있다.

DMD 방식의 경우 SLS과 비교하여 적층속도는 빠르나 복잡형상을 구현하는데 어려움이 있다 특히 내부 채널이나 중공형상을 제작시 처짐이 발생하여 형상재현에 어려움이 있으며, 제품의 정밀도 또한 떨어져 필수적으로 후가공을 통한 제품의 정밀도를 향상시키는 방법을 택해야 한다. 그에 반대로 SLS방식의 경우 복잡형상의

제조는 가능하지만, 제작시간이 오래 걸리고, 장비의 크기에 따라 제작 크기의 제한이 있다.

그리고 원료로 쓰이는 금속 파우더의 경우 사용가능한 분말 크기의 범위가 한정되기 때문에 현재 원료로 쓰이는 고가의 금속 파우더를 수급하여 사용하게 된다. 따라서 분말의 공정 수율 또한 장비 선택의 하나의 문제점으로 자리 잡고 있다.

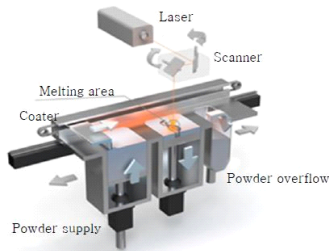
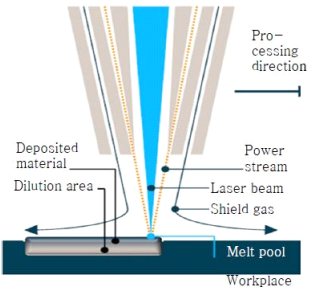
여러 관점에서 3D 프린팅 방식을 비교 분석하여 본 연구에서 목적으로 삼는 헤드 부품의 제작을 위한 SLS 방식의 금속 3D 프린터를 선정하였으며, 장비의 모델과 사양은 다음과 같다.



Fig. 2 EOS M290 3D Metal Printer

Building volume : 250×250×325(mm)

Table 1 SLS, DED방식의 비교[3]

| | Selective Laser Sintering | Direct Metal Deposition |
|-----------|---|--|
| 개략도 |  |  |
| 제작속도 | 5~20 cm ³ /h | ~70 cm ³ /h |
| 정밀도 | ± 0.02~0.05mm/25mm | ±0.125~0.25mm/25mm |
| 표면조도 | Ra 4~10μm | Ra 7~20μm |
| 최대 제작크기 | 500×500×500(mm) | 2,000×1,500×750(mm) |
| 사용가능 금속재료 | Steel, AISi, CoCr, Ni base alloy Bronze, Titanium합금 | Steel, Titanium합금, Ni base Alloy, ceramic |

Laser type : Yb-fibre laser 400W
 사용금속 : Stainless steel 316L, Ti alloy,
 Al alloy, Inconel

3. 실험 방법

본 연구를 위하여 금속3D 프린터 M290장비를 이용하여 금속 시편을 준비하게 된다.

3D 프린팅의 경우 금속분말에 조사되는 레이저의 에너지 밀도에 따라 제작시편의 물성이 변화하게 되며 에너지 밀도의 관계식은 다음과 같다.

$$E_d = \frac{P}{v \cdot h \cdot t}$$

E_d : Energy density

P : Power(W)

v : speed(mm/s)

h : hatching space(mm)

t : layer thickness

금속소재의 제작인자 중 주요인자는 레이저 파워와 scanning 속도가 주요하며, 장비 제조사에서 제공하는 UNS S31603의 제작인자는 장비제조사의 자산으로 공개가 불가하며 이후 퍼센티지(%)로 표기하기로 한다.

금속 3D 프린팅을 이용하여 제조되는 제품의 경우 base plate위에 제작이 되며, 각 layer마다 용융과 응고의 과정을 거치게 되어 제품 내부에 잔류 응력이 존재하게 된다. 이는 제품의 사용시 변형을 가져오며 결국 제품의 사용불가를 초래할 수 있다. 이를 완화하기 위해 모든제품은 plate에 부착된 채로 SAE AWS2759/4C의 표준 방법으로 응력완화 열처리를 진행하게 된다.

3.1 기본 물성 평가

금속 3D 프린터를 이용하여 현재 연소기 제작에 사용되는 UNS S31603(Stainless steel 316L)소재와 차후 연소기 제작가능소재로 검토되는

UNS S20910소재의 3D 프린팅 여부를 확인하기 위해 3D 금속 프린팅으로 인장시편 제작을 위한 블록을 제작하여 인장시험평가를 진행 하였다. 그리고 제작된 시편의 제작 방향에 따라 SEM으로 미세 조직을 관찰하고 XRD를 이용하여 결정 구조 평가도 동시에 진행 하였다.

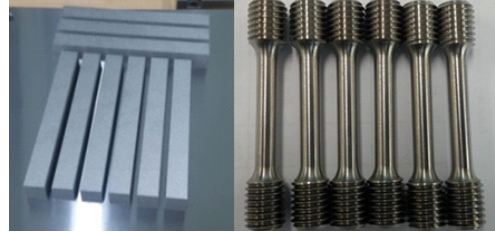


Fig.4 3D printed block(left) and Test pieces (ASTM E8)(right)

3.2 접합특성평가

금속 3D 프린팅으로 제작된 제품의 경우 현재 실제 연소기 부품의 제작을 위해 금속 접합능력에 대한 검증이 필요하며, 이를 확인하기 위하여 현재 당사에서 제조하는 연소기에 사용되는 접합기술 전자빔용접(Electron beam welding), TIG 용접, 확산접합(Brazing)등을 이용하여 3D 프린팅시편의 접합능력을 확인 하였다. 또한 확산접합시의 고온에서 접합능력 또한 확인하였다.

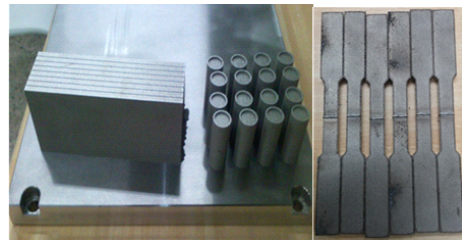


Fig. 5 3D printed plate and brazing test piece(left) Electron beam welded test pieces(sub- ASTM E8)(우)

3.3 제작조건의 변화에 따른 물성변화

앞서 말한바와 같이 SLS방식의 금속 3D 프린

팅의 단점으로 낮은 제작속도가 대표적이다. 원료금속마다 차이는 있지만 조밀구조를 필요로 하는 제품의 경우 일반적으로 20 μm 이내의 layer thickness로 적층을 하게 되며, 각 layer당 레이저 조사후 원료 재도포의 공정을 수천에서 많게는 수만번 반복하는 공정을 거치게 된다.

제작시간의 단축과 물성의 변화를 파악하여 각각의 제작조건에 따른 물성을 파악하고 쓰임새를 찾기 위해 Table.2에서 레이저 파워와 스캔속도의 변화를 주어 Fig.6과 같은 대조표를 제작하였으며, 그중에서 표면조도와 수축율을 감안하여 파워는 100 %로 고정하고 스캔속도를 변화를 주어 인장시편을 제작하여 물성의 변화를 확인하였다.

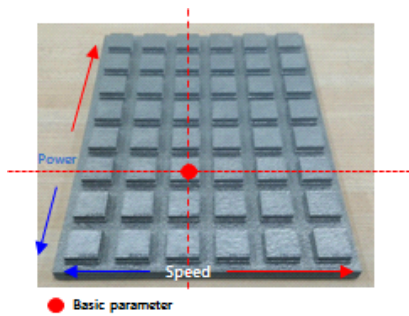


Fig. 6 Surface roughness check block by various parameters change

4. 실험결과 및 고찰

4.1 금속소재의 기본물성평가

금속 3D 프린팅을 이용하여 UNS S31603(이하 316L)소재와 UNS S20910(이하 XM19)소재의 인장시편을 제작하여 인장시험과 조직분석결과는 Fig.7과 같다.

일반적으로 제조되는 상용소재의 항복강도를 넘어서는 결과를 보여주고 있다. 이는 용융, 단조, 압출로 제작되는 강소재 내부의 합금조합의 불균일한 분포보다는 3D 프린팅 미세파우더가 균일하게 도포된 상태에서 용융, 응고되어 나타나는 물리적 특성의 영향으로 기존 316L소재와

XM19소재의 물성치를 넘어서는 결과를 나타내고 있다.

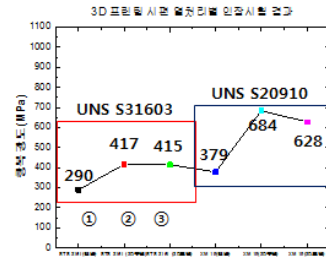


Fig.7 UNS S31603 and UNS S20910 yield strength

- ① Manufactured
- ② Water-cooled after heat treatment(Printed)
- ③ Furnace-cooled after heat treatment(Printed)

제작후 응력완화 열처리의 경우 냉각방법에 의한 차이를 보여주고 있으며 항복강도수치가 일반 사용소재를 넘어서는 수치를 둘 다 기록하고 있기 때문에 이후에 제품의 열처리 산화방지나 오염 방지를 위해 진공로에서 열처리후 로냉을 하는 것이 제품의 품질에도 좋다고 판단된다.

316L 시편의 열처리 전후 X-ray Diffraction 측정결과는 Fig.8에서와 같이 γ -Fe 단상만 나타나고 있으며 SEM 미세조직 분석결과 Fig.9에서 보여주는 바와 열처리전 Meltpool(점선)내부에 martensite조직이 관찰되고 있으나 열처리후 분율의 감소를 확인하였다. 레이저를 이용한 공정이기 때문에 매우 빠른 냉각속도를 가져서 위와 같은 결과를 나타내고 있는 것으로 판단된다. 열처리 이후 산화가 되거나 다른 상의 형성은 XRD 분석결과와 같이 나타나지 않고 있다.

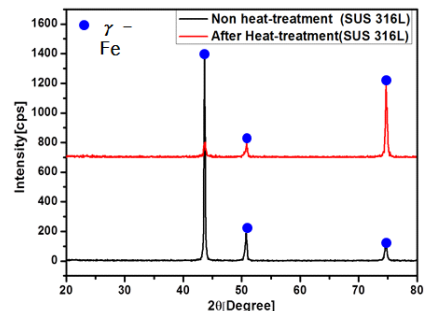


Fig. 8 X-ray diffraction pattern(UNS S31603)

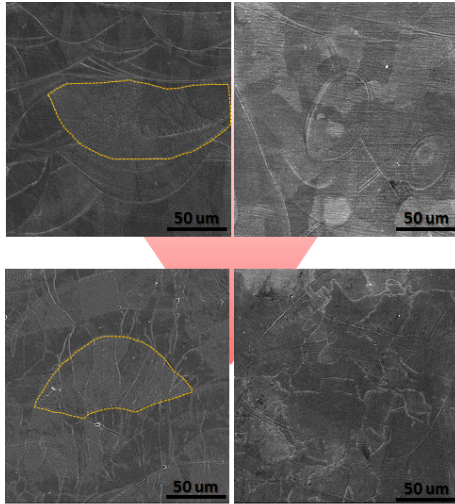


Fig. 9 UNS S31603 SEM images
As-prepared(up) After heat treatment(down)

4.2 접합특성평가

전자빔 용접과 TIG용접의 경우 판상 시편을 제작하여 인장시험을 진행하였으며, 확산접합 시편의 경우 상하 각각 제작하여 삽입금속(AWS 4764)을 이용하여 진공분위기 1050℃에서 공정을 진행하였으며, 이를 이용하여 인장시편을 제작하고 물성평가를 진행한 결과는 Fig. 10과 같다.

모두 상용소재의 접합강도를 훨씬 넘어서는 접합강도를 나타내고 있으며, 특히 XM19소재의 경우 기존소재의 수치를 150% 가까이 넘어서는 수치를 보여주고 있다. 이 결과 또한 앞서 말한 바와 같이 3D 프린팅 소재의 경우 균일한 물성분포를 가지므로 확산 접합시 삽입금속 성분의 균일한 확산에 의한 것으로 판단되고 있다.

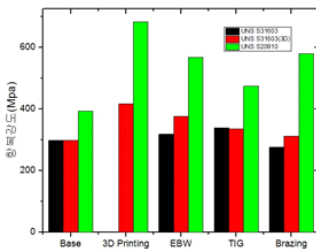


Fig. 10 Comparison of bonding properties at 3D printed materials

연소기의 제작시 3D 프린팅 제품과 기계가공 품간의 접합은 필수적이고, 이렇게 제작된 연소기는 고온에서 작동되기 때문에 연소기헤드의 고온 환경에서 물성평가를 진행 하였으며 결과는 Fig. 11에서와 같이 상온에서는 가공소재 대비 약간의 감소(약10%)하였으나 고온으로 갈수록 그 폭이 증가하여 600℃에서는 15%까지 감소하였다. 그러나 이 수치는 연소기 제작이 필요한 수치를 상회 하므로 3D 프린팅 소재의 적용은 문제가 없을 것으로 판단된다.

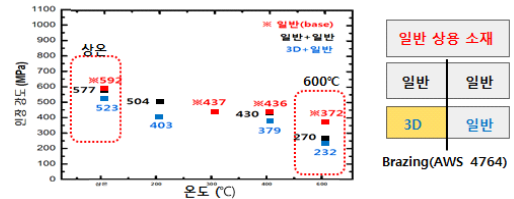


Fig. 11 High temperature properties of brazing test pieces

4.3 제작조건 변화에 따른 물성평가

Fig. 12에 레이저스캔 속도의 변화에 따른 인장강도와 항복강도를 분석하였다.

열처리 전후 인장강도의 차이는 미미하며 180% 이상부터 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 그와는 다르게 열처리 전후 항복강도는 내부응력의 완화로 인하여 20%이상 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 금속powder에 조사되는 에너지 밀도의 차이에 따라 금속의 용융정도와 냉각 시간의 차이에 의한 미세구조의 차이에서 기인한 것으로 판단된다.

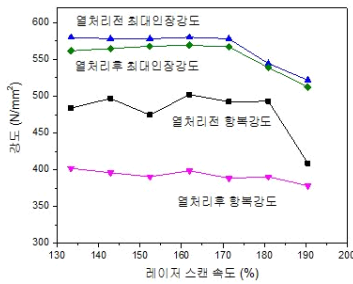


Fig. 12 Strength before and after heat treatment according to scan speed

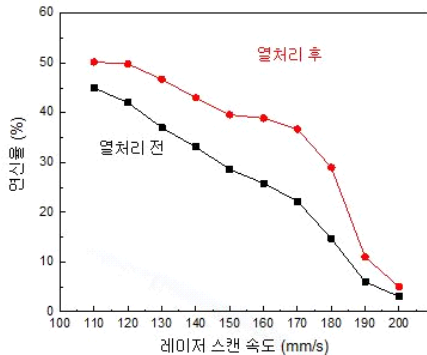


Fig. 13 Elongation before and after heat treatment according to scan speed

Fig.12에서는 제작속도 170% 이하에서 제작된 시편까지 사용이 가능할 것으로 판단되나 Fig.13에서 보여주듯이 DNS S31603시편의 연신율의 경우 140%까지는 316L 상용소재와 비슷한 수치(40±15%)를 나타내며 그 이상의 속도에서는 급격히 감소하는 것을 확인했다. 이 수치의 140%까지 스캔 속도를 상승시켜 제품을 제작하는 것은 문제가 없을 것으로 판단되며 이 결과를 바탕으로 3D 프린팅을 통한 제품의 제작 속도를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 주연소기 헤드 제작에 사용되는 소재(DNS S31603)를 3D 금속 프린팅 공정을

이용하여 제작 후 기본물성을 파악하였으며, 차후 가능소재로 점쳐지는 DNS S20910소재의 3D 프린팅 가능성도 확인하였다.

3D 프린팅으로 제작되는 소재의 물성은 기존 소재이상의 물성을 보여주고 있으며 조직적으로도 문제가 없는 것으로 확인 되었다.

연소기 제작이 필요한 기계가공소재와의 접합 특성 또한 기존소재의 접합특성 이상의 수치를 나타내고 있으며, 연소기 헤드환경에서도 기존수치를 뛰어넘는 수치를 나타내므로 3D 프린팅 소재를 이용한 연소기 부품의 제작은 가능할 것으로 판단된다.

Selective Laser Sintering 방식을 이용하는 금속 3D 프린팅 장비의 문제점으로 지목되는 느린 적층속도의 한계를 확인하기 위하여 수행한 제조속도 변화에 따른 물성변화의 경우 약 40% 이상의 속도 상승에서도 사용가능한 물 성치를 확인 하였으며, 이 수치를 이용하여 더욱 빠른 제작공정을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 미래창조과학부와 한국연구재단의 우주핵심기술개발사업 과제(2014M1A3A3A03670 01)에 의하여 지원 되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Kodama H. Automatic Method for Fabricating a Three Dimensional Plastic Model with Photo Hardening Polymer, Rev Si Antrum, pp.1770-1773, 1981.
2. 입기일, KITTI 마켓리포트 2016년 5월
3. 강민철, 예대회, 고근호, 대한용접·접합학회지 제34권 제4호, 2016년 8월