

레이저용접에 의한 금속구조물의 적층가공 기술

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 유호천
(yooho278@reseat.re.kr)

1. 서 언

레이저를 열원으로 하는 금속구조물의 적층가공(Additive Manufacturing) 기술은 아크 용접에 비해서 정밀도가 높으며 표면조도가 양호하다. 하지만 용착속도가 비교적 낮고 분말이나 열원장치 비용 등 생산 비용이 비싸다는 단점이 있다. 이와 같은 특징들에 의해 현재 소형 정밀 금속구조물의 제조가 용이하지만 점차로 용착속도를 향상시킬 수 있는 제조기술의 발달로 인하여 대형 정밀 금속구조물에게까지 그 적용범위를 넓혀가고 있다.

금속구조물의 적층가공기술은 용가재를 기준으로 하여 용접하는 경우에는 분말과 와이어로 크게 나누어지게 된다. 분말 용가재를 사용하는 경우에는 주로 레이저를 열원으로 사용하여 적층을 하게 되고 와이어 용가재를 사용하는 경우는 레이저, 전자빔 및 아크를 열원으로 하여 적층을 하게 된다. 아크를 열원으로 하는 금속구조물의 적층가공은 크게 GMAW와 TIG용접이 있는데, 높은 용착속도로 인하여 생산원가가 낮은 장점이 있지만 정밀도가 낮고 표면조도가 나쁘기 때문에 레이저용접에 대한 관심이 더욱 집중되고 있다.

본 보고서에서는 최근 가장 많이 사용되고 있는 금속구조물의 적층가공기술인 직접에너지증착법(DED, Directed Energy Deposition), 분말베드용융법(PBF, Powder Bed Fusion), 선택적 레이저용융법(SLM, Selective laser melting)을 분석하고 금속 적층가공하기 전의 예비처리 기술인 레이저 연마(polishing)에 대하여 소개하였으며 향후의 전망을 거론하였다.

2. 직접에너지 증착법(Directed Energy Deposition, DED)

DED계 기술에서 초점을 두고 있는 열에너지는 증착될 부분을 용융시키는 것이 목적인데, 분말 혹은 와이어 형태의 재료를 용융시키기 위해서 사용된다. DED를 기본으로 하는 레이저용접기술로서 DMD(Direct Metal Deposition), LENS(Laser Engineered Net Shaping)를 기본으로 하는 적층가공 기술이 있다¹⁾. 여기에서 특히 DMD는 분말 인젝션시

시스템을 기본으로 하고 로봇팔 위에 파이버레이저와 결합되어 있으며, 기존의 공구, 큰 부품에 붙어 있는 소형 부품, 새로운 부품의 제작 등의 보수에 적당하다.

금속구조물을 적층가공하는 경우, 직접에너지 증착법(DED)은 정확성이 낮고 후처리공정이 필요하기 때문에 현재 광범위하게 퍼지지는 못했다. 반면에 DED는 보수(repair)에 긴 역사를 갖고 있다. 이 분야에서 종래부터 널리 퍼져 있는 기술로서 저온가스분사, 고속산소연료분사 및 레이저 금속증착법이 있다¹⁾.

DED공정은 증착되어야 할 재료를 용융시킴으로써 금속구조물을 제조할 수 있다. 이러한 기본적인 접근으로서 폴리머, 세라믹 및 금속기지 복합재료에 작업이 가능하지만, 대개 금속분말 혹은 와이어가 사용된다. 티타늄, 인코넬, 스테인리스강, 알루미늄 및 이들의 합금과 같은 넓은 범위의 금속과 합금은 항공우주산업에 광범위하게 적용되며, DED공정에 의해서 제조될 수 있다²⁾.

DED공정에서는 공급물질(분말 혹은 와이어)을 국부적으로 용융시키기 위하여 집중적인 에너지원(레이저빔)이 사용되어 3차원 구조물이 구축된다. PBF(Powder Bed Fusion)공정과 비교해서 다축(multiple-axis)의 증착(기판에 대하여 부가적인 로터리 축)과 다수의 재료 수송(multipowder hoppers)이 DED공정 내에 사용된다. 아울러 DED공정은 마무리 기계가공에 종래의 불필요한 일부분을 선택적으로 제거하는 공정(subtractive manufacturing)과 쉽게 통합될 수 있다²⁾.

DED공정의 다축(multiaxis) 증착 능력은 항공우주 부품에 대해 박막구조체, 오버홀링(overhauling), 내부 채널형태의 부품과 같은 지지대 없이 복잡한 기하학적 구조물을 제조할 수 있다. 또한 DED공정은 각기 다른 재료로 이루어진, 다중 분말 호퍼를 가진 경사기능재료의 구조물을 생산할 수 있다. 통상의 용접공정과 비교해서, DED공정은 크램핑(clamping) 유연성(flexibility)을 지닌 낮은 입열량으로서 터빈 블레이드, 블리스크 및 엔진연소챔버와 같은 고가의 항공우주 부품을 보수하는데 채택이 될 수 있다²⁾.

3. 분말베드용융법(Powder Bed Fusion, PBF)

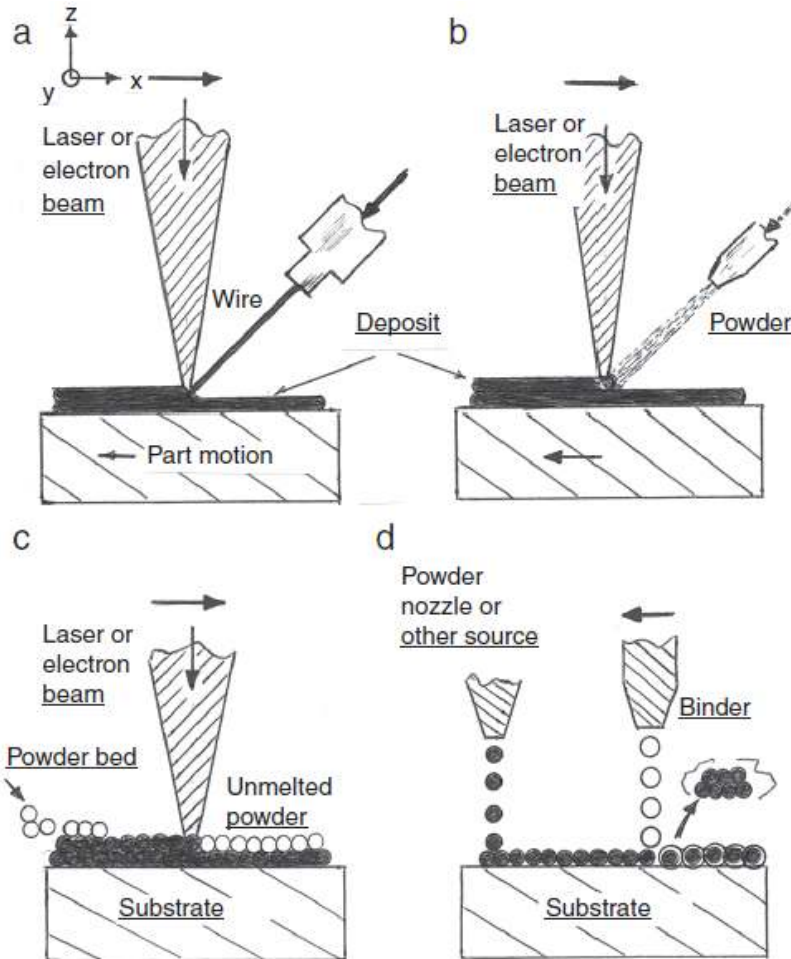
3-1. 다양한 PBF 종류에 따른 금속구조물의 제조기술

적층가공 기술은 3D 모델 자료로부터 부품을 제조하기 위하여 층위에 적층재료 층을 쌓는 공정이다. 최근까지 재료의 적용분야의 확대와 높은 기하학적인 자유도로 인하여 금속부품의 적층가공에 대한 몇 가지 공정들이 항공우주 및 의료 산업분야에 대한 구조물의 제조에 급속히 개발되었다. 이러한 금속 적층가공 기술은 2가지 형태, 즉 분말 베드계 적층가공 및 분말/와이어공급 적층가공으로 분류할 수 있다³⁾.

PBF를 기본을 하는 기술에서 열에너지는 선택적으로 분말베드 지역을 용융한다. 선택적인 레이저 소결/용융(SLS/SLM), 직접적인 금속 레이저 소결(DMLS), 레이저 큐징(cusing) 및 전자빔 용융(EBM)이 PBF계 기술의 대표적인 공정이다⁴⁾.

금속 구조물 제조를 위한 적층가공방법을 <그림 1>에 비교하였다⁵⁾. (a)는 와이어공급공

정을 이용한 레이저빔 혹은 전자빔 클래딩 적층가공법이다. (b)는 레이저 혹은 전자빔 소결계인데, 다수의 분말공급기를 결합할 수 있다. (c)는 전자빔 혹은 레이저빔 선택적 용융법을 이용한 분말베드용융법이다. 분말은 공급저장소 혹은 카세트에서 롤링(rolling) 되거나 레이킹(raking) 된다. (d)는 바인더젯트(binder jet) 분말법이다. 금속분말을 완전히 결합시키고 점결제를 없애기 위하여 후소결처리가 필요하다. 또한 결합되지 않은 분말은 재사용된다.



<그림 1> 금속 구조물 제조를 위한 적층가공방법¹⁾

분말 베드계 적층가공 기술과 비교해서, 분말/와이어-공급의 적층가공(Wire arc additive manufacturing, WAAM), 레이저 금속와이어 증착법(Laser metal wire deposition, LMWD) 및 레이저 용융증착법(Laser melting deposition, LMD)은 종래의 용접공정과 비슷한 아크 혹은 레이저용접을 이용함으로써 근사정형된(near-net shaped) 부품을 생산할 수 있다³⁾. 이러한 기술들은 높은 증착속도와 대용량으로 부품을 제조하는데 매우 적합하다. 그렇지만 제조된 생산품은 분말/와이어-공급의 적층가공의 경우, 제조되는 동안에 분말의 공급부족과 부적당한 기하학적인 정밀도 및 표면조도로 인하여 기하학적인 자유도에 의해 제한을 받고 있다.

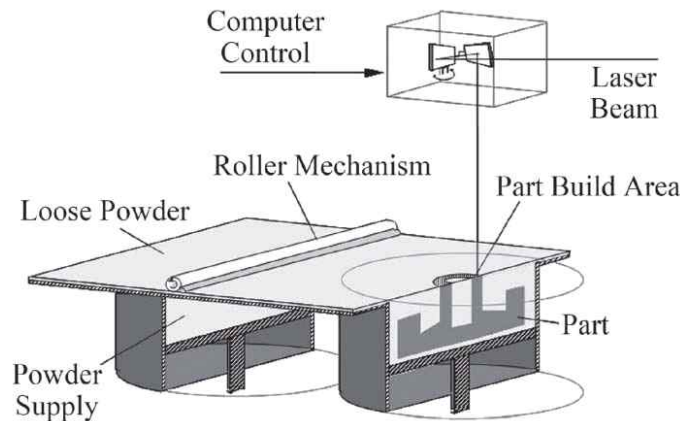
PBF 공정에서 직접적인 금속 레이저 소결(DMLS)는 적층가공 혹은 급속 금속구조물 제

조공정인데, 금속분말과 높은 출력의 레이저가 소결과 함께 사용된다. 이 방법은 아주 조밀한 금속구조물을 생산하는데 적용할 수 있고, 가스 혹은 압력을 엄격하게 적용해야 하고 후처리가 필요한 경우도 있다. 레이저 소결, 큐징 등과 같은 대부분의 용어는 크게 차이가 나지 않는 유사한 기술이다. 적층가공 공정에 적용되는 이러한 기술은 선택적인 레이저소결(SLS)이라고 하고 DMLS(Direct Metal Laser Sintering)와 개념적으로 같은 공정이지만 SLS, DMLS의 경우에 폴리머 혹은 코팅된 금속분말을 사용하는 대신에, DMLS는 코팅되지 않는 예비합금 금속분말을 사용한다⁴⁾.

항공우주산업에 적용을 하기 위한 구조물 설계의 위상수학(topology)과 기능적인 통합을 최적화하는데 적층가공 기술은 획기적인 능력을 제공할 수 있을 것이다. 그러나 현재 분말베드계 레이저빔 적층가공 기술(예, SLM, SLS, DMLS, Laser cusing 등)은 아직 완전한 밀도(density)에 도달하지 못했다⁶⁾. 이용할 수 있는 상용 시스템으로서 Concept Laser Co.의 레이저 큐징, ExOne의 3DP, EOS의 직접 금속 레이저 소결, Renishaw Co.와 SLM Solutions Co.의 SLM, Arcam의 전자빔 용융이 있다²⁾.

3-2. PBF의 적층가공 구조

분말 베드계 금속 적층가공 공정을 Bourell 등⁷⁾에 의해 <그림 2>에 나타내었다. 베드에 분산시킨 분말은 분말공급층에서 부품 적층면(build area)까지 롤(roll) 처리된다. 여기에서 분말은 컴퓨터모델(CAD)을 이용하여 레이저빔에 의해 용융된다. 하나의 층을 제조한 후에 베드에 분산시킨 분말의 새로운 층에 대하여 그 위에 롤처리한다. 이 사이클을 완전한 부품이 제조될 때까지 계속적으로 반복한다.



<그림 2> 분말 베드계 금속 적층가공 공정⁷⁾

3-3. PBF 공정의 특징

DED공정과 달리, PBF계 적층가공 공정에서는 기관 위에 분말층을 분산시키고 집중화된 에너지원(레이저빔)으로 선택적으로 분말을 용융하여 3D부품을 구축한다. 넓은 의미의 재료로서 전형적으로 스테인리스강과 공구강, 티타늄과 이들의 합금, 니켈계 합금 및 약간의 알루미늄합금이 있다. PBF공정의 핵심적인 장점은 제조과정 중에 오버행

(overhangs)과 언더컷에 대한 결함부위를 보완할 수 있다는 것이다. 그래서 높은 기하학적인 정확성($\pm 0.05\text{mm}$)으로 제조할 수 있다는 것이 DED공정과 다른 차이점이다²⁾.

금속구조물을 완성하기 위해서는 다음 단계의 마무리 기계가공이 요구된다. 분말 베드계 적층가공 기술은 작고, 복잡한 부품을 제조하는데 일반적으로 적당하다. 반면에 와이어공급 적층가공 기술은 크고 간단한 구조물을 채택하는데 아주 유리하다³⁾.

큰 사이즈의 복잡한 부품을 제조하는 경우에는 분말 베드계 적층가공 기술에 의해 제조된 바탕에 분말/와이어 공급 방식의 특별한 형태를 첨가시킴으로써 두가지 기술의 장점을 잘 결합해야 할 것이다. 이것은 적층가공 기술에 기초를 둔 더욱 유연성이 있는 제조공정인데, 하이브리드 제조기술이라고 말할 수 있다³⁾.

금속 적층가공 공정은 입자들을 함께 용융하기 위한 에너지원으로서 일반적으로 레이저빔을 사용한다. 이 공정은 지금까지 많이 연구된 레이저빔 용접공정과 유사하다. 차이점은 레이저빔 용접은 일반적으로 2종류의 고체부품 사이에 심(seam) 용융에 대해, 금속 적층가공 공정에서는 분말 베드 내에 입자의 용융이다. 분말 베드계 금속 적층가공은 접근방법으로서 적층으로 건조(build)되는데, 원료물질인 미세한 분말을 층층으로 용융함으로써 완전한 적층가공 구조물이 될 때까지 제조된다. 분말베드 내에서 용융과 비용융 입자의 상호작용과 최종부품의 기계적 성질에 미치는 영향은 금속 적층가공의 영역 내에서 현재에도 여전히 이해하기 힘든 과제로 남아 있다⁶⁾.

4. 선택적 레이저용융법(Selective Laser Melting, SLM)

4-1. SLM의 적층가공을 이용한 금속구조물 제조기술

SLM(Selective Laser Melting)과 같은 분말 베드계 적층가공 기술은 선택적으로 용융을 계속하는 층에 레이저를 이용하여 미세한 분말에 의해서 기능성의 복합구조물을 제조한다. 이러한 기술은 미세한 표면조도, 고밀도, 높은 기계적 성질 및 임의의 복잡한 구조를 지닌 금속구조물을 만들어낼 수 있다. 그렇지만 이러한 기술은 높은 생산가격, 낮은 적층비 및 소규모로 인하여 상당한 제한을 받고 있다³⁾.

SLM은 불활성 분위기에서 베드(bed) 위의 금속분말의 얇은 층을 용해하기 위하여 고체 상태에서 고밀도 레이저 프로브를 사용한다. 이것은 급속한 냉각에 의해서 전형적으로 가파른 온도기울기가 형성되어 불균일 미세조직이 부상하게 된다. 부가적으로 후공정의 열처리는 잔류응력을 제거하기 위해서 필요하다⁸⁾.

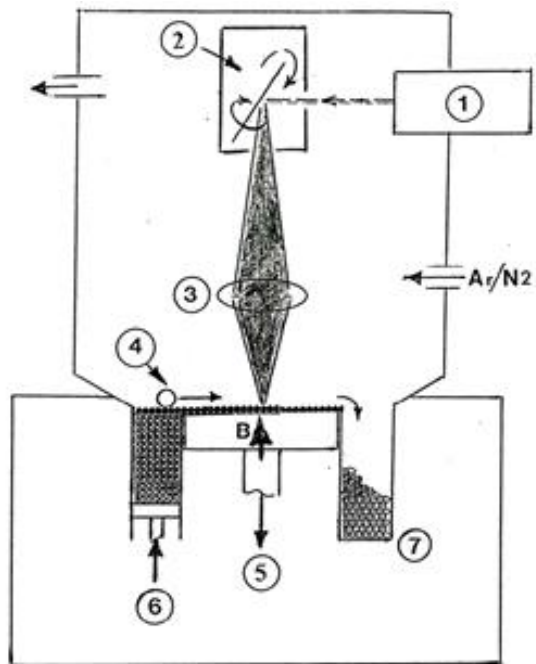
일반적으로 적층가공에 의한 금속구조물은 작은 결함(예, 잔류 기공)이 쉽게 발생하고 완전한 밀도는 보통 도달하지 못하는 경향이 있다. 그리고 비등방성 거동에 예민하다. 그래서 일반적으로 종래의 제조방법(turning, 선반세공)에 비해서 비교적 높은 표면조도값이 유지되어야 한다. 일례로 티타늄합금(예, Ti-6Al-4V)에서의 표면조도값(Ra)은 $10\mu\text{m}$ 범위에 있거나 그 이상의 범위에 있어야 한다. 레이저용접에서는 $1.6\mu\text{m}$ 혹은 그 이상의 표면조도를 필요로 하므로, 적층가공에 의한 금속구조물의 접합 표면은 후공정[예,

turning(선반세공)]이 실시되어야 한다. 또한 용접구조물 자체의 완전한 압력저항성과 100% 기밀유지를 위해서는 레이저 소결법은 충분하지 못하므로, 레이저 용융법이 금속 구조물제조를 위한 적층가공기술로서 선택되어야 한다⁶⁾.

Witsa 등^{6),9)}은 종래의 방법(turning, 선반세공)과 적층가공 방법의 적층 성능을 비교하기 위하여 시험용 부품은 SLM 경우에 종래의 방법과 적층가공 방법에 대해서 설계하고 제조하였다. 기본재료로서 비교적 낮은 밀도(경량), 내부식성, 양호한 가공성(processability)을 고려해서, 항공우주산업에 흔히 적용되는 티타늄합금 Grade 5, 즉 Ti6Al4V을 선정하였다.

4-2. SLM의 적층가공 방법

<그림 3>는 일반적인 금속층의 적층가공 방법(SLM, Selective laser melting)을 개념적으로



<그림 3> 분말층의 적층가공 제조법에 대한 레이저빔 용접장치¹⁰⁾

로 나타내었다. 불활성 분위기인 N₂ 혹은 Ar을 사용하고 금속분말은 층 내부로 롤(roll) 혹은 레이크(rake)되며 CAD 소프트웨어를 이용하여 선택적으로 용융시킨다¹⁰⁾. 작업방법은 다음과 같다.

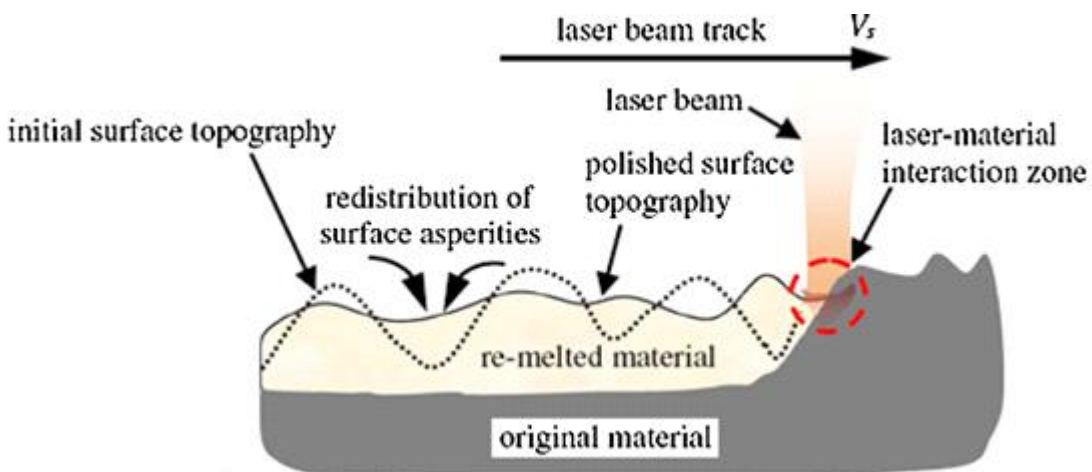
- ① 레이저빔을 주사하고 감시제어(scan) 한다.
- ② 거울(mirror)을 이용하여 빔초점을 맞춘다.
- ③ 용융분말에 대하여 빔초점을 가장 효율적으로 제어한다.
- ④ 적층가공을 하기 위하여 분말을 공급한다.
- ⑤ 피스톤을 이용하여 상하를 조절하면서 최적의 적층가공조건으로 제어한다.
- ⑥ 분말 저장소로부터 분말을 공급한다.
- ⑦ 결합되지 않는 잉여분말을 다시 보관하여 재사용한다.

5. 레이저 연마(polishing) 기술

레이저연마 기술은 지금까지 20여년 동안에 계속적으로 발전되어 왔으며 다이아몬드, 유리, 실리카 및 금속(강, 니켈/티타늄 합금 및 알루미늄합금)과 같은 여러 가지 물질로부터 표면형상이 향상된 구조물을 만들어내는데 성공적으로 적용하고 있다¹¹⁾. 그러나 더욱 규모가 큰 제품에 관한 이러한 적층가공 기술적용에는 어려운 점이 있는데, 가공물의 기하학적인 정확성과 표면 무결성(integrity)을 성취하는데 원칙적으로 현재의 적층가공 공정에서 걸림돌이 되고 있다. 부품들은 일반적으로 표면조도(5~15 μ m Ra), 표면에 한단계(stair-step) 효과, 발링(balling), 부정적인 잔류응력 및 낮은 차원의 정밀성으로 인하여 어려움을 겪고 있다. 이를 극복하기 위해서 샌드블래스팅, 기계가공, 에칭, 전해연마 혹은 플라즈마 스프레이와 같은 후공정 작업이 적층가공 구조물에 종종 적용된다¹²⁾.

종래의 적층가공 구조물의 후공정 작업 중에 어떤 것은 시간이 많이 소요되고 복잡한 기하학적 형태를 지닌 제품에 대해서는 실제로 실용가능성이 없는 경우도 있다. 이러한 시점에 가장 효율적인 대체수단으로서 레이저연마¹²⁾가 있는데, 이 방법은 조절이 용이한 비접촉식 방법이며 전용장비에 대한 도움없이 완전 자동화 할 수도 있다.

거칠은 표면을 가진 재료가 레이저빔의 영향으로 높고 낮은 부위에 재용융이 일어나, 재분배되기 시작한다. 그래서 레이저빔이 가공물 전체에 걸쳐 통과될 때에 표면장력으로 인하여 용융지를 형성한다. 이러한 현상으로 인하여 거칠은 표면에서 높고 낮은 거리의 차이가 감소하게 된다. 레이저연마에 관한 재용융 메커니즘 모습을 <그림 4>에 나타내었다¹³⁾.



<그림 4> 스테인리스강 표면의 레이저 연마에 대한 재용융 메커니즘¹³⁾

6. 금속 적층가공 기술의 향후 전망

적층가공 기술은 3D 모델 자료로부터 대상물을 만들기 위하여 층층으로 재료를 접합하는 공정인데, 산업계에 설계의 융통성(flexibility)을 부여하고, 에너지사용을 감소시키고 짧은 시간 내에 시장에 내놓을 수 있다는 장점이 있으므로 향후 활성화가 크게 기대된다.

향후 적층가공에 의한 대형 구조물 혹은 제품이 제작될 것으로 전망되고 있는데, 구체적으로 ① 고온용 금속의 직접 용적(droplet) 프린팅에 의한 대형 구조물, ② 초합금 부품, 자동차 및 항공우주산업의 구조물이 궁극적인 목표가 될 것이다¹⁰⁾.

적층가공 기술 발전의 더욱 큰 목표의 하나로, 레이저 혹은 전자빔 용융에 의한 터빈 부품과 같은 일방향성 제품의 대체재가 될 수 있으며, 특히 니켈과 코발트계 초합금으로 제조되는 일방향과 단결정 블레이드 구조물의 대체재로서의 제조가능성에 전망을 높이고 있다¹¹⁾.

대규모 구조물의 금속 적층가공 기술에 대해서는 현재 여전히 전망이 가깝게 있지 않다고 볼 수 있다. 대부분의 크고 복잡한 구조물은 탄뎀 3D공장 모듈로 제조되고 있어, 금속 적층가공에 의한 재료의 개발 및 적용에 혁명이 필요하다¹¹⁾.

적층가공 기술은 플라스틱, 금속, 세라믹 및 복합재료에 대하여 신속한 시제품, 시기적으로 급박한 공구, 직접적인 부품생산 및 부품의 보수에 적용이 가능하다. 특히 PBF계 적층가공 공정을 이용한 항공우주산업에 적용될 수 있다. 금속 적층가공 공정의 2가지 주요 인자는 부품을 제조하는데 사용되는 원재료와 에너지원인데, 원재료는 금속분말 혹은 와이어형태로 사용되고, 에너지 원으로는 레이저/전자빔 혹은 아크가 있다¹⁴⁾. 적층가공 기술의 선두주자가 되기 위해서는 이러한 제조인자들에 대한 정보수집과 기술수준의 현황 및 향후 대책을 철저히 파악하여야 할 것이다.

금속입자를 용융하기 위하여 SLM, DMLS 및 LENS 방법은 금속과 합금으로부터 적층가공에 의한 금속구조물을 제조하는데 사용되고 있다⁸⁾. SLM 혹은 DML에 의해서 강, 니켈, 티타늄, 알루미늄합금과 같은 다양한 금속에 대해서 직접적인 적층가공 프로세스가 현실화에 접어들고 있다. 최근 완전한 용융이 가능한 분말화된 원료공급 기술이 정착되고 있다. Miguel Zavala-Arredondo 등¹⁵⁾은 레이저 스폿직경을 통상 100 μ m으로 하고, 100~400W 범위의 레이저출력과 2000mm/s까지의 스캐닝 속도로 설정하여 미리 증착된 분말(통상적으로 20~50 μ m 층의 두께)에 적층가공 프로세스를 적용하였다.

종래의 적층가공 구조물의 후공정 작업 중에 어떤 것은 시간이 많이 소요되고 복잡한 기하학적 형태를 지닌 제품에 대해서는 실제로 실용가능성이 없는 경우도 있다. 이러한 시점에 가장 효율적인 대체수단으로서 레이저연마¹²⁾가 있는데, 향후 이 방법은 조절이 용이한 비접촉식 방법이며 전용장비에 대한 도움없이 완전 자동화 할 수도 있다.

7. 결 언

국내 기업체에서 레이저에 의한 금속구조물의 적층가공 기술을 확립하기 위하여 최근 가장 많이 사용되고 있는 직접에너지증착법(DED), 분말베드용융법(PBF), 선택적 레이저 용융법(SLM)을 검토하였으며 금속 적층가공하기 전의 예비처리 기술인 레이저 연마(polishing)에 대해서도 소개하였다. 이외에도 DMLS(Direct metal laser sintering) 및 LENS(Laser engineered net shaping) 등 다양한 방법이 있다, 또한 적층가공 구조물의 후공정 작업 중에 가장 효율적인 대체수단인 레이저연마 기술을 비접촉식으로 조절하여 자동화 할 수 있는 설비개발에도 연구가 활발히 진행되고 있다.

레이저를 열원으로 하는 금속 적층가공 기술은 정밀도가 높으며 표면조도가 낮다는 장점이 있다. 그러나 용착속도가 비교적 낮고 분말이나 열원장치 비용 등 생산 비용이 비싸다는 단점이 있으므로, 이를 극복하기 위하여 고부가 가치가 있는 정밀 금속구조물의 개발이 요구되고 있다. 이와 관련하여 해외 선진국들은 자체기술을 개발하여 축적하고 있으며 모든 산업분야에 실제 응용에 상당한 성과를 거두고 있는 상황에 있다.

향후 국내 기업체에서는 적층가공 기술에 의해 대형 금속구조물, 산업용 초합금 구조물, 자동차 및 항공우주산업의 금속구조물의 개발에 국제적인 경쟁력을 갖추어 나가야 할 것이다.



<참고문헌>

1. Thomas Duda, L. Venkat Raghavan, "3D Metal Printing Technology" IFAC-Papers On Line 49-29 (2016) 103-110
2. R. Liu, Z. Wang, T. Sparks, F. Liou, J. Newkirk, "Aerospace applications of laser additive manufacturing" Missouri University of Science and Technology, Rolla, Missouri, United States (2017) 351-371
3. N. Kashaev, V. Ventzke, V. Fomichev, F. Fomin, S. Riekehr, Opt. Lasers Eng. 86 (2016) 172-180
4. Gratton, A. "Comparison of Mechanical, Metallurgical Properties of 17-4PH Stainless Steel between Direct Metal Laser Sintering(DMLS) and Traditional Manufacturing Methods, Proceedings of The National Conference, (2012) 29-31
5. Lawrence E. Murra, Wayne L. Johnson, "3D metal droplet printing development and advanced materials additive manufacturing" J. Mater. Res. Technol. 6(1) (2017) 77-89

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.

6. W.W. Witsa et al., "Laser beam welding of titanium additive manu-factured parts", *Procedia CIRP* 28 (2015) 70-75
7. Bourell, D.L., Leu, M.C., Chakravarthy, K., Guo, N. and Alayavalli, K., "Graphite-based indirect laser sintered fuel cell bipolar plates containing carbon fiber additions", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 60-1 (2011) 275-278
8. Srimanta Barui et al., "Microstructure and compression properties of 3D powder printed Ti-6Al-4V scaffolds with designed porosity: Experimental and computational analysis", *Materials Science and Engineering C* 70 (2017) 812-823
9. Wits, W.W., Weitkamp, S.J., Van Es, J., "Metal additive manufacturing of a high-pressure micro-pump", *Procedia CIRP*, Vol. 7, ISSN 2212-8271, (2013) 252-257
10. Lawrence E. Murr et al., "Frontiers of 3D Printing/Additive Manufacturing: from Human Organs to Aircraft Fabrication" *Journal of Materials Science & Technology* 32 (2016) 987-995
11. E.V. Bordatchev, A.M.K. Hafiz, O.R. Tutunea-Fatan, "Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 73(1) (2014) 35-52
12. J.-P. Kruth, E. Yasa, J. Deckers, "Experimental investigation of laser surface re-melting for the improvement of selective laser melting process", *14emes Assises Europeennes du Prototypage & Fabrication Rapide*, Paris, (2009) 1-6
13. Debajyoti Bhaduria et al., "Laser polishing of 3D printed mesoscale components", *Applied Surface Science* 405 (2017) 29 - 46
14. Bhavar et al., "A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing", 4th International conference and exhibition on Additive Manufacturing Technologies, AM-2014, September 1&2, (2014) Bangalore, India.
15. Miguel Zavala-Arredondo et al. "Laser diode area melting for high speed additive manufacturing of metallic components" *Materials and Design* 117 (2017) 305-315

이 분석물은 과학기술정보통신부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.