

적층가공에 의한 티타늄합금 구조물의 제조기술

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 유호천
(yoocho278@reseat.re.kr)

1. 서 론

티타늄합금, 특히 Ti-6Al-4V은 우수한 강도 및 파괴인성, 낮은 밀도 및 매우 양호한 내부식성으로 인하여 항공우주산업, 자동차, 생체의료, 화학산업 등의 구조물에 가장 광범위하게 사용되고 있으며 수요도 급격히 확대되어 가고 있는 실정에 있다¹⁾. 그렇지만 현재 소량 다품종의 Ti-6Al-4V 소재의 높은 가격이 향후의 적용에 가장 큰 장애로 대두되고 있는 바, 부가가치성의 향상과 수요확대에 대한 해결책이 시급히 요구되고 있다.

다행히도 적층가공기술은 선진국가들의 활발한 연구결과, 제조가격을 낮출 수 있고, 에너지소비를 줄이고, 이산화탄소 배출량(carbon footprint)의 감소에 대한 가능성을 비중있게 제시하고 있다²⁾.

지금까지 Ti-6Al-4V합금을 효율적으로 제조하기 위한 적층가공 방법으로서 SLM(Selective laser melting), 플라즈마 아크용접, EBM(Electron beam melting), DMLS(Direct metal laser sintering), LENS(Laser engineered net shaping), LMD(Laser metal deposition) 등이 이용되어 왔는데, 이에 대한 철저한 동향분석이 필요하다³⁾.

본 보고서에서는 적층가공에 의한 Ti-6Al-4V합금 구조물의 최신 제조방법을 조사하고 Ti-6Al-4V합금을 제조하는데 필요한 품질관리 사항을 검토하여, 향후 국내 기업체에서 적층가공에 의한 Ti-6Al-4V합금 구조물을 제조하는데 크게 도움을 줄 수 있는 기술정보를 제공하는데 목표를 두었다.

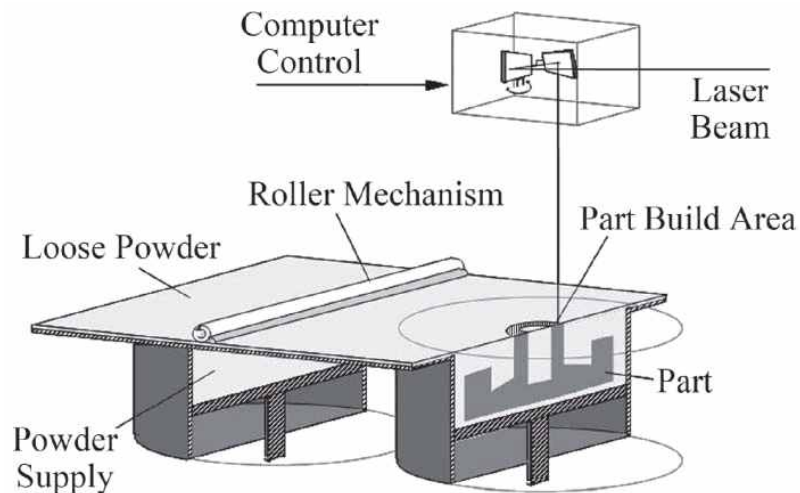
2. 적층가공에 의한 Ti-6Al-4V합금 구조물의 제조방법

2-1. 선택적 레이저 용융법(Selective Laser Melting, SLM)

금속 적층가공 공정은 입자들을 함께 용융하기 위한 에너지원으로서 일반적으로 레이저빔을 사용한다. 이 공정은 지금까지 많이 연구된 레이저빔 용접공정과 유사하다. 차이점은 일반적으로 레이저 용접공정은 2종류의 고체 구조물 사이의 심(seam) 용융을 통해 이루어지는 공정인데 비해, 금속 적층가공 공정에서는 분말 베드 내에 입자의 용융과정을 통해 이루어지는 공정이다. 분말 베드계 금속 적층가공은 접근방법으로서 원료물질인 미세한 분말을 층층으로 용융하여 완전한 3D 구조물이 형성될 때까지 3D 구조물로

적층한다⁴⁾.

Bourell 등⁵⁾은 분말 베드계 금속 적층가공 공정을 <그림 1>에 나타내었다. 베드에 분산시킨 분말은 분말공급측에서 구조물 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 롤처리 한다. 이 사이클을 완전한 구조물이 제조될 때까지 계속적으로 반복한다.



<그림 1> 분말 베드계 금속 적층가공 제조과정⁵⁾

SLM에서는 불활성 분위기에서 베드(bed) 위의 금속분말의 얇은 층을 용해하기 위하여 고체상태에서 고밀도 레이저 프로브를 사용한다. 이로 말미암아 급속한 냉각에 의해서 전형적으로 가파른 온도기울기가 형성되어 불균일 미세조직이 부상되거나 과잉의 잔류응력이 발생될 수 있다. 이에 대비해 잔류응력을 제거하기 위해서 부가적으로 후공정의 열처리는 필요하다³⁾.

Witsa 등^{4),6)}은 기존의 터닝(turning, 선반세공)에 의한 종래의 방법과 적층가공 방법의 용접성을 비교하였는데 티타늄합금 Grade 5, 즉 Ti6Al4V를 선정하여 SLM을 실시하여 종래의 방법과 적층가공 방법에 대해서 설계하고 제조기술을 확립하였다.

분말베드 내에서 용융과 비용융입자의 상호작용과 최종 구조물의 기계적 성질에 미치는 영향은 금속 적층가공의 연구범위 내에서 향후 풀어야 할 과제로 남아 있다⁴⁾.

2-2. 플라즈마 아크용접에 의한 적층가공 기술

2-2-1. 적층가공 방법

Jianjun Lina 등²⁾은 ASTM F1108-04 (2009)에 의해 화학성분이 C 0.02, O 0.14, N 0.01, H 0.007, Fe 0.07, Al 6.11, V 3.95, Bal. Ti (in weight %)이고 직경 1.0 mm인 Ti-6Al-4V와이어를 사용하였으며, 열간압연강판(2000×1500×8mm)은 150~400그릿 SiC 페이퍼에 의해 연마하고 아세톤과 에탄올에 의해 탈지하였다. KD7000 D-11와이어 공급기를 가진 출력공급기로서 A TransTig 4000 Job G/F와 A Plasma module 10를 이용하였

다. 플라즈마 아크 용접토치는 2-axis 테이블에 연결된 6-axis KUKA로봇에 접속시켰으며, 보호가스로서 불활성가스(Ar)를 사용하였다.

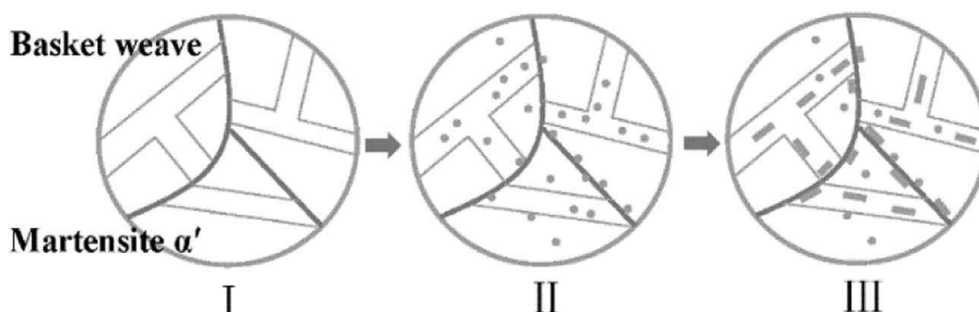
플라즈마 아크 적층가공법은 높은 에너지빔 공정에 의한 다른 적층가공 공정에 비해서 효율, 편의, 원가절감의 측면에서 가능성이 크다. L.Y. Chena 등⁷⁾에 의해, 몇 가지 종류의 Ti-6Al-4V박판을 최적의 용접와이어 공급에 의해 연속 플라즈마 아크 적층가공 공정으로 입열량을 적층 시에 점차적으로 감소시켜 증착시켰다. 평균 항복강도, 최고인장강도 및 연신율은 각각 877MPa, 968MPa 및 1.5%에 달하였으며, 단조제품의 표준치를 초과하였다. prior β 입자의 에스펙트비를 약화시키고 α 층 사이의 나노 분산질(dispersoids)을 분리시킴으로써 기계적인 성질은 증가되었으며 인성도 향상되었다. 이러한 연구결과, 연속 플라즈마 적층가공은 후열처리공정없이 금속생체재료 적층가공 구조물을 제조할 수 있는 전망을 제시하고 있다.

Stavinoha, Lin 등⁸⁾에 의하면 각각의 증착된 층의 입열량의 값으로 인하여 쉽게 열축적이 일어난다. 더욱이 Martina 등⁹⁾에 의하면 증착된 부분이 종료된 후에 기본적인 기관의 열효과로 인하여 첫 번째 층의 롯트(lot)는 제외하였다. 또한 증착된 층 사이의 입열량을 점차로 감소시킴으로써 열평형상태에 도움을 줄 수 있고, 용융지의 크기를 조절할 수 있었다.

2-2-2. 플라즈마 아크 적층가공에 의한 조직의 변화

Correa 등¹⁰⁾의 연구에서 펄스 플라즈마 아크용접에 의해 조직을 미세하게 할 수 있다는 사실을 확인하였다. 미세화가 가능한 이유는 용접하는 동안에 용융지를 더욱 강렬하게 교반할 수 있었기 때문이다. 그렇지만 펄스 플라즈마 아크공정에 의해 증착된 일정한 제조인자를 적용하는 것은 조절과 냉각시간에서 복잡성이 증가하므로 더욱 많은 인자를 설정할 필요가 있다.

Jianjun Lin 등²⁾은 CPAM(Continuous plasma arc additive manufacturing) 방법에 의해 용접와이어로 증착하였는데 Ti-6Al-4V박막에 대하여 적층을 거듭함에 따라서 입열량을 점차적으로 감소시켰다. 그 결과, 여러 위치에 따라서 60~120nm 크기의 석출된 2차 α 소편(platelets)이 전체의 판에 관찰되었다. CPAM에 의한 연속적인 증착에 의해서 나노분산질(nano-dispersoids)은 층상으로 성장하였으며 그 모습을 <그림 2>에 나타내었다.



<그림 2> 연속 플라즈마 적층아크법에 의한 다중 증착 후의 층상적인 성장과정²⁾

적층가공 기술을 이용하여 구조물을 제조하는 경우, 복잡한 사이클의 열이력이 발생하

게 되는데, 적용된 공정에 따른 미세조직의 변화와 품질특성의 관계를 이해하여야 할 것이다. 연속 플라즈마 적층가공(PAM) 공정에서는 지금까지 이러한 관계가 거의 보고되지 않았지만, 향후 연속 플라즈마 적층가공 공정에 의해 증착된 Ti-6Al-4V합금의 기계적 성질에 미치는 미세조직의 개선효과를 규명할 필요가 필요하다⁹⁾.

2-3. 전자빔 용융법(Electron beam melting, EBM)

SLM과 비슷한 양상으로 EBM은 고밀도 전자빔을 사용하는데, 여기에서 금속분말의 얇은 층은 전자빔에 의해 스캔이 되어 용융지를 발생한 뒤에 응고하여 조밀한 형태를 형성한다. 이 결과로 불균일과 매우 조대한 표면을 발생시키기도 한다³⁾. 향후 이에 대한 대비책이 확립되어야 할 것이다.

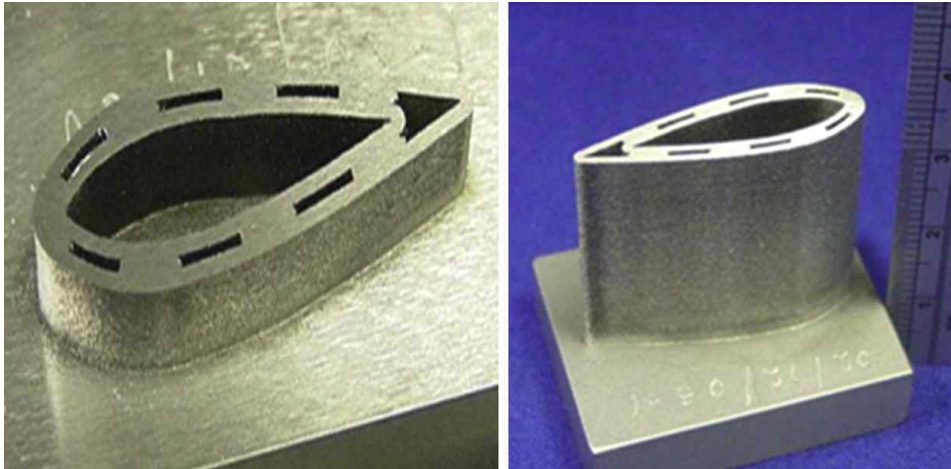
2-4. LENS(Laser engineering net-shape)

Optomec 등^{11),12)}은 항공기 엔진구조물에 대하여 LENS(Laser engineering net-shape) 기법을 사용하여 보수하였다. LENS의 보수에 대한 독특한 성능은 다음과 같다.

- ① 저입열량로 인하여 항공기 날개(airfoil)는 제한범위 이상으로 변형되지 않는다.
- ② 작은 열영향부로 인하여 기계적 성질을 최소화 할 수 있다.
- ③ 우수한 기계적인 성질로 인하여 LENS에 의한 Ti-6Al-4V 피로특성은 소성가공 구조물과 동등한 성질을 지니고 있다.
- ④ 품질이 우수하다. 분위기 제어가 완전히 가능하여 낮은 미세기공도(microporosity)를 나타낸다.
- ⑤ 복잡한 형태가 가능하며, 사실상 삭제된 부분도 채워 넣을 수 있다.
- ⑥ 보수 시에 더 넓은 접근성으로 인하여, 시야에 없는 부분이라도 보수할 수 있다.
- ⑦ 근사정형 형태가 가능하며, 마무리가공 시간을 최소화 할 수 있다.

2-5. LMD(Laser metal deposition)

Liu 등¹⁶⁾에 의해 <그림 3>에서 보는 바와 같이 LMD공정이 근사정형 Ti-6Al-4V 날개를 제조하는데 성공적으로 사용되었는데, CAD(Computer-assisted design) 모델로부터 기하학적인 모습을 정확하게 형성시켰다.



<그림 3> LMD(Laser Metal Deposition) 처리된 냉각채널이 장입된 Ti-6Al-4V 날개(airfoils)

- 제공 ; Courtesy Integrated Manufacturing Technologies Institute of the National Research Council, 캐나다.-¹⁶⁾

3. Ti-6Al-4V합금 구조물의 하이브리드 제조기술

3-1. SLM(Selective laser melting)-WAAM(Wire arc additive manufacturing) 하이브리드 제조기술

3-1-1. SLM(Selective laser melting)-WAAM(Wire arc additive manufacturing)

LMD와 비교해서 WAAM공정은 낮은 제조가격과 높은 효율이라는 팔목할만한 장점이 있다. 또한 SLM-WAAM 하이브리드 제조기술은 더욱더 적층시간과 제조비용을 감소시킬 수 있다¹³⁾.

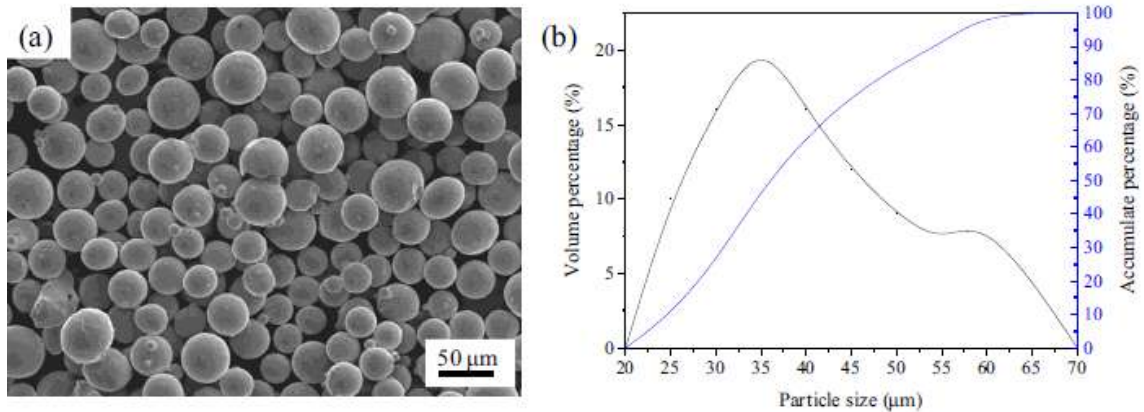
제조비용을 감소시킬 수 있는 또 다른 기술로서 용접이 있다. 이 용접기술은 티타늄 구조체에 적용할 수 있으며 높은 기계적인 성질을 성공적으로 얻을 수 있다¹⁴⁾. 그렇지만 불규칙한 용접형태 혹은 매우 두꺼운 접합부의 조건에 적용하는 것은 어렵다. 티타늄합금에서는 용접기계를 이용하여 20mm 이하의 완전용입 용접에서만 적용할 수 있다¹⁵⁾. 용접조립에서 SLM과 WAAM 구조물의 통합은 이러한 형태 내에서 한정되어 있다.

반면에 하이브리드 제조기술은 형태와 계면두께에 대해서 더 이상의 제한이 없다. SLM-WAAM 하이브리드 공정 동안에 첫 번째, 큰 구조물은 설계가 잘 되어야 할 필요가 있으며 2가지 부분 즉, 복잡한 구조물과 간단한 구조물로 나누어진다. 그래서 복잡한 구조물은 SLM에 의해 마무리되고, WAAM에 의한 공정은 기판에 적용할 수 있게 되며, 최종적으로 나머지 부분은 WAAM에 의해 완성된다¹³⁾.

3-1-2. SLM과 WAAM의 하이브리드 공정

Xuezhi Shi 등¹³⁾에 의해 AVIC BIAM에 의해 공급된 Ti-6Al-4V 분말이 SLM에 사용되었

는데, 그 형태를 SEM에 의해 <그림 4(a)>에 나타내었다. <그림 4(b)>는 평균입도의 분포를 나타내었는데, 평균크기는 $36\mu\text{m}$ 이었으며 WAAM에서 직경 1.2mm의 Ti-6Al-4V와이어가 사용되었다.



<그림 4> (a) Ti-6Al-4V 분말 형태; (b) 입자크기 분포¹³⁾

SLM에서는 레이저출력 310W, 레이저스폿 직경 $150\mu\text{m}$, 스캔속도 1100mm/s, 층두께 $60\mu\text{m}$, 해치간격 $180\mu\text{m}$, 스캔방법; 곡류 형태(meander)로 하였다. WAAM에서는 와이어공급속도 100cm/min, 용접속도 120mm/min, 피크전류 180A, 피크시간비 30%, 기준전류비 30%, 펄스진동수 1.8Hz, 가스유동속도 20L/min, 아크길이 3mm로 작업하였다¹³⁾.

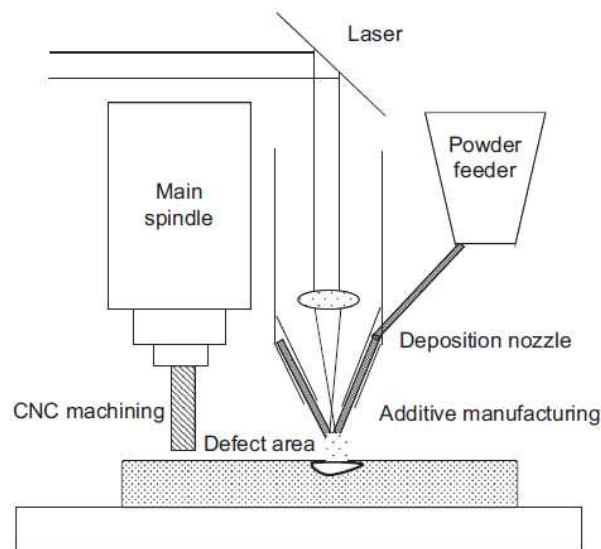
3-1-3. SLM-WAAM의 하이브리드 미세조직

하이브리드 제조기술의 통상적인 관심은 제품의 기계적인 성질에 미치는 미세조직이다. Ti-6Al-4V는 3가지 전형적인 지역, 즉 SLM지역, WAAM지역, 계면지역으로 구성되며 SLM과 WAAM 지역 사이에 금속학적으로 양호하게 접합되어 있다¹³⁾.

SLM지역 내에서 미세하고 짧은 β 주상정 입자는 주로 침상 마르텐사이트 α' 로 구성되어 있다. 계면의 미세조직은 더욱 복잡한데, SLM지역으로부터 미세한 β 주상정 입자는 약 3mm 두께의 계면지역 내에서 $150\mu\text{m}$ 에서 $250\mu\text{m}$ 까지 조대하게 성장한다. 반면에 α 층상조직에 가득 찬 조대한 β 주상정 입자는 WAAM지역 내에서 에피텍셜 형태로 성장한다¹³⁾.

3-2. Ti-6Al-4V합금의 LMD와 CNC 밀링의 하이브리드 제조공정

Liu 등¹⁶⁾은 <그림 5>에서 보는 바와 같이, LMD와 CNC 밀링을 결합한 보수용 하이브리드 제조공정의 개략도를 나타내었다.



<그림 5> Ti-6Al-4V합금 구조물의 보수를 하기 위한 하이브리드 제조공정¹⁶⁾

LMD 공정은 결함지역에 금속분말을 국부적으로 분산시킬 수 있는 능력을 제공한다. 적층가공과 CNC의 결합으로 인한 하이브리드 공정은 양쪽 모두의 공정에 대한 이점을 함유하고 있기 때문에, 더 많은 적층 능력, 더 양호한 정확성 및 더 우수한 표면가공력을 제공한다. 아울러 다축 CNC기기는 블리스크와 터빈 블레이드와 같은 복잡한 항공우주 구조물에 대하여 다축 증착과 기계가공을 할 수 있다¹⁶⁾.


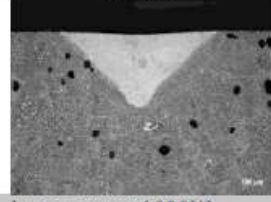


3-3. Ti-6Al-4V합금의 LMD와 SLM의 하이브리드 제조공정

Liu 등¹⁷⁾은 중규모의 복잡한 구조물을 제조하기 위하여 LMD-SLM 하이브리드 제조공정을 제시하였다. 고밀도와 양호한 기계적 강도를 가진 시료는 제조될 수 있으며 하이브리드로 제조된 Ti-6Al-4V합금의 인장강도와 연신율은 각각 918MPa와 11%에 도달하였다.

4. 품질관리 인자

4-1. 키홀 현상

Witsa 등^{4),6)}은 티타늄합금의 적층가공 구조물의 레이저빔 용접의 품질을 종래의 방법으로 제조된 구조물의 용접방법과 비교하기 위하여, 티타늄합금(Ti6Al4V)과 펄스레이저 원을 이용한 키홀용접을 실시하였다.

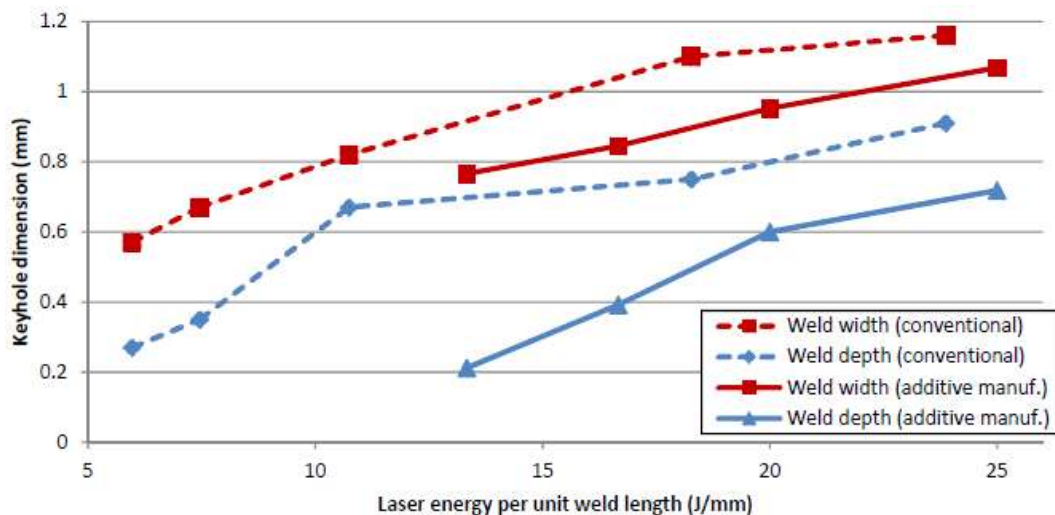
AM. I	AM. II	AM. III	AM. IV
			
Laser power: 800W Pulse length: 2ms	Laser power: 1000W Pulse length: 2ms	Laser power: 800W Pulse length: 3ms	Laser power: 1000W Pulse length: 3ms
Energy / mm: 13.3J	Energy / mm: 16.7J	Energy / mm: 20.0J	Energy / mm: 25.0J
Depth: 0.212mm Width: 0.766mm	Depth: 0.392mm Width: 0.845mm	Depth: 0.600mm Width: 0.952mm	Depth: 0.718mm Width: 1.068mm

<그림 6> 키홀 프린팅에 있어서 레이저 공정에 따른 키홀의 크기 (SLM) (Ti6Al4V)⁴⁾.

<그림 6>은 전형적인 키홀의 모습을 나타낸 것이다. 레이저 출력(입열량)이 높거나, 펄스길이가 길거나, 에너지가 높을수록 키홀의 길이는 커지고 키홀의 폭은 넓어지는 것이 관찰되었다. 아울러 <그림 6>에서 보는 바와 같이 적층가공 구조물은 아주 약간의 기공들이 검은 점의 형태로 남아 있다. 키홀 내부에 검은 점의 형태로 기공(pores)을 볼 수 있는데, 이러한 기공은 국부적으로 너무 많은 에너지 입열로 기인되는 불량한 용접품질의 표시로 간주할 수 있다. 또한 이 주변의 재료의 입자크기는 매우 무질서한 상태로 남아 있음이 관찰되었다⁴⁾.

단위 용접길이당 레이저에너지에 대한 측정된 키홀의 크기(즉, 폭과 깊이)를 <그림 7>에 나타내었다⁴⁾. 단위 용접길이당 같은 에너지에서 적층가공에 의한 적층가공 구조물에서의 키홀의 크기는 종래의 방법에서의 구조물에서보다 더 작다는 것을 확실히 알 수 있다.

Witsa 등⁴⁾은 펄스레이저빔을 이용하여 키홀 용접을 행하여 종래의 제품과 적층가공 제품의 차이점을 비교하였다. 여기에서 금속 적층가공 구조물은 중간 제조과정에서 기인된 잔류 기공과 여러 가지 다른 비등방성에 대하여 고질적인 문제로 남아 있다. 특히 용접길이당 에너지 과다에 의한 결함의 생성이 중요한 비중을 차지하고 있다는 사실이 밝혀졌다. 또한 Ti-6Al-4V의 적층가공(AM) 구조물의 접합능력을 조사하기 위하여 압력 저항성과 기밀유지(leak tightness)의 관점에서 키홀의 기하학적인 현상을 파악하였는데 항공우주 산업에 적용하기 위한 제어된 레이저 공정인자 및 양호한 품질의 용접부를 확인하였다⁴⁾.



<그림 7> 용접길이당 레이저에너지에 미치는 측정된 키홀의 크기(폭과 깊이)⁴⁾

4-2. 기공도(Porosity)

소결된 골격의 마이크로전산화 단층촬영(micro-computed tomography)에 의하면, 균일한 다공성 골격에서 57%의 전체기공도를 나타내었으며, 미세기공(micropores) 가운데에 99% 상호연결된 경사구조의 다공성 골격에서 45%의 전체기공도를 나타내었다. 단축압축 시험결과, 균일한 다공성과 경사구조의 다공성 골격의 강도는 각각 ~47MPa과 ~90MPa이었다³⁾.

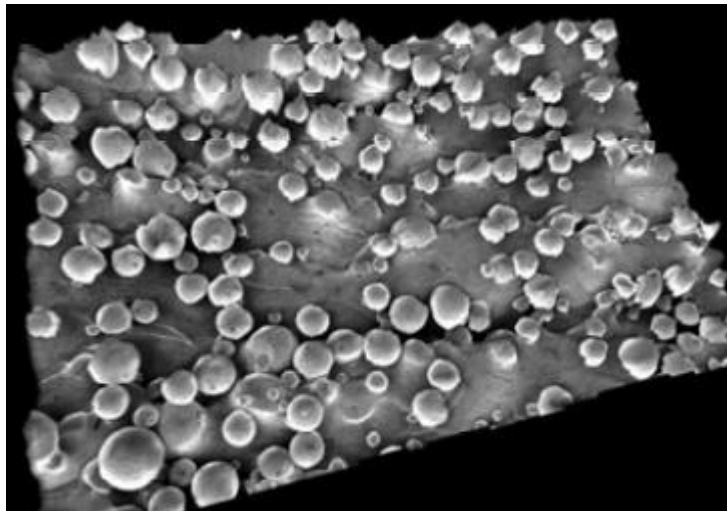
실험실적인 측정과 병행하여, 설계된 기공(pores) 주위에 전체적과 국부적으로 응력분포를 조사하기 위하여 유한요소 분석은 수행되었다. 여기에서 유한요소 분석과 일치한 결과가 나왔는데, 균일한 다공성 골격(~2GPa)에서보다 경사구조의 다공성 골격(~3GPa)에서 탄성모듈이 더 높았다. Srimanta Barui 등³⁾의 연구에서는 기존 문헌과는 달리, Ti-6Al-4V 골격에 대하여 미세조직과 기계적 성질에 관련하여 생물학적인 관점에서 첫 번째로 직접 분말 프린팅 기법을 확립하였다. 새로운 유한요소 분석에 접근한 결과, 마이크로-전산화 단층촬영을 이용한 다공성 구조물의 임계적인 이해에 기본으로 하였으며, 다공성 골격의 압축반응을 실제적으로 예측하였다.

4-3. 표면 조도

일반적으로 적층가공으로 인한 적층가공 구조물은 작은 결함(예, 잔류 기공)이 쉽게 발생하고 완전한 밀도는 보통 도달하지 못하는 경향이 있다. 그리고 비등방성 거동에 예민하다. 일반적으로 종래의 제조방법에 비해서 비교적 높은 표면조도값이 유지된다. 그래서 티타늄합금(예, Ti-6Al-4V)에서의 표면조도값(Ra)은 10 μ m 범위에 있거나 그 이상의 범위에 있어야 한다. LBW에서는 1.6 μ m 혹은 그 이상의 표면조도를 필요로 하므로, 적층가공 구조물의 접합 표면은 후공정[예, turning(선반세공)]이 되어야 한다. 또한 용접 시험 구조물 자체의 완전한 압력저항성과 100% 기밀유지를 위해서는 레이저 소결법은

충분하지 못하고, 레이저 용융법이 금속 적층가공기술로서 선택된다⁴⁾.

Ti-6Al-4V의 적층가공 구조물의 3D 표면 재건(reconstruction) 시에 분말 베드계 생산 공정의 표면조도를 <그림 8>에 나타내었다⁴⁾. 재건된 표면은 구조물의 건조(build) 방향과 수직인 측면도를 나타내었는데, 재건된 표면에서 측정된 표면 조도(Ra) 값은 수평과 수직방향에서 각각 5.1 μ m, 4.6 μ m이었다.



<그림 8> 적층가공 처리에 의한 표면 재건(reconstruction) 현상⁴⁾

5. 향후 전망 및 결론

Ti-6Al-4V합금 소재는 우수한 비강도 및 파괴인성, 낮은 밀도, 매우 양호한 내부식성으로 인하여 현재 항공우주산업, 자동차, 생체의료, 화학산업 등에 광범위하게 사용되고 있으며 향후 수요도 크게 확대될 것으로 예상되고 있다.

Ti-6Al-4V합금 구조물을 제조하기 위한 적층가공 방법으로서 SLM(Selective laser melting), 플라즈마 아크용접, EBM(Electron beam melting), DMLS(Direct metal laser sintering), LENS(Laser engineered net shaping), LMD(Laser metal deposition) 등이 많이 이용되고 있어, 이러한 용접방법에 대한 가장 효율적인 제조기술의 파악이 무엇보다 중요하다 볼 수 있으며, 이 중에서도 SLM과 플라즈마 아크를 이용한 적층가공의 제조기술에 대해 더욱 관심을 기울여야 할 것으로 사료된다.

특히, 크고 복잡한 Ti-6Al-4V합금 구조물을 생산하는데 있어서도, 하이브리드 제조기술, 예를 들면 SLM(Selective laser melting)와 WAAM(Wire arc additive manufacturing), LMD(Laser metal deposition)와 CNC(Computer numerical control) 밀링, LMD와 SLM과의 결합 등에 의한 적층가공 기술의 연구개발이 활발히 전개될 것으로 예상되어 이에 대한 기술투자가 적극적으로 추진될 것으로 전망된다.

적층가공에 의한 Ti-6Al-4V합금 구조물을 생산하는데 필요한 제조인자로서 키폭 현상,

기공도 및 표면조도 등이 있는데, 제조 시에 이에 대한 품질관리를 철저히 기하여 제조 기술 확립에 최선을 다하여야 할 것이다.

<참고문헌>

1. I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies, Springer, (2010)
2. Jianjun Lin et al., "Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment", Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 69, (2017) 19-29
3. 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
4. W.W. Witsa et al., "Laser beam welding of titanium additive manufactured parts", Procedia CIRP 28 (2015) 70-75
5. 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
6. Witsa, 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
7. L.Y. Chena et al., "Anisotropic response of Ti-6Al-4V alloy fabricated by 3D printing selective laser melting", Materials Science & Engineering, A 682 (2017) 389-395
8. Stavinoha, J.N., "Investigation of Plasma Arc Welding as a Method for the Additive Manufacturing of Titanium-(6) Aluminum-(4) Vanadium Alloy Components." ProQuest LLC, Michigan, USA. (2012)
9. Martina, F., Mehnen, J., Williams, S.W., Colegrove, P., Wang, F., "Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti - 6Al - 4V" Mater. Process. Technol. 212, (2012) 1377-1386
10. Correa, E.O., Costa, S.C., Santos, J.N., et al., "Weldability of iron-based powder metal materials using pulsed plasma arc welding process." J. Mater. Process. Technol., 198, (2008) 323-329
11. Optomec. "LENS Blisk Repair Solution. Available from": http://www.optomec.com/wpcontent/uploads/2014/04/Optomec_LENS_Blisk_Repair_Datasheet.pdf.
12. L. Xue, M.U. Islam, "Laser consolidation-a novel one-step manufacturing process for making net-shape functional components, in: Cost Effective Manufacture via Net-Shape Processing", (2006). Neuilly-sur-Seine, France.

13. Xuezhi Shi et al., "Selective laser melting-wire arc additive manufacturing hybrid fabrication of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties", Materials Science & Engineering A 684 (2017) 196-204
14. N. Kashaev, V. Ventzke, V. Fomichev, F. Fomin, S. Riekehr, Opt. Lasers Eng. 86 (2016) 172-180
15. M. Gopalakrishna Pillai, R.K. Gupta, B. Pant, P.S. Sreejith, Trans. Indian Inst. Met. 68 (2014) 423-431
16. 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
17. Q. Liu, Y. Wang, H. Zheng, K. Tang, L. Ding, H. Li, S. Gong, Mater. Sci. Eng.: A 660 (2016) 24-33



이 분석물은 과학기술정보통신부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.