

금속 적층제조기술의 국내외 개발동향과 기술적 이슈

강민철^{*,†} · 예대희^{**} · 고근호^{**}

^{*}3D프린팅연구조합

^{**}한국마그네슘기술연구조합

International Development Trend and Technical Issues of Metal Additive Manufacturing

Min-Cheol Kang^{*,†}, Dea-Hee Ye^{**} and Geun-Ho Go^{**}

^{*}3D Printing Research Organization, Seoul 06307, Korea

^{**}Korea Magnesium Technology Research Association, Changwon 51395, Korea

[†]Corresponding author : mkang@3dpro.or.kr

(Received July 6, 2016 ; Revised July 19, 2016 ; Accepted July 21, 2016)

Abstract

Metal parts are produced by conventional methods such as casting, forging and cutting, extrusion, etc. However, nowadays, with additive manufacturing (AM), it is possible to directly commercialize by means of stacking of equipment to the 3D drawing and use of high precision tools such as laser source. Thus, drawing of materials is an important aspect in delivering good products. AM deals with production of lighter aircraft parts and few more three-dimensional molds, it wish to manufacture special medical parts and want to steadily expand the new market area.

The cost of related equipment and materials are still expensive and difficult to obtain on a mass production. However, the ability to make changes and lead the innovation in the paradigm of traditional manufacturing process is still effective.

In this paper, we introduce metal AM and the principles of the related devices, metal powder production process, and their application.

Key Words : Additive manufacturing, Atomization, PBF, DED

1. 개요

전통적인 금속부품의 생산방법은 주조, 단조, 절삭가공, 압출 등의 방법으로 제품을 생산하였다면, 적층가공기술은 3D도면과 재료, 레이저 등을 소스로 하는 적층장비만 있으면 바로 제품화가 가능하다. 따라서 누구나 도면만 있으면 제품을 생산할 수 있는 적층제조기술이 '3차 산업혁명', '제조업의 인터넷 혁명'으로 불리우며 전세계인의 관심을 한 몸에 받고 있다. 그러나 지난 2-3년간 언론보도 등으로 전지전능한 도구로 과장된 면이 있었으나 기존 전통방식으로 제조가 불가능한 입체냉각물드, 항공기부품 등을 더욱 경량화하는 방향, 그리고 개인 맞춤형 의료용 부품 등으로 새로운 시장영

역을 꾸준히 확장하고 있다.

또한 아직은 관련 장비 및 재료가격이 비싸고 대량생산이 힘들다는 한계로 회의적인 시각도 존재하고 있다. 그러나 기존 제조공법으로 제조가 불가능한 제품을 만든다는 제조업의 패러다임의 변화와 전통적인 제조공정을 혁신을 이끌 능력은 여전히 유효하다.

본고에서는 메탈 3D 프린터와 관련된 장비의 원리, 금속 분말제조 공정, 적용사례 등을 살펴보고자 한다^{1,2)}.

1.1 적층제조기술의 분류와 작동원리

3D 프린터는 공식적인 용어가 아니며 절삭가공(Subtractive Machining)과 대조되는 적층제조(Additive Manufacturing)가 공식적인 ASTM 용어이다. 이 적

Table 1 Classification of additive manufacturing processes by ASTM

Category	Description
Binder jetting	Liquid bonding agent selectively deposited to join powder
Material jetting	Droplets of build material selectively deposited
Powder bed fusion	Thermal energy selectively fuses regions of powder bed
Directed energy deposition	Focused thermal energy melts materials as deposited
Sheet lamination	Sheets of material bonded together
Vat photopolymerization	Liquid photopolymer selectively cured by light activation
Material extrusion	Material selectively dispensed through nozzle or orifice

층제조기술은 Table 1에 나타난 바와 같이 7가지로 분류하고 있다.

적층제조 기술은 이미 20여년 전에 RP(Rapid Prototyping) 기술로 활용된 기술이나 최근 원천기술이 일부 해제되면서 개발에 가속이 붙었고 대중화를 앞당기는 상황이 되었다. 플라스틱의 경우 수지의 다양화, 엔지니어링 플라스틱의 도입뿐만 아니라 금속, 세라믹 등 소재의 다양화가 진행되고 산업체의 활용도가 확장되고 있다. 특히 금속 적층제조에 사용되는 소재는 Δ 분말 기반형 Δ 와이어 기반형 Δ 박판기반형으로 나눌 수 있다. 분말기반형은 금속분말을 아토마이저 방식 등으로 급랭하여 구형화된 분말을 대부분 사용하며 Powder Bed Fusion(PBF)와 Directed Energy Deposition (DED) 방식이 대표적으로 널리 사용된다.

와이어 기반형은 용접의 원리와 똑같이 베이스에 와이어를 용융시켜 용융풀을 형성한 후 기계가공으로 마무리하는 형태로서 대표적인 방법이 EBF(Electron Beam Freeform Fabrication)가 있다. 박판기반형은 금속박판 시트를 여러층을 적층하여 초음파로 접합시키는 방법 등이 있으나 와이어 기반형과 함께 형상 자유도가 떨어져 잘 사용하지 않는 방식이다.

1.2 왜 적층제조기술인가?

지금까지 기업들은 소비자가 좋아할 만한 상품을 개발해 대량생산해서 최대한 많이 판매하는 것을 목표로 삼았다. 그러나 적층제조기술을 이용하면 다양한 소비자의 욕구를 충족시킬 수 있는 맞춤형 다품종 소량 생산이 가능하다. 소비자 중심에서 생산기반형의 적층제조기술이 주목받는 가운데 이 기술의 장점에 대해 설명하고자 한다³⁻⁶⁾.

첫째는 'Freedom of design'이다. 항상 엔지니어는

제조 설계단계에서 공정을 미리 전제로 하여 주조, 단조, 압출, 프레스 등의 공정을 염두에 두기 때문에 모든 디자인이나 기구설계가 전통적인 제조공법을 고려한 설계가 중요하다. 그러나 적층제조기술은 엔지니어가 설계한 그대로를 기존 전통공정에서 만든 수 없는 어떠한 제품도 제작이 가능하다. 즉 복잡한 냉각채널을 가지는 냉각몰드의 경우 기계가공으로는 복잡한 냉각수채널을 제조할 수 없으나 Fig. 1에서 보듯이 금형표면에 따라 내부 냉각채널을 제조가 가능해짐에 따라 사출 금형이나 다이캐스팅 금형의 경우 제품의 함몰이나 수축을 최대한 줄일 수 있게 설계가 가능하여 최종제품의 불량률을 줄이고 생산성을 올릴 수 있다.

둘째는 'Complexity for free'이다. Fig. 2는 항공기에 사용되는 브라켓으로 내부를 중공화하거나 강성이 요구되지 않는 영역을 가감히 제거할 수 있는 최적설계(topology optimization)를 보여준다. 이러한 설계는 동일한 구조강성을 확보가 가능하고 소재 절감 및 경량화에도 기여할 수 있는 장점이 있다.

셋째는 'Potential elimination of tooling'이다. 기업들이 프로토타입이나 시제품 생산시 필요한 금형비용을 대폭 줄일 수 있어 도전적인 제품개발이 가능한 것도 큰 매력이다. 미국의 Rocket Lab은 뉴질랜드에



Photo by Mincheol kang

Fig. 1 Injection mold core with conformal cooling

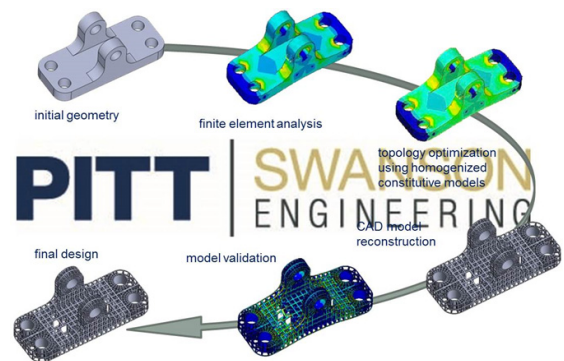


Fig. 2 Design optimization of mounting bracket for aerospace



Fig. 3 The Rutherford rocket engine(Rocket Lab)

서 로켓개발을 진행하며 적층제조기술을 적극적으로 도입하여 저비용화를 실현했다고 한다. 로켓2단에 9대의 엔진을 장착하여 인젝터, 터보 펌프 등의 주요 추진체 밸브 등을 타이타늄 합금으로 제조하여 로켓을 500만 달러 미만으로 발사할 수 있다고 밝히고 있다. 보잉은 항공기 소형부품 300여 종을 3D프린터로 제작 중에 있으며 기타 미사일 부품, 전투기 등 방산 관련부품과 신차 개발 등에도 적용사례와 저비용화를 실현한 사례들이 속속 공개되고 있다.

2. 적층제조기술에 사용되는 장비와 금속소재

2.1 적층제조용 장비

메탈 적층제조장비는 크게 두가지로 분류할 수 있다.

첫 번째는 Powder Bed Fusion (PBF) 방식이다.

이 방식은 Table 2에 보듯이 분말공급 장치에서 일정한 면적을 가지는 분말 베드에 수십 μm 의 분말층을 깔고 레이저 또는 전자빔을 설계도면에 따라 선택적으로 조사한 후 한층 한층씩 용융시켜 쌓아 올라가는 방식이다. PBF 방식은 SLS(Selected Laser Sintering) 또는 SLM(Selected Laser Melting), Laser Curing, DMLS(Direct Metal Laser Sintering) 등의 용어도 혼용하고 있으나 그 원리는 동일하다. 두 번째 방식은 DED(Directed Energy Deposition) 방식이다. 이 방식은 보호가스 분위기에서 분말을 실시간으로 공급하여 고출력의 레이저를 사용하여 공급 즉시 용융되어 적층해 나가는 방식이다. PBF와 DED는 각각 장단점을 아래 표에 정리해 두었으며, 전 세계 장비판매량은 비교적 정밀하고 형상자유도 구현에 유리한 PBF 방식이 월등히 많다. PBF방식은 독일의 ConceptLaser, EOS, SLM 등이 독일회사가 70%이상의 시장점유율을 가지고 있으며 우리나라에서는 원포시스, 스택, 센트럴 등이 개발에 성공하여 시판하고 있다^{7,8)}.

2.2 적층제조용 금속분말의 특징

3D프린터용 금속분말은 PBF 방식은 구형을 사용하며 제조방식은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 가스 Atomisation으로 제조하며 고주파로 봉재의 금속을 가열후 가스를 분사하는 EIGA(Electrode Induction Melting Gas

Table 2 Comparison of PBF and DED technologies

CRITERIA	POWDER BED FUSION	DIRECTIED ENERGY DEPOSITION
Schematic Diagram		
Build speed	5-20 cm^3/h (~40-160 g/h)	Up to 0.5 kg/h (~70 cm^3/h)
Accuracy	+/- 0.02-0.05 $\text{mm}/25 \text{ mm}$	+/-0.125-0.25 $\text{mm}/25 \text{ mm}$
Detail capability	0.04-0.2 mm	0.5-1.0 mm
Surface quality	Ra 4-10 μm	Ra 7-20 μm
Max. part size	800 $\text{mm} \times 400 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$	2,000 $\text{mm} \times 1,500 \text{ mm} \times 750 \text{ mm}$
Materials	Steel, Al,Ti, CoCr, Ni base alloy, bronze	Steel, Ti, Ni base alloy, ceramic
Typical application	Molds and die(tool inserts), Implants All types of component	Repair of worn components Modification of tooling for re-use Shaft, ducts, airfoils and coating

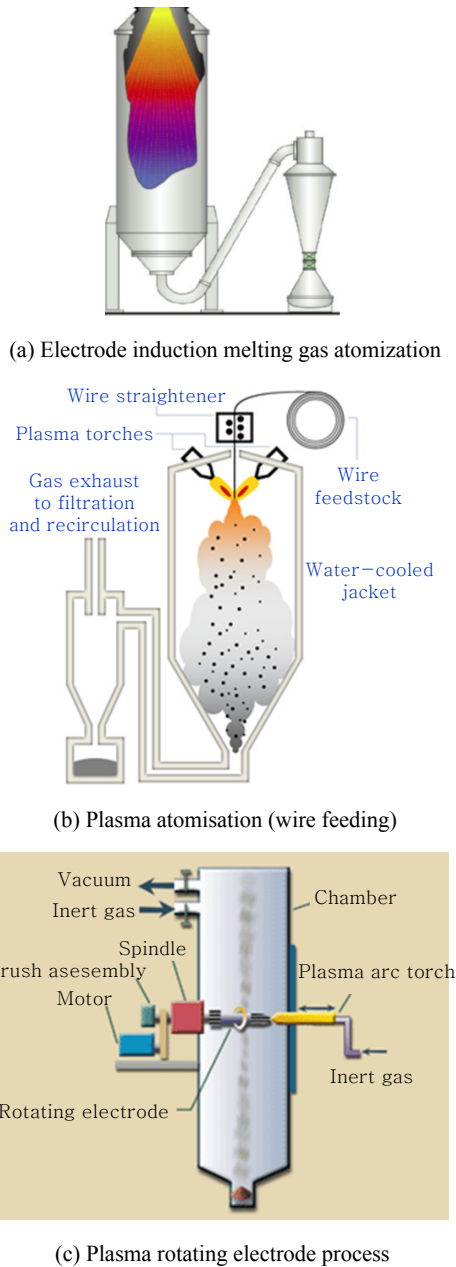


Fig. 4 Atomization processes for spherical metal powder

Atomization), 와이어를 공급하여 플라즈마로 가열하여 분사하는 방식, 봉재를 고속으로 회전하며 플라즈마를 가열하는 방식 등이 구형화 분말제조에 유리하여 주로 사용된다. 분말의 크기는 제조회사마다 차이가 있지만 레이저를 사용하는 ConceptLaser 및 EOS의 경우 25-55 μ m를, 전자빔을 사용하는 Arcam 사는 50-100 μ m, MIM을 대체할 초소형부품제작용은 1-5 μ m를 사용하는 것으로 알려져 있다^{9,10}.

이 구상화분말을 제조하는 업체는 AP&C, Sandvik, Höganäs, TLS Technik, H.C.Stark 등이 제조를 하고 있다.

분말에 대한 요구조건은 구형화도, 유동도, Tap density, 산소 및 질소 농도 등이 매우 까다로운 편이며 Table 3에 요구조건과 측정방법 등을 나타내었다.

2.3 금속분말의 종류와 응용분야

기존의 분말야금 방법은 분말을 성형 압축시켜 소결 등 여러 공정을 거치게 되나 적층제조기술을 활용하면 단순하게 금속분말 박스 내에서 국부적인 용융과 응축이 발생되어 부품이 탄생하는 것이다. 이 방식을 사용하면 스크랩 등의 재료손실도 없고 유사한 디자인이나 형상변경에 대한 설계변경이 자유롭다는 장점이 있다.

또한 기존 주조방법으로 제조가 불가능한 언더컷, 다중공 형태 제품의 생산이 가능하며, 두께도 0.3mm 이하로 제작 가능하여 정밀한 부품제조가 가능하고 Net-shape 성형이 가능하기 때문에 성형이후 기계가공 공정을 대폭 줄일 수 있다.

그러나 적층제조에 사용될 수 있는 금속은 많지 않고 잉곳 등 원소재에 비해 20-30배로 가격 또한 고가이다. 그 이유는 분말제조기술이 난이도가 높고 각 합금마다 적층 조건이 다르며 현재로서는 시장 확대가 되지 않았기 때문이다. 현재 사용되는 금속은 순타이타늄 및 그 합금, 스테인레스 합금류, 알루미늄합금, Fe-Cr-

Table 3 Measurement methods and requirement for additive manufacturing metal powder

Requirement	Why?	Measurement
Spherical Shape	High Packing Layer, Surface area and Low Porosity	SEM, BET analysis
Flowability		Hall Test : ASTM 8214 MPIF 03 Carney Test : ASTM B964
Low Porosity	Sound Microstructure	SEM
Particle Size	Uniform Melting	SEM, Laser Diffraction
Purity	Low Oxygen and Nitrogen Contents	ON Analyzer
Tap to Apparent Density Ratio	Powder Packing	Hausner or carr, Tapped densitytester
Chemical Composition	Uniform Mechanical Properties	ICP-OES, XRD

Table 4 Metal powder and applications for additive manufacturing

Materials name	Material type	Typical applications
MaragingSteel MS1	18 Mar 300/1.2709	Injection molding series tooling; Engineering parts
StainlessSteel GP1	Stainless steel 17-4/1.4542	Functional prototypes and series parts; Engineering and medical
StainlessSteel PH1	Hardenable stainless 15-5/1.4540	Functional prototypes and series parts; Engineering and medical
NickelAlloy IN718	Inconel™ 718, UNS N07718, AMS 5662, W.Nr 2.4668 etc.	Functional prototypes and series parts; High temperature turbine parts etc.
NickelAlloy IN625	Inconel™ 625, UNS N06625, AMS 5666F, W.Nr 2.4856 etc.	Functional prototypes and series parts; High temperature turbine parts etc.
CobaltChrome MP1	CoCrMo superalloy, UNS R31538, ASTM F75 etc.	Functional prototypes and series parts; Engineering, medical, dental
CobaltChrome SP2	CoCrMo superalloy	Dental restorations
Titanium Ti64	Ti6Al4V, TiAl6V4 ELI	Functional prototypes and series parts; Aerospace, motor sport etc.
Aluminium	AlSi10Mg, AlSi12	Functional prototypes and series parts; Engineering, automotive etc.
ETC	CL 80CU(Bronze), Yellow gold(18 carat), Silver alloy(930 sterling)	Arts and Jewelry

Table 5 Mechanical properties of metal materials for additive manufacturing

Materials	Condition	T.S [MPa]	Y.S [MPa]	Elong.[%]
Aluminum AlSi10Mg	as built	280-355	235-250	1-3
Aluminum AlSi12	as built	310-325	170-220	2-3
Tool steel 1.2709	heat-treated	1900	1800	2-3
Tool steel 1.2083 (stainless)	heat-treated	1700	1600	>2
Stainless steel 1.4404	as built	570	470	>15
Titanium TiAl6V4	heat-treated	1060-1120	980-1040	10-18
Cobalt-Chrome ASTM F75	as built	1100-1350	910-1010	8-13
Nickel-base alloy Inconel 718	as built, at 20 °C	1400	1100	10

Ni 강, 마르에이징강, Inconel 초내열합금, 귀금속 등에 제한적으로 사용되고 있으며 Table 4에 분말의 종류 및 응용분야를 Table 5에 기계적 성질을 나타내었다¹¹⁾.

2.4 메탈프린팅 제품 응용사례



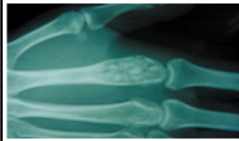

메탈프린팅 제품의 응용분야는 크게 금형, 치과 및 의료분야, 자동차, 우주항공, 전자기기 등으로 나눌 수 있으며 현재의 적용분야와 미래의 적용가능 분야를 Table 6에 나타내었다¹²⁾.

우주항공 분야는 Airbus, GE 등에서 활발하게 진행되고 있다. 터빈 브레이드, 연소기 부품, 각종 브라켓,

연료 노즐 등등 가시적인 성과 등이 속속 보고되고 있으며 주로 사용하는 소재는 Inconel 초내열합금 및 타이타늄, CoCr합금 등이 주로 사용된다. 그러나 적층소재의 열응력, 피로강도, creep 특성 등에 대한 보다 신뢰성을 확보해야만 적용분야가 증가할 것으로 보인다.

의료분야는 특히 개인 맞춤형으로 제작되기 때문에 기존 방식보다 신속하고 가격이 저렴한 장점이 있다. 활용되는 사례는 치과용 각종 크라운, 고관절 비구컵 등 인공뼈, 두개골 손상 후 머리 임플란트, 척추 임플란트, 각종 수술용 도구 등에도 많이 사용되고 있다. 주된 재료는 Co-Cr 합금 및 Ti 합금이 널리 사용되고 있으며 국내에도 확산되고 있어 향후 시장규모가 크질 것으로 보인다.

Table 6 Current and future applications of additive manufacturing in the industry

Industry	Current applications	Future applications and technical problem
	<ul style="list-style-type: none"> • Concept model and prototype • Small parts: nozzle, bracket • Special light and high strength parts 	Deformation, fatigue, thermal stress etc. <ul style="list-style-type: none"> • Large structure parts: wings, main body • Complex engine part: turbine blade • Electronic devices
	<ul style="list-style-type: none"> • Prototype parts • Motorsports parts • Parts for discontinued models 	<ul style="list-style-type: none"> • Lightweight automotive parts by optimized design • Private motor racing parts • Heat sink for hot conductivity
	<ul style="list-style-type: none"> • Prostheses and implant • Medical equipment and model • dental implants 	<ul style="list-style-type: none"> • Biodegradable implant • Parts of bio robot
	<ul style="list-style-type: none"> • Manufacturing and test for modeling • Personal jewelry and watch • Cooling channel • Personal special product 	<ul style="list-style-type: none"> • High strength mold • Cooling channel for die casting and hot forming

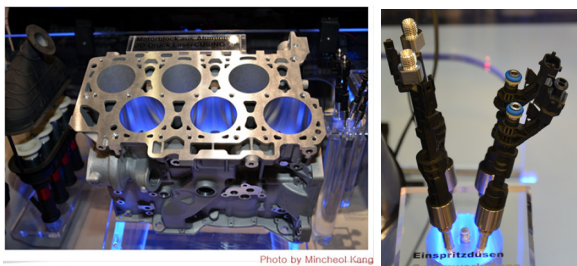


Fig. 5 Prototype parts of automobile



Fig. 6 Medical and dental parts

자동차분야는 양산용이라기 보다는 주로 프로토타입용으로 많이 제작되며, 일부 모터스포츠용의 튜닝제품,

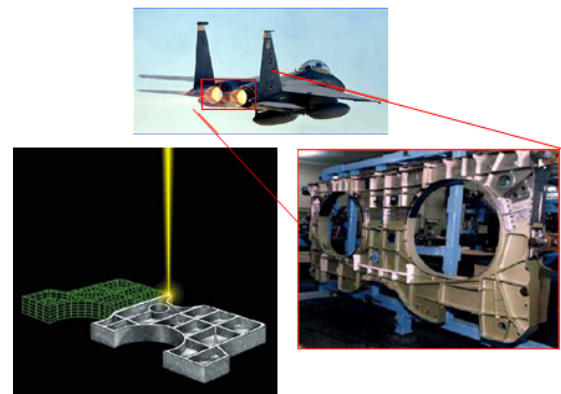


Fig. 7 Aerospace parts(up: F-15 part made by DED process, down: combustor made by PBF process)



단종모델의 부품 제작에 활용된다. 최근 디젤 직분사엔진용 연료분사장치를 개발하여 연료효율을 향상시켰다고 보고가 있어 직접 제조한 부품이 양산차에 적용될

Table 7 Global market share and outlook of additive manufacturing

Classification	2013(\$billion)	2014(\$billion)	2018(\$billion)	CAGR
AM equipment market	7	13	54	50.1%
Service and Material Market	18	25	108	43.8%
Total market	25	38	162	45.7%

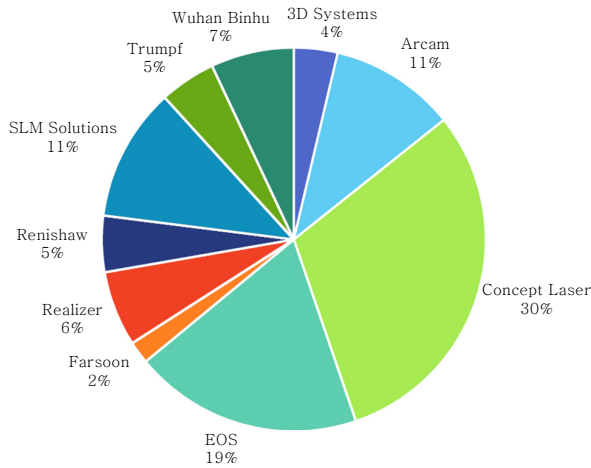


Fig. 8 Sales performance of metal AM equipment(2015)

수 있는 부품도 다수 있을 것으로 전망된다.

그 외 RFID 삽입을 위해 제작되는 금형, 귀금속을 활용한 각종 장신구 등에도 수요가 있다¹³⁾.

적층제조 시장은 크게 장비, 소재, 적층제조한 완제품, 교육 및 소프트웨어 등으로 크게 나눌 수 있다. Table 7에 2018년까지 각 분야에 대한 시장 전망을 보여주고 있으며 2013년 보다 2018년에는 연평균 45.7%의 성장으로 5년 사이 6.5배의 시장이 형성될 것으로 예상하고 있다. 이 중 Roland Berger사의 조사에 따르면 금속과 관련된 시장은 장비시장은 30%, 소재는 20%, 관련 서비스시장은 30%를 차지하며 장비의 경우 2023년 77억 유로로 예상하고 있다¹⁴⁾.

금속분말시장의 경우 전체 적층제조 소재시장의 5.9%를 차지하고 있으며 2015년 약 600톤 정도의 수요가 있었으며, 2023년 4,800톤으로 금속장비 보급에 따른 수요가 8배 이상으로 증가할 것으로 예상하고 있다.

2015년 전세계 메탈 프린터 매출은 그림 8에 나타낸 바와 같이 총 264백만달러로 ConceptLaser, EOS, SLM 등 독일기업이 70% 이상 차지하고 있으며 후발주자인 미국의 3D Systems에서도 단기간에 매출실적이 상승되고 있다.

향후 경사기능재료나 MMC 등 복합소재에 대한 기술개발, 인쇄전자용 나노급 분말의 수요도 발생할 것으로 예상되는바 소재시장의 지속적인 확대가 예상된다.

3. 결 론

적층제조기술이 대중들에게 알려진 것은 불과 수년이 지났으며 과거 만능의 도깨비 방망이처럼 포장이 되어 세간의 관심을 한몸에 받았으나 최근에는 그 열풍이 다소 잠잠한 감이 있다. 그러나 최근 피규어 등등의 생활 소품에서 생산기반형 부품의 성공사례가 속속 나오고 있으며 금속부품의 관심도는 급증하고 있다. 해외 적층제조설비사들도 대형화와 적층속도 증가를 위한 멀티 레이어 시스템, 적층결합 실시간 검사기능, 고정밀화 및 초소형부품 제조 등 많은 혁신이 진행되고 있다.

우리나라도 원포시스, 스맥, 센트럴, 인스텍 등의 장비 개발이 가속화되고 있으며 적층제조용 분말의 개발 성공 소식도 들려오고 있다. 현재 적층제조 기술에 있어서 금속 분야의 응용범위가 제한적이었으나 국내에도 장비 보급이 확산되고 있어 각종 금형제작, 의료분야, 로봇 부품, 방산 및 자동차 부품 제조도 점차 확산될 것으로 예상된다. 향후 KFX사업 등에서도 금속 적층기술을 도입할 예정으로 있어 그 전망은 밝다고 할수 있다.

국내외적으로 플라스틱 부품을 3D 프린터로 부품을 제조하는 기술은 도입기를 지나 성숙기로 접어들고 있으나, 금속으로 제조하는 기술은 선진국에 대비하여 기술격차가 크게 뒤떨어지지 않는 도입 성장기이기 때문에 우리나라도 장비제작을 비롯해서 보다는 시장규모가 더 큰 금속분말소재 및 응용분야를 확장하는 것이 시급하다.

References

1. Mincheol Kang, *Proceedings of KFS.*, (2013) (in Korean)
2. 3D-PRO, *3D printing symposium*, (2014) (in Korean)
3. 3D-PRO, *3D printing technical seminar*, KIM, (2014) (in Korean)
4. Mincheol Kang, Current metal 3D printing and meaning, *3D Printing*, 8(2014) (in Korean)
5. Mincheol Kang, 3D printing in the automobile industry of Germany, *3D Printing*, 10(2014) (in Korean)
6. Mincheol Kang, *Proceedings of KPMI*, (2014) (in Korean)
7. IRS Global, *Reprot-3D printing market, technology, and business strategy*, (2015) (in Korean)
8. IRS Global, *Reprot- 3D printing business for new industrial revolution*, (2016) (in Korean)

9. Mincheol Kang, *Inside 3D Printing Conference & Expo*, KINTEX (2016)
10. Rachel Gordon, *Inside 3D Printing Conference & Expo*, KINTEX (2016)
11. Mincheol Kang, Ji-hoon Yu, *Journal of KPMI*. 22(6), (2015), 452 (in Korean)
12. Smartech, *Additive Manufacturing Opportunities in the Metal Powder Industry*, (2014)
13. Wohlers Associates, *Wohlers Report-3D Printing and Additive Manufacturing State of the industry Annual Worldwide Progress Report*, (2014)
14. RolandBerger, *Additive manufacturing-Opportunities in a digitalized production*, (2015)