



# 금속 3D 프린팅 설계 기술 동향

## I. 서론



변기영  
한국산업기술평가관리원



이창우  
한국생산기술연구원



김건희  
한국생산기술연구원



김형균  
한국생산기술연구원

4차 제조혁명을 주도할 수 있는 기술 중 하나로 3D 프린팅 기술이 각광받고 있다. 3D 프린팅(또는 삼차원 프린팅)이란 삼차원형상의 구조물을 구현하기 위해 삼차원 도면을 자동화된 출력장치를 통해 입체화하는 기술을 의미한다. 기존의 성형 또는 사출기술과 비교하여 3D프린팅은 생산공정이 매우 간단하며 상대적으로 복잡하며, 기존 성형 또는 사출기술로는 제작이 불가능한 제품을 저비용으로 제작할 수 있는 장점을 가지고 있다. 때문에 미국, 일본, 유럽과 같은 선진국에서는 3D프린팅 기술을 제조업 혁신을 위한 핵심기술로 선정하여 국가주도의 정책적 지원을 꾸준히 전개하고 있으며, Google, HP, Amazon과 같은 글로벌 기업들 또한 3D 프린팅 시장진출의 경쟁을 가속화 하고 있다.

우리 정부 또한 2014년 3D프린팅 산업 발전전략<sup>[1]</sup>을 수립하여 기술개발, 인프라조성, 산업인력양성, 법·제도 마련 등 초기 생태계 조성을 육성하고자 노력하고 있다. 그러나, 3D 프린팅 선진국과의 기술격차, 기존 주력산업분야의 활용 수요 부족, 핵심소재와 장비의 가격이 비싸 중소중견 기업 중심의 후발업체가 창의적 아이디어 만으로는 시장 진입 문턱이 높아 국내 산업 경쟁력은 여전히 미흡한 수준이다. 또한, 다품종 소량 생산의 시장수요에 걸맞아 3D프린팅의 유망 산업 중 하나

로 손꼽히는 의료기기의 경우에도 사회적 기반, 인허가 문제에 대한 기반이 미약하여 산업적 실용화를 위한 난관이 많다 할 수 있다.

본 기고에서는 3D프린팅에 관한 일반적 기술동향과 함께 3D프린팅의 핵심기술 중 설계기술과



이병수  
한국생산기술연구원



제조(공정) 기술 동향을 살펴보고, 산업적 실용화를 단축하기 위한 기술적 제언을 하고자 한다.

## II. 3D 프린팅의 일반적 기술동향

### 1. 3D 프린팅의 기술 방식 분류

삼차원 조형물을 제작하기 위한 기존 방식은 재료를 자르거나 깎아 생산하는 절삭가공방식이 대표적이며, 3D프린팅은 액체, 파우더형태의 폴리머(수지), 금속 등의 재료를 적층하여 제조하는 방식으로 제작한다는 점이 가장 큰 차이점이라 할 수 있다. 이렇게 제작하는 프로세스의 차이를 강조하여 3D 프린팅을 적층제조(Additive Manufacturing)기술이라 하며, 상대적으로 복잡하고 긴 기존 공정과 비교하여 상대적으로 빠르게 제작할 수 있는 점을 강조하여 쾌속조형 (Rapid Prototyping) 제작 방식이라 부르기도 한다. 3D 프린팅의 구현은 소재기술 또는 성형기법에 따라 다양하게 구현이 가능하며, 미국재료시험학회(ASTM)에서 대표적인 7가지 3D 프린팅 기술방식을 분류하였고, 다음과 같다<sup>[2]</sup>.

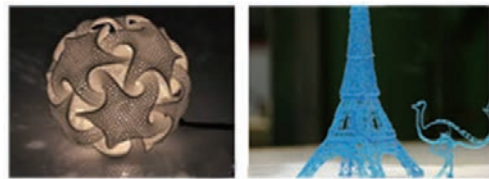
- 광중합방식(PP, Photo Polymerization) 빛의 조사로 플라스틱 소재의 중합반응을 일으켜 선택적으로 고형화시키는 방식, SLA, DLP가 대표적 방식
- 재료압출방식(ME, Material Extrusion) 고온 가열한 재료를 노즐을 통해 압력으로 연속적으로 밀어내며 위치를 이동시켜 물체를 형성시키는 방식, FDM이 대표적 방식
- 접착제 분사방식(BJ, Binder Jetting) 가루형태의 모재위에 액체 형태의 접착제를 토출하여 모재를 결합시키는 방식, 3DP가 대표적 방식
- 재료분사방식(MJ, Material Jetting) 용액형태의 소재를 Jetting으로 토출하고 자외선 등으로 경화시키는 방식, Polyjet이 대표적 방식
- 분말적층용융방식(PBF Power Bed Fusion) 가루형태의 모재위에 고에너지빔(레이저 또는 전자빔)을 조사하며 조사해 선택적으로 결합시키는 방식, SLS가 대표적 방식

- 고에너지 직접조사방식(DED, Direct Energy Deposition) 고에너지원(레이저 또는 전자빔)으로 원 소재를 녹여 부착시키는 방식, DMT가 대표적 방식
- 마지막으로 Sheet Lamination 방식이 있으며 얇은 필름 형태의 재료를 열, 접착제 등으로 붙여가며 적층하는 방식이다.

### 2. 3D 프린팅의 기술의 장점과 시장전망<sup>[3]</sup>

3차원 조형물을 만들어 내기 위해 기존 기술은 중간재를 대상으로 필요한 부분만 남기고 나머지 재료를 제거하거나(절삭가공), 소재를 용융시켜 틀에 주입하여 형상을 만드는 (주물가공, 주조) 방법을 사용하였다. 이러한 기존 제조방식과 달리 선택된 부분만 반복적으로 적층하여 3차원 조형물을 만들어 낼 수 있는 3D 프린팅 기술은 기존 기술 대비 상대적으로 복잡한 형상의 구현이 용이하고, 소재를 절감하며, 디자인 변경이 용이하고 다양한 산업과 연계 융합이 가능한 장점을 갖는다.

- (복잡한 형상 구현) 작업물과 공구간 간섭이 최소화되어 복잡한 형상 제조에 더욱 유리하며 적층방식의 제작으로 내부 형상 제작이 가능하다.



- (소재의 절감) 임의의 3차원 형상을 제작하는데 있어 전통적인 절삭가공과 비교하여 필요한 만큼의 소재를 사용하므로 소재를 크게 절감할 수 있고, 또한 고강도를 갖는 3차원 격자 구조의 설계기법을 기반으로 형상의 무게를 크게 줄일 수 있다.



- (디자인 변경이 용이) 별도의 금형이 필요 없기 때문

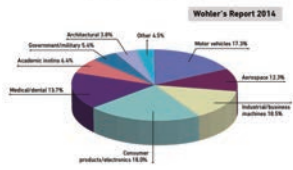
에 다품종 소량, 맞춤형 제작에 활용되며 제품개발 및 제작의 비용이 대폭 감소된다.



3D 프린팅의 다양한 산업분야로의 적용 가능성을 바탕으로 점차적인 시장확대가 예상되며 장비/서비스를 포함한 시장이 2020년 210억불 규모로 성장 전망이 예상된다.



〈시장현황 및 예상〉



〈응용분야별 이윤창출 설문결과〉

이와 같이 3D 프린팅의 다양한 산업분야로의 응용 및 미래시장에 대응하기 위해서는 3D 프린팅의 핵심 요소기술에 대한 이해와 접근전략이 필요하다 할 수 있다.

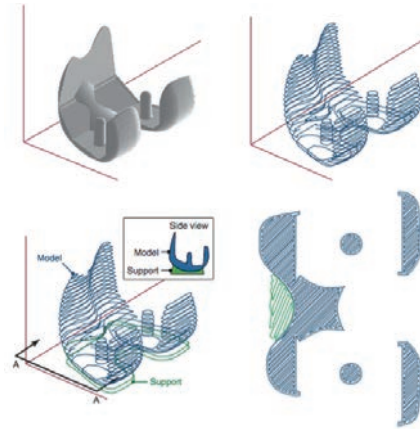
### 3. 3D 프린팅의 핵심요소기술 동향

3D 프린팅 기술은 크게 설계기술, 소재기술, 장비기술, 공정기술, 후처리 기술로 분류할 수 있다. 이들 중 본 기고문에서는 설계기술과 공정기술에 초점을 맞추고자 한다.

#### 가. 3D 프린팅 설계 기술 동향

기존 제조공정으로는 구현이 불가능한 형상에 대한 제조가 3D 프린팅에서는 가능해짐에 따라 3D 프린팅을 위한 기능성 복합구조 형상설계기술이 3D 프린팅의 핵심 원천기술로 부각되고 있다.

의료분야에서는 체내 삽입의료기기를 위한 기능성 표면 프로파일, 탄성구조 제어, 복합곡면 동시구현 설계를 통해 체내 식립 후 인체 친화성, 내구성 등의 요구가 존재하며 이에 대응하기 위한 stress-release 구조 설계, 접



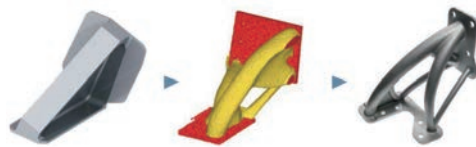
〈그림 1〉 3D 프린팅 모델 Layering 및 support 설계 예

촉 표면적 극대화를 통한 표면효과증진의 제품설계 기술이 필요하다. 〈그림 1〉과 같이 제조공정 중 Layering과 support 설계를 통해 공정 생산성, 치수정밀성, 빌드품의 물성등을 제어할 수 있다. 이는 빌드의 방향이나 속도 등이 물성에 영향을 미칠 뿐 아니라 제조공정의 속도에도 영향을 미치는 것을 의미한다<sup>[4-7]</sup>.

항공분야에서는 항공부품 등의 요구강성을 만족하면서 경량화 실현가능한 구조 설계기술이 가장 큰 요구라 할 수 있다. 〈그림 2〉는 경량·고강도 항공기 구조부품의 예이며, Ti 합금분말을 이용하여 구현한 제품으로 고 비강



〈그림 2〉 경량·고강도 항공기 구조부품 (출처:EOS社)



〈그림 3〉 위상기하학 기반 경량·고강도 설계 예시 (출처: laser Zentrum Nord社)



〈그림 4〉 Airbus社 경량·고강도 구조부품 설계/제작 예



도가 매우 높은 제품이다.

이와 같이 3D 프린팅 설계기술은 기존 제품의 설계도면을 기준으로 보다 효율적 디자인으로 변경하여 구현하는 방향으로 발전하고 있으며 주로 부가가치가 높은 다품종 소량생산품을 대상으로 위상기하학(topology), 생체공학 응용기반 경량·고강도 구조설계와 더불어 열 효율 증대를 위한 복합 구조설계기술이 가장 크게 대두되고 있다. <그림 3>과 <그림 4>는 각각 위상기하학을 기반으로 한 경량·고강도 설계의 예시와 제품의 예시이다.

전술한 바와같이 자동차, 항공분야 등에서는 연료절감, 속도향상 등의 목적으로 제품의 중량감소가 큰 관심사가 되고 있으며 3D 프린팅의 설계/디자인을 통해 이러한 요구를 만족시킬 수 있는 충분한 가능성을 보여주고 있다. <그림 5>에서는 기존 제품과 3D 프린팅을 통해 제조된 제품의 설계/디자인의 차이를 통해 제품의 중량을 어느정도 감소시킬 수 있는지에 대한 가능성을 보여주고 있다.

<그림 5>는 동일한 기능에서 강도를 유지하면서 약 41%의 중량이 감소됨을 보여주는 예이다.

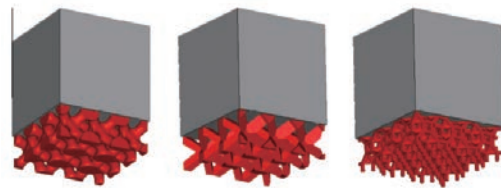
한편, 3D 프린팅제작의 공정에서 빌드폼이 무너지지 않고 제작과정 중 형상을 유지할 수 있도록 지지대(supporter)를 설계하는 것 또한 기존 제작공정과 차별화 되는 부분이며 매우 중요한 공정이다. 이러한 지지대는 단순히 형상구현과정상의 보조재 역할 뿐 아니라 제작과정상 발생하는 열을 외부로 방출할 수 있는 통로로서의 중요한 기능을 담당한다. 때문에 지지대의 개수, 방향, 크기는 빌드폼의 물성을 결정하는 또 하나의 매우 중요한 변수라 할 수 있다. 일 예로 이러한 지지대에 대한 기능적

	original design	bionic design	integrated design* ("bracket" directly glued into honeycomb)
bracket weight	330 g	195 g	0 g
assembly weight	1,400 g incl. fiber mount and HiLocks	1,265 g incl. fiber mount and HiLocks	300 g
dimensioning load case	35 kN	35 kN	35 kN
weight saving		135 g per bracket -41%	1,100 g per assembly >-80%

<그림 5> 생체공학 응용 경량·고강도 항공부품 설계<sup>[8,9]</sup>



<그림 6> 지지대 설계에 따른 열충격 크랙 발생 예<sup>[10]</sup>



<그림 7> 열 분산 효율평가를 위한 지지대 설계 예<sup>[11]</sup>

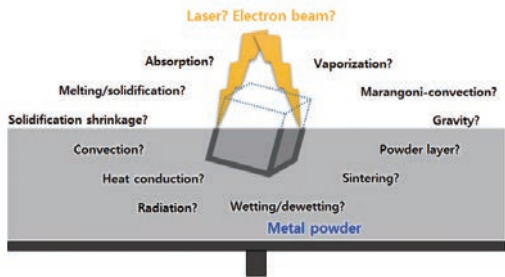
관점이 고려되지 않을 경우 제작과정상 발생하는 열응력에 의한 제품의 균열이 발생하는 문제가 나타날 수 있다. <그림 6>은 지지대 설계 오류로 인해 열응력 차단기능이 부족하여 제품에 균열이 발생한 예를 보여준다.

이와 같이 3D프린팅 형상 제작 중 발생할 수 있는 열응력 문제에 대한 대응을 위해서는 효율적 열 분산 기능을 갖는 지지대 설계가 매우 중요하며, <그림 7>은 그 시뮬레이션 이미지의 예이다.

<그림 7>의 시뮬레이션 이미지에서 보듯 지지대 수가 많고 표면적이 넓을수록 열 분산의 효과가 높고 성형되는 빌드폼의 물성에 미치는 영향을 크게 달라진다.

#### 나. 3D 프린팅 제조(공정) 기술 동향

금속 3D 프린팅의 경우 고에너지빔(레이저 또는 전자빔)과 금속분말의 상호반응에 따라 제품성형이 이루어짐으로 제작과정상의 공정변수 제어가 필수 불가결하다 할 수 있다. 공정변수로는 분말의 형상과 크기, 분포 등의 조건과 빔의 종류에 따라 레이어의 두께(layer thickness), 빔의 지름(beam diameter), 빔의 세기(beam power), 초점공차(focus offset), 점간거리(point distance), 노출 시간(exposure time), 스캔속도(scan speed), 에너지 밀도(energy density), 선 에너지(line energy)등 다양한 변수가 있다. 이러한 변수들을 기반으로 한 공정조건 최적화를 통해 완전한 성능과 성형을 갖는 조형물을 만들어 낼 수 있으므로 이러한 공정조건에 대한 연구는 매우 중



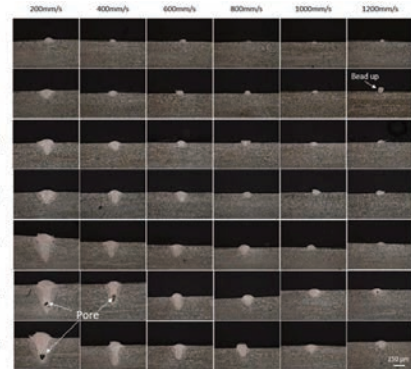
〈그림 8〉 에너지원과 금속간 상호작용 반응요소

요하다. 〈그림 8〉은 에너지원과 금속 분말의 상호작용에서 일어날 수 있는 반응요소들을 보인다.

〈그림 8〉에서 예시한 바와 같이 반응요소에서 고려할 사항은 “에너지가 어느정도 흡수될 수 있는지?”, “기화현상은 일어나지 않는지?”, “용융/응고가 적정 시점에서 일어나는지?”, “응고시 수축이 발생하지 않는지?”, “적층두께는 적정한지?” 등 14가지가 넘는다.

금속 3D 프린팅의 공정최적화를 위해 금속분말의 full melting조건을 선정한 후, SDW(Straight dense wall) 제조 조건을 확보, hatching distance를 최적화하는 과정을 거치며, 이를 기반으로 energy density별 데이터베이스를 구축하여 적용함으로써 공정최적화를 이룰 수 있다. 금속분말의 full melting을 위해 금속분말 소재에 대한 빔의 흡수율 계산값, 단위 부피별 금속소재가 용융될 수 있는 에너지를 열역학적으로 계산한 값과 3D 프린터가 가용한 energy density값과 상호 비교하여 공정을 선정하게 된다. 일반적으로 장비를 구축할 때, 장비 제조기업이 제시하는 공정조건은 형상을 만드는 것에 만족되지만 각 부품에 대한 물성, 예를 들어 강도, 경도, 연성, 피로강도 및 충격강도를 만족하는 공정조건은 아님으로 구축 후 각 장비의 조건을 잘 이해하여 최적 공정조건을 구축해야 한다.

공정 최적화를 위해 소재에 따라 기본적으로 melt pool 과 SDW에 관한 연구가 필요하다. 최적 melt pool은 에너지 조사에 대해 분말이 어느정도의 깊이까지 녹는지를 나타내는 것으로 layer thickness에 따라 분말을 full melting하고 단계별 용융부위까지 열영향부(HAZ, Helt Affected Zone)을 형성시켜 주어 적정한 key hole이 형성될 수 있도록 해준다. 또한, 하단부와의 delamination

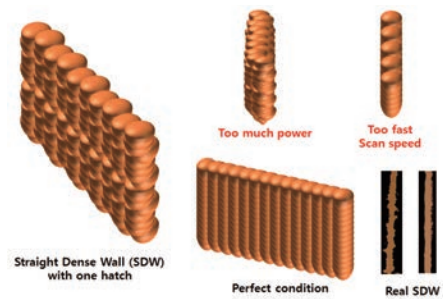


〈그림 9〉 3D 프린팅 공정조건별 Ti-6AL-4V melt pool 분석<sup>[12]</sup>

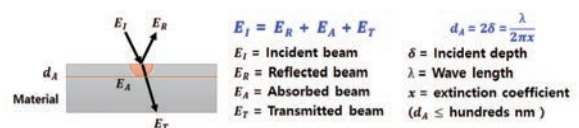
을 막기위한 에너지 조사조건을 찾는 것이 필요하다. Gong의 연구팀은 Ti-6AL-4V 합금분말로 레이저 파워와 scan-speed조건에 따른 melt-pool 형성기구와 bead up(balling effect)와 key hole 형성시 pore형성의 가능성에 대해 제시하였고, 그 분석결과를 〈그림 9〉에 보였다.

SDW는 얼마나 치밀한 조직을 최적의 공정으로 만들 수 있는가를 평가하는 지표로 적정한 melt pool 조건으로 hatch space를 넓혀 각각의 개별 wall을 만들어 기공도 등 결함여부와 wall의 조도를 평가하고 최적의 조건을 도출하는 항목이다. 이는 SLM 원천기술을 보유한 realizer社가 제안한 평가방법이며, 〈그림 10〉은 SDW 평가를 한 모습도 실제 시험결과의 단면을 보여주고 있다.

한편, 상기 두 항목에 대해 모두 에너지 밀도를 공정변수로 하여 어느정도의 에너지가 분말에 조사되는지를 예



〈그림 10〉 SDW(Straight Dense Wall) 평가(Realizer社)



〈그림 11〉 입사된 레이저 에너지의 분리 및 영향 깊이

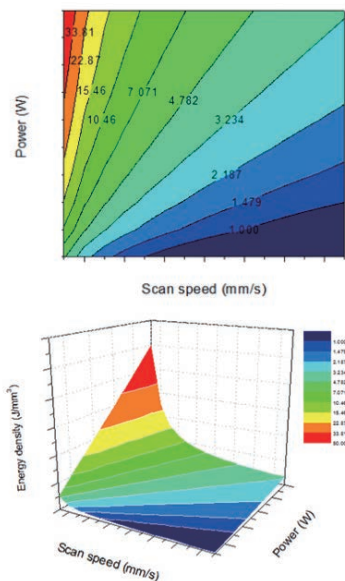


측하는 것이 중요하다. 3D프린팅 공정에서 조사에너지(EI)는 투과에너지(ET), 반사에너지(ER)와 흡수에너지(EA)의 합으로 정의된다.

금속의 경우 투과에너지가 없으므로 반사에너지와 흡수 에너지의 합으로 분말의 용융에 필요한 에너지가 구성되며, 금속의 경우 고상의 금속이 액상의 금속으로 상변태하는데는 Heat Capacity(열용량, HC), 용융잠열(Heat of fusion, Hf), 상변태 에너지(Pahse Transformation, Hp)의 3 항목의 열량합으로 계산된다. 이러한 이론적 계산은 공정설계시 매우 중요한 인자로 상기식을 적용하여 기본 공정 설계를 진행한다.

금속의 용융에 필요한 최소에너지를 3D 프린팅 장비에 공급하기 위한 공정변수로 에너지 파워(W)와 스캔속도(scan speed, mm/s)를 활용한다. SLM(Selected Laser Melting)공정에서 단위당 가해지는 에너지 밀도(Energy Density) E(J/mm<sup>3</sup>)는 파워 P(W), 스캔속도 V, 해치공간(hatch space) h(mm)으로 계산될 수 있으며, <그림 12>는 이러한 세 공정변수의 상관관계를 보여준다.

금속 용융에 대한 최적 공정조건을 보여주는 기본 그래프로 녹색영역은 용융과 응고에 적절한 공정조건 영역이라 할 수 있고, 붉은 영역은 과 용융, 청색영역은 미 용융 영역으로 공정에 적용이 어려운 조건이다. 보다 자세한



<그림 12> SLM 활용가능한 에너지 밀도

이론적 접근과 실질적 데이터베이스 구축방식은 여러관점이 있을 수 있으나 각 부품의 요구 물성에 맞는 제조공정이 필요하며 상기 언급된 이론적 접근이외에도 빌드폼의 방향성, 내부 응력 등이 고려되어야 한다.

#### 4. 산업적 실용화 단축을 위한 제언

금속 3D프린팅 실용화를 위해 앞서 언급된 설계기술 및 제조공정기술이 가장 기반이 되는 기술이나 이외에도 사용하는 금속분말의 원소별 산화방지, 분말 크기제어, 불순물 제어 등 소재기술과 에너지원에 따른 스캔속도제어, 생산속도에 중요한 분말 도포방식의 개발, 분말회수 기술 등 장비 연계기술 및 잔류응력의 제어, 표면조도의 제어, 내부물성제어 등을 위한 후처리 기술 또한 중요한 연계기술이다. 이미 글로벌 시장동향은 평균 5%이상의 성장을 보이고 있고, 선진국에서는 보잉社, GE 등이 우주/항공분야에, conformis社(美), Alder Ortho社(伊) 등이 의료분야에서 각각 상용화 제품을 출시 판매하고 있는 현황이다. 국내에서도 다양한 산·학·연의 기관들이 다양하게 3D 프린팅의 기술과 제품을 개발하고 있는 상황에서 선진국의 기술개발 격차를 좁히고 독창적인 3D 프린팅 제품 적용을 가능하게 하기 위해 기초단계에서부터 각 기관이 보유하고 있는 기술을 결집하여 적용할 필요가 있다.

#### 참고 문헌

- [1] 미래창조과학부, 산업통상자원부, 3D프린팅 전략기술로드맵, 2014,12
- [2] www.astm.org
- [3] 산업통상자원 R&D전략기획단, 2016년 시스템산업 산업기술 R&BD전략, 2015.08
- [4] Ravi Janardan etc. 'Geometric and Algorithmic Aspect of Computer-Aided Design and Manufacturing,' American Mathematical Society, 2013
- [5] Tom Page, 'Design for Additive Manufacturing-Guidelines for cost effective manufacturing,' Lambert Academic Publishing, 2011
- [6] G. Strano, L.Hao, R.M.Everson and K.E.Evans, 'A new



Approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing,' The Int. J. of Adv. Manuf. Tech., Vol. 66, p.1247~1254, 2015

[7] Patent US 6596614 B2

[8] C.Emmelmann, P.Sander, J.Kranz and E.Wycisk, 'Laser Additive Manufacturing and Bionics: Redefining Lightweight Design,' Physics Procedia, Vol.12, p.364~368, 2011

[9] J.Kranz and D. Herzog and C. Emmelmann, 'Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in Ti5Al4V,' Journal of Laser Applications, on-line published, 2016.

[10] Jukka-Pekka Jarvinen, etc, 'Characterization of Effect of Support Structures in Laser Additive Manufacturing of Stainless Steel,' Physics Procedia, Vol. 56, p72~81, 2014

[11] F. Calignano, 'Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting,' Materials & Design, Vol. 64, p203~213, 2014

[12] H.Gong et al, 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2014



변기영

- 2003년 2월 인하대학교 전자공학과 (박사)
- 2003년 3월~2005년 6월 가톨릭대학교 강의교수
- 2005년 7월~2016년 7월 삼성전기 수석연구원(부장)
- 2016년 8월~현재 한국산업기술평가관리원 (스마트전자 PD)
- IT 기술사 (컴퓨터 시스템 응용)
- 정보처리/정보통신 수석감리원

〈관심분야〉  
3D프린팅, 가상증강현실, IoT, 홈정보가전, LED/광(레이저)



이창우

- 2001년 9월 Tohoku Univ. 재료공학(박사)
- 1994년 8월~1998년 10월 한국과학기술원 연구원
- 2001년 10월~2002년 7월 일본 VBL 연구소 선임연구원
- 2009년 3월~2011년 2월 조선대학교 초빙교수
- 2009년 3월~현재 UST 겸임교수
- 2002년 7월~현재 한국생산기술연구원 강원본부(본부장)

〈관심분야〉  
적층성형가공, 금속재료 조직제어/분석



김건희

- 2010년 8월 인하대학교 기계공학과 (박사)
- 2005년 9월~2014년 9월 한국생산기술연구원 금형기술그룹 (연구원)
- 2014년 7월~현재 한국생산기술연구원 강원지역본부 (적층성형가공그룹 그룹장)

〈관심분야〉  
3D프린팅 특화 설계, 응용제품/부품, 후가공



김형균

- 2013년 2월 강원대학교 신소재공학과 (박사)
- 2013년 3월~2014년 6월 강원대학교 산업기술연구소
- 2014년 7월~현재 한국생산기술연구원 강원지역본부 (적층성형가공그룹 선임연구원)

〈관심분야〉  
금속소재, 적층성형가공, 재료분석





**이병수**

- 2012년 9월 Tohoku University 금속재료과 (박사)
- 2012년 10월~2013년 3월 Tohoku Univ. IMR
- 2013년 4월~현재 한국생산기술연구원 강원지역본부  
(적층성형가공그룹 선임연구원)

〈관심분야〉

생체재료, 적층성형가공, 공정설계