

# 금속 3D 프린팅 적층제조(AM) 공정 시뮬레이션 기술에 관한 고찰( I )

## Investigation to Metal 3D Printing Additive Manufacturing (AM) Process Simulation Technology ( I )

김용석<sup>1</sup> · 최성웅<sup>2</sup> · 양순용<sup>1\*</sup>

Yong Seok Kim, Seong Woong Choi and Soon Yong Yang

Received: 23 Jul. 2019, Revised: 20 Aug. 2019, Accepted: 21 Aug. 2019

**Key Words** : Metal 3D Printing(금속 3D 프린팅), Additive Manufacturing(AM: 적층제조), AM Process Simulation(AM 공정 시뮬레이션), ANSYS AM Software(ANSYS AM 소프트웨어), Powder Bed Fusion(PBF: 파우더 베드 퓨전), Direct Energy Deposition(DED: 직접 에너지 증착)

**Abstract**: 3D printing AM processes have advantages in complex shapes, customized fabrication and prototype development stage. However, due to various parameters based on both the machine and the material, the AM process can produce finished output after several trials and errors in the initial stage. As such, minimizing or optimizing negative factors for various parameters of the 3D printing AM process could be a solution to reduce the trial-and-error failures in the early stages of such an AM process. In addition, this can be largely solved through software simulation in the preprocessing process of 3D printing AM process. Therefore, the objective of this study was to investigate a simulation technology for the AM software, especially Ansys Inc. The metal 3D printing AM process, the AM process simulation software, and the AM process simulation processor were examined. Through this study, it will be helpful to understand 3D printing AM process and AM process simulation processor.

### 1. 서 론

적층제조(AM: Additive Manufacturing)는 한 번 디자인된 기본 설계를 바탕으로 특수한 형상(feature)으로 또는 이종 소재로 바로 구현이 가능하도록 쉽게 제어 가능하기 때문에 고도화된 맞춤화를 실현하는데 매우 유용하게 활용될 수 있다. 단번에 고도로 맞춤화된 제품을 생산하는 능력은 생산 비용과 소재 낭비를 크게 줄이는 동시에 사용자 만족도와 기업 이익을

크게 향상시킬 수 있다. 특히, 금속제품의 개발단계에 적층제조 기술의 적용은 전략적으로나 재정적으로 큰 효과가 알려지고 있다. 하지만 모든 기업으로 일반화 되지 못하고 주로 고비용의 정교한 제품 설계가 요구되는 항공회사와 같은 대기업을 중심으로 적용되고 있다. 이것은 금속 적층제조에 사용되는 프린팅 장비가 고가이고 소재분말의 비용이 현저히 높으며, 기술적으로 초기 단계에 실패율이 높아 개발환경 구축 초기 비용이 크게 발생하기 때문인 것으로 알려지고 있다. 머티리얼라이즈사 Stefaan Motte는 금속 3D 프린팅을 이용한 적층제조에서 전체 비용 중 75% 이상이 출력 공정에 들어가고 있으며, 또한 시험 출력이나 실패한 출력물 등에도 많은 비용이 들어가며, 특히 복잡한 기하학적 구조의 프린팅 출력물은 평균 15%가 실패한다고 하였다<sup>1)</sup>. 지멘스사 Eckhoff는 현재 금속 프린팅 작업을 완성하는 데 평균 3~5 회의 시도가 필요한 것으로 이야기하였고, 점진적으로 더 많은 기

\* Corresponding author: soonyy@ulsan.ac.kr

1 Department of Mechanical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

2 Department of Construction Machinery Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

Copyright © 2019, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

업과 산업이 생산 워크플로우의 일부로 적층제조를 채택함에 따라 한 번에 완성된 출력물을 달성하는 것이 점점 더 중요해지고 있다고 하였다<sup>2)</sup>. 이와 같이 금속 프린팅에서 단 한 번에 완성된 출력물을 만들어 내지 못하고 시행착오적인 실패가 반복되는 것은 새로운 장비나 워크플로의 도입에 따른 축적된 기술의 부재, 생소한 제조 파라미터의 조정, 경험 부족에서 오는 제조적인 오류 그리고 불필요한 요소의 미흡한 제거로 인한 요인 등이 있을 수 있다. 이러한 요인을 최소화하거나 최적화함으로써 시행착오적인 실패를 줄일 수 있으며, 이것은 소프트웨어적으로 상당부분 해결할 수 있다. 근래 금속 3D 프린팅 AM분야에도 전통적인 MC가공분야와 같이 최종 제품의 기능을 고려하여 적층제조와 전처리 및 적층공정 그리고 후처리 과정에서 야기될 수 있는 문제점을 미리 예측하고 보정하는 시뮬레이션 기술 적용 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 연구에서는 AM분야의 시뮬레이션 기술을 적용하기 위한 전반적인 시뮬레이션 기술에 대하여 살펴보고자 한다. 특히, ANSYS Inc.,의 AM 소프트웨어를 중심으로 다루어보고자 한다. 본 1편에서는 금속 3D 프린팅 AM 공정의 소개와 AM 공정 시뮬레이션 소프트웨어에 대한 현황 그리고 AM 공정 시뮬레이션 프로세스를 중심으로 다루고, 다음 2편에서는 AM 공정 시뮬레이션 예시와 관련하여 Topology Optimization, ANSYS Workbench, Additive Print 그리고 Additive Science에 대한 직접적인 수행을 통하여 사용법을 알아보고 분석해보고자 한다.

## 2. 금속 3D 프린팅 AM 공정

3D 프린팅 기술은 3차원 형상을 컴퓨터 모델링 작업을 통하여 디지털 CAD 모델 데이터로 만들고 이를 2차원 평면으로 잘게 자른 후, 분말화된(powdered) 소재를 3차원 프린터로 평면에 한 층씩 쌓아가는 적층 방식(layer by layer)으로 입체 형상을 제조하는 기법이다. 종래의 제조 기술이 입체 형상의 소재를 기계 가공 등을 통해 자르거나 깎는 방식으로 입체 형상을 생산하는 절삭가공(Subtractive Manufacturing) 방식이었다면, 3D 프린팅에서는 이와 대치되는 개념으로 적층하는 방식을 취하여, 공식용어로 적층제조(AM: Additive Manufacturing) 또는 쾌속조형(RP: Rapid Prototyping)으로 사용되고 있다. 적층제조 분야는 고분자 소재로 시작하여 근래에는 금속 소재로 확대되

어 3차원 프린팅 기술이 비약적으로 발전하고 있다. 글로벌 금융그룹 ING의 보고서에 따르면, 2060년까지 제조품의 50%가 3D 프린터로 인쇄돼 세계 무역 규모의 1/4 이상을 차지할 것이라 전망하고 있다<sup>3)</sup>. 더불어 공산부품 대부분이 금속으로 만들어지는 것을 고려해볼 때, 금속 3D 프린팅 AM 분야에 관심은 날로 높아질 것으로 예상된다. 하지만, 3D 프린팅 AM 공정에 있어서 우선 해결해야할 과제도 다수 있다. 복잡한 형상의 제품을 개발하는 단계의 시제품 생산에는 비용과 시간적으로 이점이 있으나 생산단계의 수준에서는 느린 속도, 낮은 정밀도, 낮은 강도, 소재의 제한 등은 우선 해결해야할 과제다. 일반 제조공정(절삭가공)과 3D 프린팅 제조공정(적층제조)의 특징과 장단점을 비교하여 Table 1에 정리하였다. 금속 3D 프린팅 기법에 대한 ASTM(American Society for Testing and Materials) 및 ISO(International Organization for Standardization)에서는 크게 2가지로 분류하고 있다. 그것은 평평하게 깔아놓은 분말영역을 레이저의 선택적 열에너지로 융합하는 분말적층 용융방식(Powder Bed Fusion: PBF)과 레이저 빔의 집중된 열에너지로 분말소재를 직접 녹여서 증착하는 고에너지 직접 조사방식(Directed Energy Deposition: DED)이다. 이와 같이 금속 3D 프린팅 기법은 크게 PBF와 DED 방식으로 나뉜다. 소재의 형태와 파워 소스의 유형에 따라 더 세분하여 분류되고, 레이저 업체에 따라 다양한 이름으로 불리고 있다. 소재의 형태와 파워 소스의 유형 그리고 레이저 업체에 따른 AM 방식의 분류를 Table 2에 나타내었다<sup>4)</sup>. PBF방식은 분말공급 장치(스퀴저, 블레이드, 리코터 등으로 불림)에 의하여 평평하게 공급된 파우더(플라스틱, 세라믹, 금속) 위에 가공하고자 하는 3차원 형상의 2차원 단면에 맞춰 레이저 빔을 조사하여 소결한 후 그 위에 새로운 파우더를 공급하는 과정을 수차례 반복하여 원하는 3차원 형상을 만들어 낸다. 이 과정에서 적층분말의 두께는 30~150um 정도다. 열원으로 사용되는 레이저 빔은 대부분 CO<sub>2</sub> 레이저 빔을 사용하고 있으며, 이때 레이저 빔 엔진에 의해 발진되는 빔의 크기는 500um 정도다. PBF 방식에서 분말소재는 10~45um 범위의 구형분말을 주로 사용한다. 분말소재의 형상은 일반적으로 구형에 가까울수록 좋으며, 균일한 크기의 미세한 입자의 조성을 가질수록 적층성이 우수한 것으로 알려지고 있다. 하지만 분말입도가 너무 미세할 경우 미소 폭발이 일어나 파우더가 날리거나 소결이 아닌 탄화가 발생할 수도 있다. 이와 같이 분말 입자의 크기 및

Table 1 Comparison of features and advantages and disadvantages of general manufacturing process (Subtractive Manufacturing) and 3D printing manufacturing process (Additive Manufacturing)

	General manufacturing process (Subtractive manufacturing)	3D printing manufacturing process (Additive manufacturing)
<b>Manufacturing method</b>	Production of completed products by casting mold, casting, part molding, Machining and assembly process	Produce completed product without assembly process by layering raw materials
<b>Machining characteristic</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Skills are required to select machining conditions and to create CAD/CAM data.</li> <li>- Tool required replacement</li> <li>- The shape that the tool does not enter can not be machined (under-cut)</li> <li>- Chip occurs and work environment is poor</li> <li>- High precision</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Complete 3D data required for production (any shape of 3D Modeled can be manufactured)</li> <li>- Limitation on powder materials</li> <li>- After completion of product, supporter removal is necessary</li> <li>- Step difference occurs on product shape surface</li> <li>- Dimensional precision is low</li> </ul>
<b>Advantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Advantage in mass production</li> <li>- Easy to make of simple shapes product</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Advantageous for various products and small quantity production</li> <li>- Easy to make of complex shapes product</li> <li>- Production of various products with one printer</li> <li>- Cost and time reduction in prototype development</li> </ul>
<b>Disadvantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Different molds and production lines required for each product</li> <li>- Additional process such as assembly is required</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- General products take a long time to manufacture</li> <li>- Surface precision low</li> <li>- Post-processing such as processing or heat treatment is required</li> </ul>

형상에 대한 선정도 주요한 공정 중에 하나이다. PBF 방식의 주요공정변수(W사 장비의 예)로는 샘플 방향 (Sample Orientation: Horizontal/Vertical), 빌드 방법 (Building Strategy: Island/Linear; Size-mm; Rotation-°), 레이저 파워(Laser power: W), 헤치 간격(Hatch spacing:  $\mu\text{m}$ ), 스캐닝 스피드(Scanning speed: mm/s), 레이어 두께(Layer thickness:  $\mu\text{m}$ ), 에너지 밀도(Energy density:  $\text{j}/\text{mm}^3$ ) 등이다. PBF방식은 비교적 높은 정밀도 (DED 대비)와 다양한 소재로의 확장성, 자유로운 디자인(복잡한) 형상의 구현이 가능한 장점이 있다. 또한, 소결되지 않은 파우더가 서포터 역할을 해주기 때문에 간단한 형상은 별도의 서포터가 필요하지 않다는 장점도 있다. 하지만, 적층공정 중에 챔버 내부에서 발생하는 가스(fume) 및 분진(dust)의 처리문제 (품질에 영향을 미침), 적층 후 소재의 처리 및 재활용 문제, 적층품의 낮은 내구성 등은 해결해야 할 과제다. 또한, 적층형상이 복잡하고 내부에 공간이 넓게 형성된 경우 보다 정밀한 제품으로 적층하기 위해서는 필수적으로 서포터가 고려되어야 한다. 서포터와 관련해서 적층제조 기술 초기에는 다른 공정요소에 비하여 서포터에 대한 영향이 미미한 것으로 분석되어 무시되어 왔다. 최근에는 적층품의 정밀도에 대한

요구가 높아지고, 적층과정에서 구조적 처짐이나 열적 변형이 적층품의 정밀도에 미치는 영향이 검증되면서 중요하게 다루어지고 있다.

DED방식은 고출력의 레이저로 금속 분말(powder)을 완전히 녹여서 적층하는 방식으로써 소재사이에 완벽한 용융이 이루어져 우수한 품질(조직이 치밀하여 강도가 향상됨)의 제품을 만들 수 있고, 더욱이 적층품질이 조밀한 조직을 가지게 됨으로 금형과 같은 틀 제작에 유리한 장점이 있다. DED 메커니즘의 적층영역은 레이저 빔에 의해 전달된 에너지를 흡수할 때 가열되어 기관에서 용융 풀이 형성됨과 동시에, 분말소재가 풀에 공급되어 녹아 용융되고 기관과 희석되게 된다. 이때 용융되어 적층되는 소재와 기관소재 사이의 강한 융합 결합이 즉시 이루어져 치밀한 조직을 가지게 된다. 아직, 레이저의 가격이 비싸고, 제작에 시간이 오래 걸리며, 급속한 냉각으로 인한 용융-풀의 산화방지 대책과 출력되는 표면이 거칠어 후가공이 필요한 것은 단점이다. DED방식의 한 레이어 적층두께는 일반적으로 100-300 $\mu\text{m}$  범위 정도다. 열원으로 사용되는 레이저 빔은 대부분 CO<sub>2</sub> 레이저 빔을 사용하며, 이때 레이저 빔 엔진에 의해 발진되는 빔의 직경은 0.8~1.0mm 정도다. DED방식에서 분말소

Table 2 AM method classification of material type, power source type, and according to laser manufacturer

	Material type	Power source	AM Process	
PBF	Powder based	Laser	SLS (Selective Laser Sintering)	
			DMLS (Direct Metal Laser Sintering)	
			SLM (Selective Laser Melting)	
		Electron beam	EBM (Electron Beam Melting)	
DED	Solid Filler based	Laser	LENS (Laser Engineered Net Shaping)	
			DMD (Direct Metal Tooling)	
			DMT (Direct Metal Tooling)	
		Electron beam	CLAD (Construction Laser Additive Direct)	
			EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing)	
			GTSW, GMAW arc	WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)
			GMAW arc	DML (Direct Metal Lamination)
				ADED (Arc Directed Energy Deposition)
		Plasma arc	IFF (Ion Fusion Formation)	
			RPD (Rapid Plasma Deposition)	
GTAW arc	STAM (Super-TIG Additive Manufacturing)			

재는 40~140 $\mu$ m 범위의 구형 분말을 사용한다. 분말소재의 형상은 일반적으로 구형에 가까울수록 적층성이 좋으며, 균일한 크기의 입자의 조성을 가질수록 공급시 유동성이 좋아진다. DED방식의 주요공정변수(I사장비의 예)로는 레이저 빔 파워(Laser beam power: W), 슬라이싱 레이어 높이(Slicing layer height: mm), 오버랩 폭/겹침 폭(Overlap width: mm), 파우더 유동율(Powder flow rate: g/min), 레이저 이송 스피드(Laser traverse speed: mm/min), 파우더 가스 공급량(Powder gas rate: l/min), 동축 가스 공급량(Coaxial gas rate: l/min) 등이다. DED방식에는 차폐가스로 불활성 가스

(아르곤 or 질소)를 사용한다. 차폐가스는 레이저로부터의 순간적으로 미소영역에 대하여 급속도로 녹이고 냉각이 이루어짐에 따라 기판과 적층소재 사이에 산화가 일어나는 것을 방지하는 목적으로 사용된다.

상기 기술한 프린팅 방식에 따른 금속 프린팅 장비는 국외제품이 기술적으로 우위에 있으며, PBF방식의 장비로는 ConceptLaser, EOS, 3D Systems, ExOne 등 있고, DED방식으로는 TRUMPF, EFESTO 장비가 대표적이다. 국내 금속 프린팅 장비의 대표적인 기업으로는 PBF방식의 원포시스(주)와 센트럴(주) 등이 있고, DED방식으로 인스텍(주) 장비가 대표적이다. 이러한 3D 프린팅 AM분야의 장비도 절삭가공과 적층가공이 결합되어 하이브리드화되고, 대형화되어 가는 추세에 있다.

### 3. AM 공정 시뮬레이션 소프트웨어

3D 프린팅 시뮬레이션은 공급 소재의 용해에서부터 부품을 만드는 데 필요한 실제 공구경로에 이르기까지 3D 프린팅 공정의 모든 프로세스를 분석하는 포괄적이고 광범위한 용어로 사용되고 있다. 특히, 금속 3D 프린팅 공정 시뮬레이션은 프린팅 출력물의 변형(왜곡) 및 잔류응력을 프린팅 이전 단계에서 소재, 구조, 공정 등을 고려하여 프린팅 공정을 미리 예측하고 설계하는 것이라 할 수 있다. 즉, 개발단계의 시행착오를 줄이고 초기부터 곧바로 제품으로 프린팅이 가능하도록 하여 시간과 비용을 절약할 수 있는 방법이다.

금속 3D 프린팅 AM 공정에서 나타나는 결함의 원인은 크게 구조적 요인과 열적인 요인으로 나눌 수 있다. AM 공정 조건(파라미터)의 조합으로 나타나는 변형(distortion)과 잔류응력(residual stress)은 출력물 품질에 직접 영향을 미치는 요소다. AM 공정 중에 발생하는 출력물의 변형은 제품을 출력한 후에 다른 부품과 조립이 불가할 뿐만 아니라, 리코터 블레이드(recoat blader: PBF방식의 경우)와 충돌을 유발하여 프린팅이 중단되거나 출력물이 파손되기도 한다. 또한, 잔류응력은 출력물의 수축이나 출력물에 크랙을 유발하여 제품결합의 원인이 되기도 한다. 금속 AM 공정은 고에너지 레이저에 의하여 분말소재가 용융되어 풀이 만들어지는 가열과 용융 풀이 굳어 융합되는 냉각되는 과정을 반복하게 된다. 이러한 반복적인 가열과 냉각으로 인하여 팽창과 수축으로 출력물에 나타나는 변형이 열적 변형이다. 이러한 열적 변형으로부터 영향을 줄이기 위해서는 베이스 플레이트부터

출력물을 효과적으로 지지하여 처짐이나 뒤틀림을 방지하는 것이다. 이와 같이 금속 AM 공정에서 제조 중에 적층된 부분이 제 위치에 유지되도록 잡아주는 지지구조(support)가 매우 중요하다. 서포터(지지대)가 필요 이상으로 만들어지면 비용(적층 소재/시간 증가)이 늘고 적게 만들어지면 출력물 품질이 떨어져 출력 실패로 이어질 수도 있다. 또한, 출력물로부터 서포터를 제거하는 작업은 일반적으로 수작업에 의존하게 됨으로 제거가 용이하고 정밀하게 제거될 수 있도록 설계단계에서 최적으로 서포터를 구축하는 것은 비용과 시간적으로 매우 효과적이다. 서포터에 대한 최적화 구축은 금속 AM 공정 시뮬레이션 중 주요 목적 중 하나라 할 수 있다. 이와 같이 서포터를 설계하거나 수정 또는 소재가 낭비되지 않는 효율적인 배치 그리고 출력 후 제품의 왜곡을 예측하여 형상을 미리 보정하는 등의 과정을 소프트웨어적인 시뮬레이션을 통하여 해결할 수 있다. 이외에도 금속 AM 공정 시뮬레이션은 적층제조 장비와 소재에 따른 레이저 파

위와 속도, 스캔 계획과 같은 공정 매개변수를 조합하고 조절할 수 있게 한다. 또한 3D 프린팅 AM 공정을 위한 형상의 최적화 디자인도 포함된다.

상기에 기술한바와 같이 AM 공정의 시뮬레이션은 소프트웨어적으로 가상공간에서 수행이 가능하다. 시뮬레이션 기술이 40년 이상 전통적인 엔지니어링 및 생산 프로세스를 최적화 한 것처럼 적층제조 분야에도 새로운 과제를 해결하기 위해 점점 진화하고 있다. 최근에 AM 기술의 활성화에 힘입어 AM 공정 시뮬레이션 소프트웨어도 다수 개발되어 활용되고 있다. 현재 출시되어 활용되고 있는 주요 소프트웨어를 중심으로 Table 3에 정리하였다. 현 출시된 소프트웨어를 보면, 현 AM 분야의 기술발전 수준과 맥을 같이하고 있음을 알 수 있다. 적층제조 기술의 동향<sup>5)</sup>에 따르면 장비와 소재 면에서 DED방식보다는 PBF방식이 진보적으로 기술개발이 이루어진 것은 이를 뒷받침한다. 아울러 금형분야와 같이 고강도 툴 소재를 다루는데 유리한 DED방식의 시뮬레이션기술이 초기

Table 3 Released software for AM process simulation<sup>6-16)</sup>

No.	Software name (Company)	Supported AM process	Software characteristics	Remark
1	Amphyon <sup>6)</sup> (Altair Inc.)	PBF, (SLM, DMLS)	Buildup process, Shape compensation	Enable linkage of HyperWorks
2	Simufact Additive <sup>7)</sup> (MSC Software)	PBF (DMLS, EBM)	Modeling, Distortion compensation	Enable cloud
3	Netfabb <sup>8)</sup> (Autodesk Inc.)	PBF, DED	Multi-scale simulation	Enable cloud
4	GENOA 3DP <sup>9)</sup> (AlphaStar Corporation)	PBF	Simulation and analysis of polymers, metals and ceramics	ABAQUS FEM support
5	FLOW-3D <sup>10)</sup> (Flow Science, Inc.)	PBF, DED (BJ)	PBF and DED simulation possible	Analysis of material melting micro-structure
6	Additive Suite <sup>11)</sup> (Ansys Inc.)	PBF (DED)	All stages of AM process can be simulated	Additive Suite, Additive Print, Additive Science
7	Magics <sup>12)</sup> (Materialise)	PBF	Insufficient reflection on thermal analysis	Simufact base technology
8	Siemens NX <sup>13)</sup> (Siemens, Inc.)	PBF (DED, BJ)	Pursuit of thermal distortion prevention	
9	e-Xstream <sup>14)</sup> (e-Xstream engineering)	PBF (SLS, FFF, FDM)	Distortion compensation, AM special material database possession	Multi-material additive pursuit
10	SIMULIA <sup>15)</sup> (Dassault Systèmes)	PBF, DED (BJ)	Distortion compensation Multi-physics modeling	Enable cloud
11	COMSOL <sup>16)</sup> (COMSOL, Inc.)	PBF	For metal/plastic AM, Analysis of additive chemical process	Addition of electromagnetic analysis

SLM(Selective Laser Melting), DMLS(Direct Metal Laser Sintering), EBM(Electron Beam Melting), PBF(Powder Bed Fusion), DED(Direct Energy Deposition), BJ(Binder Jet), SLS(Selective Laser Sintering), FFF(Fused Filament Fabrication), FDM(Fused Deposition Modeling), MJ(Material Jetting)

단계 수준인 것은 금형분야에 AM기술의 수요를 고려할 때 아쉬운 부분이다. 본 논문에서는 ANSYS Additive Suite에서 제공되는 PBF방식을 중심으로 AM 공정 시뮬레이션 프로세서를 기술하기로 한다. ANSYS에서 제공되는 AM 소프트웨어 툴 킷을 Additive Suite라고 하며, Topology Optimization, Workbench Additive, Additive Print 그리고 Additive Science가 포함되어 있다.

#### 4. AM 공정 시뮬레이션 프로세서

금속 AM 공정 시뮬레이션 프로세스는 크게 형상 디자인(geometry design)과 적층 공정(additive process)으로 나누어 이루어진다. 형상 디자인 시뮬레이션은 오버 디자인된(over designed) 형상을 물리적 또는 구조적으로 최적화된(topology optimized) 형상으로 디자인한 후 검증(validation)하는 과정을 시뮬레이션 한다. 적층 공정 시뮬레이션은 서포터 생성 및 분석, AM 공정 파라미터 분석, AM 빌드-업 과정 분석 그리고 소재 특성 및 미소구조 분석 등을 시뮬레이션 한다. ANSYS Additive Suite을 이용한 AM 공정 시뮬레이션 워크플로우의 예를 Fig. 1에 나타내었다.<sup>17)</sup> Additive Suite을 이용한 AM 시뮬레이션 프로세서는 먼저, Topology Optimization 툴을 이용하여 적층제조 할 형상을 최적화하고, Additive Workbench 또는 Additive Print 툴을 이용하여 적층제조(빌드-업)과정을 시뮬레이션하게 된다. 한편, 적층제조 분말소재의 특성을 분석하기 위한 Additive Science를 이용하여 우선적으로 시뮬레이션 할 필요도 있다. ANSYS Additive Suite을 이용한 AM 공정 시뮬레이션 프로세서를 Fig. 2에 나타내었다.

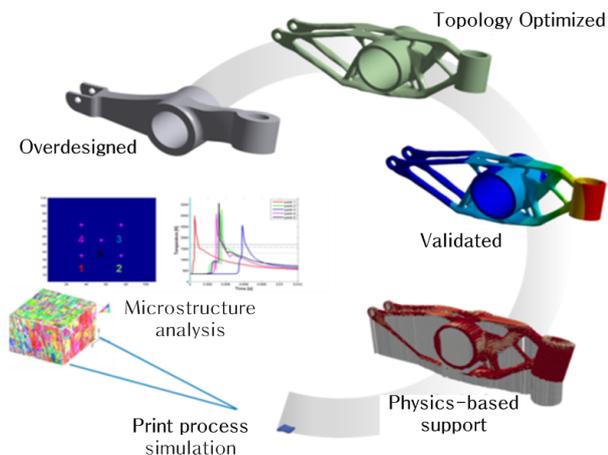


Fig. 1 AM process simulation flow chart with ANSYS Additive Suite [Source<sup>17)</sup>]

Topology Optimization을 이용한 적층형상 시뮬레이션은 오버디자인 된 형상에 대하여 하중조건을 부여한 후 정적 구조해석을 먼저 수행하게 된다.<sup>18-19)</sup> 이것을 바탕으로 Topology Optimization 환경에서 최적화 요소(질량, 변형 등)에 대한 허용범위를 정하여 토폴로지(물리적 or 구조적) 최적화 시뮬레이션을 수행한다. 그리고 또 한 번의 정적 구조해석을 통하여 검증 과정을 거친 후 적층형상을 결정하게 된다. 이와 같이 Topology Optimization을 이용한 시뮬레이션 과정을 상세히 나타내면 Fig. 2의 (a)와 같다.

Additive Workbench을 이용한 AM 공정 시뮬레이션은 서포터 분석, 열적인 분석 그리고 구조적인 분석으로 이루어진다. 이러한 시뮬레이션 프로세서에 대한 설정은 Workbench에서 Additive Wizard을 이용하여 쉽게 접근할 수 있다.

Workbench에서 AM 시뮬레이션을 위한 단계는 공정 파라미터를 설정하는 Additive Wizard을 이용하는 단계를 포함하여 모두 12단계로 이루어진다. 이러한 시뮬레이션 단계는 해석 시스템의 생성, 적층소재에 대한 정의, Additive Wizard을 이용한 적층 형상에 대한 메시, 접촉, 서포터, 소재물성, 공정조건, 장비조건, 온도조건의 부여 그리고 빌드-업 과정을 고려한 과도 열적 분석 및 구조적 분석을 시뮬레이션 하여 결과를 분석하게 된다. 이와 같이 Additive Workbench을 이용한 AM 시뮬레이션 과정을 상세히 나타내면 Fig. 2의 (b)와 같다.

Additive Print를 이용한 AM 프로세서 시뮬레이션은 정적 구조해석과 과도 열적해석이 고려된 형상 빌드-업 과정에 대하여 수행하게 된다.(Additive Workbench와 Additive Print로부터 얻는 시뮬레이션

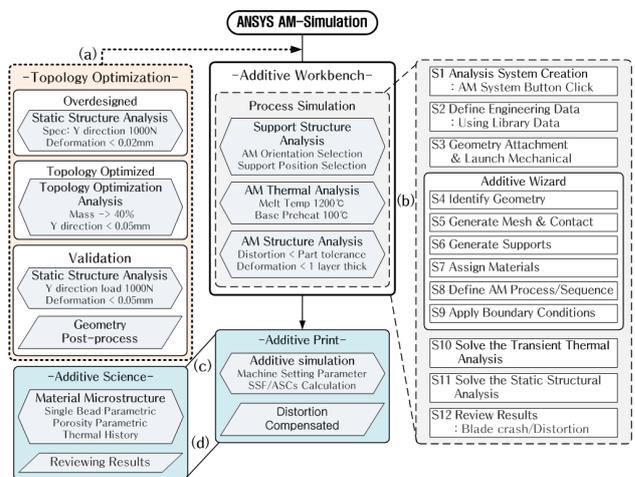


Fig. 2 AM simulation processor using ANSYS Additive Workbench

결과는 유사함) 또한, 소재에 대한 변형률 스케일링 계수(Strain Scaling Factor: SSF) 및 이방성 변형률 계수(Anisotropic Strain Coefficients: ASCs)를 용이하게 결정할 수 있는 시뮬레이션이 포함되어 있다. Additive Print를 이용한 AM 시뮬레이션 과정은 사용 장비 및 소재로부터 최적의 SSF 및 ASCs 계수를 검증하고 보정하여 찾아냄으로써 왜곡되는 최종 적층 형상을 예측하여 보정할 수 있는 것이 Additive Workbench와 차이점이다. 이러한 Additive Print를 이용한 AM 시뮬레이션 과정을 나타내면 Fig. 2의 (c)와 같다. Additive Print AM 시뮬레이션에는 Assumed Strain Simulation(가정된 스트레인 시뮬레이션), Scan Pattern Simulation(스캔패턴 시뮬레이션) 및 Thermal Strain Simulation(열적 변형률 시뮬레이션) 등 세 가지 유형이 있으며, 시뮬레이션 프로세서를 보다 상세히 나타내면 Fig. 3과 같다. Assumed Strain Simulation은 부품 내부의 모든 위치에서 일정한 등방성 변형이

일어난다고 가정한 것으로 가장 빠른 시뮬레이션이 가능하다. Scan Pattern Simulation은 가정된 균일 변형률과 동일한 평균 변형률 크기를 사용하지만, 부품 내에서 스캔 벡터의 로컬 방향에 따라 구성 요소별 변형률을 세분화하게 됨으로 시뮬레이션 시간이 길어진다. Thermal Strain Simulation은 열적 순환이 부품 내의 각 위치에서 변형 축적에 어떻게 영향을 미치는지 예측하게 됨으로 모든 스캔 벡터에 대해 열적인 예측이 필요하기 때문에 시뮬레이션에 가장 긴 계산 시간을 필요로 한다. Additive Print를 이용한 SSF 및 ASCs 계수의 보정은 계산과정과 검증과정으로 이루어지고, 이 과정에는 시뮬레이션 결과와 3D 프린팅 장비를 이용한 실제 제작을 통한 측정 결과를 비교분석하여 계수를 결정하게 된다. SSF 및 ASCs 계수의 보정을 위한 과정을 상세히 나타내면 Fig. 4와 같다.

Additive Science을 이용한 AM 시뮬레이션은 소재에 대한 미세 구조와 최종 프린팅 출력물의 특성을 예측하는 도구다. Additive Science을 이용한 시뮬레이션은 Fig. 2 (d)에 나타낸바와 같이 Single Bead Parametric(싱글 비드 파라메트릭), Porosity Parametric(다공성 파라메트릭), Thermal History(열적 히스토리) 시뮬레이션을 수행할 수 있다. Single Bead Parametric 시뮬레이션은 선택한 소재의 용융 풀 특성에 대한 정보를 얻는데 사용되는 도구이며, 용융 풀의 기하학적 형상(폭, 길이 및 깊이)을 결정하는데 소재와 장비에 대한 실험적 과정을 거치지 않고도 공정 매개변수가 용융 풀 특성에 미치는 영향을 확인할 수 있게 된다. Porosity Parametric 시뮬레이션은 적층 제조된 소재의 다공성 수준에 대한 정보를 얻는데 사용되며, 선택된 소재와 스캔 패턴을 사용하여 완전한 3D 입방체(또는 직육면체)의 빌드에 따른 다공성 수준을 검증하여 공정 매개변수를 제어할 수 있게 된다. Thermal History 시뮬레이션은 소재, 부품 및 모든 공정 매개변수(용융 풀 치수 및 열적 이력)가 특정 단면의 동축 평균 센서 결과를 시뮬레이션 하여 출력하게 되며, 동축 평균 센서는 순간 용융 풀 치수(길이, 폭 및 깊이)와 부품의 상단 표면에서의 레이저 위치를 중심으로 한 원형 시야(FOV) 내의 평균 온도의 맵을 제공하게 된다. Additive Science의 AM 공정 시뮬레이션은 장비에 대한 환경 설정, 형상에 대한 정보 설정, 시뮬레이션 실행 그리고 결과분석으로 이루어진다. 이러한 시뮬레이션 과정을 상세히 나타내면 Fig. 5와 같다. 다만, Thermal History 분석은 베타버전으로 제공되어 좀 더 검증이 필요한 것으로 보인다.

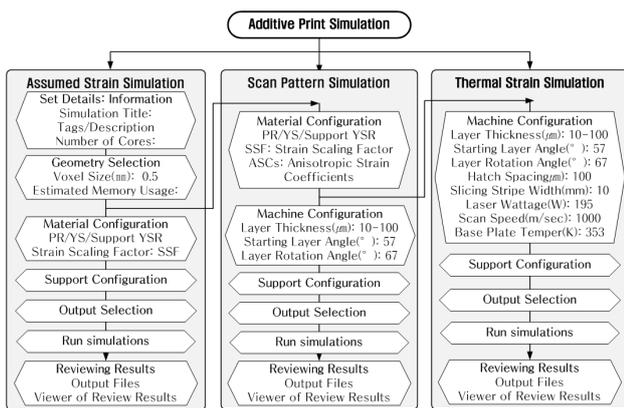


Fig. 3 AM simulation processor using Additive Print

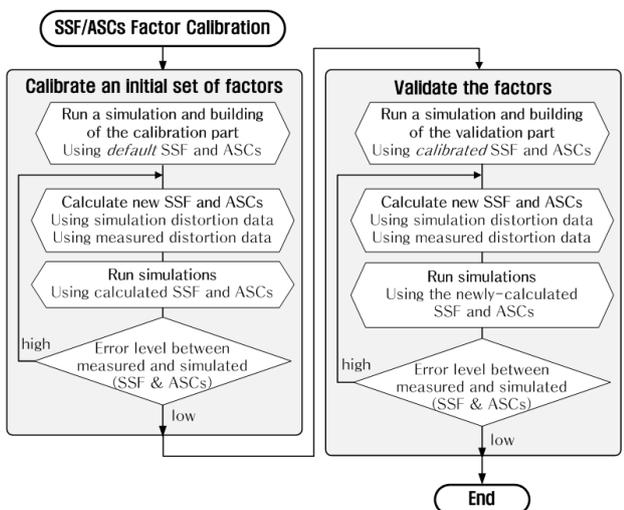


Fig. 4 Simulation processor for correction of SSF and ASCs factors

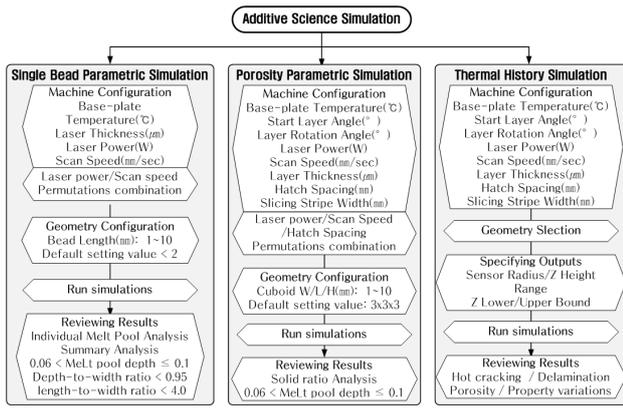


Fig. 5 Simulation processor using AM Additive Science

### 5. 결 론

본 연구에서는 금속 3D 프린팅 AM 공정의 소개와 AM 공정 시뮬레이션 소프트웨어에 대한 현황 그리고 AM 공정 시뮬레이션 프로세서를 중심으로 고찰하였다. 3D 프린팅 기술이 제조 현장에서 쓰이려면, 우수한 3D 프린터와 소재 그리고 소프트웨어가 필수적이다. 3D 프린터로 출력하기에 적합한 형상으로서 설계, 출력물이 프린팅 과정에서 무너지지 않도록 지지하는 서포터의 생성, 출력하기 전 출력물의 균열이나 뒤틀림을 미리 감지하여 보정하거나 수정하는 등 주요 AM 공정의 대부분 작업이 소프트웨어적으로 이루어진다. 더욱이 AM 공정에서 소프트웨어적인 시뮬레이션은 소재가 더욱 다양화되고 출력물 형상이 점점 복잡해지고 대형화가 되어감에 따라 중요도는 점점 높아지고 있다. AM 공정 시뮬레이션의 목표는 부품의 거시적인 왜곡 및 응력을 예측하여 빌드-업 실패를 방지하는 것이다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 적층품 방향의 결정, 서포터의 배치와 크기의 조정을 포함한 전반적인 AM 공정 설계의 개선을 위해 최적화된 데이터를 제공하는 것이라할 수 있다. 일반적으로 AM 공정 시뮬레이션 프로세스는 적층형상 디자인의 최적화와 적층제조 파라미터의 최적화로 이루어진다. 형상 디자인 시뮬레이션은 오버 디자인된 형상을 물리적(중량 감소)으로나 구조적(강도 유지)으로 최적화된 형상으로 디자인한 후 검증하는 단계를 거치게 된다. 적층제조 프로세스 시뮬레이션은 서포터 생성의 위치 및 방향 그리고 조밀한 정도의 분석, 장비와 소재에 따라 요구되는 레이저 파워, 스캔 속도, 온도 조건 등의 AM 빌드-업 공정 매개변수를 분석하게 된다. 또한, AM 프린팅 빌드과정에서 야

기될 수 있는 문제점의 분석과 AM 장비와 소재에 따른 용융-폴 미소구조(길이, 깊이, 폭, 다공성)를 분석하게 된다. AM 공정 시뮬레이션은 적층제조 출력품의 형상이 크고 복잡할 때 유용하다. 적층제조 출력품의 형상이 크고 복잡한 경우 구조적으로 치짐이나 열적 변형이 쉬이 일어나기 때문에 지지하는 서포터의 보다 정밀한 생성과 빌드-업 공정에 보다 최적화된 파라미터의 제공이 필요하다. 따라서 적층제조 출력품의 형상이 크고 복잡한 경우 AM 공정 시뮬레이션은 반드시 이루어져야할 것이다. 또한, AM 공정의 최적화는 출력품의 품질과 출력비용에 직접 영향을 미치게 됨으로 설계자는 중요하게 고려하여야할 것이다.

### References

- 1) ZDNet Korea, <https://www.zdnet.co.kr/view/?no=20181001104213>
- 2) Engineering.com, <https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/17822/>
- 3) www.3ders.org, <http://www.3ders.org/articles/20171003-ing-ays-3d-printing-could-account-for-half-of-manufactured-goods-by-2060-wiping-out-25-percent-of-global-trade.html>
- 4) MFG Inc., <http://www.mfgkr.com/archives/7832>
- 5) J.-W. Oh, H. Na, and H. Choi, "Technology Trend of the additive Manufacturing (AM)", Journal of Korean Powder Metallurgy Institute, Vol.24, No.6, pp.494-507, 2017.
- 6) Amphyon, <https://altairhyperworks.com/partner/amphyon>
- 7) Simufact Additive, <https://www.mscsoftware.com/kr/product/simufact-additive>
- 8) Netfabb, <https://www.autodesk.com/products/netfabb/overview>
- 9) GENOA 3DP Simulation, <http://www.alphastarcop.com/applications/additive-manufacturing/>
- 10) FLOW-3D, <https://www.flow3d.com/industries/additive-manufacturing/>
- 11) ANSYS Additive Suite, <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-additive-suite>
- 12) Materialise Magics, <https://www.materialise.com/en/software/magics/modules>
- 13) Siemens NX, <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ko/products/manufacturing-planning/additive-manufacturing.html#>

- 14) e-Xstream, <https://www.e-xstream.com/product/digimat-am>
- 15) SIMULIA, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/trends/digital-additive-manufacturing/>
- 16) COMSOL, <https://www.comsol.com/paper/simulation-of-laser-powder-bed-fusion-additivemanufacturing-process-using-the-c-65242>
- 17) Taesung S&E, <https://www.tsne.co.kr/pc/public/sub2/7-4-0.php>
- 18) J. W. An et al., "Development of Analytical Model of Spindle and Rack Gear Systems for Knuckle Boom Crane", Journal of Drive and Control, Vol.14, No.2, pp.23-29, 2017.
- 19) H. G. Kim et al., "Shape Optimization for Enhancing the Performance of an Inducer for the Main Hydraulic Pump in a Rotary Wing Aircraft", Journal of Drive and Control, Vol.14, No.2, pp.37-44, 2017.