

ISO/ASTM 52900 표준에 기반한 적층 제조 용어의 한글화

Korean Terminologies for Additive Manufacturing according to the ISO/ASTM 52900 Standard

이인환¹, 김호찬², 안동규^{3,#}
In Hwan Lee¹, Ho-Chan Kim², and Dong-Gyu Ahn^{3,#}

¹ 충북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University)

² 안동대학교 기계자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Andong National University)

³ 조선대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chosun University)

Corresponding Author / E-mail: smart@chosun.or.kr, TEL: +82-62-230-7043

ORCID: 0000-0002-2111-300X

KEYWORDS: Additive manufacturing (적층 제조), ISO/ASTM standard (ISO/ASTM 표준), Korean terminology (한글 용어)

Additive manufacturing processes have been called by a wide variety of terms since the early days of development. As these names are often mixed academically and industrially, the demand for standardization of terms has gradually increased. Accordingly, the American Society for Testing Materials (ASTM) and the International Organization for Standardization (ISO) are in the process of establishing standards for the names and definitions of important terms related to additive manufacturing. Although Korea has also begun to establish KS standards based on ISO/ASTM standards, the Korean language and definitions of important terms related to additive manufacturing as defined by ISO/ASTM have not been fully organized. Therefore, the similar terms defined in ISO/ASTM in many academic and industrial literature are called by various Korean terms. Thus, this work deals with suggestions on the Korean terminologies and standardization of important terms related to additive manufacturing based on ISO/ASTM standards. Especially, this paper deals with the Additive Manufacturing and seven sub-process classifications.

Manuscript received: September 8, 2020 / Revised: October 21, 2020 / Accepted: October 28, 2020

1. 서론

절삭 공정은 매우 오래 전부터 사용되고 있는 대표적인 기계 가공 공정으로서, 모재의 불필요한 부분을 제거하여 제품의 형상을 제작하는 제거 가공(Subtractive Manufacturing)의 범주에 해당된다. 이에 반하여 필요한 재료를 조금씩 더해서 제품의 형상을 제작하는 부가 가공은 3D 프린팅(3D Printing)으로 불리기도 하는 적층 제조(Additive Manufacturing, AM) 공정이 가장 대표적이다. 시제품을 제작하기 위해서 개발된 적층 제조 공정은 이후 발전을 거듭하여 현재에는 제품을 직접 제작할 수 있는 혁신적인 기술로 점차 인식되고 있다. 적층 제조 공정은 관련 기술의 역사로 볼 때 지형학이나 광 조각 등을 기원으로 보기도 한다.¹ 하지만 찰스 헐(Charles W. Hull)이 개발하고 미국 3D

시스템즈(3D Systems)사에 의해 최초로 상업적으로 적용된 광조형(Stereolithography, SL) 기술을 적층 제조 공정의 시작으로 보는 것이 일반적이다.² 이후 3D 시스템즈사에서 개발한 SLA-250 장비는 이 기술을 널리 알리는 계기가 되었다. 한편, 광경화성 수지를 재료로 이용하는 광조형 기술 이외에도 다양한 재료를 적층하여 3차원 형상을 제작하는 다수의 공정들이 개발되었으나, 이들은 모두 재료를 층층이 적층하여 제품을 제작한다는 것에서 모두 적층 제조 공정의 범주에 해당된다.³

한국은 1992년도 KAIST와 한국금형기술(주)의 공동연구로 수행된 SLA 공정 및 2차 공정을 이용한 금속 자동차 휠 및 터빈 블레드 제작 기술 개발을 시작으로 적층 제조 공정을 이용한 시제품의 제작이 시작되었다. 1990년대 초반 일부 기업에서 미국 3D 시스템즈사의 SLA (Stereolithography Apparatus) 장비를

도입하여 시제품 제작에 사용하기 시작하였으며, 이후 많은 기업에서 시제품 제작에 소요되는 시간과 비용을 절감하는데 적극적으로 활용하고 있다.

1998년부터 5년간 KAIST 주관으로 진행된 국가 중점 기술 개발사업인 주문적응형 쾌속제품개발시스템 사업단에서는 지능형 제품 설계 및 시스템 개발, 쾌속 시작 시스템 개발, 컴퓨터원용 역엔지니어링/측정/평가 기술개발 및 주문 적용형 쾌속제품개발의 시스템 통합 기술개발에 대한 연구가 진행된 바 있다. 이를 통해 개발된 적층 제조 공정인 VLM-S (Variable Lamination Manufacturing Using Polystyrene Foam)을 (주)메닉스에 스피인 오프(Spin-Off)하여 2001년도부터 상용화되었으며, 그 후 연간 적층 제조 동향 보고서인 월리 보고서(Wholer's Report)에 등재되었다.⁴⁶ 부산대학교에서는 1990년대 중반부터 시작하여 광조형 기술을 비롯한 적층 제조와 관련한 다양한 연구를 수행한 바 있다. 이를 통해 각종 적층 조형 기술의 정밀화와 공정의 최적화 및 그 후처리 공정은 물론 적층물을 이용해 다양한 툴링 공정이 개발되었다.^{7,9} 그리고 POSTECH에서는 2000년대 초반부터 광조형 기술을 기반으로 마이크로 구조물을 제작하는 마이크로 광 조형 기술을 개발하였고,¹⁰ 이를 바탕으로 적층 제조 기반의 생체 조직의 재생 및 제작에 대한 많은 연구 결과들을 발표하고 있다.^{11,12}

적층 제조 공정은 개발 초기부터 매우 다양한 명칭들로 불려왔다. 그리고 이들 명칭들이 학문/산업적으로 혼용되는 경우가 많아 용어의 표준화에 대한 요구가 점차 증가되었다. 이에 따라서 미국재료시험학회(American Society for Testing Materials, ASTM)와 국제 표준화 기구(International Organization for Standardization, ISO)에서는 적층 제조와 관련한 중요 용어의 명칭 및 정의들에 대한 표준들을 제정하기 시작하였다.^{13,21} 한국에서도 ISO/ASTM 표준들에 기반한 KS 표준을 제정하기 시작하였으나, 현재까지도 ISO/ASTM에서 정의하고 있는 적층 제조와 관련한 중요한 용어들에 대한 한글화 및 이들의 정의가 완전히 정리되지 않고 있다. 따라서 많은 학문적 및 산업적 문헌에서 ISO/ASTM에서 정의된 동일한 용어들이 다양한 한글 용어로 불리고 있다.

이 논문에서는 ISO/ASTM 표준에 기반한 적층 제조 관련 중요 용어들의 한글화 및 표준화에 대한 제안을 하고자 한다. 또한 이 연구에서 사용된 용어들은 KS 표준화 작업을 통해서 정리된 용어들이다

2. 적층 제조(Additive Manufacturing)

제품의 형상 데이터를 컴퓨터 등을 활용하여 가상의 공간에서 단면으로 나누고, 재료를 각 단면 형상에 따라 적절한 공정을 통해 층층이 쌓아 실제 제품을 제작하는 공정은 초기부터 영어로는 'Rapid Prototyping' 혹은 'Solid Freeform Fabrication' 등의 명칭으로 불리기 시작하였으며, 이는 적층 제조 공정의 시초가 시제품 제작을 위한 공정에서 출발한 것에 기인한다. 한국

에서도 유사하게 시제품 제작과 관련한 기술로서 적용되기 시작하였기 때문에 '쾌속 조형' 또는 '신속 조형'으로 불리기 시작하였고, 이후에는 '부가 가공' 또는 '적층 가공' 등의 명칭으로도 불려 왔다. 한편, 미국의 제44대 대통령이었던 버락 오바마(Barack Hussein Obama II)는 2013년 초에 있었던 국정 연설에서 "3D 프린팅은 우리가 모든 것을 만드는 방법에 있어 혁명의 바람을 일으킬 잠재력을 가지고 있다."고 한 바 있으며, 이때부터 기존의 다양한 명칭으로 불려 왔던 적층 제조 공정이 '3D 프린팅'이라는 명칭으로 사람들에게 매우 널리 알려지게 되었다.²² 하지만 '3D 프린팅'이라는 명칭은 적층 제조 공정의 특징을 정확하게 대표하는 것으로 보기에는 한계가 있다.

국제적으로 적층 제조의 명칭 및 관련 표준을 제정하려는 시도는 1990년대 후반부터 시작되었다.²³ 1997년 10월 미국 국립 표준 기술원(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 측정 및 표준화에 대한 논의가 시작되었으며, 2000년대 초반에는 미국재료시험학회에서 적층 제조 고유의 표준을 제정하려는 시도가 이루어졌다. 2009년에는 미국재료시험학회 산하에 '적층 제조 기술에 관한 위원회 F42(ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies)'가 만들어져 적층 제조 표준에 대한 논의가 본격적으로 이루어지기 시작하였다. 이때 만들어진 표준인 ASTM-F2792에서는 그동안 다양한 명칭으로 불리고 있었던 명칭들을 적층 제조(Additive Manufacturing)로 표준화하였다. 한편, 비슷한 시기에 국제 표준화 기구 산하에 '적층 제조 기술에 관한 ISO 위원회 TC261(ISO Committee TC 261 on Additive Manufacturing Technologies)'이 만들어져 적층 제조와 관련한 국제 표준 제정에 대한 시도들이 이루어지게 되었다. 이후 2013년에는 미국재료시험학회와 국제 표준화 기구가 적층 제조와 관련한 표준들을 공동으로 개발하기로 합의하였고, 2015년에 적층 제조의 일반 원리 및 용어를 정리한 ISO/ASTM 52900을 발표하였다.¹³

한편, 한국에서는 2014년부터 적층 제조 분야의 표준을 제정하기 위한 시도가 이뤄져왔다. 즉, ISO의 적층 제조 분야 국제 표준 제정에 대응하기 위한 한국위원회(National Mirror Committee)인 적층 제조 전문위원회가 만들어졌으며 이를 위해 3D 융합산업협회가 간사 기관으로 지정되었다. 그리고 또한 이때부터 3D 융합산업협회가 표준개발 협력기관으로 지정되어 ISO/ASTM에 의해서 제정된 국제 표준 중에서 중요한 것들을 우선적으로 한국 산업 표준(Korean Industrial Standards, KS)에 도입하기 위한 KS 부합화 작업이 시작되었다. 이와 같이 적층 제조의 명칭 및 관련 용어의 표준화에 대한 시도가 다양하게 이루어지고 있다. 하지만 국제 표준에서 사용되는 적층 제조와 관련한 용어들은 한국에서 여전히 다양한 명칭으로 불리고 있으며, 어떤 경우에는 잘못된 용어가 사용되고 있는 경우도 있다. 따라서, 국제 표준에 사용된 적층 제조와 관련한 용어, 분류 및 정의들을 한글화하는 것이 시급하다.

ISO/ASTM 52900에서는 적층 제조를 '3차원 모델 데이터로부터 제품을 만들기 위한 공정으로서, 일반적으로는 층을 겹겹이

쌓아 제작한다(Process of Joining Materials to Make Parts from 3D Model Data, Usually Layer Upon Layer)'라고 설명하고 있다.¹³ 즉, 이 공정은 기존의 기계 가공에서 매우 많이 사용되고 있는 재료 제거 공정(Subtractive Manufacturing)과 다르게 재료를 단면 형상에 맞게 층층이 쌓아 올려서 제품을 제작한다는 것이다. 이렇게 되면 재료 제거 공정의 특성에 따라 많이 발생하는 칩(Chip) 등과 같은 재료의 낭비가 현저하게 줄어들 수 있다. 또한, 적층 제조 공정에서는 단순히 주어진 단면 형상에 따라서 재료를 적층하기 때문에 기존의 재료 제거 공정에서와 같이 공구의 형상에 따라서 가공이 가능한 제품의 형상이 결정되지 않고 자유롭게 복잡한 형상을 가진 제품을 제작할 수 있다.

1980년대에 처음 개발된 적층 제조 공정인 광조형 기술은 폴리머가 주요 재료로 사용되었다. 그 후에도 비교적 초기에 개발된 적층 제조 기술들에서도 역시 폴리머가 주요한 재료였다.^{2,24,25} 각각 SLA, SLS (Selective Laser Sintering) 및 FDM (Fused Deposition Modeling)으로 불리는 이 기술들은 현재에도 폴리머 재료를 기반으로 하는 중요한 적층 제조 공정이다. 이후 다양한 금속을 재료로 사용하는 다수의 적층 제조 기술들이 개발되었다. 또한 폴리머 외에 세라믹 등과 같은 일부 비금속 재료들도 상용화된 적층 제조 장치에 사용되기 시작하고 있으며, 다양한 공정기술들이 다양한 재료들의 적층 제조를 위해 개발되고 있다. 향후에는 급속한 속도로 새로운 재료와 이에 따른 공정기술들이 개발될 것으로 기대된다.

초기에는 시제품을 제작하는 것으로부터 시작된 적층 제조 공정은 점차 실제 사용 가능한 제품을 제작하기 위한 공정으로서 그 영역이 확대되고 있다. 이와 같이 적층 제조는 재료를 쌓아 올려 제품을 제작하는 '적층'의 의미와 제품을 제작하는 '제조'의 의미가 모두 포함되고 있음을 알 수 있다. 따라서 '재료를 층층이 쌓아 제품을 제작할 수 있는 공정'으로서 'Additive Manufacturing'은 '적층 제조'로 번역되는 것이 바람직하다고 판단된다.

3. 적층 제조 공정의 분류

적층 제조 공정은 사용되는 재료 및 재료들을 이용하여 각 단면을 성형하는 방법에 따라서 다양한 기술들이 개발되어 왔다. 상업적으로 적용되고 있는 각각의 적층 제조 기술들은 대부분 기업이나 대학에서 최초로 개발되었으며, 이에 따라 각 기술 고유의 명칭을 가지고 있는 것이 일반적이다. 예를 들어 미국 3D 시스템즈사에서 개발한 광 경화성 수지에 자외선 레이저를 주사하여 단면을 성형하는 기술은 SLA로 불리며, 또한 미국 스트라타시스(Stratasy)사에서 개발한 열 가소성 플라스틱을 필라멘트 형태로 만들고 이를 가열 노즐을 통하여 가열 및 압출하여 단면을 성형하는 기술은 FDM이라고 부른다. 또한 압출된 분말 재료에 선택적으로 열에너지를 가해서 소결하여 단면을 성형하는 SLS 그리고 얇은 판재를 단면 형상으로 자르고 이를 적층하여

3차원 제품을 제작하는 LOM (Laminated Objects Manufacturing) 등도 있다.

한편, 기존의 기술들과 유사한 형태의 재료나 기술을 사용하는 새로운 기술들이 개발되면서 일부에서는 SLA나 FDM 같은 특정 기업이나 기관에서 개발한 기술들의 명칭을 해당 공정을 대표하는 명칭으로 사용하기도 하였다. 즉, 적층 제조 공정은 사용되는 재료에 따라서 개별 기업이나 대학 등에서 개발된 기술의 명칭으로 구분하기도 하였다. 예를 들면, 액체 상태 재료를 이용하는 공정 및 가루 및 고체 상태의 재료를 이용하는 공정으로 구분하거나, 또는 폴리머를 사용하는 공정과 금속/세라믹을 사용하는 공정으로 구분하기도 하였다.²⁶⁻²⁹

2015년 발표된 국제 표준인 ISO/ASTM 52900에서는 적층 제조를 재료들을 성형하는 공정 자체에 기반하여 7가지 공정으로 세분화하여 구분하고 있으며, 이 구분 방법은 점차 널리 사용되고 있다. 따라서 한국에서도 7가지 세분화된 공정의 명칭을 기반으로 하는 구분 방법들이 사용되기 시작하고 있으나, 이들 세부 공정들에 대한 한글 명칭들은 기존의 영문 명칭들을 한글로 번역하는 과정에서 다양하게 불리고 있다. 따라서 이들 세부 공정들에 대한 표준화된 한글 명칭을 정하는 것이 시급하다. 본 논문에서는 적층 제조뿐만 아니라 ISO/ASTM 52900에서 정의하고 있는 7가지 세부 공정들에 대한 한글 명칭들도 제안하고자 한다.

3.1 접착제 분사(Binder Jetting, BJ)

접착제 분사 공정은 ISO/ASTM 52900에 따르면 '분말재료를 결합시키기 위해 액체 상태의 접착제가 선택적으로 분사되는 적층 제조 공정(Additive Manufacturing Process in Which a Liquid Bonding Agent Is Selectively Deposited to Join Powder Materials)'과 같이 정의되어 있다.¹³ 재료는 분말 상태로 공급되어 일반적으로는 베드 위에 놓이게 되며 이는 분말 베드 용해와 유사하다. 베드 위에 놓인 분말에 단면 형상에 맞도록 접착제를 선택적으로 분사하고 이를 반복하여 3차원 형상을 제작하게 된다. 이때, 매우 작은 양의 접착제를 선택적으로 분말 위에 분사하기 위해서 잉크젯 프린터의 헤드와 유사한 원리의 노즐이 많이 사용된다.

이 공정은 1990년대 초반 미국 MIT 대학에서 처음으로 개발되었으며, 접착제를 다수의 노즐을 통해서 분사하는 것이 인쇄 공정과 유사하다고 하여 초기에는 3D 프린팅이라는 기술로 불렸다. 석고, 폴리머, 금속 또는 세라믹 분말들이 주요 재료로 사용되며 접착제 자체가 색을 가지고 있거나 혹은 별도의 컬러 잉크를 추가로 분사하여 다양한 색상을 갖는 3차원 형상을 제작할 수도 있다. MIT에서 개발된 기술은 엑스원(ExOne)사와 지코퍼레이션(Z Corporation)사에서 사용권을 획득하여 상용화되었으며, 지코퍼레이션사에서 개발한 초기 장치는 전분 분말에 물을 접착제로 사용하였다. 이후 다양한 분말 재료에 맞는 다양한 접착제를 분사하는 기술들이 개발되고 있다. 한편, 대형 제품의 제작이 가능한 VoxelJet 기술도 접착제 분사 기술의 한 종류이다.

3.2 에너지 제어 용착 (Directed Energy Deposition, DED)

ISO/ASTM 52900에 따르면 에너지 제어 용착은 ‘적층되어지는 재료를 용융시키기 위해 집중된 열에너지를 사용하는 적층 제조 공정(Additive Manufacturing Process in Which Focused Thermal Energy Is Used to Fuse Materials by Melting as They Are Being Deposited)’으로 정의되어 있다.¹³ 에너지 제어 용착 공정에서는 기저부(Substrate) 가열, 기저부 용융 및 적층 재료의 용융을 동시에 수행하기 위하여 에너지를 좁은 영역에 집중한다. 이때 용융된 적층 재료는 기저부의 용융지(Melt Pool) 내부로 혼합된 후, 냉각됨으로써 적층 비드를 생성한다. 이 적층 비드의 선-대-선(Line-by-Line) 적층이 첫 번째 층을 생성한다. 첫 번째 층 위에 기저부와 적층재료 용융 및 기저부의 용융지 내 용융된 적층재료 혼합 및 냉각을 반복하여 연속적으로 새로운 적층 층들을 생성하고, 이 과정을 반복적으로 수행하여 3차원 제품을 제작하는 공정이다. 에너지 제어 용착 공정에 사용되는 집중된 열원(Focused Heat Source)으로는 레이저(Laser), 전자빔(Electron Beam) 및 용접 열원(Welding Heat Flux) 등이 사용되고 있다. 에너지 제어 용착 공정은 공급 재료(Feed Stock)에 따라 분말 공급형(Powder Feeding Type)과 선재 공급형(Wire Feeding Type)으로 구분할 수 있다.^{28,30}

레이저를 집중된 열원으로 사용하는 분말 공급형 에너지 제어 용착 공정에서는 독립된 분말 공급부를 이용하여 분말을 측면에서 공급하고 레이저를 기저부에 수직으로 조사하는 측면 분말 공급 방식과 동축 노즐을 이용하여 노즐의 중앙부에서는 레이저를 조사하고 중앙부 인근 노즐에서는 레이저의 초점 주위로 적층용 분말을 공급하며 노즐의 최외곽부에서는 보호 가스(Shield Gas)를 공급하는 동축 노즐 활용 방식으로 구분할 수 있다. 상용화된 분말 공급형 에너지 제어 용착 공정은 대부분 동축 노즐 활용 방식을 사용하고 있다. 에너지 제어 용착 공정은 미국의 샌디아 국립연구소(Sandia National Laboratory)에서 개발된 LENS (Laser Engineered Net Shaping) 공정으로부터 시작되었다. 그 후, 미국 미시간 주립대학교(Michigan State University)에서 CCD 카메라 2대로 적층부 높이를 실시간 모니터링하여 적층 높이를 제어하는 DED (Direct Energy Deposition) 공정이 개발되었다. LD (Laser Deposition)과 LC (Laser Consolidation) 공정은 조사하는 측면 분말 공급 방식을 사용한다. 선재 공급형 에너지 제어형 적층 공정으로는 집중 열원에 따라 4가지 정도로 구분할 수 있다. 레이저와 용접 열원을 사용하는 공정으로는 WLAM (Wire and Laser Additive Manufacturing) 공정과 WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) 공정 등이 개발되었다. 전자빔을 집중 열원으로 사용하는 공정으로는 열전자 전자빔을 사용하는 EBF (Electron Beam Fabrication) 공정과 플라즈마 전자빔을 사용하는 PEBF (Plasma Electron Beam Fabrication) 공정이 개발/상용화되었다. 특히 EBF 공정의 경우 시아키(Siacky)사에 개발하여 항공기 부품 개발에 적용되고 있다.

3.3 재료 압출(Material Extrusion, ME)

재료 압출 공정은 ISO/ASTM 52900에 따르면 ‘노즐이나 오리피스를 통해 재료가 선택적으로 토출되는 적층 제조 공정(Additive Manufacturing Process in Which Material Is Selectively Dispensed through a Nozzle or Orifice)’과 같이 정의되어 있다.¹³ 플라스틱이나 금속재료를 다이(Die)를 통해서 압출하는 공정은 오래 전부터 사용되고 있는 기계 제작 공정이다. 재료 압출 공정은 이런 전통적인 압출 공정에 기반한다. 즉, 유동성을 갖는 재료를 일정한 단면 형상을 가진 구멍 형상을 가진 노즐이나 오리피스 등을 통해서 압출하여 각 단면 형상을 만들고 이를 층층이 반복하여 3차원 형상을 제작한다. 일반적으로 재료들은 압출된 직후 유동성을 잃게 되어 단면을 형성하는 것이 일반적이다.

고체 상태의 열 가소성 수지를 필라멘트 모양으로 만든 것을 공급 재료로 사용하고, 이를 용융 압출 헤드를 통해서 녹이면서 압출하여 단면을 만드는 FDM 기술이 처음으로 개발된 재료 압출 방식의 적층 제조 기술이다. FDM 기술은 다른 적층 제조 기술들에 비해서 상대적으로 단순한 시스템으로 구성된 적층 제조 장치가 사용된다. 하지만 사용되는 재료 및 공정기술의 특성으로 인해 높은 해상도를 갖는 3차원 형상의 제작이 어렵지만 일반적인 열 가소성 수지가 재료로 사용될 수 있기 때문에 기존의 플라스틱 제품이 사용되는 곳에 적용하기가 용이하다. 또한 이를 바탕으로 직접 제품을 생산하는 DDM (Direct Digital Manufacturing)의 개념들도 적용되고 있다. 재료 압출 공정은 노즐이나 오리피스를 통해서 압출이 가능한 다양한 재료에 적용이 가능한 공정이다. 따라서 현재에는 플라스틱뿐만 아니라 콘크리트, 식품 재료 및 바이오 재료 등 다양한 재료를 사용하는 재료 압출 기술들이 개발되고 있다.

3.4 재료 분사(Material Jetting, MJ)

재료 분사 공정은 ISO/ASTM 52900에 따르면 ‘적층 재료의 액적을 선택적으로 적층하는 적층 제조 공정(Additive Manufacturing Process in Which Droplets of Feedstock Material Are Selectively Deposited)’으로 정의되어 있다. 현재에는 광 경화성 수지나 왁스 등의 재료를 미세한 방울(Droplet)로 만들어 선택적으로 분사하여 단면을 만들고 이를 반복하여 3차원 형상을 제작하는 것이 대부분이다.¹³ 이 공정은 주로 잉크젯 프린팅 기술을 기반으로 하기 때문에 매우 높은 해상도를 갖는 3차원 형상의 제작이 가능하다.

현재 상용화된 재료 분사 공정은 이스라엘 오브젝트 지오메트리스(Object Geometries)사에서 개발된 Polyjet 기술이 시초이며, 이후 오브젝트 지오메트리스사는 미국 스트라타시스사와 합병되었다. Polyjet 기술은 짧은 파장을 갖는 자외선에 의해서 경화되는 광 경화성 수지를 수백 개의 잉크젯 프린터와 유사한 노즐을 통해서 단면 형상으로 분사한다. 광 경화성 수지가 단면 형상으로 분사된 후에 자외선 램프로 이를 경화시켜 굳혀 단면을 만들게 되고 이를 반복하여 3차원 형상이 제작된다. 이후 미국 3D

시스템즈사에서도 MJP (Multi Jet Printing)라는 명칭의 유사한 기술을 개발하였다. 이들 기술들은 다수의 노즐을 통해서 다수의 재료를 하나의 단면에 분사할 수 있기 때문에 다양한 물성과 색상을 갖는 폴리머 재료를 하나의 단면에 성형하는 것이 가능하다. 따라서 만들어진 3차원 형상은 별도의 조립 과정을 거치지 않고도 다양한 색상 및 다수의 재료로 구성된 제품을 한 번의 공정으로 제작하는 것이 가능하다.

3.5 분말 베드 용해(Powder Bed Fusion, PBF)

분말 베드 용해 공정은 ISO/ASTM 52900에서 ‘열에너지가 분말 베드의 영역을 선택적으로 용해하는 적층 제조 공정(Additive Manufacturing Process in Which Thermal Energy Selectively Fuses Regions of a Powder Bed)’으로 정의되어 있다.¹³ 분말 베드 용해 공정은 분말 공급 장치(Feeder)를 이용하여 플라스틱/금속 분말을 분말 베드 위에 일정 두께로 도포한 후 고밀도 에너지원(High Density Energy Source)을 이용하여 분말을 소결 또는 용융시켜, 선-대-선 적층을 반복하여 첫 번째 층을 생성한다. 그 후, 생성된 층 위에 다시 분말 공급과 고밀도 에너지원을 이용한 선택적 분말 용해를 수행하여 새로운 층 생성을 반복하여 3차원 형상의 제품을 제작한다. 분말 베드 용해 공정은 분말 저장/공급부(Powder Delivery Stage), 적층부(Deposition Stage) 및 잔여 분말 보관부(Waste Storage Stage)로 구성된다. 분말 공급 장치는 롤러형, 갈퀴(Rake)형 및 롤러/갈퀴 혼합형 등이 개발되었다. 분말을 용해시키는 고밀도 에너지원으로는 레이저와 전자빔 등이 사용되고 있다.³⁰

분말 베드 용해 공정은 분말의 용해 상태에 따라 소결형과 용융형으로 구분될 수 있다. 상용화된 소결형 분말 베드 용해 공정들은 모두 레이저를 고밀도 에너지원으로 사용하고 있다. 소결형 분말 베드 용해 공정으로는 미국 텍사스 주립대학 오스틴 캠퍼스(University of Texas at Austin)에서 개발된 선택적 레이저 소결(Selective Laser Sintering, SLS) 공정과 독일에서 개발된 직접식 금속 레이저 소결(Direct Metal Laser Sintering, DMLS) 공정이 대표적이다. DMLS 공정은 SLS 공정과 달리 저용점 분말과 고용점 분말의 2가지 분말을 혼합한 적층용 분말을 사용함으로써 저용점 분말은 용융시키고 고용점 분말은 표면만 용융시켜서 SLS 공정보다 적층 제품의 밀도를 현저히 향상시켰다. 용융형 분말 베드 용해 공정에는 레이저를 고밀도 에너지원으로 사용하는 선택적 레이저 용융(Selective Laser Melting, SLM) 공정과 전자빔을 고밀도 에너지원으로 사용하는 전자빔 용융(Electron Beam Melting, EBM) 및 플라즈마 전자빔 용융(Plasma Electron Beam Melting, PEBM) 공정 등이 있다. 용융형 분말 베드 용해 공정으로 제작된 제품의 밀도는 98% 이상으로 알려져 있다.³¹

3.6 판재 적층(Sheet Lamination, SHL)

판재 적층 공정은 ISO/ASTM 52900에서 ‘판재형 재료가 결합되어 제품을 성형하는 적층 제조 공정(Additive Manufacturing

Process in Which Sheets of Material Are Bonded to Form a Part)’으로 정의하고 있다.¹³ 판재 형태로 공급되는 재료를 한 층의 CAD 데이터와 같이 절단하고, 접합/브레이징/초음파 용접 등을 이용하여 절단된 부분을 기저부에 결합시켜 첫 번째 층을 생성한다. 그 후 다음 층에 대한 절단과 절단된 부분의 이미 생성된 층위에 적층하는 것을 반복하여 3차원 형상을 생성하는 적층 제조 공정이다. 이 공정은 층-대-층(Layer-by-Layer) 적층 방식으로 3차원 제품을 제작한다. 판재 적층 공정 중에서는 미국의 헬리시스(Helisis)사의 LOM (Laminated Object Manufacturing) 기술이 최초로 상용화된 것이다. 판재 적층 공정은 결합 방식에 따라 접착제(Gluing and Adhesive Bonding) 결합형, 열 접합과 클램핑형 및 초음파 용접형으로 구분할 수 있다. 또한 제작 순서에 따라 결합 후 성형 공정과 성형 후 결합 공정으로 분류할 수 있다.

접착제 활용 결합형 판재 적층 공정에서는 결합 후 성형 공정으로 LOM 기술이 대표적이며, 성형 후 결합 공정으로는 CAM-LEM, VLM-ST 기술 등이 개발되었다. 성형 후 결합 공정에서는 결합 후 성형공정의 단점인 장시간이 요구되고 노동 집약적인 디큐빙(Decubing) 작업이 요구되지 않는 장점이 있으나, 접착제가 빨리 건조되어 층간 결합 시 문제가 발생할 가능성이 있다. 열 접합과 클램핑 활용 판재 적층 공정에서 결합 후 성형 방식을 사용하며, 대표적인 공정으로 철판 적층(Steel Lamination) 공정을 들 수 있다. 이 공정에서는 모두 레이저로 판재를 절단하여 각 층에 해당되는 형상을 제작하고 절단된 판재들을 브레이징(Brazing)과 클램핑으로 결합한 후, 기계 가공으로 표면을 후 가공하여 최종 제품을 제작한다. 초음파 용착(Ultrasonic Consolidation) 공정에서는 결합 후 성형 방식을 사용하며, 알루미늄 포일을 초음파 용접으로 기저부 또는 이미 적층된 층 위에 용접한 후, 기계 가공 공정으로 적층부의 측면을 윤곽 가공하여 여러 층의 형상을 한번에 생성하며, 이 과정을 반복하여 목적하는 3차원 제품을 제작한다.

3.7 액조 광경화(Vat Photopolymerization, VPP)

액조 광경화 공정은 ISO/ASTM 52900에 따르면 ‘광 중합 반응에 의하여 액조 내에서 액상 광경화성 수지가 선택적으로 경화되는 적층 제조 공정(Additive Manufacturing Process in Which Liquid Photopolymer in a Vat Is Selectively Cured by Light-Activated Polymerization)’으로 정의되어 있다.¹³ 즉, 액체를 담은 용기인 액조에 액체 상태의 광 경화성 재료를 담고 그 위에 특정 파장의 빛을 주사하면 광 경화성 수지가 고체 상태로 변화되는 광 중합 반응이 일어나는 현상을 이용하는 공정이다. 따라서 특정 파장의 빛을 단면 형상에 맞게 액체 광 경화성 수지에 주사하면 굳어지게 되어 단면이 만들어지고, 이것을 반복하여 단면을 층층이 성형하면 3차원 형상의 제품이 만들어지게 된다. 특히 자외선 레이저 빔을 단면 형태로 주사하거나 또는 자외선 광원을 DMD (Digital Micromirror Device)를 이용하여 선택적으로 반사시켜 단면을 만드는 기술들이 주로 사용된다.

액조 광경화 공정은 찰스 혈에 의해서 상용화된 SLA가 최초로 개발된 기술이다. SLA 기술은 자외선 레이저를 일련의 광학계를 이용하여 매우 작은 초점을 갖도록 만들고 이를 광 경화성 수지 표면에 주사하여 수지를 경화시켜 단면 모양의 층을 생성시킨다. 이후 유사한 기술로서 엔비전텍(Envision Tec)사의 3PS 기술도 발표되었다. 한편 자외선 광원에서 만들어진 빛을 수 μm 크기의 매우 작은 거울들의 배열인 DMD로 선택적으로 광경화성 수지 위에 반사시켜 단면을 한번에 경화시켜 단면을 형성하는 DLP 기술도 개발되었다.

4. 기타 적층 제조에 많이 사용되는 용어들

일반적인 제조 공정과 적층 제조에서 공통적으로 사용될 수 있는 용어는 매우 다양하다. 그러나 적층 제조에서 사용되면 일반적인 경우보다 제한적 의미로 해석되는 경우가 있으므로 3장에서 서술한 적층 제조 공정의 구분뿐만 아니라 자주 사용되는 핵심 용어를 정리할 필요가 있다.

4.1 층(Layer)

적층 제조 공정은 2차원적인 면의 제조와 누적을 반복하여 3차원적인 입체 형상을 구현하는 것에 기반을 두고 있다. 또한 이때의 면은 주로 평면이나 공정에 따라서는 곡면일 수 있으며, 제조에 사용되는 공정원리에 따라 재료는 면, 선 또는 점의 단위로 추가되어 면을 이룬다. 이때의 한 면을 하나의 '층'으로 보게 되며, 층은 일정한 두께로 만들어지는 것이 일반적이나 두께를 가변화하여 제작된 제품과 모델링된 목표 형상과의 오차를 저감하는 방법도 사용되고 있다. 이렇게 하나의 면을 만들기 위해 배열되거나 펼쳐진 재료의 집합을 물리적으로 층이라 할 수 있으며, 소프트웨어적으로는 3차원적인 입체의 구현을 위하여 2차원적으로 분할된 공간을 뜻한다.

4.2 적층물, 출력물, 제품, 부품(Part)

적층 제조 공정으로 제작된 제품은 각 층이 누적되어 제조되었기 때문에 '적층물'로 불리거나 적층 제조 시스템의 출력이라는 의미에서 '출력물'로 불린다. 또한 만들어진 적층물을 활용하는 입장에서는 이를 '부품' 또는 '제품'으로 다양하게 부를 수 있다. 이들은 모두 동일한 물체를 칭하는 것으로 실제적으로 제품의 전체 또는 일부를 구성할 수 있는 기능적 요소를 가진 적층 제조로 제작된 결합된 재료를 뜻한다. 물론 해당 적층물에 요구되는 기능은 제작자의 의도에 따라 결정되므로, 동일한 물체에 대해서 의도에 따라 적층물, 제품, 부품 등 다양하게 부를 수 있다.

4.3 슬라이싱(Slicing)

일반적으로 적층 제조에서의 소프트웨어적인 전처리 공정은 입력받은 3차원 CAD 모델의 오류 검증, 오류 복구, 제작 방향

선정, 부품 배치, 슬라이싱(Slicing), 지지대 생성, 가공 경로 생성 및 G-Code 출력순으로 이루어진다. 이러한 일련의 작업은 모두 후속의 적층 작업을 계획하는 작업이므로 공정 계획(Process Planning) 작업이다. 그러나 산업 현장에서는 이러한 소프트웨어적인 처리를 모두 합쳐서 대표적인 공정 요소인 '슬라이싱'으로 부르는 것이 일반적이다.

4.4 후처리 공정(Post-Processing)

적층 제조 장치에 의해 재료가 선택적 적층이 완료된 중간 부품(Green Part)의 상태에서부터 최종적으로 부품으로 활용되기 위하여 세척, 버(Burr)나 지지대의 제거, 후경화, 코팅, 절삭, 연마, 도색 등 부품의 품질을 향상하기 위하여 실시되는 보조 작업을 모두 '후처리'라고 한다. 최근의 금속재료를 사용하는 적층 제조 공정에서는 적층의 중간 또는 마지막 단계에서 중간 부품을 직접 절삭 또는 연삭하여, 정밀도가 높고 결함이 적은 부품을 생산할 수 있도록 절삭 가공기와 복합화하는 사례도 증가하고 있다.

4.5 지지대(Support)

새로운 재료를 이전의 제작 중인 중간 단계의 부품에 추가하기 위해서는 이를 부착할 위치에 사전에 제작된 부품이 필요하다. 그러나, 3D CAD 모델을 슬라이싱하면 새로운 재료를 부착할 중간 단계의 부품이 없을 경우가 있다. 즉, 위로 쌓아가는 적층 공정의 경우라면 아래 면이 비어있어 윗면을 쌓을 수 없는 경우가 있는 것이다. 이러한 경우에 최종 제품에는 필요하지 않지만 아래에서부터 재료를 미리 쌓아 두어 그 위에 새로운 면을 성형할 수 있도록 하는 것이 '지지대'이다. 이외에도 지지대는 중간 부품이 제작 도중에 넘어지거나 떨어져 이동되는 것을 방지하고 또한 제작 과정에서 부품의 변형을 방지하거나 열의 배출 등 다양한 역할을 수행하도록 사용되고 있다.

4.6 공급재료(Feedstock)

적층 제조 장치에 공급되어 최종적으로 부품이 되는 재료를 '공급재료'라 한다. 이는 적층 제조 장치에 직접 공급되어 사용될 수 있도록 가공된 단계의 원재료를 의미하며 일반적으로 액체, 분말, 현탁액, 필라멘트, 판재 등과 같은 다양한 형태로 공급된다. 카트리지(Cartridge)의 형태로 제조되어 장착하거나 사용 중인 소재 용기에 추가(Refill)하여 사용이 가능하도록 제품화된 것으로 적층 제조 시스템에 직접 활용할 수 있도록 준비된 형태의 재료를 뜻한다.

5. 결론

본 논문은 동일한 제조 공정임에도 불구하고 다양한 명칭으로 불리고 있는 적층 제조 및 관련 용어들의 한글 명칭을 기준의 사용 사례를 기준으로 국제적 표준 용어를 고려하여 정리하고

그 공통적 사용을 제안하기 위하여 작성되었다. 즉, 제품의 형상 데이터를 컴퓨터 등을 활용하여 가상의 공간에서 단면으로 나누고, 재료를 각 단면 형상에 따라 적절한 공정을 통해 층층이 쌓아 실제 제품을 제작하는 공정인 적층 제조 및 관련 용어들에 대하여 다루었으며, ISO/ASTM 52900 표준에 기반한 적층 제조의 7개 세부 공정들인 접착제 분사, 에너지 제어 용착, 재료 압출, 재료 분사, 분말 베드 용해, 판재 적층 그리고 액조 광경화에 대해 각 공정의 정의 및 한글 명칭을 제안하고 각각에 대하여 서술하였다. 그리고 기존의 제조 공정에서 또는 적층 제조에서 많이 사용되는 용어들인 층, 적층물, 제품, 부품, 슬라이싱, 후처리 공정, 지지대, 공급재료의 한글 명칭도 제안하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

한국 적층 제조 분야의 발전에 큰 기여를 하셨으며, 본 논문의 작성에 필요한 영문 용어의 한글 정의에 많은 도움을 주신 광주과학기술원 양동렬 교수님, 부산대학교 이석희 교수님, 그리고 포항공과대학교 조동우 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 적층 제조 KS 표준화 작업을 위한 용어 정리에 도움을 주신 3D 융합산업협회 강승철님께도 감사드립니다.

REFERENCES

- Choi, S. G., "Designers for Rapid Prototyping User Guide," Hye Ji Won, pp.46-47, 2010.
- Hull, C. W., "Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography," US Patent, 4575330A, 1984.
- 3D Systems, "SLA 250," <http://www.3dsystems.ru/products/slaseries/sla250/sla250.pdf> (Accessed 16 NOVEMBER 2020)
- Ahn, D. G., Lee, S. H., and Yang, D. Y., "Investigation into Development of Progressive-Type Variable Lamination Manufacturing Using Expandable Polystyrene Foam and its Apparatus," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 216, No. 9, pp. 1239-1252, 2002.
- Ahn, D. G., Lee, S. H., and Yang, D. Y., "Development of Transfer Type Variable Lamination Manufacturing (VLM-st) Process," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, No. 14, pp. 1577-1587, 2002.
- Yang, D. Y., Ahn, D. G., Lee, S. H., Kim, H. C., and Park, S. K., "Investigation into the Development of Automatic VLM-st (VLM-sta) Process and its Apparatus," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 4, pp. 109-119, 2004.
- Kim, H. C. and Lee, S. H., "Minimization of Post-Processing Area for Stereolithography Parts by Selection of Part Orientation," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 26, No. 11, pp. 2409-2414, 2002.
- Park, H. and Lee, S. H., "A Study on Laser Scan Path Generation for Improving the Precision of Stereolithographic Parts," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 13, No. 12, pp. 142-150, 1996.
- Kim, B. Y., Lee, S. H., and Kim, H. C., "Layout Planning for Stereolithography Parts Using 3D Collision Detection Algorithm," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 27, No. 9, pp. 1546-1554, 2003.
- Lee, I. H. and Cho, D. W., "An Investigation on Photopolymer Solidification Considering Laser Irradiation Energy in Micro-Stereolithography," Microsystem Technologies, Vol. 10, Nos. 8-9, pp. 592-598, 2004.
- Lee, S. J., Kang, H. W., Park, J. K., Rhie, J. W., Hahn, S. K., et al., "Application of Microstereolithography in the Development of Three-Dimensional Cartilage Regeneration Scaffolds," Biomedical Microdevices, Vol. 10, No. 2, pp. 233-241, 2008.
- Yi, H. G., Jeong, Y. H., Kim, Y., Choi, Y. J., Moon, H. E., et al., "A Bioprinted Human-Glioblastoma-on-a-Chip for the Identification of Patient-Specific Responses to Chemoradiotherapy," Nature Biomedical Engineering, Vol. 3, No. 7, pp. 509-519, 2019.
- ISO/ASTM 52900, "Additive Manufacturing-General Principles-Terminology," 2015.
- ISO/ASTM 52901, "Additive Manufacturing-General Principles-Requirements for Purchased AM Parts," 2017.
- ISO/ASTM 52902, "Additive Manufacturing-Test Artifacts-Geometric Capability Assessment of Additive Manufacturing Systems," 2019.
- ISO/ASTM 52904, "Additive Manufacturing-Process Characteristics and Performance-Practice for Metal Powder Bed Fusion Process to Meet Critical Applications," 2019.
- ISO/ASTM 52907, "Additive Manufacturing-Feedstock Materials-Methods to Characterize Metal Powders," 2019.
- ISO/ASTM 52910, "Additive Manufacturing-Design-Requirements, Guidelines and Recommendations," 2018.
- ISO/ASTM 52911-1, "Additive Manufacturing-Design-Part 1: Laser-Based Powder Bed Fusion of Metals," 2019.
- ISO/ASTM 52911-2, "Additive Manufacturing-Design-Part 2: Laser-Based Powder Bed Fusion of Polymers," 2019.
- ISO/ASTM 529115, "Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.2," 2016.
- The White House, "Remarks by the President in the State of the Union Address," <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2013/02/12/remarks-president-state-union-address> (Accessed 16 NOVEMBER 2020)
- Monzón, M., Ortega, Z., Martínez, A., and Ortega, F., "Standardization in Additive Manufacturing: Activities Carried

Out by International Organizations and Projects,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 76, Nos. 5-8, pp. 1111-1121, 2015.

24. Beaman, J. and Deckard, C., “Selective Laser Sintering with Assisted Powder Handling,” US Patent, 4938816A, 1989.
25. Crump, S., “Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects,” US Patent, 5121329A, 1992.
26. Park, S. H., Shim, D. S., and Choi, J. W., “Additive Manufacturing Technology and Engineering,” Hongreung Publishing Co., pp.78-219. 2019.
27. Chua, C. K., Leong, K. F., and Lim, C. S., “Rapid Prototyping: Principles and Applications (With Companion CD-ROM),” World Scientific Publishing Company, pp. 35-300, 2010.
28. Gibson, I., Rosen, D., and Stucker, B., “Direct Digital Manufacturing,” Additive Manufacturing Technologies, pp. 375-397, 2015.
29. Beaman, J. J., Barlow, J. W., Bourell, D. L., Crawford, R. H., Marcus, H. L., et al., “Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing,” Kluwer Academic Publishers, Vol. 2061, pp. 25-49, 1997.
30. Ahn, D. G., “Direct Metal Additive Manufacturing Processes and Their Sustainable Applications for Green Technology: A Review,” International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol. 3, No. 4, pp. 381-395, 2016.
31. Ahn, D. G. and Lee, H. J., “Investigation of Novel Metal Additive Manufacturing Process Using Plasma Electron Beam based on Powder Bed Fusion,” CIRP Annals, Vol. 68, No. 1, pp. 245-248, 2019.



Dong-Gyu Ahn

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Korea. He received his Ph.D in Mechanical Engineering from KAIST. His research interests include additive manufacturing (AM), applications of AM, metal forming, injection molding, lightweight materials, and finite element analysis.

E-mail: smart@chosun.ac.kr



In Hwan Lee

Professor in the School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Korea. He received his Ph.D in Mechanical Engineering from POSTECH. His research interests include additive manufacturing and its applications.

E-mail: anxanx@chungbuk.ac.kr



Ho-Chan Kim

Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Andong National University, Korea. He received his Ph.D in Mechanical Engineering from Pusan National University. His research interests include additive manufacturing, CAD/CAM and biomedical engineering.

E-mail: hckim@andong.ac.kr