

Additive Manufacturing (AM)

Computer-Aided Design 69 (2015) 65–89



Contents lists available at ScienceDirect

Computer-Aided Design

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cad



The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering

Wei Gao^{a,*}, Yunbo Zhang^a, Devarajan Ramanujan^a, Karthik Ramani^{a,b}, Yong Chen^c, Christopher B. Williams^d, Charlie C.L. Wang^e, Yung C. Shin^a, Song Zhang^a, Pablo D. Zavattieri^f

^a School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA

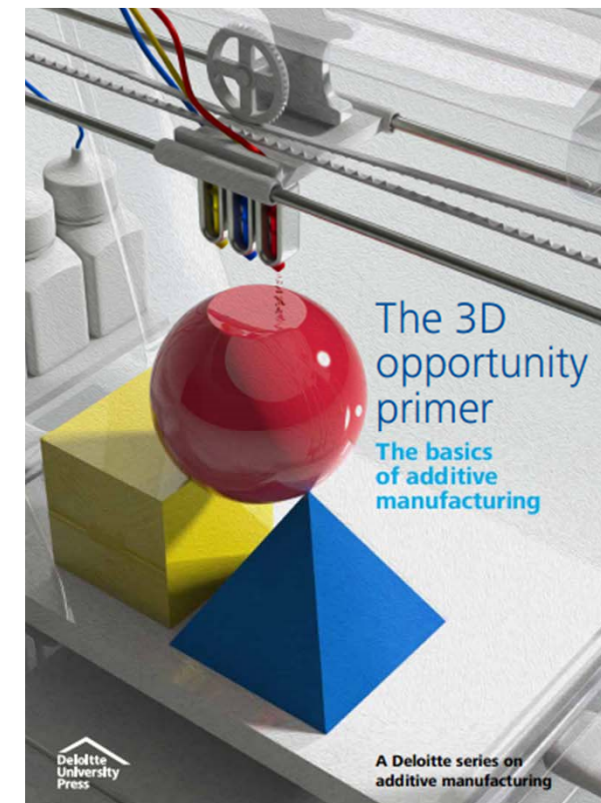
^b School of Electrical Engineering (by courtesy), Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA

^c Department of Industrial and Systems Engineering, University of Southern California, Los Angeles, CA 90089, USA

^d Department of Mechanical Engineering, VirginiaTech, Blacksburg, VA 24061, USA

^e Department of Mechanical and Automation Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China

^f School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA



Additive Manufacturing (AM) Terminology

Known by many names:

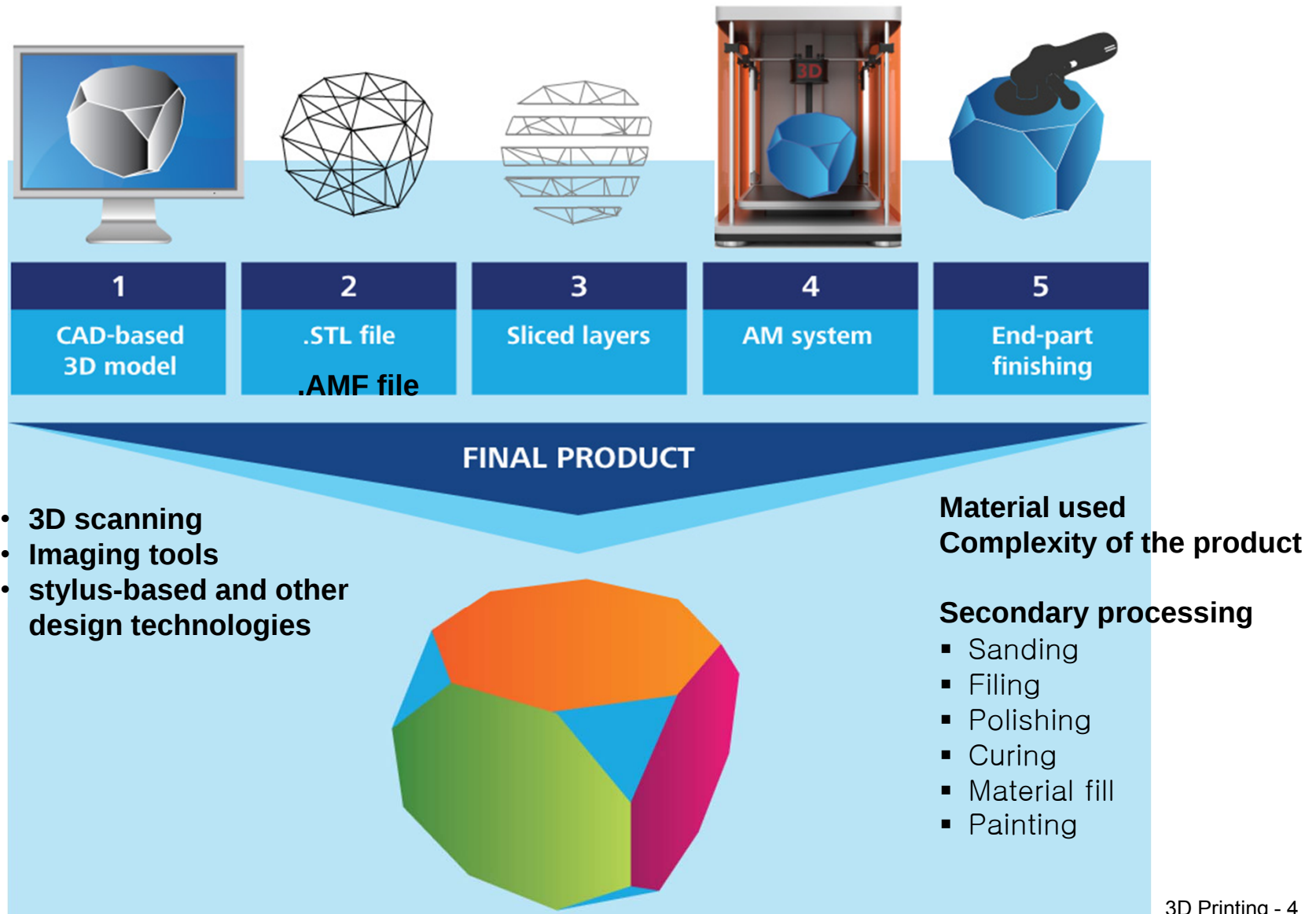
- 3D Printing
- Rapid Prototyping
- Rapid Tooling
- Rapid Technologies
- Rapid Manufacturing
- Advanced Manufacturing
- Additive Fabrication
- Additive Layer Manufacturing
- Direct Digital Manufacturing
- Direct Manufacturing

Additive Manufacturing (AM) / 3D Printing

- A process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies
 - 3D프린팅: 디지털디자인 데이터를 이용, 소재를 적층해 3차원 물체를 제조하는 프로세스
 - 적층제조(Additive Manufacturing, AM): 재료를 자르거나 깎아 생산하는 절삭가공(subtractive manufacturing)과 대비되는 개념으로 공식 용어
- Group of technologies that create products through the addition of materials (typically layer by layer) rather than by subtraction (through machining or other types of processing)

ASTM International, *Standard terminology for additive manufacturing technologies*, designation F2792 – 12a, 2013, p. 2.

Additive Manufacturing (AM) Process Flow



3D 프린터 역사 (1)

- 1984 : 3D Systems사 Charles Hull이 SLA 방식 3D 프린터 최초 개발
- 1986 : SLA 방식 특허 획득
- 1988 : SLA 방식 첫 상용화, LOM 방식 특허 획득
- 1989 : SLS 방식 특허 획득
- 1990 : FDM 방식 첫 상용화
- 1992 : FDM 방식 특허 획득, SLS 방식 개발, SLA 방식 Layer by Layer 방법으로 파트 완성
- 1993 : MIT에서 3차원 프린팅 기술(잉크젯 기반) 특허 획득, 3DP 방식
- 1996 : Stratasys "Genisys", 3D Systems "Actua2100", Z Corporation "Z402" 출시
- 2005 : 첫 고선명 컬러 3D 프린터인 Z Corporation "Z510" 출시, RepRap의 오픈소스 기반 3D 프린터 소개
- 2006 : SLS 방식 제조 대량 커스텀화, Object사에서 다양한 재료를 프린팅 가능한 제품 출시

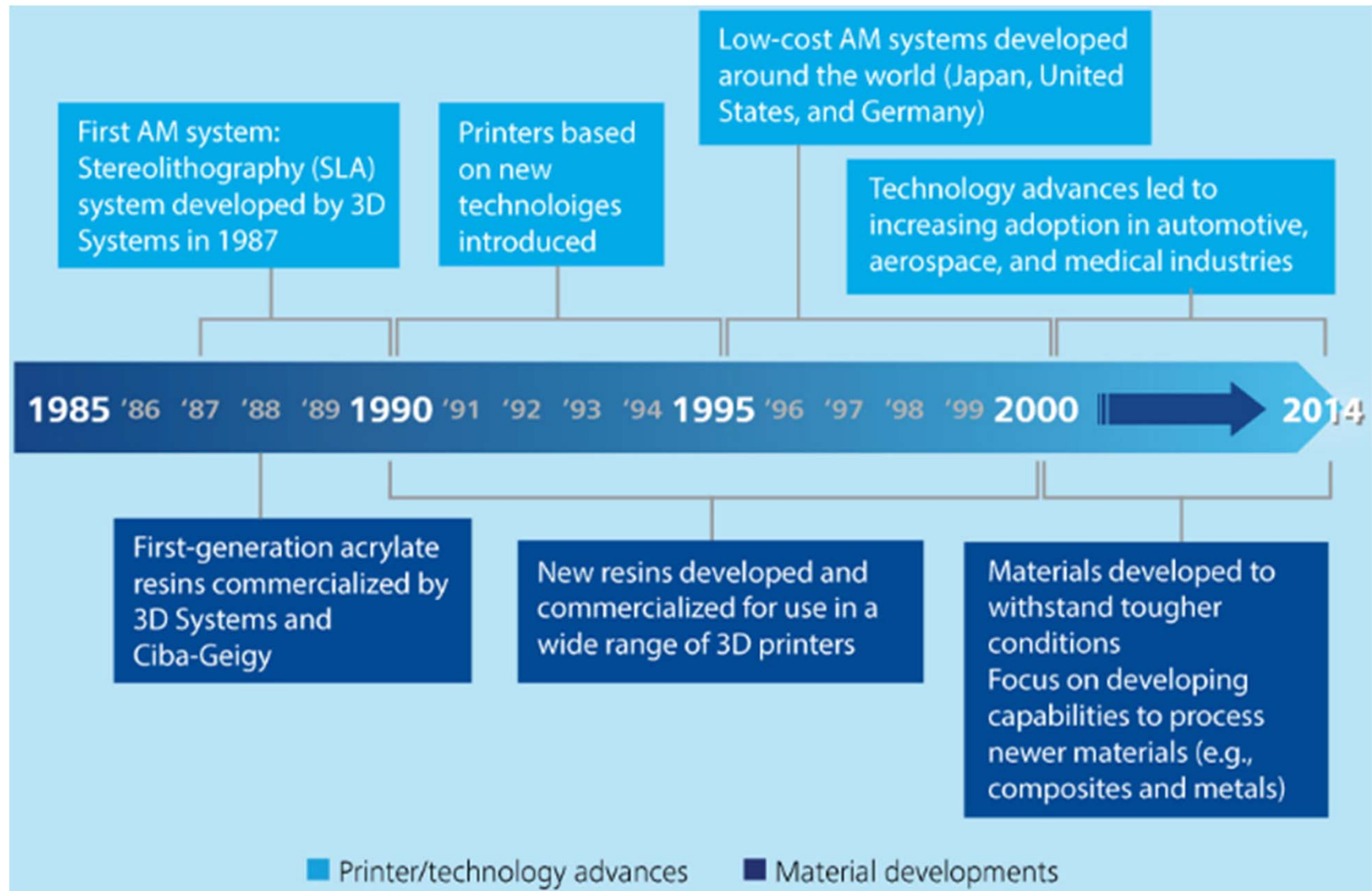


3D 프린터 역사 (2)

- 2008 : [RepRap](#)에서 첫 Self-Replicating 프린터 릴리즈, Shapeways의 DIY 서비스
- 2009 : MakerBot 3D 프린터 DIY Kit 시장에 출시
- 2010 : Southampton 대학 기술자들이 세계 최초 3D 프린터로 제작한 시험용 비행체 비행 성공
- 2011 : 세계 최초 3D 프린터로 제작한 자동차 소개
- 2012 : 네덜란드에서 3차원 프린터로 인공턱 구현, FDM 방식 특허 20년 기간 만료 대중화 진입 촉진
- 2013 : 줄기세포 기반 3D 프린터 인공장기 소개, 권총 3D CAD 도면 인터넷 업로드(다운로드)
- 2014 : SLS 방식 특허기간 만료로 FDM 방식과 같이 대중화에 많은 기여 예상

Evolution of AM Technology

speed of processing
complexity of design
variety of materials used



3D 프린팅 작동 원리와 특징

원료	기술명	원리	특징
고체 (ABS, PLA 등)	FDM (Fused Deposition Modeling: 압출 적층 조형)	- 고체 필라멘트(실)형태의 열가소성 플라스틱을 노즐 안에서 녹인 후 분사하여 쌓아 올림 - 레이저를 사용하지 않는 단순 구조	- 스트라타시스(Stratasys)사 개발 - 내구성이 높고 강도가 강하며 장비가격과 유지비용이 저렴하고 원료수급 용이
분말 (나일론, 유리, 세라믹, 티타늄 등 다양)	SLS (Selective Laser Sintering: 선택적 레이저 소결 조형)	- 기능성 고분자나 금속 파우더 원료를 조형판에 공급하고, 레이저로 경화시켜 레이어 형성 - 레이어가 형성되면 그 위에 파우더를 얇게 뿌리고 다시 레이저로 새로운 막을 형성하여 쌓아 올림	- 텍사스 대학(University of Texas system)연구진 개발 - 조형속도가 빠르고 금속을 포함한 다양한 원료 사용 가능 - 장비가 비싸고 유지비용이 많이 소요
액체 (포토폴리머 플라스틱)	SLA (Stereo lithographic Apparatus: 광경화 수지 조형)	- 빛을 받으면 고체로 변하는 광경화성 수지에 UV 레이저를 주사하여 경화시켜 레이어 형성 - 레이어가 형성될 때마다 받침대가 한 층 두께만큼 하강하며 쌓아 올림	3D 시스템즈(3D SYSTEMS)사가 개발 - 정교한 출력 가능 - 장비가 비싸며 유지비용이 많이 들고 원료선택이 제한적

3D 프린팅의 기본 동작 원리 (1)

- **재료 압출 방식 (Material extrusion)**

- 직경 1~2 mm의 얇은 관 형태의 플라스틱 필라멘트를 노즐 내에서 가열 및 압출하여 적층하는 방식으로 미국 내에서 일반 사용자용 제품 군부터 전문가 및 산업용 제품 군까지 상용화가 가장 잘 이루어지고 있다. 이 기술은 1989년 S. Scott Crump에 의하여 발명되어 특허가 출원된 후 Stratasys에 의해 상용화되었다. 이후 RepRap과 Fab@Home와 같은 오픈 소스 개인용 3D 프린터 개발 프로젝트 등으로 이 방식을 이용한 저가의 3D 프린팅 기기 개발 및 확산되었다.

- **분말 적층 용융 방식 (Powder Bed Fusion)**

- 분말 형태의 소재를 특정 두께로 평편하게 깔아 레이저 (Laser) 및 전자빔 (Electron beam) 형태의 열원을 조사하여 단면을 따라 용융시켜 구조물을 생성하는 방식으로 금속 3D 프린팅에 주로 사용된다. 미국 내에서 관련 연구가 가장 활발한 방식으로 다양한 금속 소재 개발과 정밀도 및 속도를 높이기 위한 연구가 진행 중이다.

3D 프린팅의 기본 동작 원리 (2)

- **광중합 방식 (Photo Polymerization)**

- 빛에 의해 경화되는 액체형태의 광경화성 수지 (Photo-Polymer)에 자외선을 조사해 단면을 따라 경화시켜 적층하는 방식으로 3D 프린팅 기기 중 가장 먼저 발명되었다. 이 기술은 Charles W. Hull에 특허 출원되어 3D Systems사에 의하여 상용화 되었다. 광경화성 수지의 약한 기계적 특성으로 인하여 제작된 제품을 실사용이 어려운 한계가 있다. 하지만 상대적으로 고속 제작이 가능하고 제작된 제품이 높은 정밀도를 갖는다. 현재 미국 내에서는 기계적 특성을 높여 실사용이 가능한 소재가 개발되고 있고, 제작 속도를 더욱 높인 기기의 개발이 이루어지고 있다.

- **재료 분사 방식 (Material Jetting)**

- 일반적인 잉크젯 프린터와 같은 방식으로 재료를 프린트 헤드에서 원하는 패턴을 따라 분사하여 경화시키는 방식이다. 이 방식은 Objet Geometries사에서 상용화되었다. 현재 Stratasys사는 멀티헤드 방식의 프린터가 개발하여 출력 속도를 높이고, 다양한 재료 및 색상의 재료를 개발함으로써 사용자가 원하는 색상 및 기능을 가진 제품의 제작이 가능한 3D 프린터를 개발 하고 있다.

3D 프린팅의 기본 동작 원리 (3)

- **접착제 분사 방식 (Binder Jetting)**

- 분말 형태의 소재 위에 액상의 접착제를 뿌려 2차원 단면을 생성하는 방식으로 Massachusetts Institute of Technology 에서 개발되어 Z Corporation에서 상용화되었다. 이 방식은 제작 중 지지구조물 (support structure)을 생성하지 않는 특징이 있다. 최근 ExOne사는 금속 및 세라믹 소재의 다양한 소재의 분말을 개발하고 있다.

- **박판 합착 방식 (Sheet Lamination)**

- 얇은 판형의 소재를 2차원 단면을 따라 절단하여 이전 층의 재료와 합착하는 방식으로 종이, 박판 수지 또는 금속이 소재로 사용된다. 박판을 접착시키기 위해서 접착제를 사용하거나 열 또는 초음파가 사용된다.

- **직접 용착 방식 (Direct Energy Deposition)**

- 와이어 형태 또는 분말 형태의 재료를 노즐을 이용하여 공급하는 동시에 열원을 이용하여 용융시켜 구조물을 제작하는 방식으로 기존에 존재하는 구조물 표면에 직접 적층이 가능한 특징을 갖는다.

ISO TC261, ASTM F42



Binder Jetting

노즐을 통해 분사된 잉크가 경화물질에 분사/증착되어 적층되는 방식
(잉크: Bonding agent 역할)



DED

레이저, 전자빔, 플라즈마아크 등의 에너지를 이용하여 재료를 녹여서 붙여나가는 적층방식
(금속분말소재와 가스사용)



Material Extrusion

고온으로 가열한 재료를 다이스(노즐)를 통해 압력을 가하여 압출하여 적층하는 방식
(FDM/FFF)



Material Jetting

프린터 헤드를 통해 액체원료를 분출시키고 자외선으로 경화시키는 방식
(Polyjet, MJM)



PBF

Powder Bed상의 고제입자를 레이저나 전자빔으로 가열하여 고형화 하는 방식
(SLS)



Sheet Lamination

얇은 필름형태의 재료를 적층하여 접착하는 방식 (종이, 필름)



Vat Photo-polymerization

광경화성수지(액상)에 빛을 조사하여 경화가되는 원리를 이용하는 방식
(DLP, SLA)

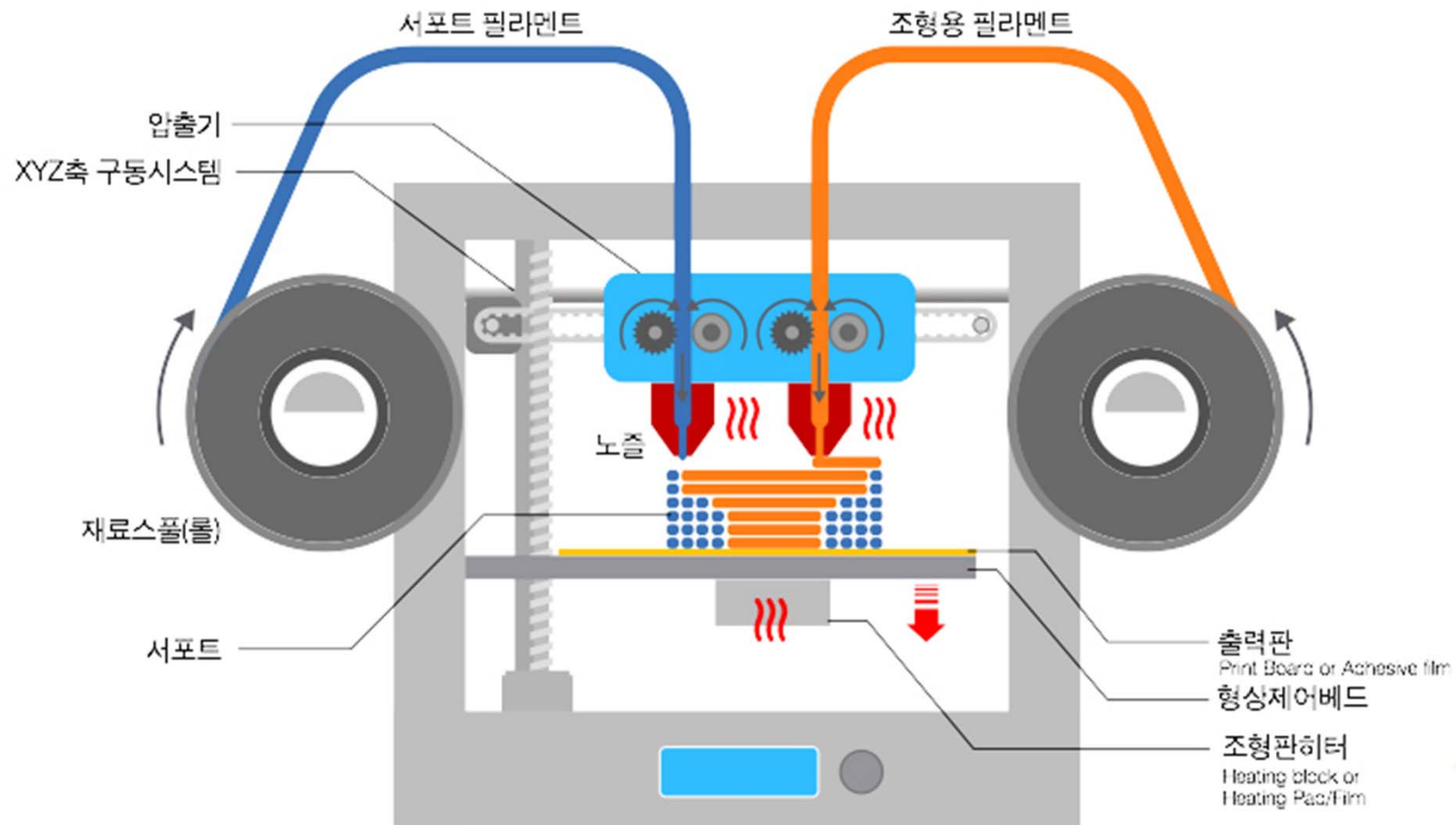
<http://www.veltz3d.com>

재료압출식 3D프린터



Material Extrusion
FDM/FFF

와이어 형상의 플라스틱 재료를 가열하여 노즐을 통해 압출하여 적층하는
방식의 3D프린터



재료와 특성

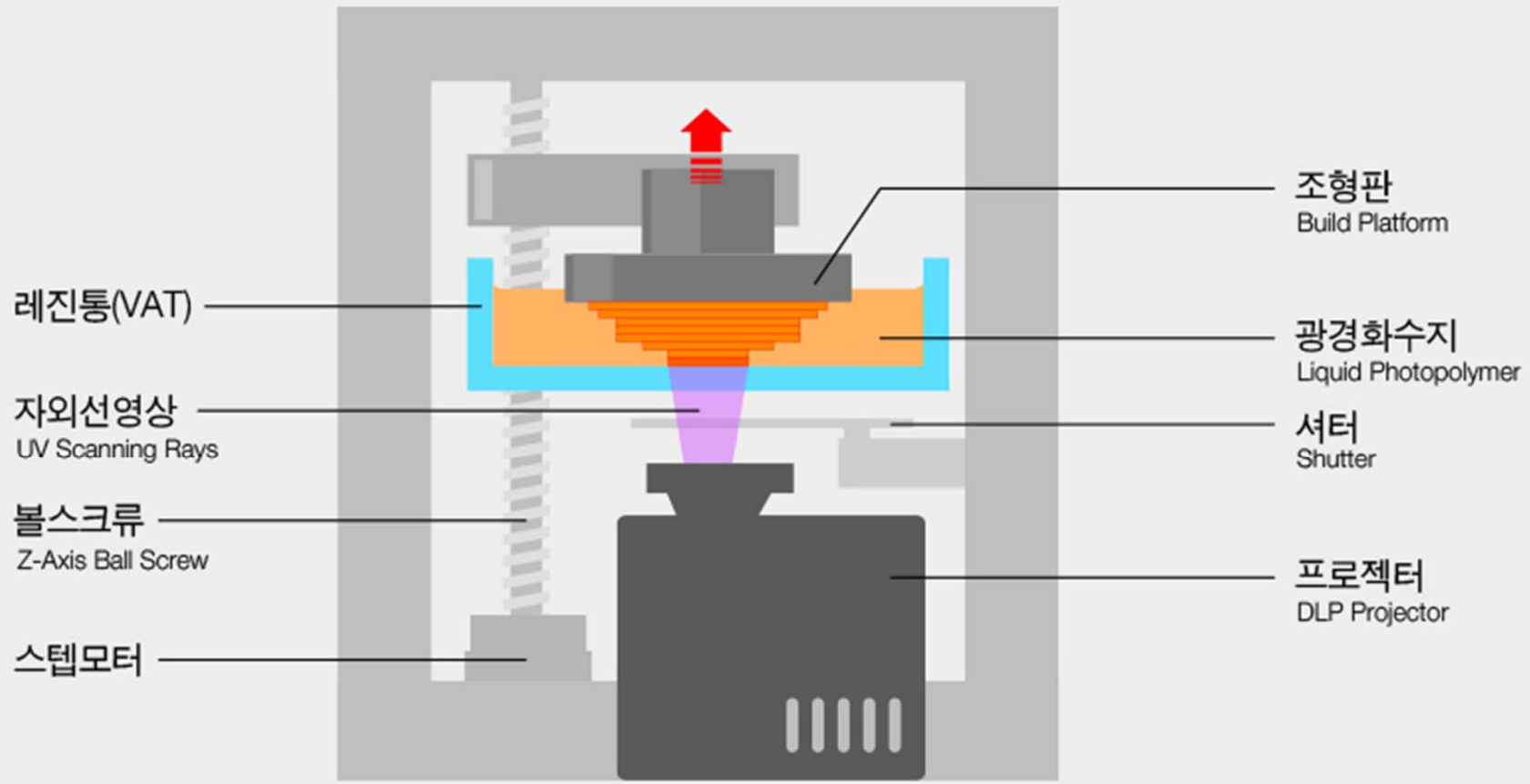
종류	설명	주요특징	용융온도
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene 5대 범용수지로서 가공성이 좋으며 기계적특성이 우수함 다양한 종류가 있으며 대부분의 가전 제품에 적용	조형시 스트링현상이 없고 디테일한 묘사가 가능하여 산업용 3D프린터의 기본소재 수축율이 높아 조형시 비틀림, 변형, 들뜸발생 내열도가 우수하며 충격에 강함 다듬질이나 도색성의 후가공에 용이 도금가능, 접착성 우수 특유의 냄새발생	215~250도
PLA	Poly-Lactic Acid(폴리락트산) 옥수수에서 추출한 녹말을 발효시켜 젖산을 응축하고 고분자화 하여 만든 친환경소재	수축율이 낮아 크기가 큰 조형에 유리 레이어간 접착력 우수(레프트,서포트 제거난해) 히팅베드 없이도 출력가능 단면형상이 다수의 폐곡선일 경우 스트링 발생 내열도가 낮으며 후가공이 난해함 옥수수타는냄새, 스트링의 분진화	180~220도
PVA	Polyvinyl alcohol	수용성소재로 서포트 소재로 우수 흡습성이 강하여 단시간의 노출에도 재료손상 보관 및 프린팅 조건난해	220~230도

포토폴리머용 3D프린터



Vat Photopolymerization DLP

Resin(Polymer)을 채운 투명재질의 VAT에 아랫쪽에 위치한 DLP에서 출력모델의 단면이미지를 투사하게되며 이때 Build Platform과 VAT사이의 공간에 있던 Resin이 경화되는 과정을 지속적으로 반복하면서 적층하는 원리



SLA 3D프린터

광경화성 재료에 레이저광선을 투사하여 경화/적층하는 방식의 3D프린터

Resin(Polymer)을 채운 투명재질의 VAT에 조형판을 향하여 상부에서 레이저로 스캔하여 한층씩 Resin을 경화시키며
경화가 완료될 때마다 조형판이 지속적으로 아래로 내려가면서 이 과정을 반복하게 되는 원리

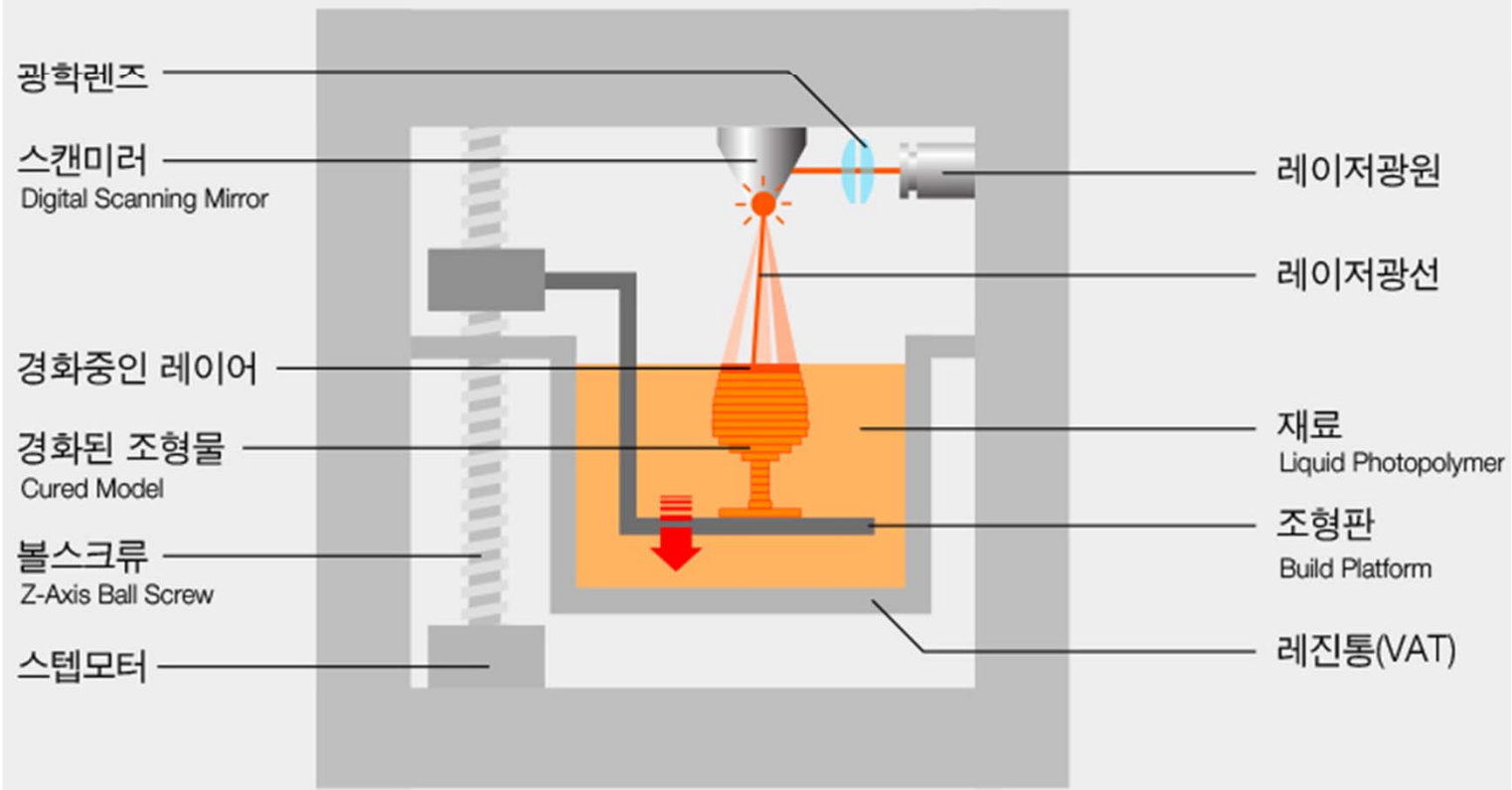
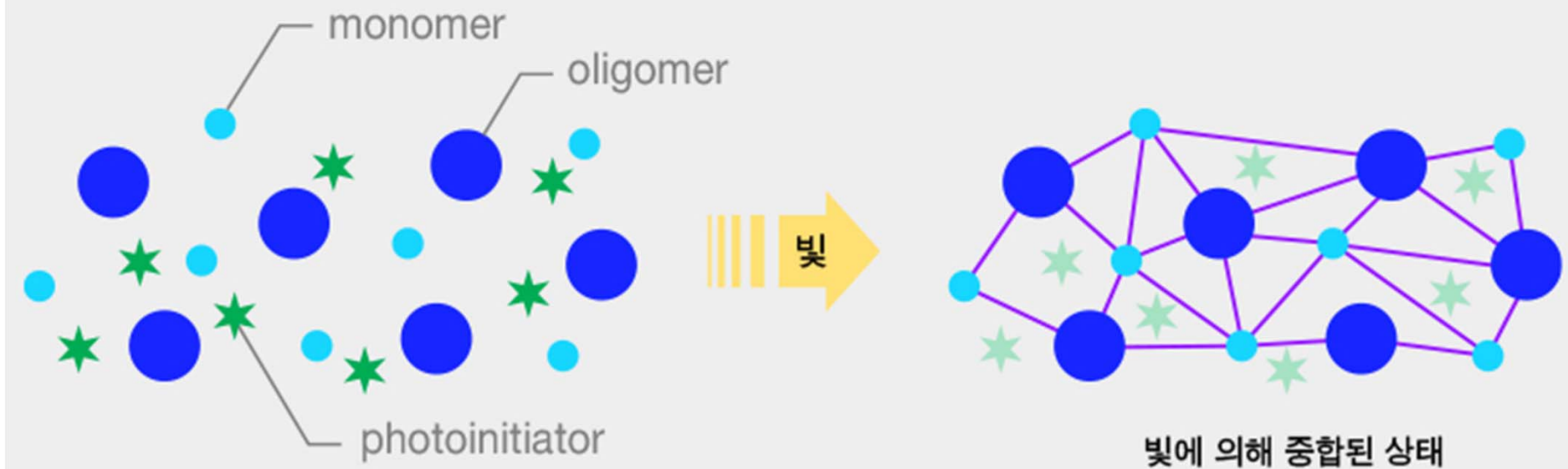
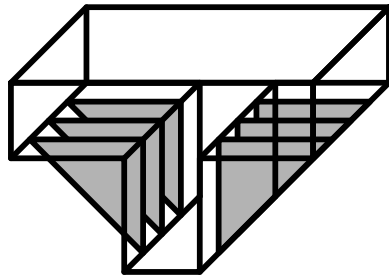


Photo Polymer (광중합체)

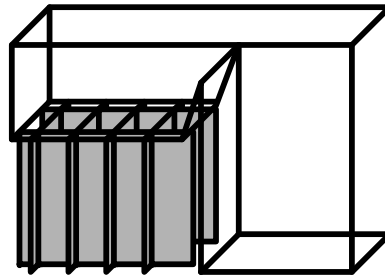
빛의 작용으로 분자구조에 변화가 일어나고 그 결과 물성변화가 생기는 고분자 또는 고분자 조성물을 의미.
물성변화는 경화성, 용해성, 접착성, 화학적 친화성, 광학적성질 등 다양하며
이렇게 변화되는 물성을 이용하여 광경화수지를 합성하여 3D프린터의 소재로 사용.



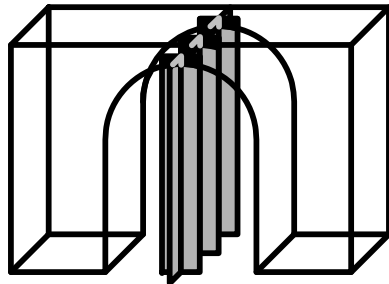
Support Structures in the SL Process



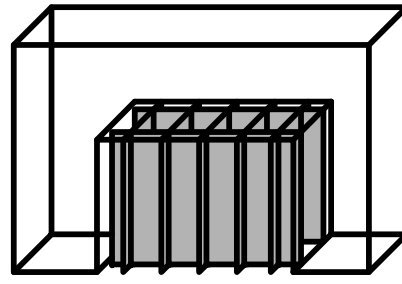
(a) Gusset



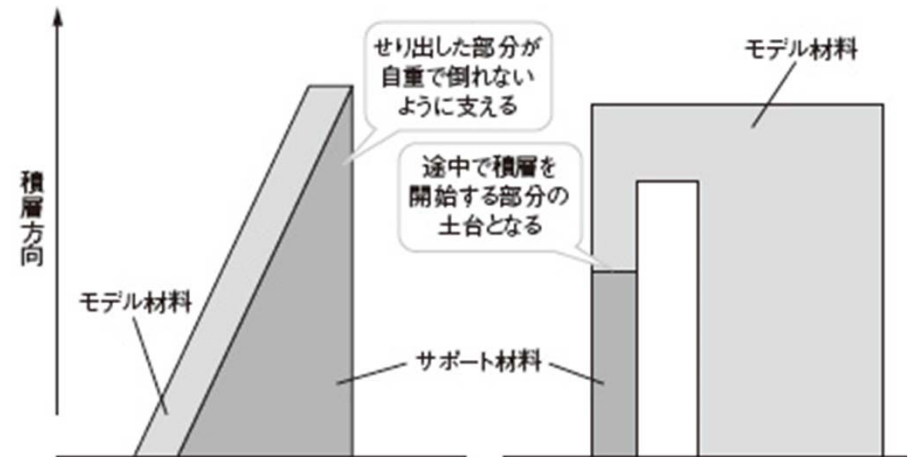
(b) Island



(c) Ceiling within a arch



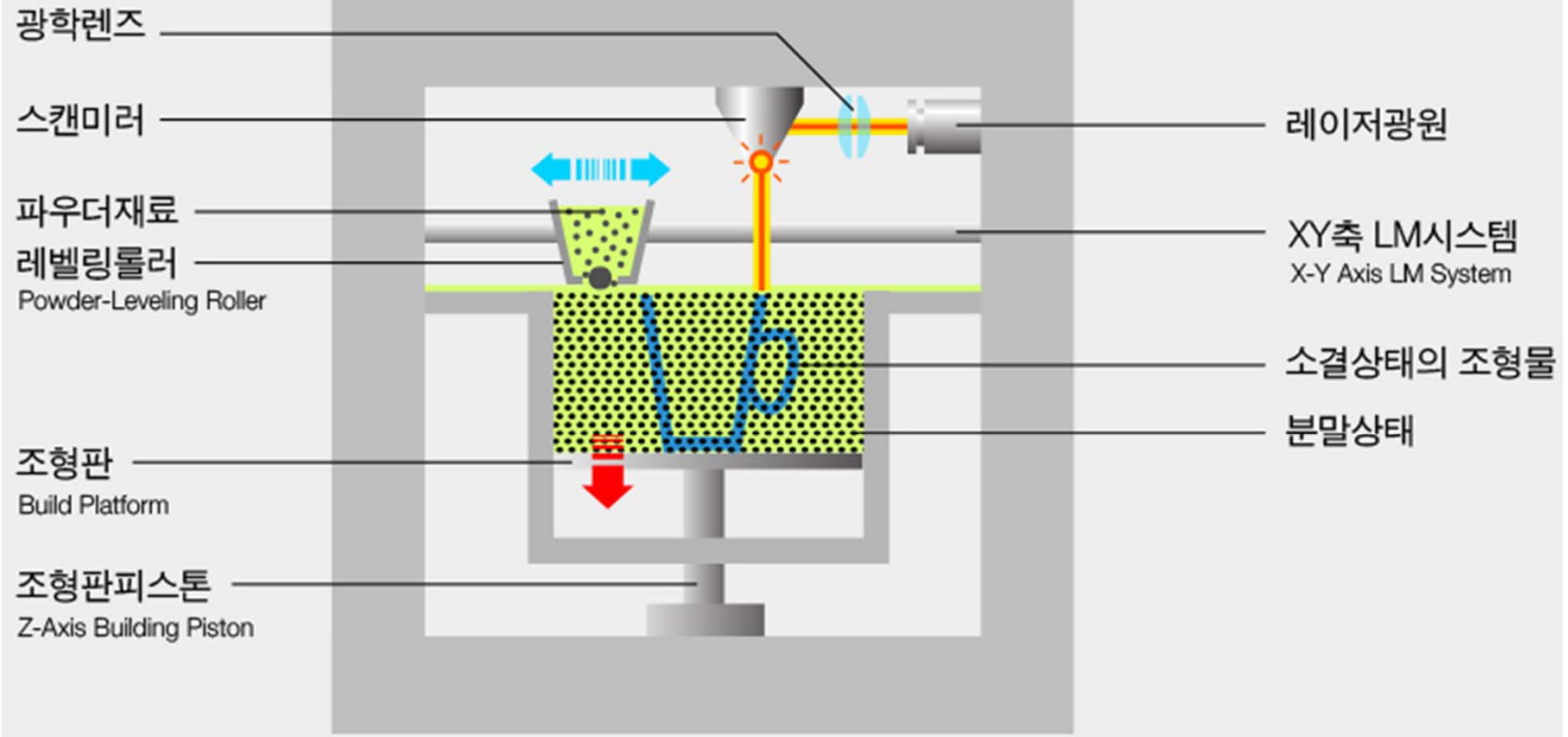
(d) Ceiling



SLS 3D프린터



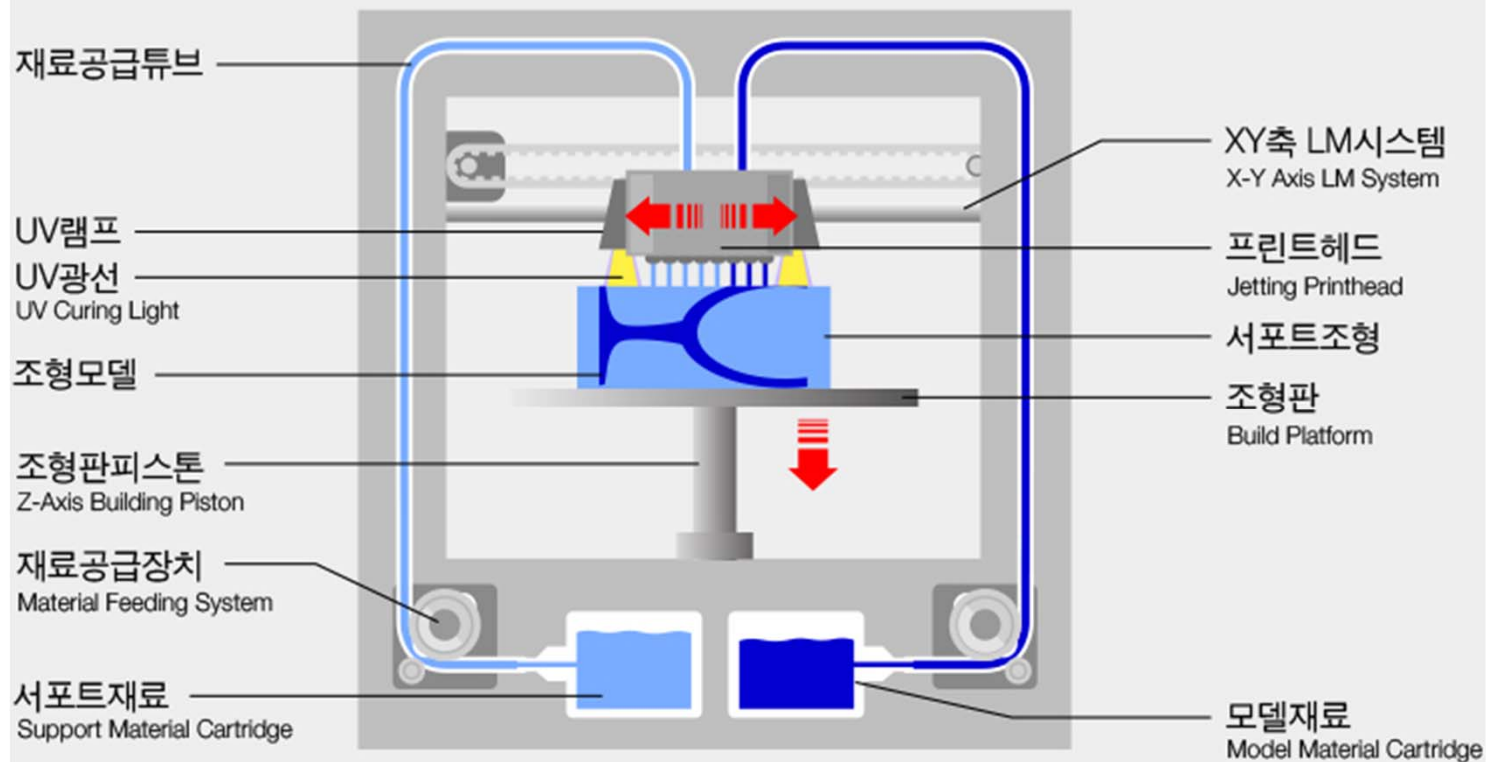
Powder Bed Fusion
SLS





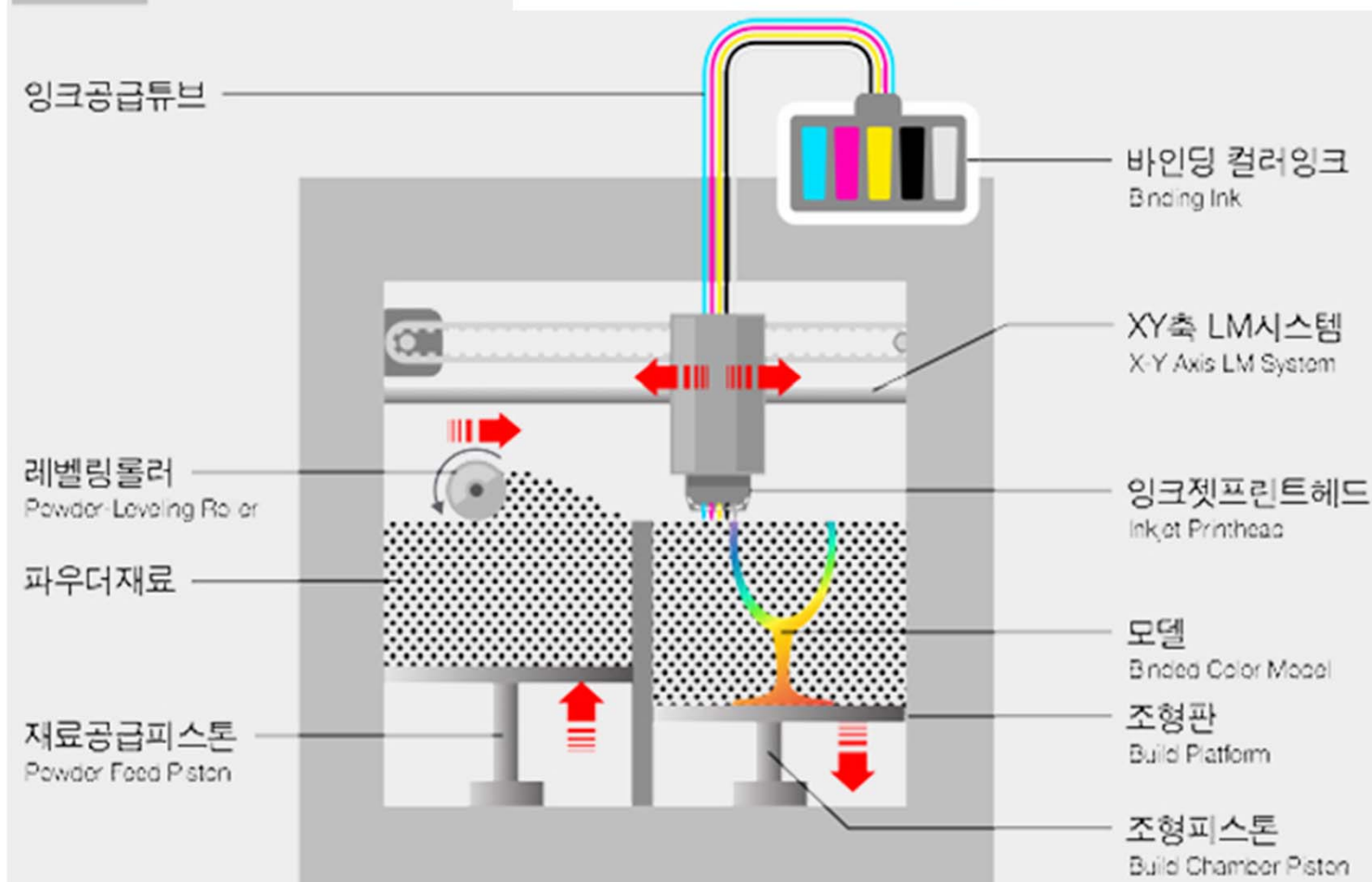
Material Jetting / dispens Polyjet/MJM

Material Jetting방식 3D프린터의 구조와 원리 / Polyjet 출력물예시[stratasys]

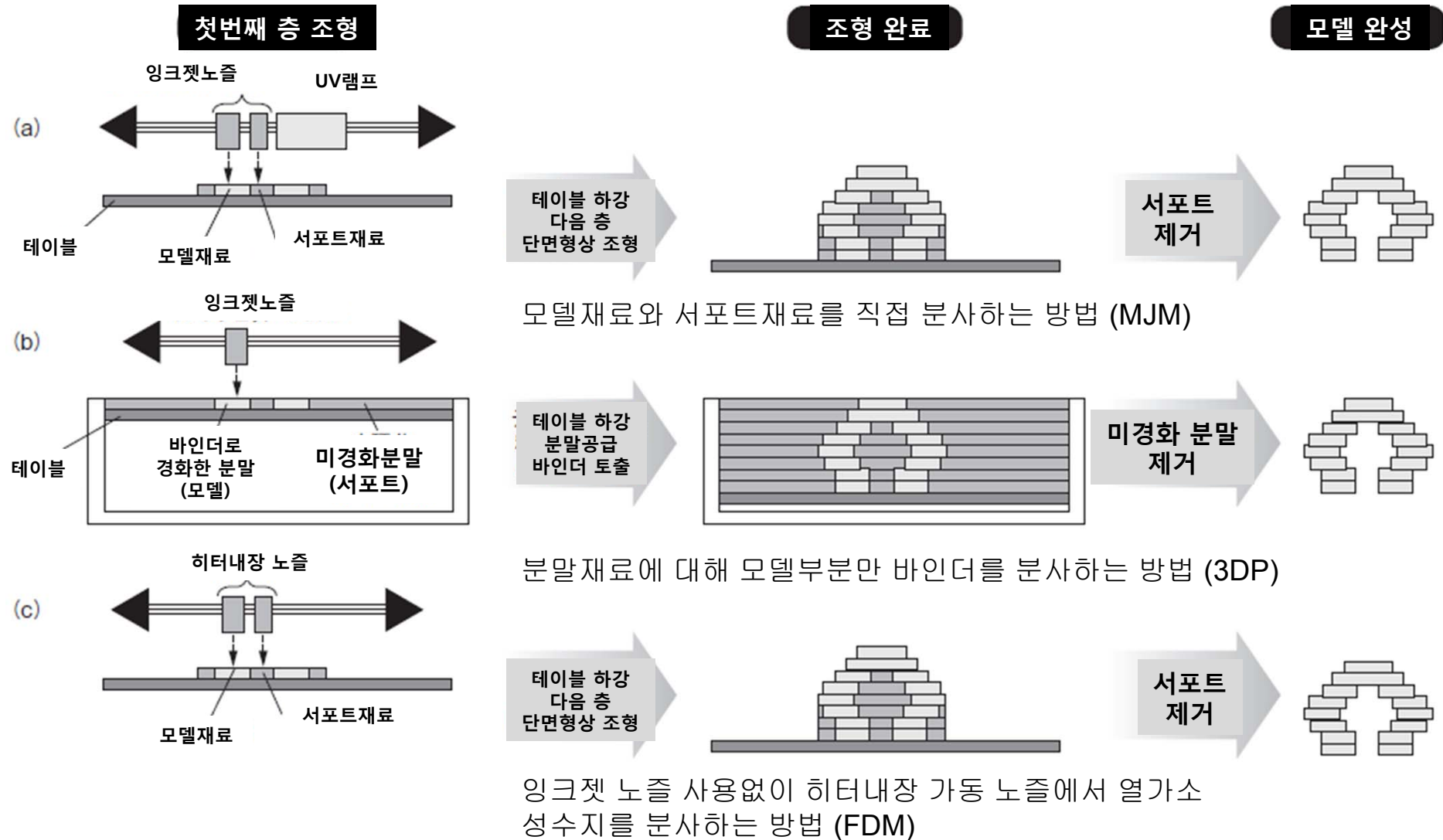




Binder Jetting 3DP

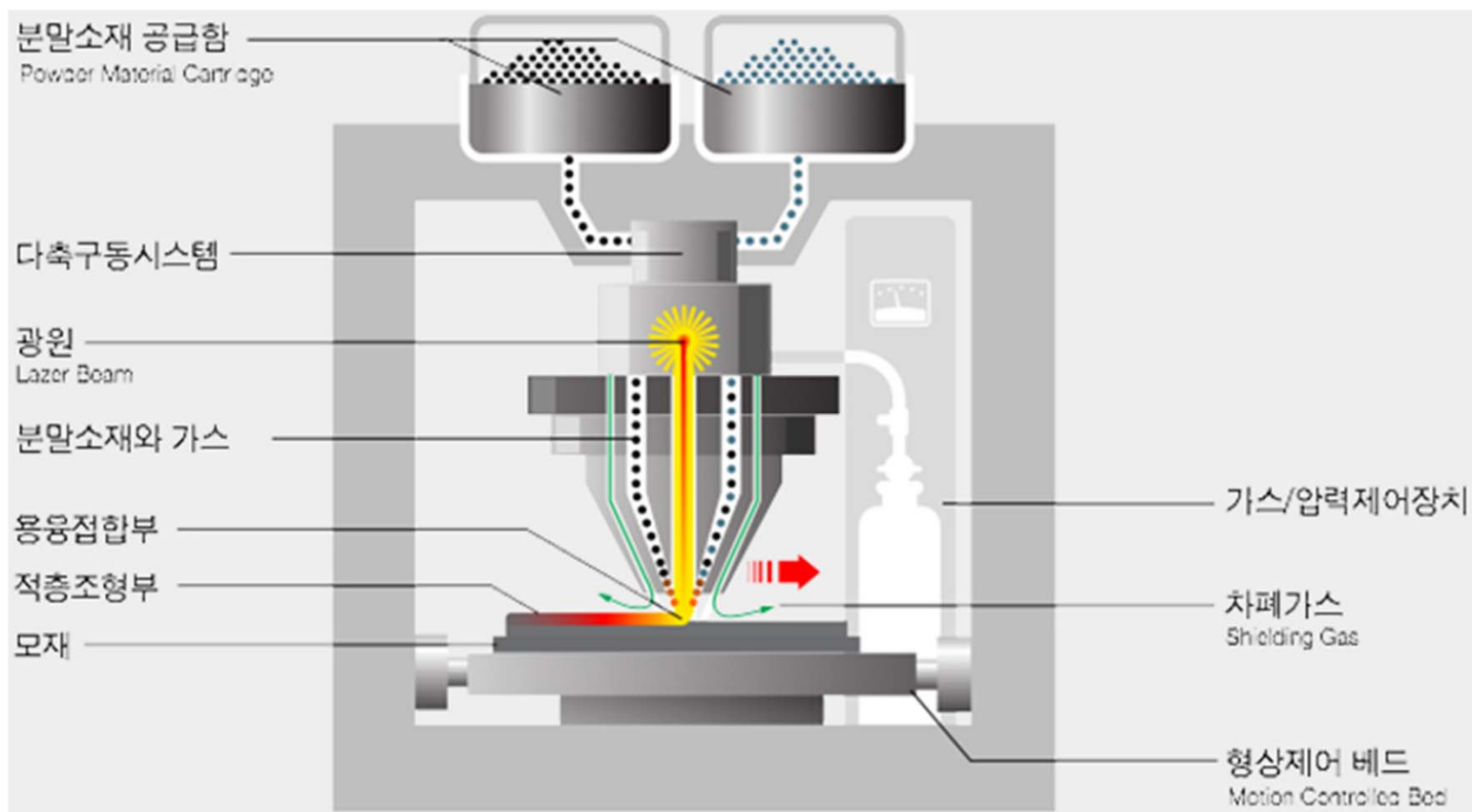


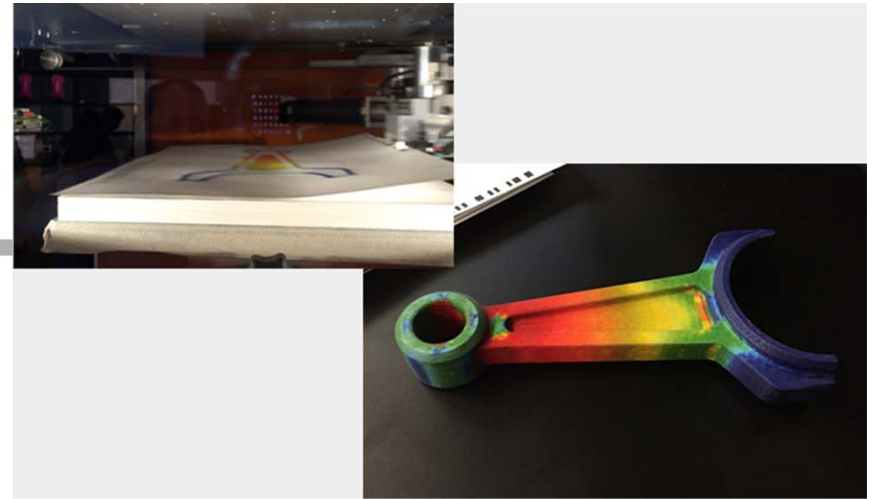
분사 방법



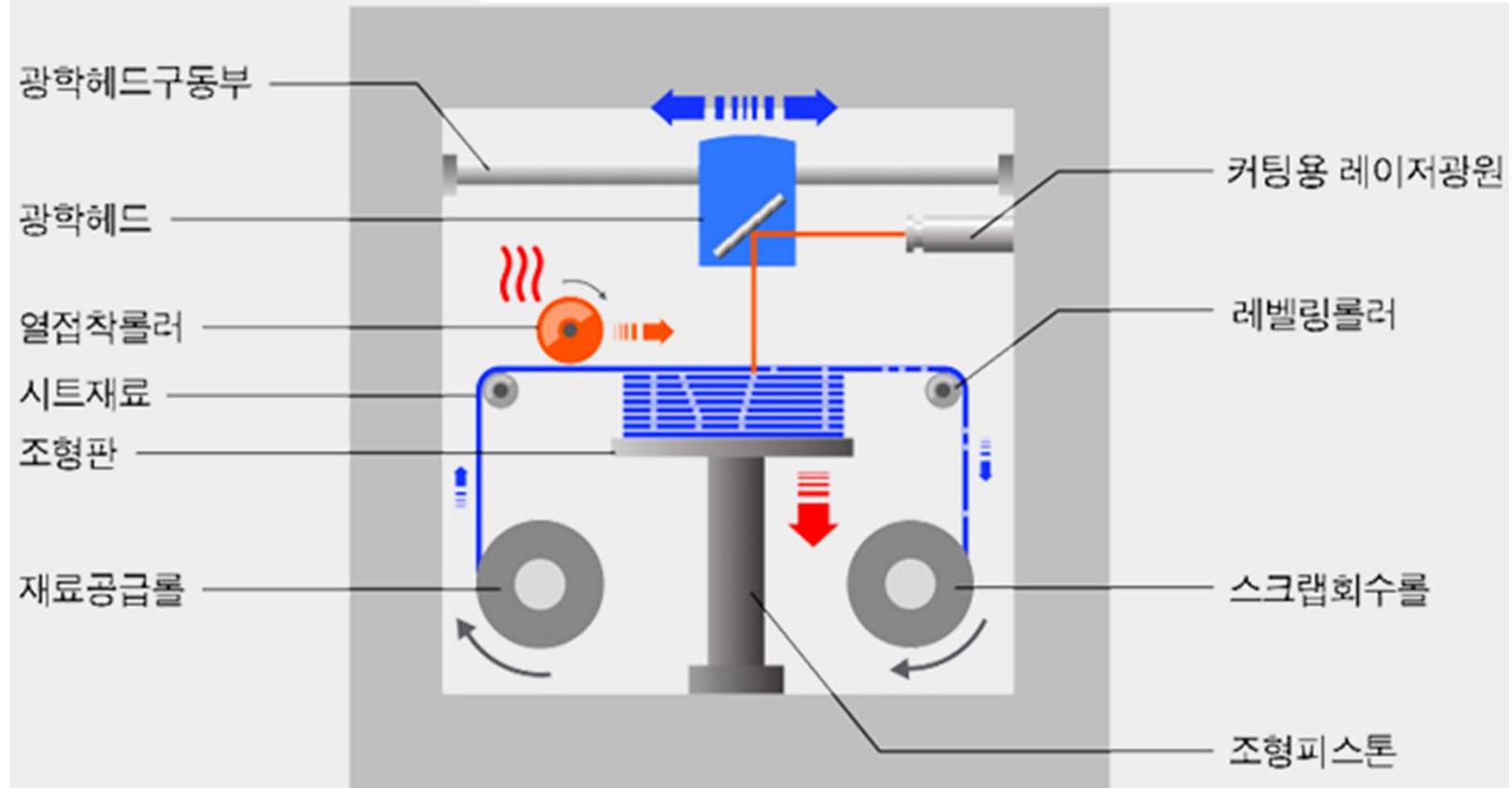


Direct Energy Deposition DED





Sheet Laminating LOM



7 Categories of AM Technologies (1)

- Material Extrusion
 - material is selectively dispensed through a nozzle or orifice
 - [FDM \(Fused Deposition Modeling\)](#), Contour Crafting
- Photo Polymerization
 - liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerization
 - [SLA \(Stereolithography\)](#), [DLS \(Digital Light Synthesis\)](#)
- Material jetting
 - droplets of build material are selective deposited
 - [PolyJet](#)
- Binder jetting
 - liquid bonding agent is selectively deposited to join powder materials
 - [Binder 3DP](#)

7 Categories of AM Technologies (2)

- Powder bed fusion
 - thermal energy selectively fuses regions of a powder bed
 - [SLS \(Selective Laser Sintering\)](#), [SLM \(Selective Laser Melting\)](#), [DMLS \(Direct Metal Laser Sintering\)](#), [EBM \(Electron Beam Melting\)](#)
- Sheet lamination
 - sheets of material are bonded to form an object
 - [LOM \(Laminated Object Manufacturing\)](#)
- Direct Energy deposition
 - focused thermal energy is used to fuse materials by melting as the material is being deposited
 - [LENS \(Laser Engineered Net Shaping\)](#), EBW (Electron Beam Welding)

Classification of Additive Manufacturing Processes by ASTM International

CATEGORIES	TECHNOLOGIES	PRINTED "INK"	POWER SOURCE	STRENGTHS / DOWNSIDES
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling (FDM)	Thermoplastics, Ceramic slurries, Metal pastes	Thermal Energy	• Inexpensive extrusion machine • Multi-material printing • Limited part resolution • Poor surface finish
	Contour Crafting			
Powder Bed Fusion	Selective Laser Sintering (SLS)	Polyamides /Polymer	High-powered Laser Beam	• High Accuracy and Details • Fully dense parts • High specific strength & stiffness • Powder handling & recycling • Support and anchor structure • Fully dense parts • High specific strength and stiffness
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Atomized metal powder (17-4 PH stainless steel, cobalt chromium, titanium Ti6Al-4V), ceramic powder		
	Selective Laser Melting (SLM)			
	Electron Beam Melting (EBM)		Electron Beam	
Vat Photopolymerization	Stereolithography (SLA)	Photopolymer, Ceramics (alumina, zirconia, PZT)	Ultraviolet Laser	• High building speed • Good part resolution • Overcuring, scanned line shape • High cost for supplies and materials
Material Jetting	Polyjet / Inkjet Printing	Photopolymer, Wax	Thermal Energy / Photocuring	• Multi-material printing • High surface finish • Low-strength material
Binder Jetting	Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)	Polymer Powder (Plaster, Resin), Ceramic powder, Metal powder	Thermal Energy	• Full-color objects printing • Require infiltration during post-processing • Wide material selection • High porosities on finished parts
Sheet Lamination	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Plastic Film, Metallic Sheet, Ceramic Tape	Laser Beam	• High surface finish • Low material, machine, process cost • Decubing issues
Directed Energy Deposition	Laser Engineered Net Shaping (LENS) Electronic Beam Welding (EBW)	Molten metal powder	Laser Beam	• Repair of damaged / worn parts • Functionally graded material printing • Require post-processing machine

AM Technologies / Base Materials (1)

Technology	AM process	Typical materials	Advantages	Disadvantages
Stereolithography	Vat polymerization	Liquid photopolymer, composites	Complex geometries; detailed parts; smooth finish	Post-curing required; requires support structures
Digital light processing	Vat polymerization	Liquid photopolymer	Allows concurrent production; complex shapes and sizes; high precision	Limited product thickness; limited range of materials
Multi-jet modeling (MJM)	Material jetting	Photopolymers, wax	Good accuracy and surface finish; may use multiple materials (also with color); hands-free removal of support material	Range of wax-like materials is limited; relatively slow build process
Fused deposition modeling	Material extrusion	Thermoplastics	Strong parts; complex geometries	Poorer surface finish and slower build times than SLA
Electron beam melting	Powder bed fusion	Titanium powder, cobalt chrome	Speed; less distortion of parts; less material wastage	Needs finishing; difficult to clean the machine; caution required when dealing with X-rays
Selective laser sintering	Powder bed fusion	Paper, plastic, metal, glass, ceramic, composites	Requires no support structures; high heat and chemical resistant; high speed	Accuracy limited to powder particle size; rough surface finish
Selective heat sintering	Powder bed fusion	Thermoplastic powder	Lower cost than SLS; complex geometries; no support structures required; quick turnaround	New technology with limited track record
Direct metal laser sintering	Powder bed fusion	Stainless steel, cobalt chrome, nickel alloy	Dense components; intricate geometries	Needs finishing; not suitable for large parts

AM Technologies / Base Materials (2)

Technology	AM process	Typical materials	Advantages	Disadvantages
Powder bed and inkjet head printing	Binder jetting	Ceramic powders, metal laminates, acrylic, sand, composites	Full-color models; inexpensive; fast to build	Limited accuracy; poor surface finish
Plaster-based 3D printing	Binder jetting	Bonded plaster, plaster composites	Lower price; enables color printing; high speed; excess powder can be reused	Limited choice of materials; fragile parts
Laminated object manufacturing	Sheet lamination	Paper, plastic, metal laminates, ceramics, composites	Relatively less expensive; no toxic materials; quick to make big parts	Less accurate; non-homogenous parts
Ultrasonic consolidation	Sheet lamination	Metal and metal alloys	Quick to make big parts; faster build speed of newer ultrasonic consolidation systems; generally non-toxic materials	Parts with relatively less accuracy and inconsistent quality compared to other AM processes; need for post-processing
Laser metal deposition	Directed energy deposition	Metals and metal alloys	Multi-material printing capability; ability to build large parts; production flexibility	Relatively higher cost of systems; support structures are required; need for post-processing activities to obtain smooth finish

Technologies and Materials Matrix

Technology	Polymers	Metals	Ceramics	Composites
Stereolithography	●			●
Digital light processing	●			
Multi-jet modeling (MJM)	●			●
Fused deposition modeling	●			
Electron beam melting		●		
Selective laser sintering	●	●	●	●
Selective heat sintering	●			
Direct metal laser sintering		●		
Powder bed and inkjet head printing ¹³	●	●	●	●
Plaster-based 3D printing			●	●
Laminated object manufacturing ¹⁴	●	●	●	●
Ultrasonic consolidation		●		
Laser metal deposition		●		●

Review

- Printing Attributes of AM processes
 - Build time
 - Feature resolution
 - Surface quality
 - Anchor and support material
 - Post-processing
- Building Capabilities of AM
 - Multi-material printing
 - Printed assemblies
 - Embedding foreign components
 - Printing circuits, sensors, and batteries

AM vs. Traditional Manufacturing

- **Advantages of AM**
 - Design complexity
 - Speed to market
 - Waste reduction
- **Advantages of traditional manufacturing**
 - Mass production
 - Choice of materials
 - Manufacturing large parts
- **Two key areas of benefit**
 - Workflow streamlining
 - Flexible design and product customization

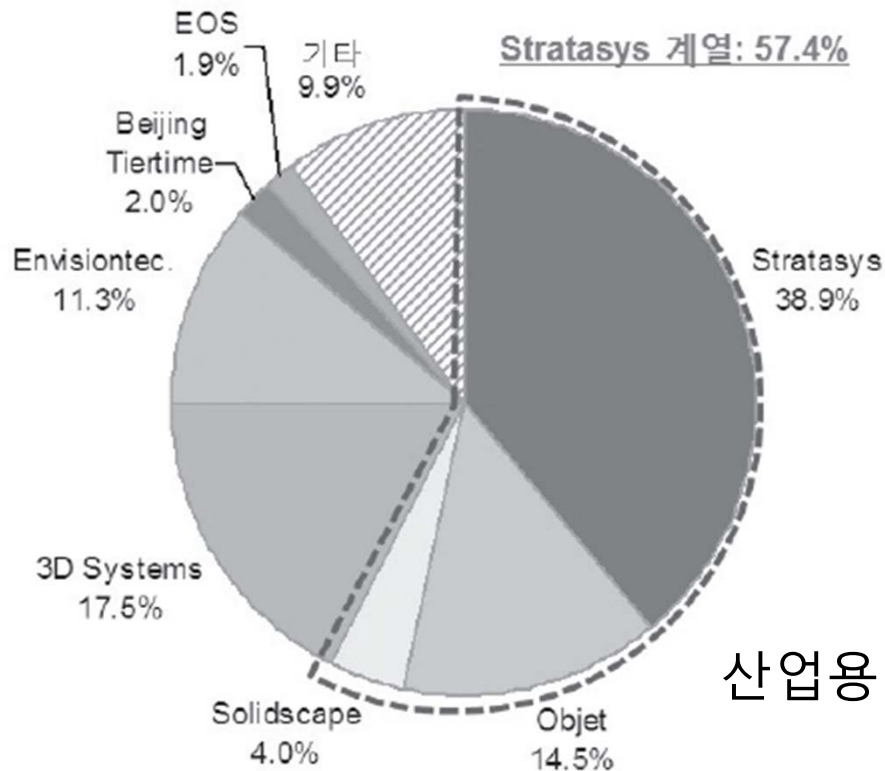
3D 프린팅의 장점

- 시제품 제작 비용 및 시간 절감
- 다품종 소량생산, 손쉬운 맞춤형 제작
- 복잡한 형상제작 및 재료비 절감
- 제조공정 간소화, 인력이 많이 소요되지 않아 인건비, 조립비용 절감
- 기존 절삭방식에서는 불가능한 중공형상 및 복잡한 내부형상 가능
- 부품제조가 아니라 일체화된 어셈블리된 형상을 한번에 조형
- 복수의 상이한 재료를 사용한 일체조형 가능
- 누가 몇 개를 만들더라도 매회 동일한 제품 조형 가능
- 복수의 모델을 한번에 조형 가능
- 생산자의 기술력에 크게 의존하지 않음

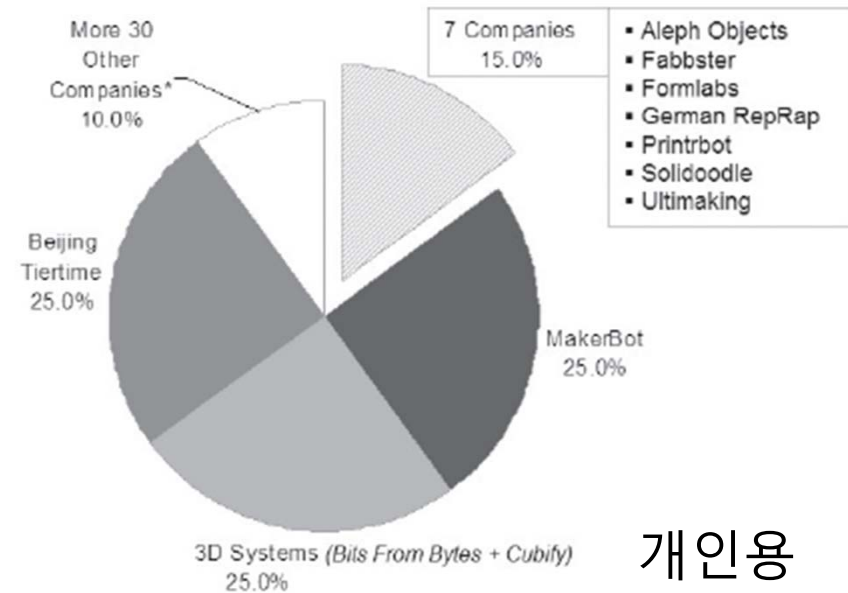
3D 프린팅의 단점

- 조형속도가 느리고 규모가 큰 물체 조형에 한계
- 표면해상도가 아직 높지 않음
- 적층방식제조로 단층방향의 힘에 약하고 강도가 약함
- 광경화성수지, 레이저소결수지, ABS필라멘트 및 금속소재 일부만 활용 가능
- High-end 산업용 장비재료는 kg당 수백 달러, Low-end 개인용장비는 kg당 수십달러에 달하는 등 재료비가 고가
- 높은 디자인 해상도로 인하여 상당한 컴퓨팅 능력 요구
- 소멸된 특허권 등이 있긴 하나 성격상 특허의 경계가 모호하고 이로 인한 지적재산권 분쟁의 소지
- 소재와 공정에 대한 규격이나 표준이 정립되어 있지 않음

3D 프린터 시장 점유율 (2012년 기준)



산업용



개인용

- [3D Systems: Manufacturing the Future](#)
- [Stratasys](#)

ZPrinter 450

- 특징

- 제작 크기: 8 x 10 x 8인치(203 x 254 x 203mm)
- 수직 제작 속도: 0.9인치/시(23mm/시)
- 레이어 두께: 0.0035~0.004인치(0.089~0.102mm)
- 최소 선폭: 0.006인치(0.15mm)
- 해상도: 300 x 450dpi
- 색상: 180,000 색(2개의 프린트 헤드)

- 사양

- 출력용 파일 형식: STL, VRML, PLY, 3DS, ZPR
- 장비 규격: 48 x 31 x 55인치(122 x 79 x 140cm)
- 장비 무게: 425lbs(193kg)
- 전력 요건: 100-240V, 15-7.5A



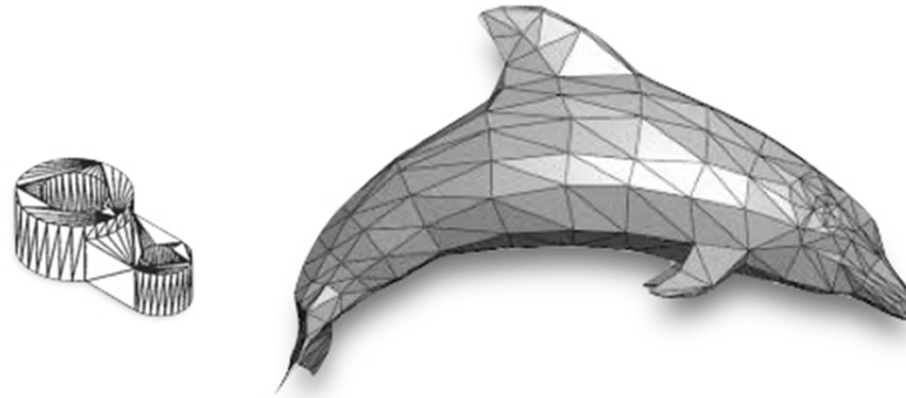
File Formats

- STL (Standard Tessellation Language)
 - 3D Systems 에서 개발, ASCII와 BINARY로 표현
 - 컬러 값을 가지고 있지 않는 3차원 지오메트리 형상을 표현
- WRL (VRML 파일, 보통 "월드(world)"라 부름)
 - 3D 폴리곤의 버텍스와 에지 및 표면 색깔, 텍스처 UV 매핑, 반사 및 투명 효과 등을 표현
- PLY (주로 3D 스캐너로부터 3 차원 데이터를 저장)
 - 평면 다각형의 리스트와 같은 단일 객체의 비교적 간단한 설명을 지원
- AMF (Additive Manufacturing File)
 - XML 기반의 데이터 교환용 오픈 소스 프레임 워크
 - 기능별로 등급을 나눈 디지털 재료를 포함한 복합재료, 다채로운 색상, 복잡한 구조를 표현

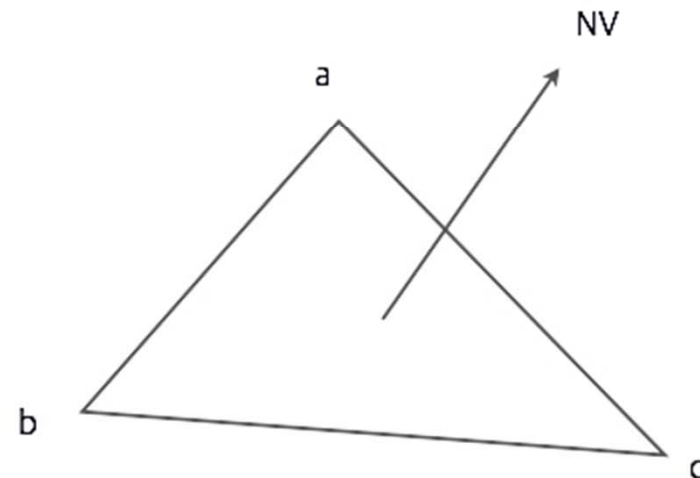
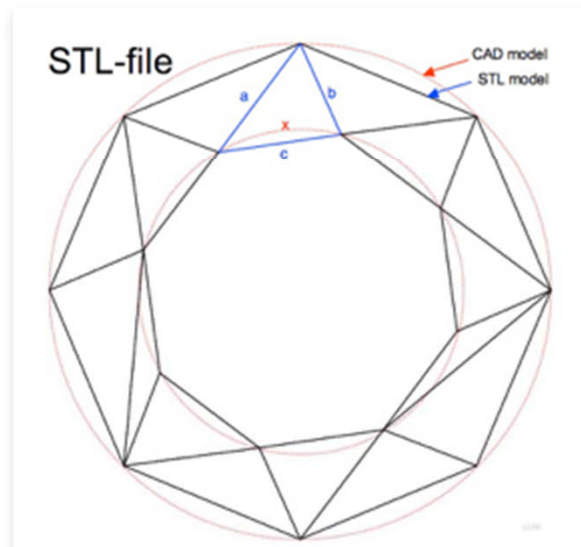
STL

STL파일의 정의

Surface Tessellation Language
Stereo-Lithography
Standard Transform Language



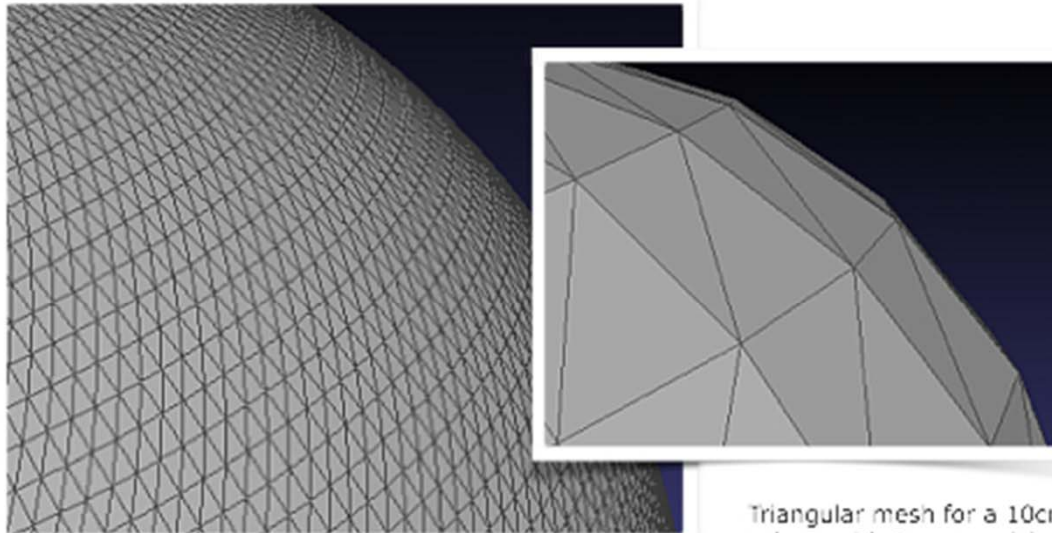
STL(stereo lithography) 파일 형식은 미국 3D Systems사가 1988년 제정한 인터페이스 표준 데이터 형식이 간단하며 복잡한 CAD 시스템의 지원과 양호한 크로스플랫폼이 필요치 않아, 여러 분야에서 광범위하게 응용. 거의 모든 CAD 시스템에서 설계한 3D모델을 STL 형식으로 변환가능.



STL vs. AMF

STL 형식은 유한 원소의 그리드 구분과 유사, 이것은 물체 표면을 삼각형으로 구분하여, 삼각형 패치로 3D실물의 표면을 구성하여 유사하게 구현. 삼각형 꼭지점 좌표와 삼각형의 노멀 벡터의 묘사를 통해 3D 모형의 기하 특징을 표시
STL 파일은 이진법 형식과 ASCII 코드 형식 STL 파일이 폭 넓게 응용되고 있으나 파일 형식의 결함으로 데이터가 너무 많고, 토폴로지 정보 부족, 많은 데이터 량, 데이터 에러 등의 문제있음.

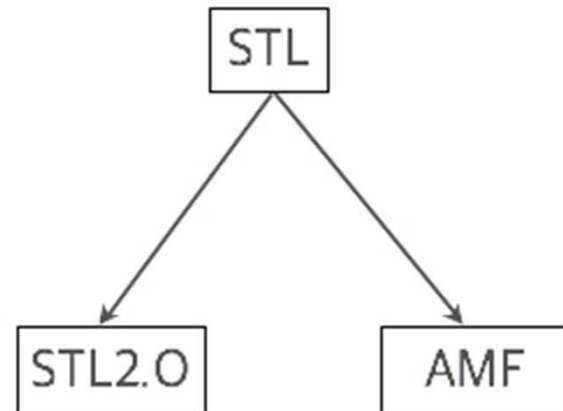
STL files inefficient for High Resolution 3D printers



Triangular mesh for a 10cm sphere with 10 micron precision
50,000 triangles / 350,000 lines / 13MB

Triangular mesh for a 10cm sphere with 1mm precision
506 triangles / 0.13MB

STL files contains only vertex and facet definitions.



	STL Format (Binary)	AMF Format (Curved Triangles)
PRECISION	10 micron	10 micron
NO. OF MESH TRIANGLES	49,500	320
FILE SIZE	2400k	10k

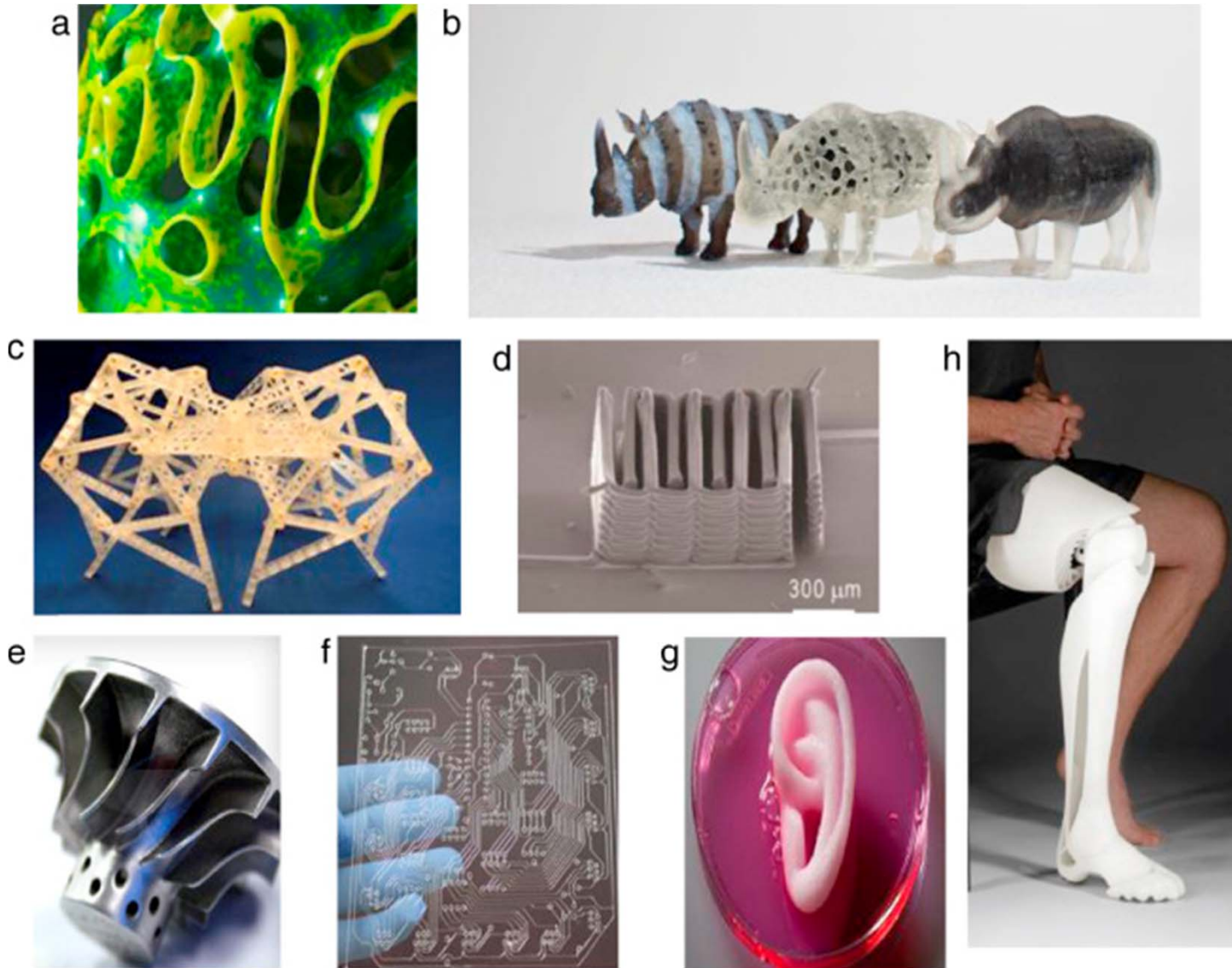
3D Printing in Industries



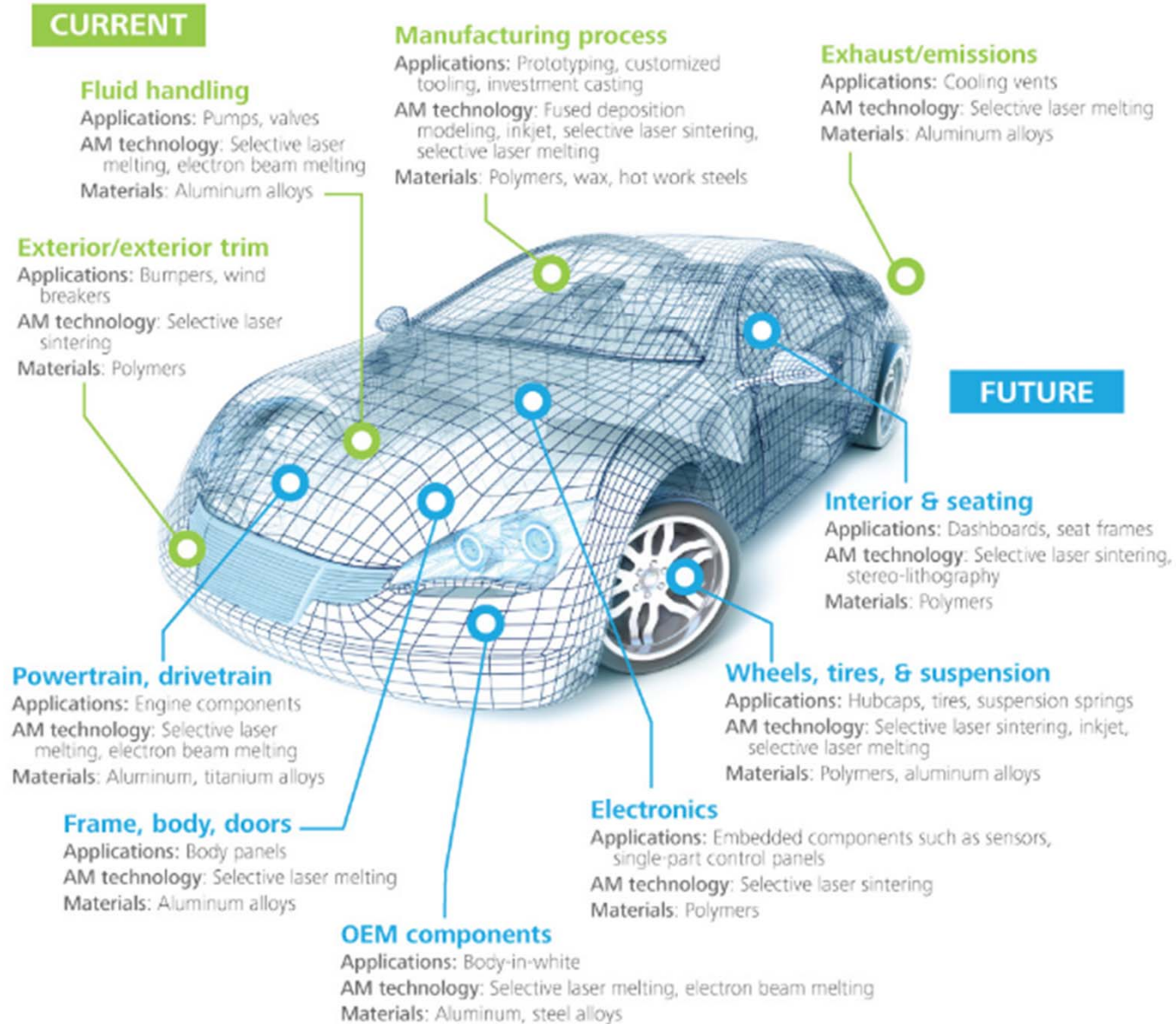
AM Applications

INDUSTRIES	CURRENT APPLICATIONS	POTENTIAL FUTURE APPLICATIONS
 COMMERCIAL AEROSPACE AND DEFENSE¹⁷	• Concept modeling and prototyping • Structural and non-structural production parts • Low-volume replacement parts	• Embedding additively manufactured electronics directly on parts • Complex engine parts • Aircraft wing components • Other structural aircraft components
 SPACE	• Specialized parts for space exploration • Structures using light-weight, high-strength materials	• On-demand parts/spares in space • Large structures directly created in space, thus circumventing launch vehicle size limitations
 AUTOMOTIVE¹⁸	• Rapid prototyping and manufacturing of end-use auto parts • Parts and assemblies for antique cars and racecars • Quick production of parts or entire	• Sophisticated auto components • Auto components designed through crowdsourcing
 HEALTH CARE¹⁹	• Prostheses and implants • Medical instruments and models • Hearing aids and dental implants	• Developing organs for transplants • Large-scale pharmaceutical production • Developing human tissues for regenerative therapies
 CONSUMER PRODUCTS/RETAIL	• Rapid prototyping • Creating and testing design iterations • Customized jewelry and watches • Limited product customization	• Co-designing and creating with customers • Customized living spaces • Growing mass customization of consumer products

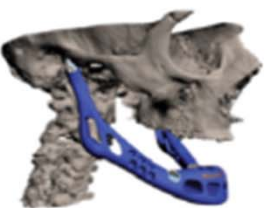
. Examples of objects that can be printed using AM



AM in an Automobile



활용 분야 (1)

활용 분야	사례	예	활용 분야	사례	예
자동차	대시보드, 바디패널 등 시제품 제작		완구	완구류 모형 제작	
의료/ 치과	인공치아나 인공뼈, 인공 관절 같은 보형물 제작		패션	귀금속, 의류, 구두 등의 시제품 견본 제작	
항공/ 우주	무인정찰기 주요 부품 제작 (연료분사장치, 연소기 부품 등)		건축	건축 모형 제작	
엔터테 인먼트	영화용 캐릭터 제작		소비자 가전	소비자가 원하는 가전 직접 제조 (조립하는 헤드폰)	

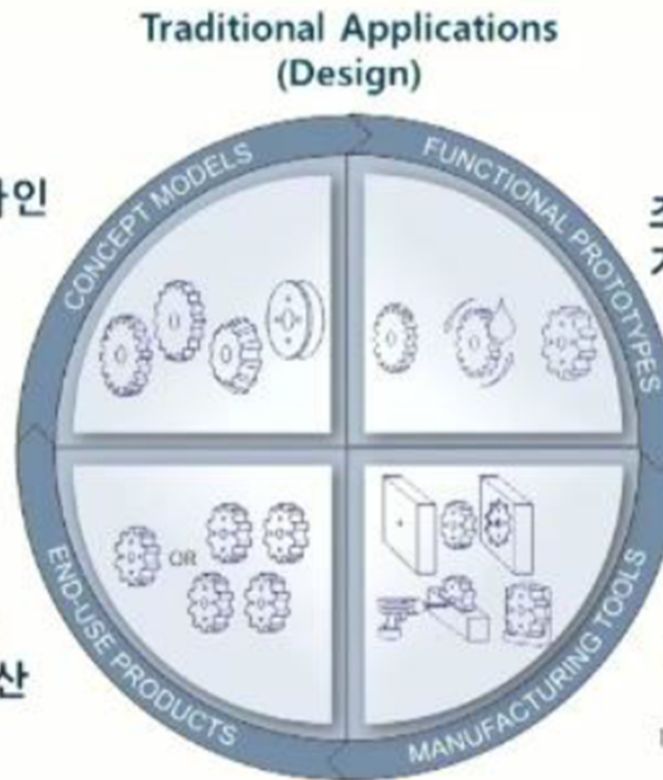
활용 분야 (2)



빠른 디자인
수정



조립성,
기능성 Test



Jig &
Fixture



다품종
소량생산



Direct Digital Manufacturing
(Manufacturing)

52억 달러 | 2020년 전 세계 3D 프린팅 산업 규모 전망치



제작기간 : 1년
제작비용 : 20만 달러



주문생산 기타

제작기간 : 100~300시간
제작비용 : 3,000~5,000달러

(Popular Science, December 2012)



뼈다귀 램프

제작기간 : 3시간
제작비용 : 300달러



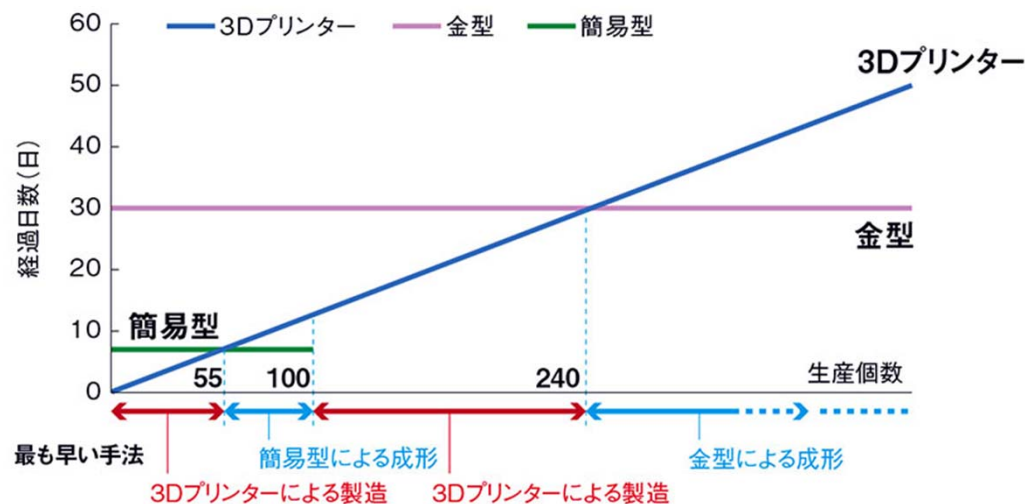
영국 사우샘프턴대가 알루미늄 소재를 이용해 만든 무인비행기.



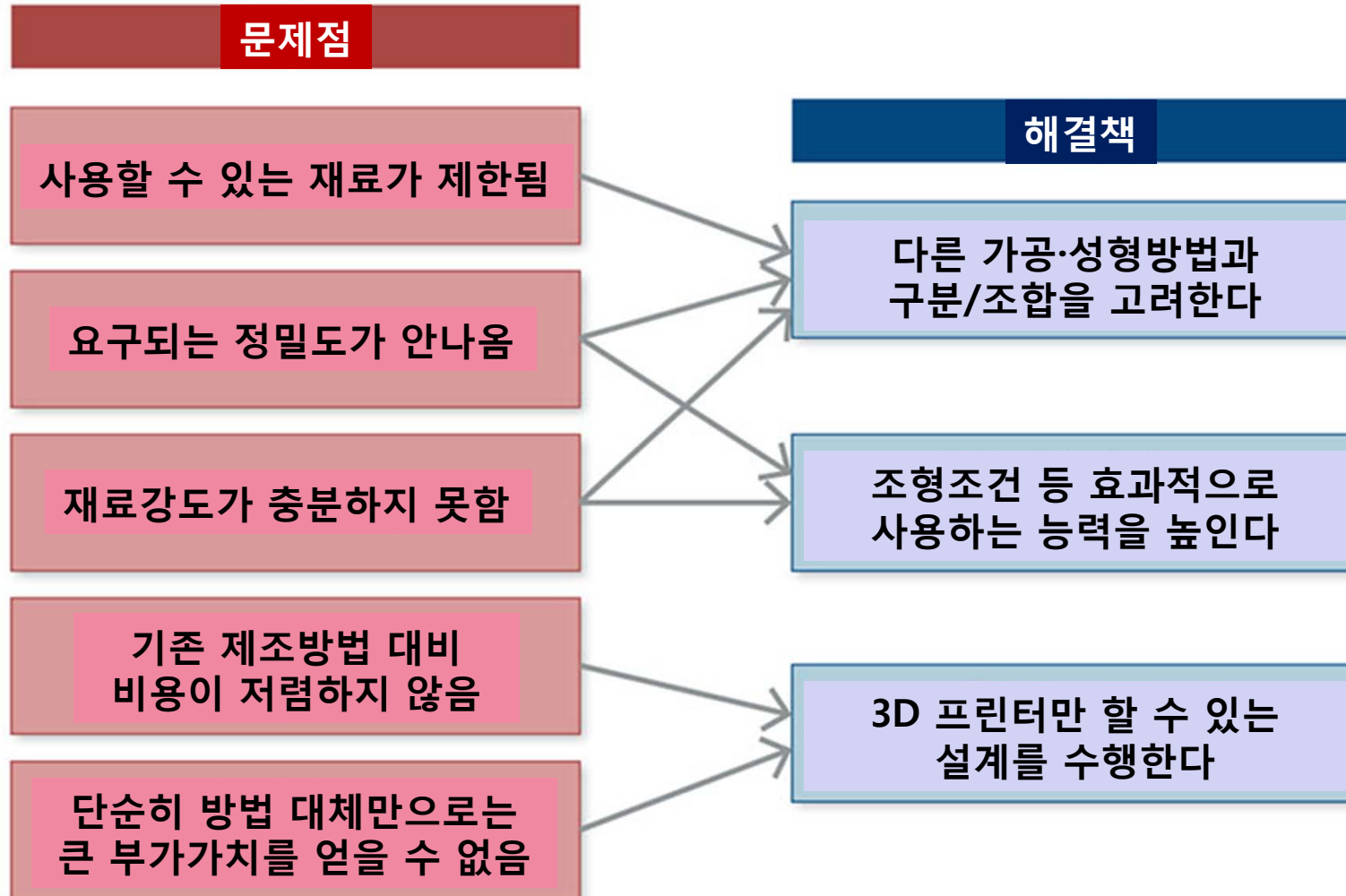
(좌)미국 패션업체 콘티넨이 만든 여성용 구두 '스트렉트'. / (우)유럽항공방위우주산업이 제작한 지전거 에어바이크.

3D 프린터의 활용

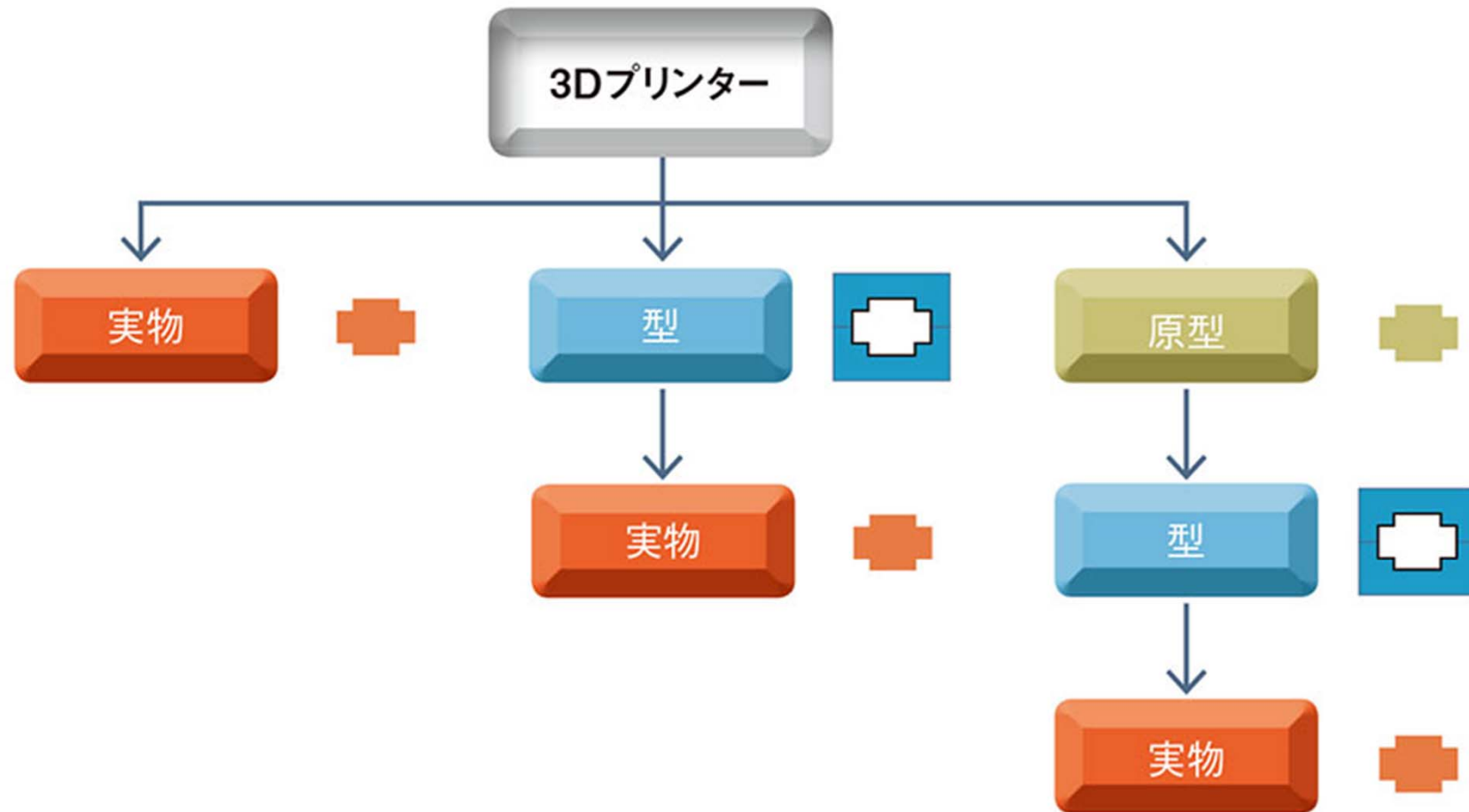
- 시작품 제작
 - 제품개발 프로세스의 기간단축 및 비용절감
 - 실물을 통한 검토회수 증가로 품질향상
- 최종 제품/부품의 제조수단
 - 납기단축
 - 제품의 커스터마이징화
 - 기타: 재고삭감, 원가저감



3D 프린터를 제조장비로 활용?



1. 3D 프린터로 실제 부품을 제작하는 방법



2. 효과적 활용, 3. 3D 프린터만 가능?

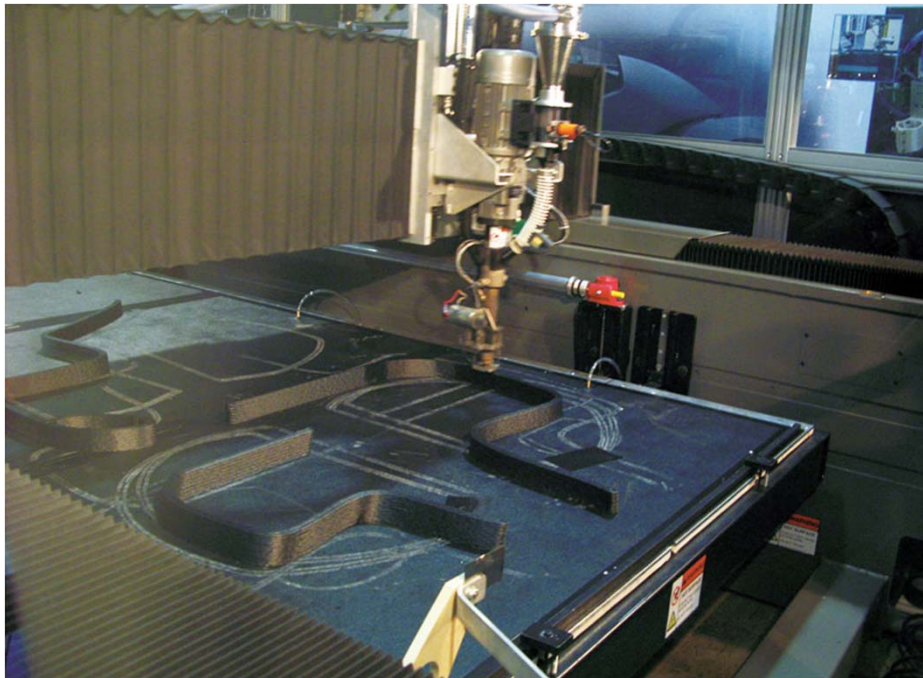
- 장비의 기본사양을 상세히 이해
- 카탈로그 사양 이외에 실제 조건과 형상재현성/정밀도 관계를 체크
- 자동화가 많이 되어 있어도 사용자가 개입할 수 있는 파라미터
 - 설치환경 제어(온도 등), 적층방향, 서포트 부착 방법, 서포트 제거를 포함한 후처리
- Data Format
 - STL: 형상 정보이외에 표현 불가능
 - AMF(Additive Manufacturing File Format) 표준화: 장비설정



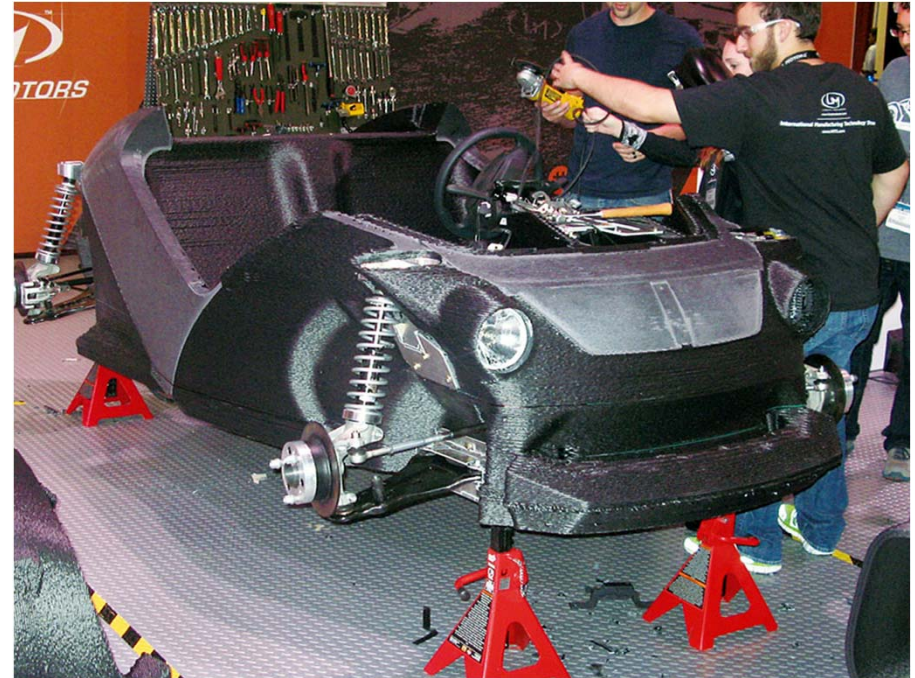
금형의 냉각수관
(직선적인 수관의 조합 →
3차원적 복잡한 경로)

자동차: Strati (2015.02)

- [Local Motors](#) + [Oak Ridge National Laboratory](#)
([Manufacturing Demonstration Facility](#))
 - 3D Printer (BAAM, Cincinnati사), 5축 절삭가공기, 조립공간 (컨베이어, 대차 등 불필요)
 - 차체질량 550kg (일반 차체+도어+후드+내장부품: 400kg)
 - 부품수가 1/400로 줄어듦 (EV: 2만개→50개, 일체화)
 - (기존)철판을 프레스로 성형하여 용접 등으로 조립
 - (3D 프린터) 충격흡수구조도 1개 부품 내부로 제조
 - 강도확보 (미국 법규): ABS 80%, carbon fiber 20%
 - 5축 가공기: 조립부 형상 정밀도 향상, 외관 매끄럽게, 도장? Wrapping film
 - 조형 44시간, 조립 24시간



CAD



3D Printing - 53

BAAM

- Big Area Additive Manufacturing
- 개발: ORNL(Oak Ridge National Laboratory)
- 제조사: 미국 Cincinnati사 (공작기계)
- 세계 최대 3D 프린터 (2015.03 기준)
- 노즐: 직경 8mm, 초당 이동거리 76mm
- 적층 두께: 4mm
- 제조영역: 6.0 x 2.3 x 1.8m
- 속도: 45kg/hr



4.0 x 2.0 x 0.9m, 16kg/hr(탄소섬유강화ABS)

Microfactory

- 수송비용절감
- 지역생산, 지역소비로 제품을 개발/생산
- 고객이 제품설계나 디자인에 참여하여 공동 작업



디자인을 단기간에 변경/조정 가능



Rally Fighter (Phoenix, Arizona)

Mass Customization

- Order made: 고객요구에 대한 개별최적화
- Mass customization: 대량생산과 동등한 가격과 기간에 제공 가능 (제품의 고부가가치화)
 - 사례: 명함집 (이름과 회사명이 하나씩 다름)
 - 조형시간: 약1시간 (조형영역에 여럿 배치하면 더 줄임)
 - 분말수지를 레이저로 용융결합하는 방식
 - 적층두께: 약10mm
 - 힌지부분 일체: 조립불필요



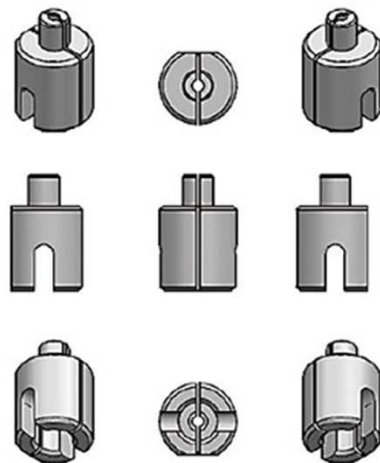
Precision vs. Cost/Time

	3D Printing	절삭가공	사출성형
정밀도	$\pm 0.1 \sim 0.3\text{mm}$	$\pm 0.01\text{mm}$	$\pm 0.03\text{mm}$
1개당 시간	3.7시간	17시간	25초
1개당 가격(재료비)	20,000Yen	129,000Yen	70Yen
초기(준비) 시간	0	8시간	1~1.5개월
초기(준비) 가격	0	60,800Yen	2,000,000Yen

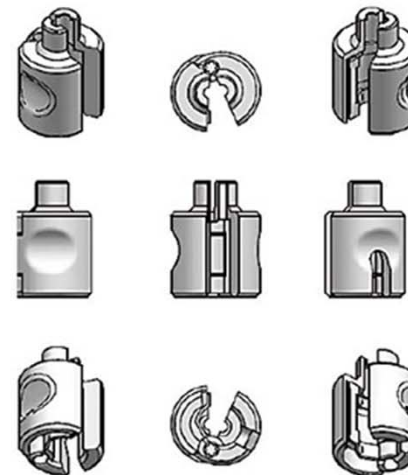
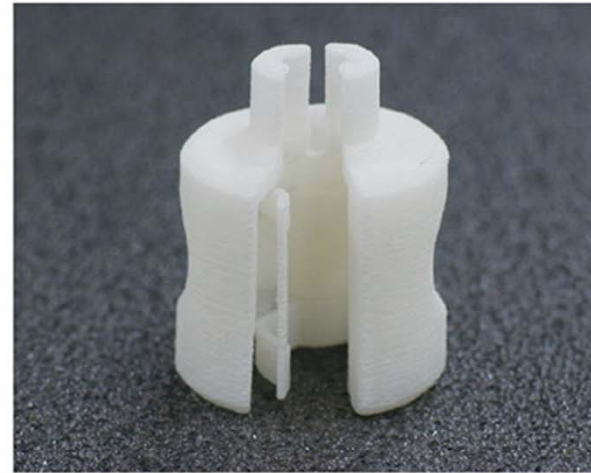
- 절삭가공: 단순한 형상, 고 정밀도 요구
- 3D 프린팅: 복잡한 형상 (내부의 공동을 설계, 복수부품 일체화→소형화, 경량화)

제조방법 변경으로 기능 강화

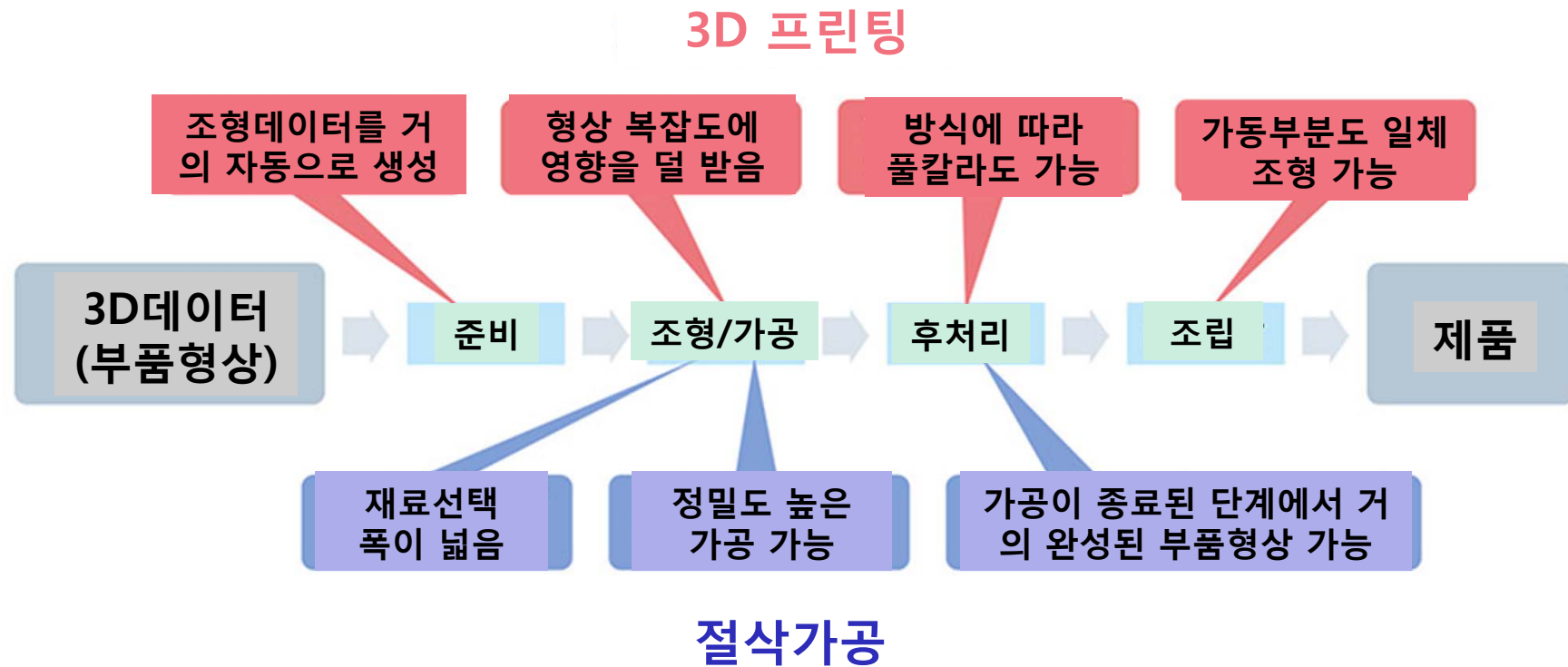
기존제품 (절삭가공/PP)



개량제품 (3D프린팅/PA)



전체 프로세스로 검토



3D 프린팅	절삭가공
복잡한 형상에 대응하기 쉽다 저렴한 가격으로 단시간에 완성시킬 수 있다	높은 치수정밀도를 실현할 수 있다 사용할 수 있는 재료가 다양하다