

<https://doi.org/10.22974/jkda.2023.61.7.003>

투고일 : 2022. 11. 4

심사일 : 2022. 11. 21

게재확정일 : 2023. 6. 8

# 광경화성 액상수지경화방식 이용한 치과용 3D 프린터 종류와 특성

문원준, Enshi Jiang, 최유경, 임범순, 정신혜

서울대학교 치의학대학원 치과생체재료과학교실

## ORCID ID

Wonjoon Moon, [ID](https://orcid.org/0000-0003-2875-3760) <https://orcid.org/0000-0003-2875-3760>Enshi Jiang, [ID](https://orcid.org/0000-0003-1955-5420) <https://orcid.org/0000-0003-1955-5420>Yukyung Choi, [ID](https://orcid.org/0000-0002-9664-9343) <https://orcid.org/0000-0002-9664-9343>Bum-Soon Lim, [ID](https://orcid.org/0000-0003-3112-0227) <https://orcid.org/0000-0003-3112-0227>Shin Hye Chung, [ID](https://orcid.org/0000-0002-9037-1950) <https://orcid.org/0000-0002-9037-1950>

## ABSTRACT

### Introduction to photopolymerization-based dental 3D printers

Wonjoon Moon, Enshi Jiang, Yukyung Choi, Bum-Soon Lim, Shin Hye Chung

Department of Dental Biomaterials Science, School of Dentistry, Seoul National University

3D printing is an additive manufacturing technique with popularity in dental fields for fabricating a wide range of structures and complex geometries. Photosensitive resin-based materials are the most widely used in dental clinics, from manufacturing orthodontic devices to implant surgical guides. Each device for 3D printing carries advantages and disadvantages as well as specific requirements for understanding the printing process. This article contains an introduction of the vat photopolymerization-based dental 3D printing devices to enhance understanding, thus gaining feasibility of the clinical use.

Key words : 3d, printing, vat polymerization, stereolithography

## Corresponding Author

Shin Hye Chung, DDS, MSD, PhD

Department of Dental Biomaterials Science, School of Dentistry, Seoul National University,

101 Daehakro, Jongno-gu, Seoul, Korea, 03080

Tel : +82-2-740-8693 / Fax : +82-2-740-8694 / E-mail: den533@snu.ac.kr

## I. 서론

3D 프린팅이라고 불리는 적층제조법 (AM, additive manufacturing)은 현대 산업에서 빼놓을 수 없는 분야이다. 치의학분야에서도 교정 장치의 제작, 임플란트 지대주 제작 및 금속 코핑 제작, 주조체 제작을 위한 왁스 프린팅 등 이미 다방면에서 응용되고 있으며 동시에 활발하게 연구되고 있다. ISO/ASTM 52900:2015에 따르면 3D 프린팅 장비는 적층 기술에 따라, 1) 노즐을 통해 연화된 재료를 압출하는 Fused Deposition Modeling (FDM), 2) 자외선-가시광선 영역의 빛으로 수조에 있는 광경화성 액상 재료를 경화시키는 수조 광경화방식 (Vat Polymerization, Stereolithography (SLA)), 3) 고에너지원을 이용하여 분말입자를 결합시키는 Powder Bed Fusion (selective laser sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective Laser Melting (SLM)), 4) 재료를 분사하여 경화시키는 Material Jetting (MJ) 또는 Polyjet, 5) 액상의 결합제를 분사하여 분말을 결합하는 Binder Jetting (BJ), 6) 고에너지원이 재료를 직접 결합하는 방식인 Direct Energy Deposition, 7) 얇은 시트 형태의 재료를 층층이 쌓는 Sheet Lamination 으로 나눌 수 있다<sup>1)</sup>.

치과용 3D 프린팅은 주로 보철 및 수복 또는 모형 및 가이드 등의 제작을 위한 수조 광경화를 이용한 광경화성 액상수지경화방식이 주를 이룬다<sup>2)</sup>. 이 방식의 기본적인 개념은 광개시제를 포함한 액상의 단량체와 올리고머에 광조사하여 교차결합(crosslink)을 유도하고, 결과적으로 폴리머 출력물을 얻는 것이다. 광원은 광개시제의 종류에 따라 자외선-가시광선 영역의 빛을 사용하며, 층층이 쌓아 올린 단면은 최종적으로 삼차원적 형태를 갖춘다. 인쇄 방향, 두께, 중합도 등은 최종 결과물의 기계적 및 물리적 특성에 영향을 미친다고 알려져 있다<sup>3-6)</sup>. 일반적인 광경화성 액상수지경

화방식 프린팅은 모델링, 슬라이싱, 프린팅, 세척, 후경화 단계로 이루어진다. 소프트웨어를 이용하여 삼차원적 형태를 제작하고 (모델링), 삼차원 개체를 프린팅이 가능한 이차원 단면으로 나누어 각각의 층으로 나누어 (슬라이싱) 데이터를 프린터로 전송한다. 프린터에서 프린팅이 끝난 제품은 과량의 경화되지 않은 레진을 제거하고, 잔여 단량체의 양을 최소화한다(세척). 마지막으로 세척 후 추가적인 광경화 과정을 통해 제품이 충분한 중합도와 물리적 강도 및 적절한 색상을 얻도록 한다 (후경화). 각각의 단계는 최종 제품의 정확도와 물리적 성질에 영향을 미치며 임상에서 사용하기 위해서는 각 단계에 대한 이해가 필수적이다<sup>7-9)</sup>.

이에, 본 글에서는 광경화성 액상수지경화 방식을 사용하는 치과용 3D 프린터 종류와 제품별 특성, 빌드 플랫폼 이동에 따른 프린팅 방식의 특성을 알아보고자 한다.

## II. 액상수지경화 방식 치과용 3D 프린터 종류와 특성

광경화성 재료를 사용하는 프린팅 방법은 빛에 민감한 감광성(photosensitive) 수지 재료에 광원에 의한 빛 에너지를 가하여 경화하는 3D 프린팅 기술의 총칭이며, SLA, DLP, LCD, 폴리젯이 여기에 포함된다(표 1). 광원의 종류에 따라 레이저, DLP, LCD로 나누어지며, 프린팅, 세척, 후경화 과정을 거쳐 출력물을 얻게 된다. 폴리젯 방식은 vat polymerization 또는 SLA 방식과는 다르게 수조를 사용하지 않지만, 자외선 광원에 의해 경화되는 광경화성 재료를 이용한다는 점에서 공통된 특징을 가지므로 본문에서 다루었다(그림 1).

임상가를 위한 특집 1

표1. 광경화성 액상수지경화 방식을 치과용 3D 프린팅 종류와 특성

적층기술	광원	동의어	장점	단점	상업용 프린터 제품명
SLA	Laser	SLA	고해상도, 높은 재현성, 출력물의 변형이 적음.	특수한 유지 관리가 요구됨. 장비의 가격이 고가임. 레이저를 이용하여 DLP와 LCD 비교시 프린팅 속도가 느림. 전용 재료사용이 권장됨.	Form3B (Formlabs)
DLP	Projector printers	Projector printers	고해상도, 빠른 프린팅 속도, 장비의 내구성, 다양한 재료와 호환됨	특수한 유지 관리가 요구됨. 광원이 고가임. 장비가 무거움. 일부장비에서는 전용재료사용 시스템을 채택함.	NextDent5100 (3D systems) IMD (Carima) D4K Pro (EnvisionTEC) PRO 4K, MAX UV (Asiga)
LCD	Masked SLA (MSLA)	Masked SLA (MSLA)	빠른 프린팅 속도, 낮은 가격, 부품의 가격이 저렴함. 다양한 재료와 호환가능. 장비가 가벼워 이동이 용이함	화면의 모서리부분에서 변형이 쉽게 일어남. 스크린의 교체주기가 DLP에 비해 비교적 짧음.	Karv (Shinwon Dental) Raydent studio (Ray)
Polyjet	UV lamp	Multijet	고해상도, 매우 높은 정확도, 빠른 프린팅 속도, 장비의 내구성. 출력 후 부가적인 광경화과정이 불필요함. 다양한 재료와 색상 혼합이 가능함.	장비의 가격이 고가임. 특수한 유지 관리가 요구됨. 장비가 무거워 이동이 용이하지 않음. 전용재료사용 시스템을 채택함.	J5 Dentajet (Stratasys)

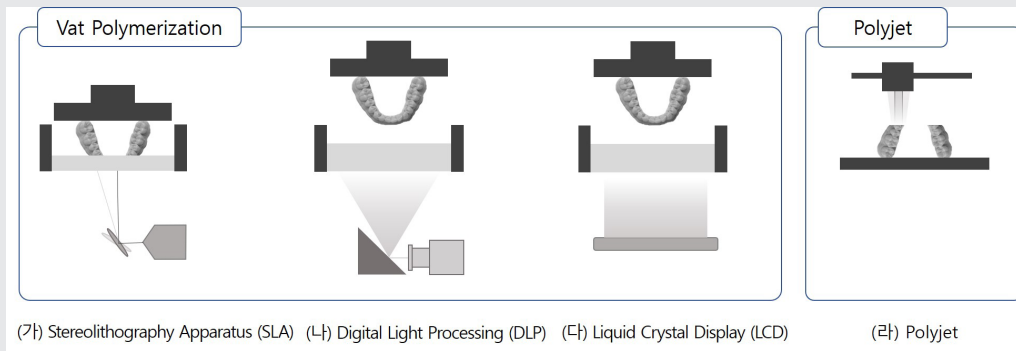


그림 1. 수조(vat) 이용과 광경화 방식에 따른 분류. (가) SLA. 레이저를 거울에 비추어 거울에 움직임에 따라 빛이 도달하는 부위만 선택적으로 경화하는 방식. (나) DLP. 프로젝터를 이용하여 한 개의 층을 동시에 경화하는 방식, (다) LCD. 화면에서 빛을 조사하여 한 개의 층을 동시에 경화하는 방식. (라) Polyjet. 작은 입자 형태의 재료를 분사함과 동시에 광에너지로 경화시키는 방법.

1. Stereolithography (SLA)

SLA는 가장 초기에 개발된 3D 프린팅 기술 중 하나로 1980년대 초반에 등장하였으며, 1987년 3D Sys-

tems에서 3D 프린터가 최초로 상용화되었다. SLA 기반의 프린팅 장비는 광경화성 액상수지재료를 넣는 수조와 완성품이 부착되는 빌드 플랫폼 (build platform), 광원인 레이저로 구성되어 있다. 플랫폼을 액

체 수지에 잠기도록 담그고, 레이저로 사용하여 수지를 중합한 후, 한 개의 층 두께에 해당하는 거리를 이동하면 중합되지 않은 새로운 재료가 이미 중합된 모형을 덮고, 다시 빛을 가하는 방식으로 모형을 제작한다<sup>10</sup>. 광원에 의해 재료가 경화되므로 optical fabrication 또는 photo-solidification이라고 부르거나, 수조(vat)에 담긴 액상 재료를 경화시키므로 vat polymerization으로 부르기도 한다. SLA 장비에서의 프린팅은 ‘빛 노출-플랫폼의 이동-액상수지의 재충진’의 반복적인 과정으로 이루어진다. SLA는 해상도가 높고, 재현성이 좋으며, 출력물의 변형이 적은 장점이 있다. 그러나 장비의 가격이 고가이며 레이저가 조사되는 부분만 경화되기 때문에 넓은 면적을 출력하는 경우, DLP와 LCD와 비교시 시간이 소요되는 단점이 있다. 또한 각 층의 픽셀 수나 형태가 출력 시간에 영향을 미친다.

## 2. Digital Light Process (DLP)

DLP 방식은 1987년, Texas Instruments사의 Larry Hornbeck이 개발한 방법으로 빛 전달은 빔 프로젝터의 원리와 같다. 디지털 마이크로 리플렉터 디바이스(digital microreflector device)라고 부르는 작은 거울을 연속적으로 배열한 판이 빛을 전달하는데, 각 거울은 하나의 픽셀이며, 단위면적 당 거울의 수가 많을수록 해상도는 높아진다. 거울의 움직임을 통해 경화면에 빛이 도달하며, LCD에 비해 발열이 적어 더 많은 양의 빛을 전달할 수 있다. SLA에서 레이저를 사용하여 레이저가 도달하는 면만 중합되는 반면, DLP는 한 번의 빛 전달로 한 개의 층 전체를 출력할 수 있다는 장점을 가진다. 이로써 출력하는 층의 픽셀의 수나 형태와 무관하게 각 층을 출력하는 시간은 동일하고, 전체 출력물을 얻을 때까지 걸리는 시간을 크게 단축할 수 있다. 장비가 고가이며, 무겁고 비교적 큰 공간을 필요로 하고, 프로젝션 방식으로 인쇄 면적이 넓어지

면 최외각부 해상도가 저하되며, DLP 칩 자체의 한계로 해상도가 LCD 보다 낮다는 단점이 있다. 그러나 활용도가 높아 다양한 분야에서 활발하게 연구되고 있는 출력 방식이다. 최근 연구에 따르면 DLP 방식에 정확도와 미세부재현성, 재료의 한계를 넘는 기술이 접목되어 나노미터 단위의 재료 프린팅, 지르코니아와 세라믹 및 금속 프린팅, 고탄력 고점도 재료의 프린팅이 가능해졌다<sup>11~14</sup>.

## 3. LCD

LCD를 이용한 출력방식은 노트북 등의 화면에서 보는 Liquid Crystal Diode 디스플레이를 사용하는 방법으로 DLP에서 사용하는 프로젝터와 다르게 LED 모듈에서 나오는 빛을 액정으로 보내고 화면을 이용하여 빛 에너지를 전달한다<sup>10</sup>. LED로부터 들어온 빛이 액정 화면에서 출력하고자 하는 형태에 따라 차단(masking)되어 하나의 이미지 층을 재료에 전달하기 때문에 masked SLA 라고도 한다. DLP와 마찬가지로 한 개의 층 전체가 동시에 빛에 노출되므로 SLA에 비해 출력 속도가 빠른 특징이 있다. LCD는 제조 단가가 저렴하고, 정확한 출력물을 얻을 수 있으며 장비가 작고 가벼워 이동이 용이하다는 장점이 있다. 그러나, 화면 모서리에서의 변형이 쉽게 일어나며, 과열되거나 변형에 의한 화면(screen)의 교체주기가 DLP에 비해 비교적 짧다는 단점이 있다. DLP와 비교시 정확도가 낮다는 보고가 있지만<sup>9,15</sup>, 가시광선 영역의 파장을 사용하는 LCD의 경우, 자외선 조사에 의한 약물 변형없이 출력할 수 있다는 장점으로 약물전달체 출력에 응용되기도 한다<sup>16</sup>.

## 4. Polyjet

폴리젯 방식은 2000년에 Objet-Geometries사에

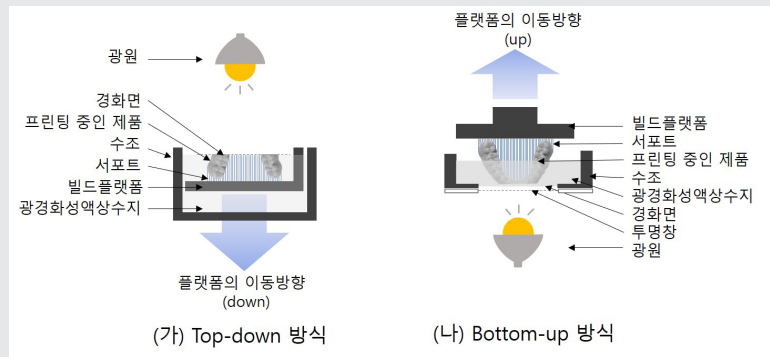


그림 2. 광원의 위치와 플랫폼의 이동방향에 따른 분류. (가) Top-down 방식. 광원의 위치 상부(top), 플랫폼의 하방(down) 이동. 상부에 광원이 위치하고, 프린팅 중인 출력물이 플랫폼에 부착되어 하방으로 이동하면서, 상부 경화면에 새로운 층을 적층하는 방식. (나) Bottom-up 방식. 광원의 위치 하부(bottom), 플랫폼의 상방(up) 이동. 하부에 광원이 위치하고 투명창을 통해 광에너지가 재료로 도달함. 프린팅 중인 출력물이 플랫폼에 부착되어 상부로 이동하면서, 하부 경화면에 새로운 층을 적층하는 방식.

의해 개발되었고 현재는 Stratasys사에서 제품을 생산한다. 재료를 분사하면서 즉시 경화시키는 재료분사법(material jetting)으로, 광경화성 수지 재료를 사용한다는 점에서 SLA, DLP, LCD와 공통점을 가진다. 그러나 액상수지재료에 국한되지 않고 열가소성 수지부터 세라믹, 지르코니아까지 다양한 재료를 사용할 수 있다. 광경화성 재료는 출력헤드에 장착된 분사공을 통해 분사되고, 분사와 동시에 헤드에 장착된 광원이 이를 중합하는 원리를 사용하여 잉크젯 프린터와 구조적 유사성을 지닌다. 출력물이 존재하는 위치로 헤드가 이동하여 재료를 경화하므로 수조를 이용하는 경화방식보다 재료의 소모가 적지만, 한 번 분사로 일부만 경화되므로 한 개의 층을 경화하는 데 시간이 소요된다. 또, 여러 개의 물성을 가진 재료를 각각 다른 노즐을 통해 한 번에 분사하는 방법으로 색상, 점도, 강도, 탄성 등 서로 다른 물성을 가진 재료를 한 층에 출력하거나 블렌딩(blending)할 수 있는 장점이 있다. 이는 다양한 응용을 가능하게 하는 폴리젯의 강점이다. 자외선 광원을 사용하기 때문에 원칙적으로는 자외선 영역에서

자유라디칼을 형성하는 다른 재료와 호환될 수 있지만, 재료를 분사하는 방식의 특성으로 인하여 전용 재료를 사용하도록 설계되어 있다. 출력물의 크기에 따라 필요 시 서포트를 부착하므로 출력 후 서포트 제거 및 표면 마무리 등의 처리를 거친다. 수조를 사용하는 방식과 다르게, 출력 후 추가적인 광경화 과정이 불필요하여 세척과정에서 소실되는 재료가 적고 후경화에 필요한 시간이 단축된다. 광경화 수지를 이용한 출력물은 해상도가 매우 높고, 정확도가 우수하며, 표면이 매끄러운 특징이 있다.

### III. 빌드 플랫폼의 움직임에 따른 분류

수조를 이용한 vat polymerization에서 액상수지 재료를 경화면으로 이동시키기 위해 빌드 플랫폼이 상방 또는 하방으로 움직이는데, 이를 ‘Top-down 방식’과 ‘Bottom-up 방식’으로 설명할 수 있다(그림 2).

## 1. Top-down 방식

Top-down 방식은, 광원이 상방(top)에 위치하고 플랫폼이 하방(down)이동하면서 액상수지재료가 경화하는 방식이다. 이 방식의 경화 과정은, 1) 플랫폼이 재료에 잠기도록 낮게 위치한다. 이 때 플랫폼의 위치는 재료의 최상방 기준으로 재료의 광경화가 가능한 단일층 두께이어야 한다. 2) 수조에 담긴 재료의 최상 부층에 광조사하여 재료의 경화가 일어난다. 초기에 경화되는 층은 출력물이 플랫폼에 움직임 없이 부착하도록 한다. 3) 빌드 플랫폼이 하방 이동한다. 4) 휠 등을 이용하여 출력물의 상부에 새로운 재료를 균일하게 퍼준다. 5) 이어서 광조사에 의해 두 번째 층이 경화된다. 6) 3)~5)의 과정을 반복하면 출력물은 계속 수조 안쪽인 하방으로 이동하여 프린팅 과정 중에는 출력물이 보이지 않는다. 7) 최종 층에서 경화가 마무리되면 플랫폼이 상부로 이동하여 출력물을 제거할 수 있다.

이 방식은 상대적으로 깊은 수조를 사용하며, 전체 출력물이 잠길 수 있도록 재료를 가득 채워야 하므로 재료소모가 크다. 경화면은 공기에 노출되어 산소에 의한 중합억제층이 형성되고, 결과적으로 연쇄적인 중합반응이 방해되므로 노출시간을 증가시켜 중합반응이 충분히 일어나도록 한다. 필요 시 oxygen scavenger를 사용하여 산소접촉을 최소화할 수 있다. 출력 과정에서 플랫폼의 이동이 하방으로만 이루어지므로 한 층을 경화한 후, 바로 다음 층으로 이동할 수 있다. 또한 출력면이 부드럽게 이행되어 최종 출력물의 표면이 매끄럽다. 매번 각 층에 새롭게 공급되는 재료를 균일하게 퍼는 과정에서 재료가 완전히 편평하지 않아 개별층의 두께가 균일하지 않을 수 있다. 특히 재료의 점도가 높거나 입자 형태의 구성성분이 존재하는 경우, 중합층의 두께 조절이 용이하지 않다. 출력물은 빌드 플랫폼 위에 있으므로 비교적 안정적으로 고정되어 부가적인 서포트 부착을 최소화할 수 있다. 빛의 세기가

그대로 경화면까지 도달하여 에너지가 손실 없이 재료에 전달되어 효율이 높다. 구조적으로 움직임의 방향성이 하나이므로 부품이 닳아져 나가는 현상이 적고, 출력시간이 짧고, 출력물의 재현성이 높다.

## 2. Bottom-up 방식

Bottom-up 방식은, 광원이 하방(bottom)에 위치하고 플랫폼이 상방(up)이동하면서 액상수지재료가 경화하는 방식이다. 이 방식의 경화 과정은, 1) 플랫폼이 재료에 잠기도록 위치한다. 이 때 플랫폼의 위치는 광원이 위치한 하방에서부터 재료의 광경화가 가능한 단일층 두께 정도이어야 한다. 2) 바닥에 투명한 필름이 있는 수조에 담긴 재료의 하부에서 광조사하여 재료의 경화가 일어난다. 초기에 경화되는 층은 출력물이 플랫폼에 움직임 없이 부착하도록 한다. 3) 한 개의 층의 경화가 완료되면 빌드 플랫폼이 상방으로 이동하여 수조 바닥의 필름으로부터 출력물을 제거한다. 이때 출력물이 바닥으로부터 분리되는 소리가 난다. 4) 플랫폼은 다시 하방으로 이동하여 이미 출력된 출력물 하방으로 필름까지 단일층 두께 거리에 위치한다. 중력에 의해 새로운 재료가 플랫폼과 필름 사이에 위치한다. 5) 이어서 광조사에 의해 두 번째 층이 경화된다. 6) 3)~5)의 과정이 반복하면 출력물은 계속 수조 바깥쪽인 상방으로 이동하여 프린팅 중인 출력물을 육안으로 관찰할 수 있다. 7) 최종 층에서 경화가 마무리되면 플랫폼이 상부로 이동하여 출력물을 제거할 수 있다.

Bottom-up 방식의 경화면은 하방에 위치하여 전체 출력물의 높이에 관계없이 일정량의 재료를 수조에 넣어 사용하므로 상대적으로 재료소모가 적다. 경화면이 재료로 채워져 있고, 공기 접촉이 되지 않아 산소중합억제층이 형성되지 않는다. 출력물을 수조 바닥의 필름에서 제거하기 위한 상하방 이동으로 인해 출력된 단면의 이행이 top-down 방식과 비교 시 상대적으로

임상가를 위한 특집 1

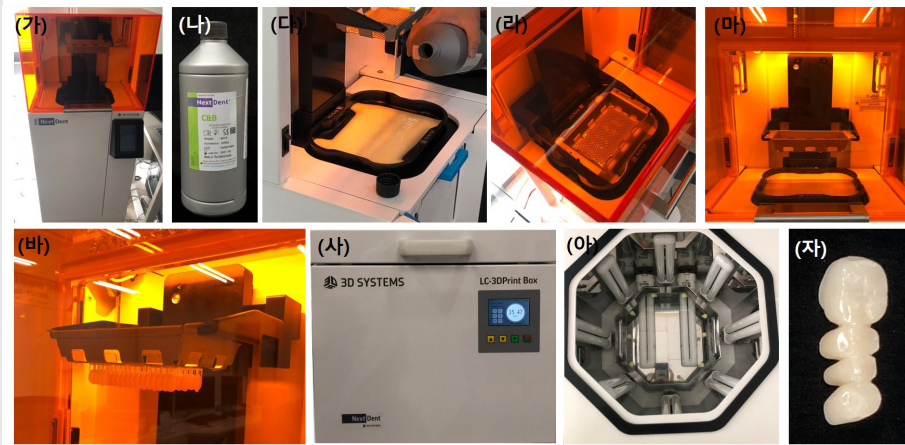


그림 3. DLP, bottom-up 방식의 NextDent5100 프린터와 후경화기 LC-3DPrint Box (가)하단에 광원이 있는 NextDent 장비의 전면, (나) 전용 임시치관용 재료인 NextDent C&B, 라벨에 있는 QR 코드를 스캔하면 프린팅 조건이 자동으로 설정됨. (다) 수조에 재료를 채움. (라) 프린팅을 시작하면 구멍이 있는 빌드 플랫폼이 하방으로 움직여 수조에 잠기고, (마) 플랫폼이 상하방 이동하며 전체적으로 상방으로 조금씩 움직이면서 프린팅 함. (바) 프린팅이 완료되면 플랫폼이 상부로 움직여 제거가 용이하게 함. (사) 3D system 사의 후경화기의 전면, (아) 후경화기의 뚜껑을 열면 거울이 장착된 바닥에 프린팅한 모형을 올릴 수 있도록 설계되어 있으며, 사방으로 UV 램프가 장착되어 있음. (자) 프린팅, 세척, 후경화가 완료된 임시치관.

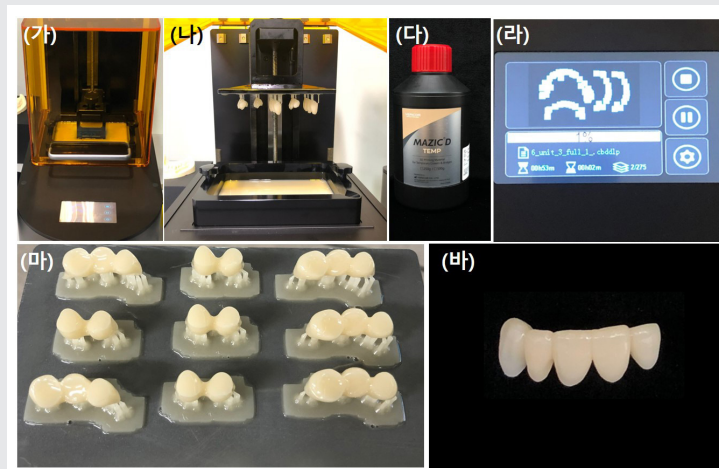


그림 4. LCD, bottom-up 방식의 Karv 프린터 (가) 하단에 LCD 광원이 있는 Karv 장비의 전면. 수조에 레진이 채워져 있고 프린팅을 위해 플랫폼이 하방으로 이동한 상태, (나) 프린팅이 완료된 후 플랫폼이 상부로 움직여 제거가 용이하게 함. (다) 액상수지경화방식 프린터에 사용 가능한 Vericom 사의 MazicD Temp 임시치관용레진, (라) 프린팅을 위해 USB에 저장된 파일을 불러오면 파일명과 플랫폼 품상의 예상 위치가 전면 하단부 디스플레이 창에 표시됨. (마) 프린팅이 완료된 플랫폼을 제거한 직후 과량의 레진이 잔존함. (바) 프린팅, 세척, 후경화가 완료된 임시치관.

거칠다. 중력에 의해 하방에 위치한 재료를 중합하므로, 휠 구조물이 필요 없고, 일정한 두께의 중합층을 얻을 수 있다. 경화된 출력물을 중력 반대 방향으로 끌어 올리는 동작이 반복되므로 재료의 점도에 의해 출력물의 완성도가 영향을 받으며, 가늘고 긴 모형의 출력이 비교적 어렵다. 출력물은 상부에 위치한 빌드 플랫폼에 거꾸로 매달린 형태이므로 재료의 처짐을 방지하기 위한 지지대(서포트)가 필요하다. 한 개의 층을 경화한 후, 경화면에서 출력물을 떼어내기 위해 플랫폼의 이동하는 과정에서 출력시간이 증가하고, 출력물에 원치 않는 스트레스가 발생할 수 있다. 또한, 하방에서 조사된 빛 에너지가 투명한 필름을 통해 재료의 경화면에 도달하므로 빛의 감쇠가 불가피하다. 그러나 빛의 감쇠 현상이 오히려 출력물을 필름에 약하게 붙이고 상방으로의 움직임 출력물을 떼어낼 수 있다. 반복적 사용으로 인해 필름의 변형이 발생하면 빛을 산란하여 적절한 중합이 이루어지지 않을 수 있어 필름을 주기적으로 교체해주어야 한다. 그러나 bottom-up 방식은 광원이 하부에 배치되어 작업자의 안전을 도모할 수 있고, 재료를 보충하거나 편평하게 하기 위한 부가적인 장치가 필요하지 않아 현재 대부분의 SLA 기반의 프린터가 채택하는 기술이다<sup>8)</sup>.

## IV. 상용화된 3D 프린터

### 1. NextDent5100 (3D Systems, 네델란드)(그림3)

NextDent5100은 3D Systems의 DLP, bottom-up 방식을 사용하는 3D 프린터이다. 일반적인 DLP 장비는 다양한 광경화성 재료와 호환이 가능하지만 NextDent5100의 경우, 자사 레진 제품 (NextDent Series)에 부착된 QR 코드를 스캔하면 자동으로 출력 조건이 설정되는 폐쇄적인 시스템을 갖고 있다. 빌드

플랫폼은 구멍이 있는 형태를 사용하고 있으며, 수조의 필름이 손상되는 경우, 수조 전체를 교체해야 하는 특징을 갖고 있다.

### 2. Karv (신원덴탈, 한국)(그림4)

Karv는 신원덴탈의 LCD, bottom-up 방식을 사용하는 3D 프린터이다. 장비의 하방에 LCD 광원이 수조 하방으로 광에너지를 전달하며, 무게가 가벼워 이동이 용이하다. 전면에 있는 디스플레이에는 예상되는 출력물의 위치와 작업시간을 표시한다. 디스플레이에서 프린팅과 관련된 설정을 조절하여 다양한 재료와 호환할 수 있는 열린 시스템을 가지고 있다. 빌드 플랫폼은 편평한 구조이며, 수조의 필름이 손상되는 경우, 필름을 고정하고 있는 나사를 풀어 필름만 교체할 수 있다.

## V. 결론

임상에서 3D 프린팅 장비를 보다 효율적으로 사용하기 위해서는 지금까지 개발된 기술과 그 특성에 대한 이해가 선행되는 것이 바람직하다. 현재 치과용 3D 프린터 관련한 기술 개발이 어느 때보다 빠르게 진행되고 있으며, 이에 따라 앞서 언급한 광경화성 액상수지경화 방식 기반의 3D 프린터가 가지는 한계는 기술의 진보에 따라 곧 극복할 것으로 사료된다. 기술에 대한 이해를 바탕으로 장비를 선택하고 사용한다면, 보다 빠르고 정확한 출력물을 통해 3D 프린팅의 응용 분야를 넓힐 수 있을 것이다.

## 참고 문헌

1. ISO/ASTM (2017) ISO/ASTM 52900:2015 additive manufacturing—general principles—terminology. <https://www.iso.org/standard/69669.html>.
2. Ligon SC, Liska R, Stampfl J, Gurr M, Mülhaupt R. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chemical reviews*. 2017 Aug 9;117(15):10212–90.
3. Al-Dulaijan YA, Alsulaimi L, Alotaibi R, Alboainain A, Akhtar S, Khan SQ, Al-Ghamdi M, Gad MM. Effect of Printing Orientation and Postcuring Time on the Flexural Strength of 3D-Printed Resins. *Journal of Prosthodontics*. 2022 Aug 16.
4. Piedra-Cascón W, Krishnamurthy VR, Att W, Revilla-León M. 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review. *Journal of Dentistry*. 2021 Jun 1;109:103630.
5. Lee EH, Ahn JS, Lim YJ, Kwon HB, Kim MJ. Effect of layer thickness and printing orientation on the color stability and stainability of a 3D-printed resin material. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2022 Feb 25.
6. Puebla K, Arcaute K, Quintana R, Wicker RB. Effects of environmental conditions, aging, and build orientations on the mechanical properties of ASTM type I specimens manufactured via stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*. 2012 Jul 27;18(5):374–88.
7. Aati S, Akram Z, Shrestha B, Patel J, Shih B, Shearston K, Ngo H, Fawzy A. Effect of post-curing light exposure time on the physico-mechanical properties and cytotoxicity of 3D-printed denture base material. *Dental Materials*. 2022 Jan 1;38(1):57–67.
8. Chang J, Choi Y, Moon W, Chung SH. Impact of postpolymerization devices and locations on the color, translucency, and mechanical properties of 3D-printed interim resin materials. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2022 Sep 28.
9. Moon W, Kim S, Lim BS, Park YS, Kim RJ, Chung SH. Dimensional accuracy evaluation of temporary dental restorations with different 3D printing systems. *Materials*. 2021 Mar 18;14(6):1487.
10. Groth CH, Kravitz ND, Jones PE, Graham JW, Redmond WR. Three-dimensional printing technology. *J Clin Orthod*. 2014 Aug 1;48(8):475–85.
11. SAHA, Sourabh K., et al. Scalable submicrometer additive manufacturing. *Science*, 2019, 366.6461: 105–109.
12. Methani MM, Revilla-León M, Zandinejad A. The potential of additive manufacturing technologies and their processing parameters for the fabrication of all-ceramic crowns: A review. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2020 Mar;32(2):182–92.
13. He R, Liu W, Wu Z, An D, Huang M, Wu H, Jiang Q, Ji X, Wu S, Xie Z. Fabrication of complex-shaped zirconia ceramic parts via a DLP-stereolithography-based 3D printing method. *Ceramics International*. 2018 Feb 15;44(3):3412–6.
14. Patel DK, Sakhaei AH, Layani M, Zhang B, Ge Q, Magdassi S. Highly stretchable and UV curable elastomers for digital light processing based 3D printing. *Advanced Materials*. 2017 Apr;29(15):1606000.
15. Tsolakis IA, Papaioannou W, Papadopoulou E, Dalampira M, Tsolakis AI. Comparison in Terms of Accuracy between DLP and LCD Printing Technology for Dental Model Printing. *Dentistry Journal*. 2022 Sep 28;10(10):181.
16. Madžarević M, Ibrić S. Evaluation of exposure time and visible light irradiation in LCD 3D printing of ibuprofen extended release tablets. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2021 Mar 1;158:105688.
17. Santoliquido, O., Colombo, P., & Ortona, A. (2019). Additive Manufacturing of ceramic components by Digital Light Processing: A comparison between the “bottom-up” and the “top-down” approaches. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(6), 2140–2148.
18. Kessler A, Hickel R, Reymus M. 3D printing in dentistry—State of the art. *Operative dentistry*. 2020;45(1):30–40.