



A Review of Three-Dimensional Printing Technology for Medical Applications

3D 프린팅 기술의 의료적응에 관한 종설

Sangwook Lee, MSc¹ , Taehun Kim, MSc¹, Dayeong Hong, MSc¹, Junhyeok Ock, MSc¹, Jaeyoung Kwon, MSc¹, Eunseo Gwon, MSc¹, Jinhee Kwon, MSc¹, Joon Beom Seo, MD², Eun Jin Chae, MD², Dong Hyun Yang, MD², Choung-Soo Kim, MD³, Yoon Soo Kyung, MD⁴, Beom Seok Ko, MD⁵, Sehoon Choi, MD⁶, Ho-Seok Sa, MD⁷, Namkug Kim, PhD^{1,2*}

Departments of ¹Convergence Medicine, ²Radiology, ³Urology, ⁴Health Screening and Promotion Center, ⁵Division of Breast Surgery, ⁶Thoracic and Cardiovascular Surgery, ⁷Ophthalmology, University of Ulsan College of Medicine, Asan Medical Center, Seoul, Korea

Three-dimensional (3D) printing technology, with additive manufacturing, can aid in the production of various kinds of patient-specific medical devices and implants in medical fields, which cannot be covered by mass production systems for producing conventional devices/implants. The simulator-based medical image demonstrates the anatomical structure of the disease, which can be used for education, diagnosis, preparation of treatment plan and preoperative surgical guide, etc. The surgical guide is used as a patient-specific medical device for guiding incision, resection, insertion, and marking. As 3D printers can output materials that can be inserted into the human body, the patient-specific implant device that reflects the patient's anatomy and surgical plan could be of relevance. In addition, patient-specific aids, including gibs, splints, prostheses, and epitheses, could be used for a better outcome. Finally, bio-printing is also used to cultivate cells to produce functional artificial tissues.

Index terms 3D Printing; Patient-Specific Modeling; Precision Medicine; Technology, Radiologic; Models, Anatomic

서론

기존의 의료기기 개발이나 개선은 대량생산 시스템의 특성과 의료기기의 인허가 과정에 서 비용과 시간이 많이 들기 때문에 다양성을 추구하기 어렵다. 대부분의 의료기기는 서양

Received January 24, 2019
 Accepted March 5, 2019

***Corresponding author**
 Namkug Kim, PhD
 Department of Radiology,
 University of Ulsan
 College of Medicine,
 Asan Medical Center,
 88 Olympic-ro 43-gil, Songpa-gu,
 Seoul 05505, Korea.

Tel 82-2-3010-8361
 Fax 82-2-3010-6196
 E-mail namkugkim@gmail.com

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID iDs

Namkug Kim
<https://orcid.org/0000-0002-3438-2217>
 Sangwook Lee
<https://orcid.org/0000-0002-7103-1563>

인이나 성인 등에게 맞춰져 있어, 동양인이나 소아나 노인 환자들에게 맞는 의료기기를 구하기 어려웠다. 또한 건수가 적거나, 변이가 심하거나, 정형화되기 어려운 수술 등에 사용되는 의료기기는 지금의 시스템으로는 양산되기가 어려워 싸게 보급되지 못하는 문제 등의 미충족 수요가 존재한다.

최근 3D 프린팅 기술의 발전과 대중화에 따라 이러한 한계를 극복하기 위해서 의료분야 중에서도 다양한 분야에서 활용되고 있다(1, 2). 3D 프린팅은 다양한 재료를 붙여서 만들기 때문에, 제조 공정에서 나오는 부산물이 적고, 형상에 제한이 없이 제조가 가능하기 때문에 제조에 드는 에너지 및 재료의 손실이 최소화된다. 또한, 다공성이 있는 복잡한 형상은 기존의 제조 방법으로는 만들기 힘들었는데, 적층제조기법인 3D 프린팅을 통해 가능해졌다. 또한, 3D 프린팅은 양산을 한다고 효율이 좋아지지 않기 때문에, 특성상 다품종 소량생산에 적합하다. 따라서, 임상적으로는 환자마다 질병 변이가 다를 수 있는 질환에 쓰이는 맞춤형 의료기기 생산에 적합하다. 따라서, 의료 3D 프린팅 기술은 환자 맞춤형 의료기기의 디자인 변경 및 적용을 효율적으로 할 수 있는 장점이 있다. 하지만 대량생산 체제의 생산 효율성과 이에 따른 비용절감은 기대하기 어렵고, 하나하나 생산할 수 밖에 없어서 생산성 향상에 한계가 있다.

최근 의료영상의 발달로 인하여 CT나 MR과 같은 의료영상을 통해서 환자마다 각기 다른 자연적인 해부학적 변이와 질환의 변이를 쉽게 획득할 수 있다. 이를 기반으로 진단 및 다양한 치료 계획을 세울 수 있다. 최근 이런 의료영상을 기반으로 3D 프린팅 기술을 이용한 맞춤형 의료기기와 삽입 보형물 등을 제작하여 다양한 임상에 적용하고 있다(3-9). 이는 의료기기 분야에서 정밀 의료의 개념을 구현한 것이라 할 수 있다. 맞춤형 의료기기 적용을 통한 의료의 질 향상과 효율적 의료기기 제조를 통한 의료 비용 감소, 궁극적으로 의료 유통의 혁명을 가져올 것이라 생각된다.

이에 본 종설에서는 의료 3D 프린팅의 특성에 기반한 환자 맞춤형 시뮬레이터, 수술 가이드, 삽입 보형물, 보조기기, 바이오프린팅 등 다양한 의료 응용에 대하여 살펴보고자 한다.

3D 프린팅 기술의 개요 및 특징

3D 프린팅 기술은 기존의 제조공정처럼 재료를 깎아서 만드는 것이 아니라 붙여서 만드는 공정이다(10). 미국의 Charles W. Hull이 1986년 최초로 Stereolithography (이하 SLA) 개발하여 특허를 출원하고 상용화시켰다. 2014년 3D 프린팅 기술들의 주요 특허가 만료되어 3D 프린팅 기술이 대중화되고, 다양한 분야에서 사용되면서 큰 파급력을 보이고 있다(11, 12). 또한, 3D 프린팅 기술은 많은 연구 개발이 이루어지는 분야이다. 실제로 지난 10년간 3D 프린팅 연구는 연간 54.61%의 성장과 논문당 10.59회의 인용 횟수를 기록했다고 보고되었다(13).

3D 프린팅 기술들은 적층제조를 기본원리로 하지만 정확도, 사용 가능한 재료 등에 따라 기술들이 구분되며 각 기술에 따라 장단점이 있다(Table 1). SLA 기법 이후로 Fused Deposition Modeling (이하 FDM), Digital Light Processing (이하 DLP), Color Jetting Printing (이하 CJP), Selective Laser Sintering (이하 SLS), MultiJet Printing (이하 MJP) 등 다양한 3D 프린팅 기술들이 개발, 상용화되었고 지속적으로 기술이 발전되어 왔다. 현재 가장 대중적으로 알려져 있는 FDM

Table 1. Summary of 3D Printing Technologies

	Advantages	Disadvantages	Major Company
FDM	Low-cost, various of material	Low-speed, almost need to support	Stratasys, Ultimaker, Zortrax, Prusa
DLP	High-speed, high-quality	High-cost, need to support	EnvisionTEC, Prodways, Carbon3D
SLA	High-quality	High-cost, need to support	3D systems, Formlabs, DWS
Material jetting	Multi-material property, color, high-accuracy	High-cost, need to support	Stratasys, 3D systems
Binder jetting	Multi-color, no-support, low-cost	Opacity, need to post process	3D systems, VoxelJet, ExOne
SLS	High-accuracy	High-cost	EOS, 3D systems, Sinterit, Sintratec
DMLS	Various of material	High-cost	EOS, 3D systems, Renishaw, SLM

DLP = Digital Light Processing, DMLS = Direct Metal Laser Sintering, SLA = Stereolithography, SLS = Selective Laser Sintering, 3D = three-dimensional

기술은 고체 폴리머를 녹여 압출하여 경화시키는 방식이고, 다른 기술들과 비교해봤을 때, 가장 경제적이며 재료의 선택 폭이 가장 넓지만 출력 속도가 느리고 표면의 질이 높지 못하다. 또한, 출력물의 형상이 온전하게 나올 수 있도록 파트를 지지해주는 역할을 해주는 구조물인 서포터가 대부분의 경우에 필요하다. DLP 기술은 빔프로젝터로 광경화 수지에 2D 이미지를 조영하여 경화시키는 방식이라 출력 속도가 가장 빠르고 표면의 질이 비교적 높으며, 정밀도가 높다. 하지만 한 제품에 다중 재료를 적용할 수 없고, 서포터가 필수적이며 출력 장비에 비해 재료의 비용이 비싼 편이다. SLA 기술은 DLP와 광경화성 수지를 사용하는 것은 동일하나 DLP와는 달리 레이저로 일정 영역을 선택적으로 경화시키는 방식이어서 출력 속도는 상대적으로 느린 편이다. Material jetting 기술은 액상 수지를 micro 단위로 분사하여 UV로 경화시키는 방식으로 Polyjet, MJP 기술이 여기에 속한다. 한 번에 여러 색상이나 물성을 가지는 재료를 출력할 수 있으며, 높은 정밀도를 가지지만, 그만큼 출력 속도가 느리고 출력 비용이 높다. 또한 서포터가 필수적이다. CJP 기술은 분말재료에 바인더를 분사하여 해당 영역만 점착시켜 형상을 만드는 방식이고, 분말재료로 가득 찬 영역에서 필요한 부분만 점착되어 있는 것이기 때문에, 서포터가 따로 필요 없고 재료의 재사용이 가능하여 경제적이며, 일반 2D 프린터에 적용되는 컬러 토너를 사용하여 모든 색상을 표현할 수 있다. 그러나 출력 후 점착되지 않은 분말을 털어내는 과정과 추가 본딩 과정이 필수적으로 필요하며, 너무 얇거나 약한 파트는 손실되기 쉽다. SLS 기술은 분말재료의 선택된 영역을 레이저로 소결시켜 형상을 얻는 방식이다. 해당 기술은 폴리머, 금속, 세라믹 파우더를 재료로 사용 가능하며 높은 정밀성을 갖는다. 하지만 출력 비용이 높고 금속과 세라믹 파우더를 사용할 시 추가로 후처리가 필수적으로 필요하다. CJP과 마찬가지로 재료의 재사용이 가능하나 비용은 더 많이 요구된다. Direct metal laser sintering 기술은 금속 분말재료의 선택된 영역을 레이저로 소결시켜 형상을 얻는 방식이다. 해당 기술은 대부분의 금속 분말재료를 사용할 수 있으며, 복잡한 형상의 고강도 제품을 제조하기에 용이하다. 단점은 출력 비용이 비싼 편이다.

3D 프린팅 이후에 서포터를 제거하거나 표면처리, 세척과정과 같이 3D 프린팅 이후 최종 결과물을 얻기 위해 이루어지는 일련의 과정들을 후처리 과정이라고 한다. 서포터는 파트와 맞닿아 있어 출력물의 표면 퀄리티에 직접적인 영향을 미치기 때문에 출력물에 손상이 없게끔 생성 및 제거할 필요가 있다. 그리고 3D 프린팅 기술상의 차이로 출력물 표면 퀄리티가 상이한데, 이를 보완하기 위한 훈증(fumigation), 글라인딩(gliding), 폴리싱(polishing), 코팅(coating) 등의 방법으로

표면 퀄리티를 높이는 후가공이 수행될 수 있다.

의료 3D 프린팅은 Fig. 1과 같이 환자의 의료영상을 얻은 다음 관심 영역을 분할하고 필요에 따라 추가 모델링을 진행한다. 그리고, 결과에 대한 검증 및 확인 이후 용도에 맞는 프린팅 방식과 재료를 선정하여 출력하게 되며, 필요에 따라 후처리 및 후가공 단계가 요구된다. 이때 의료영상은 Voxel 정보이기 때문에 slice thickness가 가능한 한 최소로 하여, Iso-cubic 영상데이터를 사용하는 것이 좋다. 그리고 영상데이터로부터 얻은 3D 객체는 3D 프린팅을 위해 STL 파일 형식으로 저장한 후, 3D 프린터 전용 슬라이싱 소프트웨어를 통해 출력하게 된다. 이때 3D 프린터 선택 기준은 얻고자 하는 결과물의 품질, 비용, 시간, 물성, 색상 등을 고려하여 결정한다. 예를 들어 기한의 여유가 있고 출력 품질이 좋지 않아도 되나, 경제적인 결과물을 얻고자 한다면 FDM 기술이 가장 적절하다고 볼 수 있다. 출력이 완료된 결과물은 임상에 적용되기 위해 필요에 따라 추가 후처리, 추가 후가공이 이루어지고, 필요에 따라 멸균 과정을 거친 이후 적용된다.

의료 3D 프린팅 적용 카테고리 및 적용 사례

의료 3D 프린팅 기술이 적용 가능한 영역은 시뮬레이터, 수술 가이드, 삽입 보형물, 보조기기, 바이오프린팅 등으로 나눌 수 있다(Fig. 2).

Fig. 1. Procedure for the application of 3DP in medicine.
CAD = computer-aided design, 3DP = three-dimensional printing

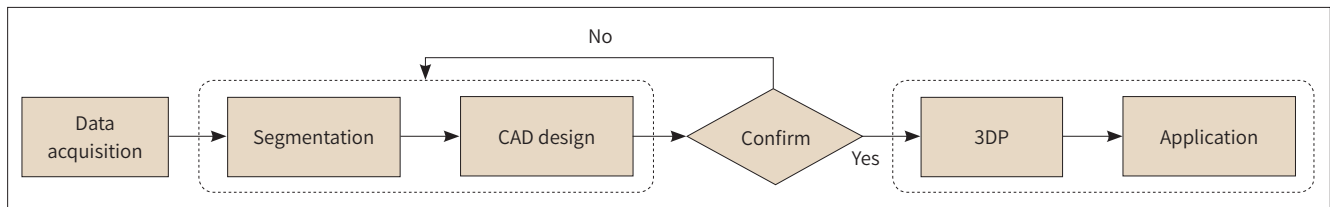
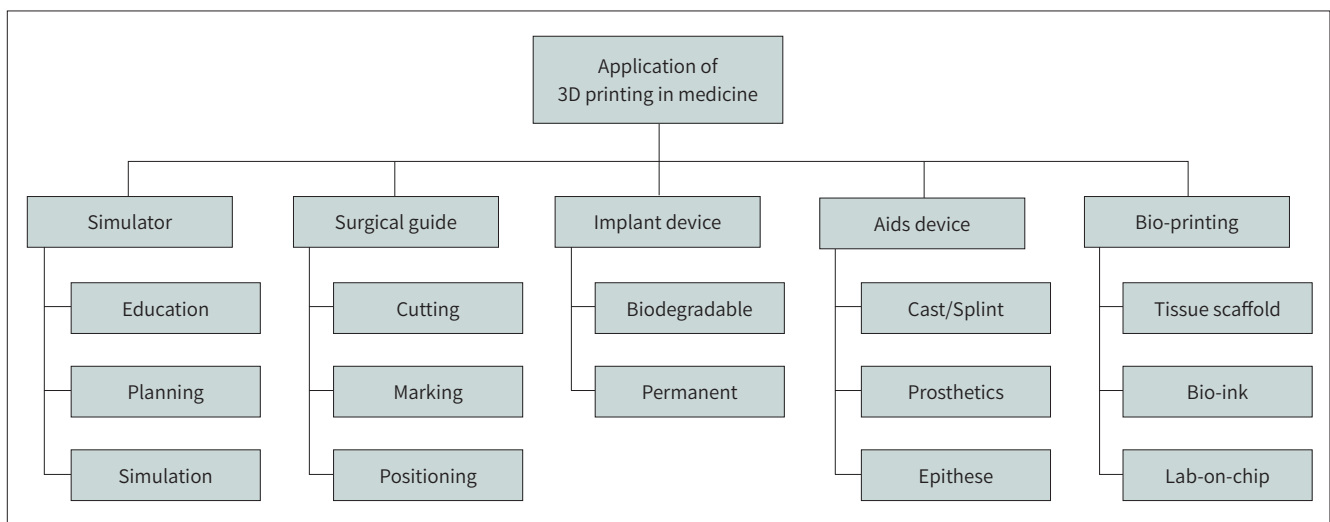


Fig. 2. Categories for application of 3D printing in medicine.
3D = three-dimensional



시뮬레이터

시뮬레이터는 환자 의료영상을 기반으로 제작하여 수술 전 환자의 질환의 해부학적 변이를 파악하여, 수술 계획을 수립하고, 나아가 수술 정확도를 높이고, 수술 시간을 단축할 수 있다(14, 15). 그리고, 수술팀 간에 소통의 수단으로 사용되거나, 수술 경험이 부족한 의사나 학생에게 교육용으로도 사용될 수 있으며, 환자에게 질환 및 수술 방법을 설명하는 용도로도 사용된다(Fig. 3). 이 밖에 특정 질환 등을 모사한 *in-vitro* 실험을 위한 시뮬레이터를 제작할 수도 있기 때문에 기존에 동물실험에 대한 윤리적 문제와 비용적인 부분을 부분적으로 해결할 수 있다(16-18). 그 예로 심혈관계 질환에 대한 시뮬레이터를 제작하여 질환 자체를 표현하거나, 인공판막이나 스텐트를 삽입하기 전 수술 전 모의 수술을 수행하여 보다 나은 수술 계획을 세우거나 질환을 이해할 수 있었다(19). 또한 *conjoined twins*의 분리 수술같이 어려운 수술에 있어 수술 전 해부학적 구조와 수술 계획 수립에도 큰 도움을 주고 있다(20). 또한, 재질을 맞추면 미리 수술을 해볼 수 있는 리허설 수술을 해 볼 수

Fig. 3. Patient-specific simulators of kidney cancer.

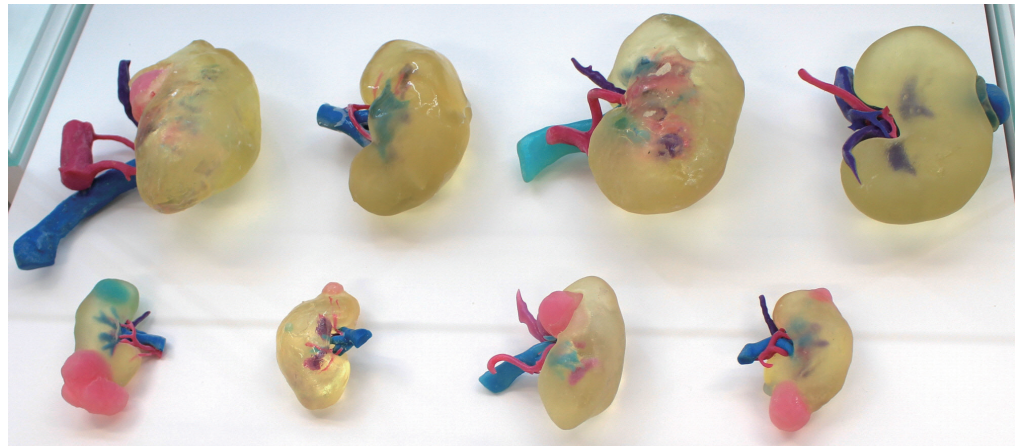


Fig. 4. Patient-specific simulators for lung transplantation.



있어서 훨씬 더 정확하게 진단 및 치료 계획을 결정할 수 있고(Fig. 4), 이 모형을 이용해서 맞춤형 수술 가이드나 삽입 보형물을 제작할 수도 있다.

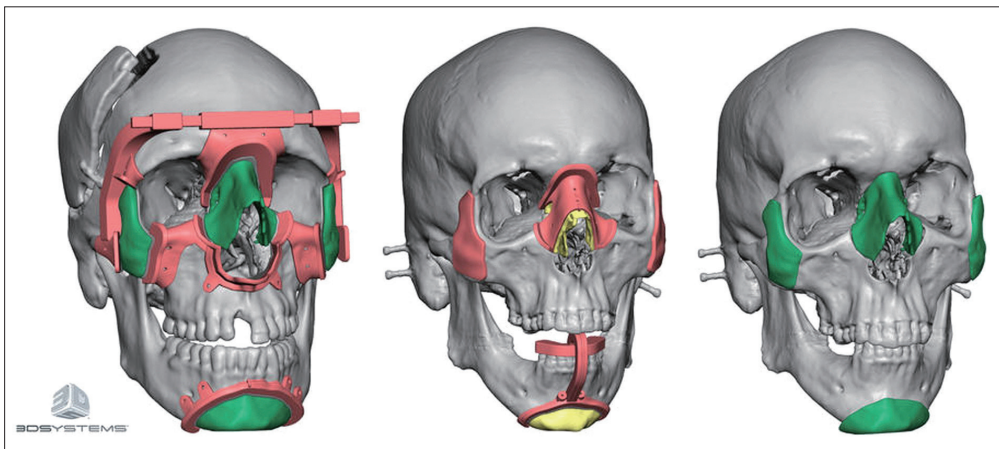
수술 가이드

수술 가이드는 환자 및 수술 계획에 맞춤형으로 제작되며, 수술 가이드를 통하여 절개, 절제, 삽입, 표기 등을 가능하게 하는 환자 맞춤형 의료기기로 활용된다(21). 이는 수술의 정확도와 편의성을 높여주며, 대부분 경조직에 적용되고 있으나, 최근에는 연조직에서도 폭넓게 사용되고 있다(22). 예를 들면, 수술 전 계획된 정확한 위치와 방향으로 삽입을 할 수 있게 뼈를 절개하게 해주거나(23, 24), 삽입 및 고정시키는 역할을 한다(25-28). 실제 안면 이식 수술에서 의료영상을 기반으로 절단면의 각도와 면적 등을 고려한 수술 가이드를 사용하고 이를 통해 수술의 편의성과 정확성을 높였었다(Fig. 5). 또한, 암 조직의 위치를 표기할 수 있게 하는 역할을 하여 암 조직을 정밀하게 절제할 수 있도록 한다(Fig. 6). 그리고, 안와골절 환자에게 사용되는 상용화된 삽입 보형물에 크기와 곡률을 형상화 시켜주어, 실제 수술 시간을 단축하거나 수술 정확도를 높여서 환자의 예후에 좋은 영향을 준다(29, 30).

삽입 보형물

체내에 삽입 가능한 폴리머, 세라믹, 금속 등 다양한 생적합 재료로 3D 프린팅이 가능해짐에 따라, 수술 계획에 따른 환자 맞춤형 삽입 보형물을 제작할 수 있게 되었다. 이는 환자의 해부학적 구조 및 질환 변이가 반영되지 못한 기존 의료기기들과 달리 수술 전 미리 계획된 대로 보형물을 삽입하기 위한 절개 영역을 최소화하고, 크기나 형상을 최적화할 수 있게 되었다(Fig. 7). 이러한 삽입 보형물은 다시 생분해성 보형물과 영구 삽입 보형물로 나눌 수 있다. 사례로는 기관지 연화증(Tracheobronchomalacia)이 있는 환자에게 외부 압력으로 인해 기도가 눌리지 않을 수 있게 생

Fig. 5. Surgical guide for facial transplant. Adapted from 3D Systems. Available from: URL: <https://ko.3dsystems.com/blog/2015/11/virtual-surgical-planning-assists-full-face-transplant> (52).



분해성 환자 맞춤형 부목을 제작하여 적용했다(31, 32). 또한, 환자 맞춤형으로 두개골 보형물을 디자인하고 삽입하거나(33), 갈비뼈와 흉골이 같이 구성되어 있는 맞춤형 금속 보형물을 제작하여 삽입하였다(34, 35).

보조기기

보조기기로는 특수한 목적을 위한 깁스, 부목을 환자 맞춤형으로 제작할 수 있고(36, 37), 저렴한 비용으로 맞춤형 의수 의족을 제작하고 있다(Fig. 8). 또한 안구결손 등과 같이 안면에 결손이 있는 환자들에게 반대쪽 눈의 홍채 패턴 및 3D 프린팅을 이용한 밑그림을 그려서 경제적이고 효율적으로 에피테제를 제작하여 미용적 보장구를 제작하는 목적으로도 활용이 되고 있다(38). 그밖에 방사선 치료에 있어 선량 적용의 범위와 분포를 제어할 수 있는 보조기기로도 사용되고 있다(39). 기존에 고가의 영상팬텀과는 달리 저렴한 비용으로 형상에 구애받지 않고 다양한 질환의 특징이 반영된 영상팬텀 연구도 진행되고 있다(40).

바이오프린팅

바이오프린팅은 세포 자체를 직접 3D 프린팅하여 형상을 제작하고 조직을 재생하는 방법과 세포배양을 위한 지지체를 제작한 이후 세포배양을 통해 지지체와 같은 형상을 가지게끔 하는 방식이 있다(41-46). 이를 통해 생체기능을 하는 체내 삽입형 의료기기를 제작하게 된다(47). 또한, 생

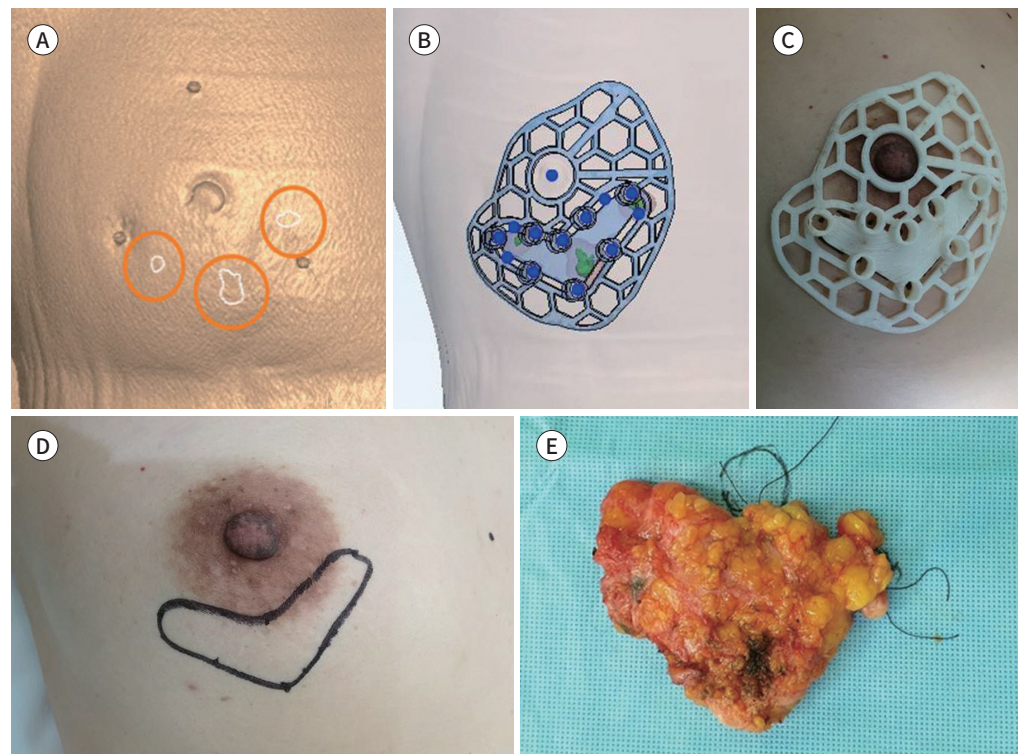


Fig. 6. Patient-specific surgical guide for BCS.

A. Three segmented breast cancer.

B. A designed surgical guide for BCS.

C. Three-dimensional-printed surgical guide for BCS.

D. The marked outline of breast cancer on the skin.

E. Resected breast cancer tissue. BCS = breast-conserving surgery

Fig. 7. Pilot study of patient-specific implant device of flexible material.

A. CT-based 3D reconstruction of patient-specific dead zone after pneumonectomy.

B. 3D-modeled dead zone and frame for molding.

C. Fabricated negative mold with silicone material.

D. Final product of spacer for dead zone with silicone material using molding technique (6).

3D = three-dimensional

Adapted from Kim et al. Korean J Radiol 2016;17:182-197, with permission of The Korean Society of Radiology (6).

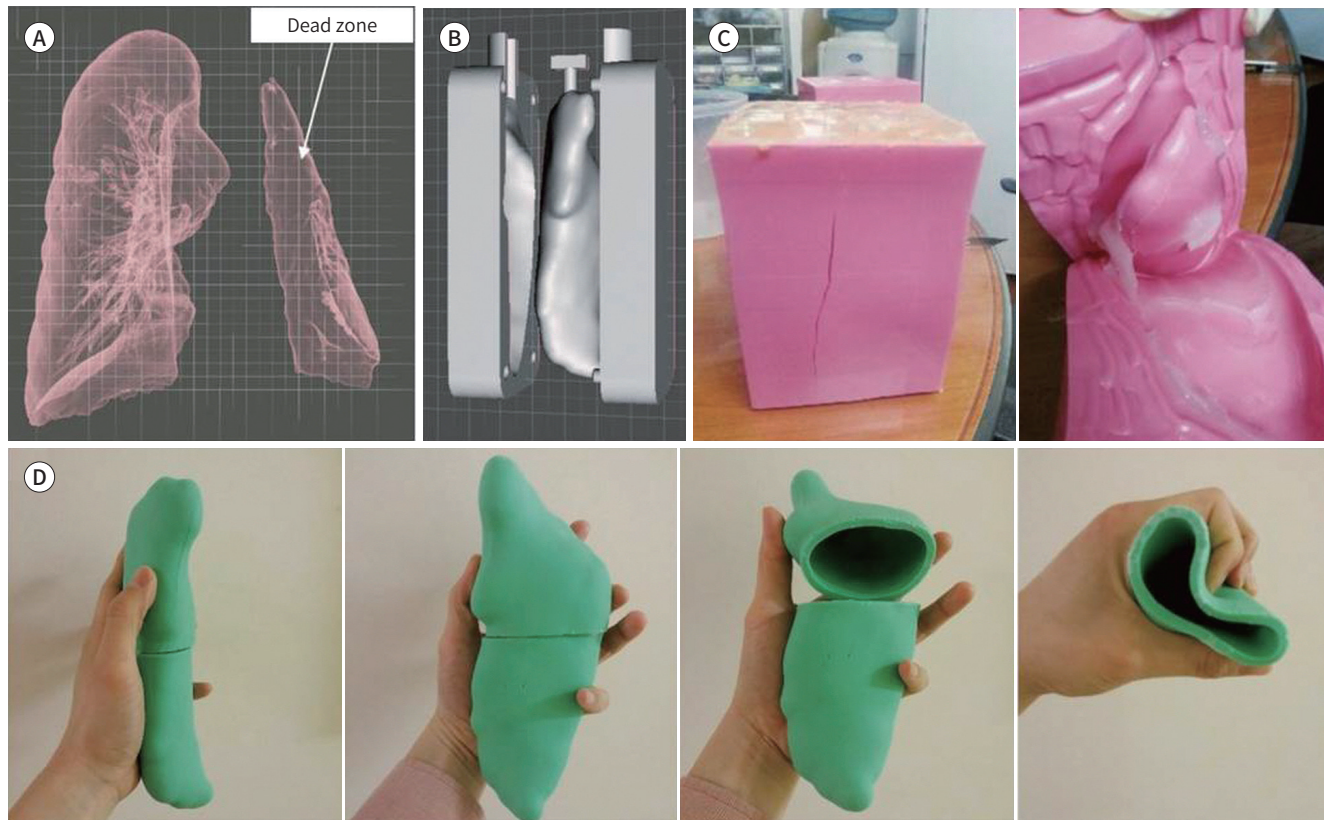


Fig. 8. Patient-specific splint.

체적합성 재료와 세포를 이용한 바이오 잉크는 실제 조직과 유사한 외형과 구조를 가진 기능성 인공 조직을 제조할 수 있기 때문에, 동물실험을 대체 가능할 것으로 주목받고 있다(48). 그리고, Lab-on-a-chip을 3D 프린팅을 통해 제작하여 기존의 기술보다 저렴하게 실험이 가능하게 되었다(49, 50).

고찰 및 결론

기존의 대량생산을 이용한 의료기기를 다양한 해부학적 변이와 질환변이를 가지는 환자에게 사용하기 위해서 다양한 크기와 수많은 규격의 의료기구나 삽입 보형물 등의 재고를 쌓아 놓고 사용하고 있다. 이런 의료기기 제조 및 유통 시스템은 많은 공간, 재고비용, 복잡한 유통 등 복잡한 문제를 발생시킨다. 또한 고려되지 않는 복잡한 변이는 실제 의료현장에서 많은 문제를 발생시키는 데, 이는 의료진의 부담을 가중시키고 있다.

3D 프린팅을 이용한 의료기술은 환자마다 맞춤형 의료기기 및 삽입 보형물 등을 생산하여, 환자별 특성에 맞는 수술 계획에 따른 정확한 수술을 할 수 있고, 재고 부담, 복잡한 의료기기 유통 등이 없어지므로, 저렴하고 효율적으로 의료를 바꿀 것으로 예측된다. 이렇게 제작되는 데이터들은 디지털화되어 관리되기 때문에 적절한 환자의 의료영상과 3D 프린터만 있으면 원격으로도 의료기기 제조가 가능해지며, 이는 의사가 부족한 개발도상국의 의료지원이나 병원에서 필요한 의료기기의 자가 생산을 가능하게 하여, 의료기기 유통의 혁명 및 의료 질의 상향 평준화를 이룰 수 있게 해줄 것으로 예상된다.

하지만, 아직 3D 프린팅 의료기기 활용이 보편화되기에는 현실적인 문제들이 존재한다. 먼저 의료영상을 기반으로 한 영상 분할 및 모델링을 진행하기 위해서는 획득할 의료영상의 질이 좋아야 하며, 영상에서 확인하기 어려운 사항들은 반영하기 어렵다. 또한 의료영상과 질환 및 임상적 수요에 대한 충분한 이해가 선행되어야 한다. 그리고 임상적 수요에 상응하는 영상분할 및 모델링, 적절한 3D 프린팅 기술 및 재료를 선정하는 과정이 필요하게 되며 이러한 업무를 수행할 수 있는 전문 지식이 있는 인력이 필요하다. 또한, 영상분할 및 모델링은 굉장히 많은 시간과 노력이 필요하다. 그밖에도, 3D 프린터 운용에 있어 프린팅 속도가 아직까지 충분히 빠르지 못하고 운용 비용이 많이 발생되기 때문에, 3D 프린팅 기술을 적극적으로 적용하기 어려운 것이 사실이다. 따라서, 앞서 언급된 일련의 사항들이 의료분야에서 합리적이고 효율적으로 수행될 수 있도록 프로토콜을 확립하고, 신기술을 도입할 필요가 있다. 특히, 영상분할 및 모델링의 경우에는 최근 인공지능의 발전으로 자동화하여 시간과 노력을 최소화할 수 있을 것으로 예상된다(51). 3D 프린팅 기술은 지속적으로 발전되어서, 시간적 한계를 극복하고 비용적인 문제 또한 해결되어야 할 것이며, 향후 3D 프린팅 기술의 장점을 이용한 의료기기가 많이 개발 및 적용될 것으로 사료된다.

이를 위해서는 수가 형태의 보상이 이루어져야 하는데, 의료 3D 프린팅 인허가와 수가 보상에 대한 추가적인 연구가 되어야 한다. 최근 국내에서 선천기형 심장 시뮬레이션 모델이 신의료기술로 선정되었고, 식품의약품안전처, 건강보험심사평가원에서 3D 프린팅 의료기기에 대한 다양한 가이드라인을 발표했다. 중국은 2015년 금속 3D 프린팅 기술로 제조된 3D 프린팅 골반뼈 삽입 보

형물의 제조 및 사용을 정식으로 승인했다. 일본은 2015년에 3D 프린팅 기술의 의료적응에 대한 가이드라인을 발표했으며, 2016년에 정형외과 일부 품목에 대해서는 수가를 만들었다. 또한, 미국 FDA에서는 3D 프린팅 기술을 응용한 의료기기 제조 관련 규제에 대한 가이드라인 뿐 아니라 2018년에 Current Procedural Terminology III 코드를 만들어서 제한적으로 3D 프린팅 의료기기 수가 코드를 만들었다.

이렇게, 세계 정부 및 기업들의 적극적인 참여로 맞춤형 의료기기의 실현은 3D 프린팅 기술의 발전과 함께 시너지를 얻고 있으며, 유전체, 신약 등의 정밀의료발전과 더불어 의료기기 측면의 정밀의료를 실현하고, 의료유통에 혁신을 가져올 핵심 역할을 할 것으로 사료된다.

Conflicts of Interest

The authors have no potential conflicts of interest to disclose.

REFERENCES

- Huang SH, Liu P, Mokasdar A, Hou L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *Int J Adv Manuf Technol* 2013;67:1191-1203
- Gross BC, Erkal JL, Lockwood SY, Chen C, Spence DM. Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences. *Anal Chem* 2014;86:3240-3253
- Rengier F, Mehndiratta A, Von Tengg-Kobligh H, Zechmann CM, Unterhinninghofen R, Kauczor HU, et al. 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2010;5:335-341
- Mitsouras D, Liacouras P, Imanzadeh A, Giannopoulos AA, Cai TR, Kumamaru KK, et al. Medical 3D printing for the radiologist. *Radiographics* 2015;35:1965-1988
- McGurk M, Amis AA, Potamianos P, Goodger NM. Rapid prototyping techniques for anatomical modelling in medicine. *Ann R Coll Surg Engl* 1997;79:169-174
- Kim GB, Lee S, Kim H, Yang DH, Kim YH, Kyung YS, et al. Three-dimensional printing: basic principles and applications in medicine and radiology. *Korean J Radiol* 2016;17:182-197
- Ventola CL. Medical applications for 3D printing: current and projected uses. *P T* 2014;39:704-711
- Michalski MH, Ross JS. The shape of things to come: 3D printing in medicine. *JAMA* 2014;312:2213-2214
- Dodziuk H. Applications of 3D printing in healthcare. *Kardiochir Torakochirurgia Pol* 2016;13:283-293
- Wong KV, Hernandez A. A review of additive manufacturing. *ISRN Mech Eng* 2012;2012:1-10
- Levy GN, Schindel R, Kruth JP. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Ann Manuf Technol* 2003;52:589-609
- Chepelev L, Giannopoulos A, Tang A, Mitsouras D, Rybicki FJ. Medical 3D printing: methods to standardize terminology and report trends. *3D Print Med* 2017;3:4
- Gupta BM, Dhawan SM. Three dimensional (3D) printing: a scientometric assessment of global publications output during 2007-16. *DESIDOC Journal of Library & Information Technology* 2018;38:238-245
- Ayoub AF, Rehab M, O'Neil M, Khambay B, Ju X, Barbenel J, et al. A novel approach for planning orthognathic surgery: the integration of dental casts into three-dimensional printed mandibular models. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2014;43:454-459
- Li B, Zhang L, Sun H, Yuan J, Shen SG, Wang X. A novel method of computer aided orthognathic surgery using individual CAD/CAM templates: a combination of osteotomy and repositioning guides. *Br J Oral Maxillofac Surg* 2013;51:E239-E244
- Canstein C, Cachot P, Faust A, Stalder AF, Bock J, Frydrychowicz A, et al. 3D MR flow analysis in realistic rapid-prototyping model systems of the thoracic aorta: comparison with in vivo data and computational fluid dynamics in identical vessel geometries. *Magn Reson Med* 2008;59:535-546
- Anderson JR, Thompson WL, Alkattan AK, Diaz O, Klucznik R, Zhang YJ, et al. Three-dimensional printing of anatomically accurate, patient specific intracranial aneurysm models. *J Neurointerv Surg* 2016;8:517-520
- Jacobo OM, Giachero VE, Hartwig DK, Mantrana GA. Three-dimensional printing modeling: application in

- maxillofacial and hand fractures and resident training. *Eur J Plast Surg* 2018;41:137-146
19. Giannopoulos AA, Mitsouras D, Yoo SJ, Liu PP, Chatzizisis YS, Rybicki FJ. Applications of 3D printing in cardiovascular diseases. *Nat Rev Cardiol* 2016;13:701-718
 20. Wood BC, Sher SR, Mitchell BJ, Oh AK, Rogers GF, Boyajian MJ. Conjoined twin separation: integration of three-dimensional modeling for optimization of surgical planning. *J Craniofac Surg* 2017;28:4-10
 21. Jabero M, Sarment DP. Advanced surgical guidance technology: a review. *Implant Dent* 2006;15:135-142
 22. Barth RJ Jr, Krishnaswamy V, Paulsen KD, Rooney TB, Wells WA, Rizzo E, et al. A patient-specific 3D-printed form accurately transfers supine MRI-derived tumor localization information to guide breast-conserving surgery. *Ann Surg Oncol* 2017;24:2950-2956
 23. Ciocca L, De Crescenzo F, Fantini M, Scotti R. CAD/CAM and rapid prototyped scaffold construction for bone regenerative medicine and surgical transfer of virtual planning: a pilot study. *Comput Med Imaging Graph* 2009;33:58-62
 24. Suojanen J, Leikola J, Stoor P. The use of patient-specific implants in orthognathic surgery: a series of 32 maxillary osteotomy patients. *J Craniomaxillofac Surg* 2016;44:1913-1916
 25. Flügge TV, Nelson K, Schmelzeisen R, Metzger MC. Three-dimensional plotting and printing of an implant drilling guide: simplifying guided implant surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 2013;71:1340-1346
 26. Sarment DP, Sukovic P, Clinthorne N. Accuracy of implant placement with a stereolithographic surgical guide. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2003;18:571-577
 27. Ersoy AE, Turkyilmaz I, Ozan O, McGlumphy EA. Reliability of implant placement with stereolithographic surgical guides generated from computed tomography: clinical data from 94 implants. *J Periodontol* 2008;79:1339-1345
 28. Oka K, Moritomo H, Goto A, Sugamoto K, Yoshikawa H, Murase T. Corrective osteotomy for malunited intra-articular fracture of the distal radius using a custom-made surgical guide based on three-dimensional computer simulation: case report. *J Hand Surg Am* 2008;33:835-840
 29. Kang S, Kwon J, Ahn CJ, Esmaeli B, Kim GB, Kim N, et al. Generation of customized orbital implant templates using 3-dimensional printing for orbital wall reconstruction. *Eye (Lond)* 2018;32:1864-1870
 30. Tabaković SZ, Konstantinović VS, Radosavljević R, Movrin D, Hadžistević M, Hatab N. Application of computer-aided designing and rapid prototyping technologies in reconstruction of blowout fractures of the orbital floor. *J Craniofac Surg* 2015;26:1558-1563
 31. Morrison RJ, Hollister SJ, Niedner MF, Mahani MG, Park AH, Mehta DK, et al. Mitigation of tracheobronchomalacia with 3D-printed personalized medical devices in pediatric patients. *Sci Transl Med* 2015;7:285ra64
 32. Zopf DA, Hollister SJ, Nelson ME, Ohye RG, Green GE. Bioresorbable airway splint created with a three-dimensional printer. *N Engl J Med* 2013;368:2043-2045
 33. Choi JW, Kim N. Clinical application of three-dimensional printing technology in craniofacial plastic surgery. *Arch Plast Surg* 2015;42:267-277
 34. Aranda JL, Jiménez MF, Rodríguez M, Varela G. Tridimensional titanium-printed custom-made prosthesis for sternocostal reconstruction. *Eur J Cardiothorac Surg* 2015;48:e92-e94
 35. Aragón J, Pérez Méndez I. Dynamic 3D printed titanium copy prosthesis: a novel design for large chest wall resection and reconstruction. *J Thorac Dis* 2016;8:E385-E389
 36. Chen Y, Lin H, Zhang X, Huang W, Shi L, Wang D. Application of 3D-printed and patient-specific cast for the treatment of distal radius fractures: initial experience. *3D Print Med* 2017;3:11
 37. Fitzpatrick AP, Mohammed MI, Collins PK, Gibson I. Design of a patient specific, 3D printed arm cast. *KnE Engineering* 2017;2:135-142
 38. Menneking H, Klein M, Locke HG, Gonschior S. Postoperative management of bone-anchored facial epiptheses. *HNO* 1998;46:579-582
 39. Su S, Moran K, Robar JL. Design and production of 3D printed bolus for electron radiation therapy. *J Appl Clin Med Phys* 2014;15:194-211
 40. Solomon J, Samei E. Quantum noise properties of CT images with anatomical textured backgrounds across reconstruction algorithms: FBP and SAFIRE. *Med Phys* 2014;41:091908
 41. Murphy SV, Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nat Biotechnol* 2014;32:773-785
 42. Das S, Pati F, Choi YJ, Rijal G, Shim JH, Kim SW, et al. Bioprintable, cell-laden silk fibroin-gelatin hydrogel supporting multilineage differentiation of stem cells for fabrication of three-dimensional tissue constructs. *Acta*

Biomater 2015;11:233-246

43. Khalyfa A, Vogt S, Weisser J, Grimm G, Rechtenbach A, Meyer W, et al. Development of a new calcium phosphate powder-binder system for the 3D printing of patient specific implants. *J Mater Sci Mater Med* 2007;18: 909-916
44. Park SH, Kim TG, Kim HC, Yang DY, Park TG. Development of dual scale scaffolds via direct polymer melt deposition and electrospinning for applications in tissue regeneration. *Acta Biomater* 2008;4:1198-1207
45. Derby B. Printing and prototyping of tissues and scaffolds. *Science* 2012;338:921-926
46. Pati F, Jang J, Ha DH, Kim SW, Rhie JW, Shim JH, et al. Printing three-dimensional tissue analogues with decellularized extracellular matrix bioink. *Nat Commun* 2014;5:3935
47. Nguyen DG, Funk J, Robbins JB, Crogan-Grundy C, Presnell SC, Singer T, et al. Bioprinted 3D primary liver tissues allow assessment of organ-level response to clinical drug induced toxicity in vitro. *PLoS One* 2016;11: e0158674
48. Chia HN, Wu BM. Recent advances in 3D printing of biomaterials. *J Biol Eng* 2015;9:4
49. Ho CM, Ng SH, Li KH, Yoon YJ. 3D printed microfluidics for biological applications. *Lab Chip* 2015;15:3627-3637
50. Yazdi AA, Popma A, Wong W, Nguyen T, Pan YY, Xu J. 3D printing: an emerging tool for novel microfluidics and lab-on-a-chip applications. *Microfluid Nanofluidics* 2016;20:50
51. Zhang DQ, Chen SC. A novel kernelized fuzzy C-means algorithm with application in medical image segmentation. *Artif Intell Med* 2004;32:37-50
52. 3D Systems. Virtual Surgical Planning Assists with Full Face Transplant. Available at: <https://ko.3dsystems.com/blog/2015/11/virtual-surgical-planning-assists-full-face-transplant>. Published 2015. Accessed Mar 20, 2019

3D 프린팅 기술의 의료적응에 관한 종설

이상욱¹ · 김태훈¹ · 홍다영¹ · 옥준혁¹ · 권재영¹ · 권은서¹ · 권진희¹ · 서준범² · 채은진² · 양동현²
김청수³ · 경운수⁴ · 고범석⁵ · 최세훈⁶ · 사호석⁷ · 김남국^{1,2*}

3D 프린팅은 재료를 붙여서 만드는 제조기법으로 다품종 소량생산이 가능하다는 장점이 있다. 대량생산 시스템을 기반으로 한 의료기기 및 재료 분야에서 커버하지 못하는 다양한 의료분야에서 환자 맞춤형 의료기기 및 삽입 보형물 제작에 활용될 수 있다. 시뮬레이터는 질환의 해부학적 구조를 환자 영상을 기반으로 제작하여 교육용, 진단, 치료 계획 수립용, 수술 전 모의 수술용 등으로 활용된다. 수술 가이드는 외과수술 계획에 맞춤형으로 제작되어 절개, 절제, 삽입, 마킹 등을 하는 환자 맞춤형 의료기기로 활용된다. 특히, 3D 프린터가 인체 삽입이 가능한 재료를 출력할 수 있게 되면서 환자의 해부학적 구조나 수술 계획을 반영한 맞춤형 삽입 보형물을 사용할 수 있게 되었고, 기존에 맞춤형으로 제작하기 힘들거나 결손된 영역에 대하여 보완이 가능하게 되었다. 보조기기로는 깁스나 부목, 의수, 의족, 에피테제 등이 있다. 바이오프린팅을 통해 지지체에 세포를 배양하거나 직접 세포를 출력하여 기능성 인공조직을 만드는 연구도 활발히 이루어지고 있다.

울산대학교 의과대학 서울아산병원 ¹융합의학과, ²영상의학과, ³비뇨기과, ⁴건강의학과, ⁵유방외과, ⁶흉부외과, ⁷안과