

생체의료용 3D 프린팅 기술의 활용 현황 및 전망

I. 서론

3D 프린터는 3차원 컴퓨터 가상 모델을 바탕으로 프린터 종류에 따라 다양한 소재를 이용하여 입체적인 물체를 만들어 낼 수 있는 기기이다. 이러한 3D 프린터를 활용한 3D 프린팅 기술은 대량 생산 시스템이 중심이 되어왔던 기존 제조업에 소비자 맞춤형 소량 생산이라는 새로운 패러다임 전환을 가져올 차세대 생산 기술로 각광을 받고 있다. 3D 프린팅 기술은 컴퓨터 소프트웨어로 만든 3차원 모델을 바탕으로 플라스틱, 합성수지, 금속 등 재료를 쌓고, 균형 3차원의 실제 물체로 만든다. 일반 프린터가 2차원인 종이 위에 잉크로 출력을 하지만, 3D 프린터는 다양한 소재로 부피와 두께가 있는 물체를 찍어낸다. 3D 프린팅 기술은 적층 방식과 사용되는 재료에 따라 구분되며, 적층 방식에 따라 압출, 분사, 광경화, 소결, 인발, 침전, 접합 등으로 구분되며, 활용 가능한 재료는 고분자, 금속, 종이, 목재, 식재료, 생체재료 등으로 그 범위가 매우 다양하다^[1-2].

1986년 미국에서 최초의 상업용 3D 프린터가 출시되었지만, 오랫동안 큰 주목을 받지 못하였다^[3]. 하지만, 최근 크게 관심을 받기 시작하여 최근 3년 동안 보급형 3D 프린터의 전 세계 판매량은 해마다 2배 이상 증가하였고, 지난해의 경우 약 27만8000대로 급증하였다. 보급형 3D 프린터의 가격도 대당 3만 - 4만달러에서 2,000달러 정도로 하락해, 중소기업이나 1인 개발자들이 구입하여 활용할 수 있는 수준까지 내려갔다. 이렇게 최근 3D 프린터 시장의 성장 속도는 폭발적이다. 지난해 기준으로 약 52억달러(약 6조원), 3년 동안 연평균 30% 넘는 성장률을 기록하였고, McKinsey 보고서^[4]에 따르면 3D 프린팅은 전 세계적으로 2025년까지 매년 2,300억 달러에서 5,500억 달러의 경제적 효과를 낼 것으로 예측된다.



이 정 진
숭실대학교 컴퓨터학부



현재 3D 프린팅 기술이 가장 활발하게 도입된 분야는 제조업이다. 3D 프린터에 컴퓨터 모델을 입력하고 제품을 출력하면 제품 개발에 걸리는 시간을 기존과 비교하여 수십 분의 1로 줄일 수 있다. 부품 틀을 제작하고 실물 모형을 만들기까지 몇 주 이상 걸리던 절차를 몇 시간 안에 끝낼 수 있다. 조립하기 복잡하거나 다양한 소재를 섞어 만들어야 하는 복잡한 부품을 손쉽게 제작하는 데도 매우 유용하다. 최근 3D 프린터 생산 기술을 이용하여 무인 항공기, 주택, 자동차, 음식, 화장품 등 다양한 분야에서 제품 생산이 시도되고, 판매되고 있다. 이중 특히 생체의료 분야에 3D 프린팅 기술의 활용이 주목 받고 있고, 기존의 임상 진단 및 치료의 효율성을 증가시키고, 비용을 감소시키는 데 큰 기여를 하고 있다. 의료기기 제조 업체들은 환자의 인체에 맞춤형 제품을 제작하는 데 3D 프린팅 기술을 활용하고 있다. 기존의 환자 신체의 본을 뜨고 그에 맞는 틀을 만드는 과정을 거치지 않고, 인체를 3차원 스캐너 등으로 스캔하여 모델을 만들고, 그 모델을 3D 프린터로 출력하면 된

3D 프린팅 기술은 가용 재료가 확대됨에 따라 생체의료와 관련된 산업 분야에서 의료 비용 절감, 개인 맞춤형 의료 제품으로의 활용에 대한 관심이 집중되고 있다.

다. 미국의 Align Technology는 치아에 장착했을 때 눈에 잘 띄지 않는 투명한 교정기를 생산하여 3D 프린팅 기술의 생체의료 적용에서 가장 큰 상업적인 성공을 거두고 있고, 미국 Bespoke Innovation은 착용자의 신체와 미적인 취향까지 반영한 맞춤형 의족을 제작하고 있다.

이와 같이 3D 프린팅 기술은 가용 재료가 확대됨에 따라 생체의료와 관련된 산업 분야에서 의료 비용 절감, 개인 맞춤형 의료 제품으로의 활용에 대한 관심이 집중되고 있다³⁾. 3D 프린팅 기술의 활용 분야 중 의료 및 치과 분야의 경우 소비재, 자동차에 이어 세 번째로 높은 점유율을 기록하고 있고, 소비자들의 신체적 조건에 최적화된 맞춤형 제품 생산이 가능함에 따라 생체의료와 관련된 산업 분야의 새로운 생태계가 도래하고 있다. 개인 맞춤형 제품이 반드시 필요한 틀니, 의족 등 특정 영역에서 3D 프린팅 기술의 도입이 필수적이고, 더 나아가 인체 조직과 세포를 재료로 인공 장기 생산이 가능함에 따라 3D 프린팅 기술은 생체의료와 관련된 산업을 견인할 핵심 기술

이 될 전망이다. 본 논문에서는 현재 생체의료용 3D 프린팅 기술의 활용 분야 및 향후 전망에 대하여 기술한다.

II. 생체의료용 3D 프린팅 기술의 활용 분야

2.1. 가상 수술 시뮬레이션

의료 수술 분야에서 인체 내부의 혈관 구조와 상호 위치 관계를 파악하는 목적으로 3D 프린팅 기술의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 중 가장 활발히 연구되고 있는 분야는 생체 부분 간 이식 수술 분야이다. 기존에는 독일의 Mevis나 EDDA Technology 등에서 다양한 종류의 간 혈관들의 위치 관계를 3차원 가상 모델로 시각화하는 서비스와 소프트웨어를 간 분할, 간 혈관 구조 분석

기술 등을 기반으로 제품화하였다. 특히 독일 메비스(MeVis Medical Solutions AG)사의 MeVis Distant Services (MDS) 로서 <그림 1>에 서와 같이 원격 서비스로 분석 결과만을 제공하고, 원격 서비스는 CT (Computed Tomography) 영상 제 공 후 2일 정도 걸리며, 요금은 회당 100만원(1일 이내 제공 시 급행료 추가) 정도가 소요된다.

기존에 이와 같이 의사의 수작업에서 진화하여 3차원 모델링 및 시각화 기술을 통하여 컴퓨터 모니터를 이용하여 제공하던 간과 3차원 혈관 모델을 각 환자의 간과 간 문맥(portal vein), 간 정맥(hepatic vein), 쓸개관(bile duct)의 3차원 메쉬 모델링이 가능하고, 3D 프린터의 입력 자료 구조인 g-code 형태로 변환하는 기술을 통하여 CT를 촬영한 모든 환자의 간과 간 혈관 구조의 입체적인 3차원 모델링이 가능하게 되었다. 모델링 결과를 고성능 3D 프린터와 연계하면, 환자의 간을 입체적인 실



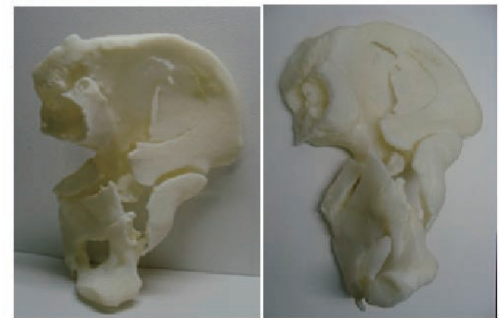
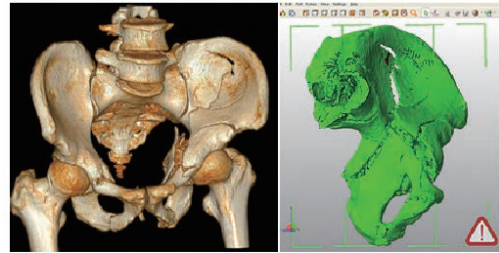
<그림 1> MeVis Distant Services (MDS) 처리 과정⁵⁾



〈그림 2〉 미국 Cleveland Clinic의 Dr. Nizar Zein 연구팀에서 실제로 수술 전 사용되는 3차원 프린팅된 간 모델^[6]

제 형태로 출력이 가능하고, 이를 이용하여 실제 수술 전 간 문맥, 간 정맥, 쓸개관의 입체적인 위치 관계를 파악하고, 수술을 모의로 시뮬레이션이 가능하여 실제 수술 시 절제 과정에서 간 혈관 등을 손상하지 않을 수 있기 때문에 수술 성공률을 높이는 데 기여할 수 있다. 〈그림 2〉는 미국 Cleveland Clinic의 Dr. Nizar Zein 연구팀에서 실제로 수술 전 사용되는 3차원 프린팅된 간 모델의 사례이다^[6]. 이러한 응용을 위하여 중요한 기술은 체적을 유지하는 mesh smoothing 기술과 기하학적 정보를 이용한 feature 유지 mesh decimation 기술 등이 필요하다.

3D 프린팅 기술은 기존의 절삭 가공과 비교하여 제작 시간과 비용 측면에서 매우 효율적이다. 특히 정형외과에서는 수술 시간과 정확성 등의 개선과 환자의 통증 감소와 재수술을 최소화할 수 있는 기술로서 관심을 받고 있다. 최근에는 3D 프린터로 골절된 뼈 모형을 제작하여 수술에 활용하는 연구가 활발히 수행되고 있고, 3D 프린터로 골반골절 모델을 직접 제작하여 사전 수술 계획에 활용되는 연구가 시도되고 있다^[7]. 환자의 CT 영상으로부터 FDM (Fused Deposition Modeling) 와이어 적층가공 방식의 조립형 3D 프린터를 이용하여 골반 골절 모델을 직접 제작하여 비용과 시간을 단축하고 사전 수술 계획에 활용하고 있다. 불안정성 골반골절 수술환자의 맞춤형 골 모델을 제작한 후 정형외과 의사에게 골절 수술 전에 제공하여 임상적 활용 가능 여부에 대한 검토와 분석 결과 정밀도와 해상도가 수술 계획 수립에 매우 유용한 것으로 판단되었다^[7]. 〈그림 3〉의 모형은 골반의 왼쪽 골절 부분을 이와 같은 방식으로 제작한 사례로서 접합 방식을 이용하여 세부분으로 나누어 출력한 후 접합하여 제작한 것이다. 골절의 형태와 크기, 해부학적 구조에 따라 분할 위치를 선정하여 제작하였고, 골반 골절 환자의 복합 골절



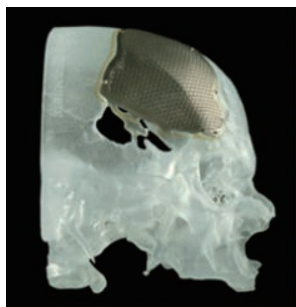
〈그림 3〉 3D 프린터로 제작된 골반 골절 모형^[7]

상태가 정확하게 표현되어 출력되었다^[7]. 이렇게 3D 프린터를 이용하여 제작된 모형으로 수술 방법과 해부학적 구조의 복원 방법을 미리 계획할 수 있다.

또한, 부비동암 수술에도 3D 프린터를 이용하여 수술 후 부작용을 최소화시킬 수 있는 연구와 임상 적용이 활발히 진행되고 있다^[8]. 부비동암 수술은 안구를 떠받치는 뼈 등 암이 퍼진 얼굴의 골격을 광범위하게 절제한 후 다른 부위의 뼈나 근육을 떼어 내 붙여 기존의 얼굴 골격을 대신하도록 하고 있지만, 기존의 CT 영상에만 의존하여 수술을 진행할 경우 얼굴 골격을 정확하게 확인하기 힘들어 수술 과정에서 부정 교합이 발생할 수 있었다. 이러한 단점을 해결하기 위해 CT 영상 기반으로 환자의 수술 부위의 골격을 3D 프린터를 이용한 모형물을 만들어 수술 중 예상되는 얼굴 골격 절제 범위를 미리 확인하고, 절제 부위의 뼈의 두께, 절제 방향의 중요 구조물 등을 실시간으로 확인하며 수술에 이용할 수 있다^[8]. 뼈 절제 후 뼈 결손 부위의 복원시 두개골 복원용 골시멘트를 이용하여 모형물에서 정확한 뼈결손부의 복원을 시킬 수 있었으며, 이 골시멘트 결손 모형은 직접 혹은 복원에 사용되는 다른 소재인 티타늄의 모양을 정확히 만들어 주는 데 이용한다.

2.2. 환자 맞춤형 보형물

환자의 특정 부위가 영구적으로 손상이 날 경우에 그 부위를 보완하기 위하여 기존에는 의사가 대략적인 사전 제작된 보형물 중 적당한 크기를 골라 수술을 하면서 이를 적당히 깎거나 변형하여 보완하는 방식으로 이루어져, 수술 후 해당 부위가 매끄럽지 못한 것은 물론, 심한 경우 보형물이 인체 내부를 돌아다니는 부작용이 일어나기도 하였다. 3D 프린팅은 이와 같은 한계를 극복할 수 있고, 원래 환자의 기존 부위의 모양과 동일한 환자 맞춤형 보형물을 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 최근에는 3D 프린터를 활용한 환자 맞춤형 보형물을 이용한 두개골 성형 수술이 시행되고 있다^[9-10]. 기존에 시행했던 두개골 성형수술은 두개골 뼈의 손실이 있는 경우 결손 부위를 플라스틱 재질의 골 시멘트로 메워왔다. 수술 시에 이 골 시멘트를 의사가 직접 두개골 형태로 만들어야 하는데, 일반적으로 7-8분 안에 제작이 이루어지지 않으면 시멘트가 굳어 변형이 불가능하며 두개골의 결손 부위가 클수록 수술이 어려워진다. 이를 해결하기 위하여 환자의 CT 영상 정보로부터 3D 프린터를 이용하여 환자 두개골 모형을 <그림 4>와 같이 티타늄 재질로 출력하였다. 이런 방식으로 수술 시간을 단축할 수 있고 감염에 대한 문제로 줄일 수 있다. 기존에는 폴리머 재질의 보형물이 사용됐지만, 3D 프린터를 활용하여 강도와 두께 등이 뛰어난 티타늄을 이용할 수 있었다. 결과적으로 환자의 영상 정보를 이용하여 개별 환자의 두개골 특징에 맞게 제작된 환자맞춤형 보형물을 이용하여 수술 중



<그림 4> 환자 맞춤형 두개골 보형물^[10]

3D 프린팅은 이와 같은 한계를 극복할 수 있고, 원래 환자의 기존 부위의 모양과 동일한 환자 맞춤형 보형물을 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

조작을 최소화하고, 수술 시간을 크게 단축시킬 수 있어 수술 후 부작용의 발생 확률을 줄일 수 있고, 3D 프린터로 제작된 보형물은 두개골 외형에 형태가 적합하여 미용적인 측면에서도 좋은 결과를 보여준다^[9].

다음으로 환자 맞춤형 보형물로 임상적으로 큰 의미가 있었던 연구는 비강 인공지대와 관련된 연구이다^[11-12]. 선천적으로 코와 콧구멍이 없었던 환자에게 3D 프린팅 기술을 이용하여 인공 코에 맞춤형 인공 콧구멍, 기도 지지대를 넣어 성공적으로 안착하는 연구가 수행되었다^[11-12]. 시중에 유통되는 인공지대는 매우 단순한 구조로 이러한 종류의 환자에 적용하기가 불가능하기 때문에 3D 프린팅 기술로 인체에 무해한 실리콘을 넣어 환자 맞춤형 기관을 완성하여 이식한다. 특히 비공, 비강의 협착을 방지하기 위해 맞춤형 비강 통로형 특수 스텐트를 수술 이후 재건된 비강의 구조 CT 영상으로부터 설계하고, 3D 프린팅 기술을 이용하여 제작하고, 자유로운 탈착이 가능하고 장착 후의 자유로운 호흡이 가능한 관 구조로 제작한다. 이렇게 제작된 스텐트를 환자에게 적용하여 호흡 훈련을 회복과 동시에 진행할 수 있게 되었으며, 점막조직재생까지 확인하여 이상 징후 없이 성공적으로 치료를 마칠 수 있었다^[12].

또한, 3D 프린터로 보형물을 제작하여 안면조소술에 적용하는 기술이 개발되어 실제 시술에 활용되고 있다^[13]. 안면윤곽술이 뼈를 깎아내는 것이라면, 안면조소술은 덧붙이는 시술을 말한다. 안면조소술은 환자의 얼굴을 CT로 촬영한 다음, 얼굴 뼈의 모양을 3D 프린터를 이용해 출력한 뒤 기존 환자 뼈에 적합한 형태의 보형물을 제작해 수술에 이용하는 방식이다. 기존의 안면윤곽술은 수술을 할 때 의사에게도 뼈가 다 보이지가 않고, 바깥쪽 뼈 모양은 볼 수 있다 해도 안쪽 뼈의 모양을 정확하게 알 수 없어 결국 의사가 CT 등의 자료만으로 대략적인 보형물의 크기를 골라 수술을 하면서 이를 적당히 깎거나 변형해 덧대는 방식이었다. 하지만, 이러한 안면윤곽술의 한계를 3D 프린터를 이용해 보형물을 제작하면 원래의 뼈 모양과 완벽하게 동일한 보형물을 제작할 수 있다. 보형

물이 기존 환자의 뼈에 맞춤형이기 때문에 수술 후 보형물이 움직이지 않으며, 경계가 생기는 부작용이 없어 환자가 느끼는 불편함이 없다.

2.3. 환자 맞춤형 수술 도구

환자 맞춤형 수술 도구 제작에도 3D 프린팅 기술이 활발히 적용되고 있다. 특히 인공 관절 수술 등에 적용이 되고 있는데, 수술 2-3주 전에 CT 영상이나 MR (Magnetic Resonance) 영상을 찍어 무릎 형태에 대한 정보를 얻고 영상 분할 및 3차원 모델링 기술을 이용해 개개인의 맞춤형 무릎 모델을 만든다^[14]. 이러한 무릎 모델로 실제 수술 전에 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 가상 수술을 한다. 이 과정에서 인공 관절이 가장 정확하게 들어가는 위치에 맞춰 수술 도구를 제작한다. <그림 5>에서와 같이 이를 3D 프린터로 전송해 수술도구를 출력한 후 실제 인공 관절 수술 시 맞춤형 수술도구로 이용한다. 3D 맞춤형 인공관절 수술은 수술 전 가상 수술을 미리 수행하고, 맞춤 제작한 수술 도구를 사용하기 때문에 인공 관절 수술의 오차 범위를 줄여 정확성을 높일 수 있다. 기존의 인공 관절 수술 방법은 일률적으로 똑같은 수술 도구를 사용했기 때문에 인공 관절이 잘못 삽입돼 수술 후 통증을 유발하거나 인공관절 수명을 단축시키는 확률이 높았다. 이에 반하여 3D 프린팅 기술을 접목한 맞춤형 인공관절 수술 도구는 수술의 정확성이나 수술시간 단축에 대한 장점이 있어 현재 미국을 비롯한 외국에서 사용이 증가하고 있다.



<그림 5> 대퇴골의 3D 프린터로 출력한 환자 맞춤형 수술 도구 가이드^[14]

3D 프린팅 기술을 접목한 맞춤형 인공관절 수술 도구는 수술의 정확성이나 수술시간 단축에 대한 장점이 있어 현재 미국을 비롯한 외국에서 사용이 증가하고 있다.

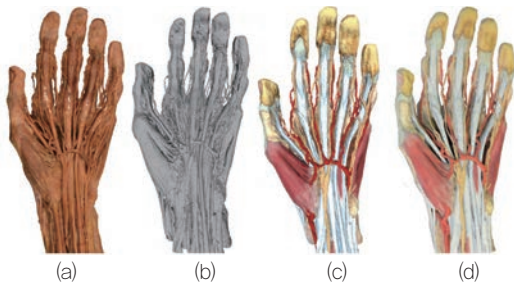


<그림 6> 3D 프린터를 이용하여 제작된 환자 맞춤형 투명 교정 장치 예시^[16]

2.4. 치과 응용

사람에 따라 치아의 모양이나 구강구조가 다르기 때문에 치아 보철물이나 임플란트에 3D 프린터가 효과적으로 쓰일 수 있다^[15]. 3D CT와 치과용 3D 스캐너를 이용하여 환자의 치아 구조 데이터를 획득하고, 3D 프린팅 기술을 활용하여 치아교정장치와 임플란트를 제작할 수 있는데 치기공 3D 모델의 경우, 수술 시 임플란트 드릴이 수술 부위의 정확한 위치에 자리할 수 있도록 환자의 구강 구조와 잇몸의 모양에 완벽히 일치하는 수술용 가이드로 이용될 수도 있다^[15]. 특히, 여러 혈관들이 지나가는 부위에서 진행되는 임플란트 수술에서는 단 1 mm의 오차도 치명적인 결과를 가져올 수 있기 때문에 수작업보다 3D 프린팅 기술을 활용함으로써 신속하고 정밀하게 수술을 진행할 수 있다. 또한, 크라운이나 브릿지 치아 보철물을 제작하기 위하여 3D 프린터가 많이 활용되고 있다^[1]. 기존 보철물은 치기공사에 의하여 고온과 고압으로 만드는 주조 방식이라 변형률이 높고, 시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라 만드는 사람의 숙련도에 따라 모양이나 질이 달라질 수 있지만, 3D 프린터를 이용하여 만드는 방식은 일정한 품질의 제품을 저렴한 가격으로 짧은 시간에 만들 수 있다.

특히 치과 분야에 실제로 많은 환자들에 적용되는 투명 교정 장치는 3D 프린터의 의료 분야 적용에서 현재 가장 상업적으로 성공적인 사례이다^[16]. 투명 교정 장치는 치과에서 교정을 원하는 환자의 정밀 인상 채득과 사진 촬영을 수행하여 그 결과를 투명 교정 장치를 제작하는 업체에 보내어 그것을 스캔하여 3차원 디지털 영상으로 재



〈그림 7〉 3D 프린터를 이용한 인체 모형 제작 단계^[17]
(a) 원 영상 (b) 3차원 재구성된 CT 영상 (c) 가상으로 입힌 색상
(d) 3D 프린팅된 모형

현하게 된다. 치과 의사의 치료 계획에 맞추어 3차원 디지털 치아 영상을 CAD (computer-aided design) 소프트웨어를 이용하여 배열하고, 시간에 따른 각 단계별 맞춤형 교정장치를 3D 프린터를 이용하여 한 환자당 평균 20~30개 정도 제작한다. 이 때, 3D 프린터로 출력한 출력물이 바로 투명 교정 장치가 되는 것은 아니고, 그 출력물을 투명 교정 장치 제작기에 입력으로 주면, 〈그림 6〉에서와 같이 특수 강화 플라스틱으로 제작된 투명 교정 장치가 제작된다. 이러한 기법은 현재 전세계적으로 350만명 이상의 환자에게 적용이 되어 오고 있고, 환자 만족도가 96% 이상을 기록하고 있다.

2.5. 의료진의 교육 및 훈련

의과 대학에서는 시체를 해부하여 인체의 각 부분을 공부한다. 하지만, 실습용 시체의 수가 늘 부족하였는데, 최근 3D 프린터를 이용하여 3D 프린터로 프린팅된 신체 내부의 골격이나 뼈를 무한정으로 제공 받을 수 있게 되



〈그림 8〉 3D 프린터 모형을 이용한 뇌종양 수술 시뮬레이션 사례^[19]

었다^[1]. McMenamin et al.은 3D 프린터로 실제와 똑같은 사실적인 시체의 부분이나 뼈 조각을 인쇄하는 기술을 개발하였다^[17]. 〈그림 7〉에서와 같이 모형을 만들기 위해서 실제 신체 부위를 CT 또는 표면 레이저 스캐너를 사용하여 스캔하고, 그 다음은 데이터를 시료와 동일하게 착색한다. 그리고, 3D 컴퓨터 모델을 만드는 데 사용한다.

또한, 3D 프린팅한 모형을 이용하여 수술 실습을 모의로 시뮬레이션하는 시도도 많이 시행되고 있고, 특히 두개골 모형 등을 통해 뇌종양을 제거하는 실습이 시행되고 있다^[18]. 다양한 질감과 두께의 플라스틱 조형물을 찍어내는 최신 3D 프린터를 이용하여 피부와 두개골, 두개골의 내부 연부조직까지 재현하여 의대생들이 종양 모형을 집

현재 3D 프린팅 기술은 피부, 근육, 혈관 그리고 연골과 같이 비교적 단순한 조직을 프린팅하여 인체에 이식하는 수준까지 발전하였지만 최근의 발전 속도를 감안했을 때, 장기를 프린팅하는 것도 조만간 가능할 것으로 보인다.

어넣은 뒤 두개골을 뚫고 뇌종양을 제거하는 실습이 가능하였다. 국내에서는 중앙대병원에서 〈그림 8〉에서와 같이 3D 프린터로 제작한 두상 모형으로 뇌종양 수술 실습교육을 실시하였다^[1]. 특정 부위에 뇌종양이 있는 환자의 두상 그대로를 본 따서 3D 프린터를 이용하여 수

술용 두상을 만들었다. 수술방에서 진행된 시뮬레이션은 우선 CT, MR 영상을 보면서 두상의 틀을 네비게이터로 인식했다. 수술하기 전 수술할 부위를 정확히 확인하는 작업이다. 이후 수술 부위에 점을 찍어 두피를 열어 고정시킨 다음, 두개골을 절개하고 종양을 제거했다. 종양의 깊이를 영상과 모형으로 동시에 확인했다. 이와 같이 3D 프린팅을 활용한 수술법은 정확한 환자 정보를 제공하여 수술 시간 자체를 단축할 수 있다.

Ⅲ. 향후 생체의료용 3D 프린팅 기술의 활용 분야 전망

3.1. 장기 재생

현재 3D 프린팅 기술은 피부, 근육, 혈관 그리고 연골과 같이 비교적 단순한 조직을 프린팅하여 인체에 이식하는 수준까지 발전하였지만 최근의 발전 속도를 감안했을 때, 장기를 프린팅하는 것도 조만간 가능할 것으로 보

이다^[15]. 조직 공학 기술과 접목하여 자신의 몸에서 채취한 세포를 배양한 후 프린팅에 활용함으로써 인체의 거부 반응 및 유착율도 높일 수 있을 것으로 예상된다. 최근 조직 공학 기술에 3D 프린팅 기술이 접목되면서 환자 맞춤형 조직 재생 분야에 혁신을 가져왔다^[11]. 2000년 초반부터 3D 프린팅 기술을 활용하여 세포 지지체를 제작하기 시작하였으며, 세포 부착이 가능한 생체재료를 사용하여 3차원 구조의 세포 지지체를 만들거나, 기하학적인 패턴에 세포를 분사할 수 있는 3D 프린터를 활용함으로써 목적 조직을 재생하는 시도가 있었다. 인체 세포를 3D 프린터용 잉크로 만든 다음, 신체 촬영 정보를 기반으로 맞춤형 관절이나 심장 판막 등 인공 장기를 만드는 게 기본 원리다. 이 방식이 실용화된다면, 장기 이식이 필요한 환자들이 기증자를 기다리는 대신 자신의 세포를 추출해 인공 장기를 만들고, 사고로 신체 일부를 잃은 경우에도 진짜 같은 인공 신체를 제작할 수 있을 것이다.

3D 프린터를 이용한 장기 재생을 개발하는데 가장 중요한 고려사항은 조직에서의 대사작용이다. 3차원 구조를 이루고 있는 조직에서 세포가 정상적으로 활동하는데 필요한 적절한 산소 및 영양소의 공급, 그리고 노폐물의 제거는 혈관을 통해 이루어진다. 따라서, 바이오 프린팅된 조직의 3차원 구조체는 신생 혈관 없이는 세포 생존 및 적절한 증식에 필요한 영양분, 산소 및 노폐물 제거 등의 적절한 물질대사를 얻지 못할 것이다^[20]. 3D 바이오 프린팅 기술에서는 세포의 증식 및 분화가 적절하고 균일하게 일어날 수 있도록 원시 혈관 구조를 설계하거나 기능적 수준의 관류를 통해 조

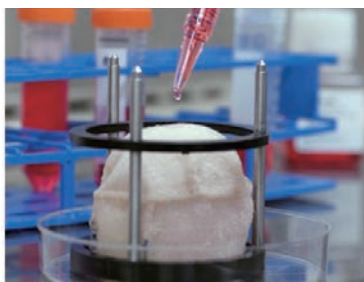
직에 적절한 대사를 공급해야 할 필요가 있다^[21]. 위와 같은 이유로 최근 조직 두께가 얇아 물질대사가 용이한 방광^[22], 기도^[23]에 성공적으로 적용이 되었다. A. Atala^[22]는 <그림 9>에서와 같이 먼저 환자의 방광에 대한 CT (computed tomography) 영상을 기반으로 설계하여 지지체를 만든다. 여기에 환자의 방광 조각에서 얻어진 세포를 7-10일 동안 배양시켜 충분한 세포 수를 확보한 후 방광 지지체에 주입한다. 이렇게 얻어진 인공방광은 약 6주 동안 체온과 95%의 산소포화도가 유지되는 바이오 리액터에 넣어 배양 및 안정화 시킨 후에 환자에게 이식된다^[22]. 비교적 구조가 간단한 인공 방광과 기도를 제외하고는 복잡한 구조를 가지는 장기 전체를 재생하는데 있어서 많은 어려움에 봉착한 관계로 현재까지 성공에 이르지 못하고 있다^[11]. 따라서, 이에 따른 대안으로서 부분적으

로 장기의 실제 기능이 가능한 조직 (functional tissue)을 재생하는데 많은 연구자들이 노력을 기울이고 있다.

장기 이식 치료는 이식 수술 기법 및 수술 후 관리의 발전을 통해 현대 의학에서 상당한 효과를 보이

고 있다^[11]. 그러나 국내의 여건상 기증 장기 부족으로 인해 수많은 환자들이 이식 치료를 받지 못하고 있는 실정이다. 3D 프린팅 기술을 이용한 장기 재생 분야가 상용화 되면 장기 이식치료에서 가장 중요한 장기 수급 문제뿐만 아니라 나아가 면역 반응 등 이식치료 시 야기되는 많은 문제들이 해결될 것으로 기대된다. 이러한 기술의 장점은 이식치료를 기다리는 더 많은 환자들에게 맞춤형 치료까지 제공해 줄 것으로 예상된다.

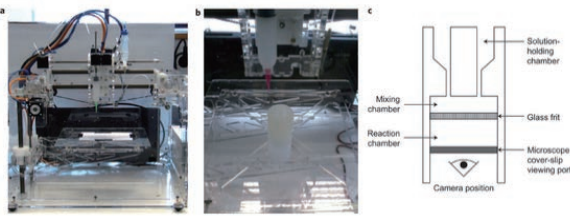
제약 업계가 의약 프린팅의 기술에 힘입어 양질의 데이터를 빠른 시간 안에 확보할 경우 신약의 개발 속도는 매우 빨라지며 비용의 절감이 가능할 것으로 예측된다.



<그림 9> Wake Forest의 방광 scaffold^[24]

3.2. 의약 프린팅

현재의 의약 연구 경우 화학 물질을 정제하여 약을 제조하고, 인간의 세포에 투여하여 반응을 본 후 이상이 없을 경우 동물 실험을 진행을 통하여 임상 시험으로 진행 과정을 따른다. 하지만, 이것을 3D 프린터를 이용하여 제작하고, 이것이 상업용으로 보급될 경우에 매우 저렴한 비용이 소요될 것으로 예측된다^[3]. 또한, 제약 업계가 의



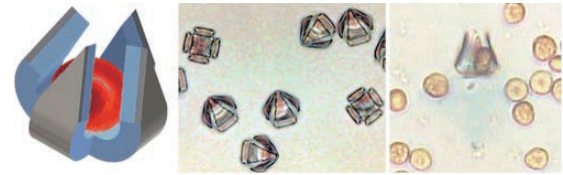
〈그림 10〉 Fab@Home freeform fabricator^[25]

약 프린팅의 기술에 힘입어 양질의 데이터를 빠른 시간 안에 확보할 경우 신약의 개발 속도는 매우 빨라지며 비용의 절감이 가능할 것으로 예측된다. 실례로 L. Cronin et al.은 소비자들이 가정에서 의약품을 설계하고 창조하는데 사용될 수 있는 가정용 화학제품 제작기계를 개발하였다^[25]. 〈그림 10〉에서와 같이 컴퓨터와 지원 설계 소프트웨어에 의해 작동되는 3D 프린터를 사용하여 상온에서 세팅되는 폴리머 젤로 만들어진 화학 반응용 특수용기(Reactionware)를 개발하였다. 프린터에는 주사기들이 달려 있으며, 그 안에는 쥬에 각종 약물과 촉매들이 들어 있다. 약을 찍어내는 과정은 맨 아래에 마지막에 반응을 할 약물을 뿌린다. 그 다음에 마지막에서 두 번째, 세 번째를 계속 쥬는다. 마지막에 화학 반응을 유도하는 액체를 뿌린다. 그러면 화학 반응이 순서대로 일어나면서 원하는 약물이 된다. 용기를 프린트하면서 동시에 화학 반응을 일으킴으로서 화학적 범용 도구 세트를 만든 후 검색 엔진처럼 생물학적, 화학적인 네트워크를 심을 수 있고 치료해야 할 세포가 있으면 이런 네트워크를 심고 동시에 화학을 하여 새로운 약품을 만들 수 있다. 또한, 설계도를 다운로드 후 그 분자에 해당하는 잉크를 사용하여 프린터를 이용해 장치를 만들 수 있으며 궁극적으로 개인 각자를 위한 약품을 프린팅이 가능하다.

4D 프린팅 기술은 자가 변형이 가능한 생체조직부터 인체에 삽입하는 바이오 장기까지 다양한 분야에 활용 가능하고, 자가 조립 기술을 통해 암 치료까지 활용 범위 확대 중이다.

3.3. 생체의료 4D 프린팅

차세대 생체의료용 3D 프린팅 기술로 각광받고 있는 4D 프린팅은 3D 프린팅 기술에 시간이 지남에 따라 스스로 모양이 변환하는 물건을 제작하는 개념을 뜻하고,



〈그림 11〉 Self-folding single cell grippers^[28]

〈표 1〉 3D 프린팅 기술과 4D 프린팅 기술의 비교^[27]

구분	3D 프린팅	4D 프린팅
프린팅 방법	<ul style="list-style-type: none"> ■ 적층제조 기술 ■ 항상 똑같은 크기로 출력 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 자가 변형, 자가 조립 ■ 맞춤형 프린팅 가능 ※ 패턴, 스타일, 크기, 유연성 등 조절
재료	<ul style="list-style-type: none"> ■ 열에 녹거나 접착제에 잘 붙는 소재 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 스마트 소재
부품조립	<ul style="list-style-type: none"> ■ 부품조립 과정 필요 ■ 프린팅 후 외부의 압력에 의해 확대나 축소, 변형 불가능 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 조립과정 불필요 ■ 물체가 스스로 조립 및 변화
프린터 크기	<ul style="list-style-type: none"> ■ 물체의 크기에 3D 프린터의 크기 제약 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 스스로 조립되기 때문에 큰 물체도 제작 가능(설계도와 프린터만 있으면 언제 어디서든 원하는 물체 제작 가능)

3D 프린팅 기술과 비교하여 〈표 1〉에서와 같은 차이가 있다^[26-27]. 특정 외부 조건 하에 변하는 소재를 사용함으로써 자가조립(Self-assembly)이나 자가변형(Self-transformation)이 가능하게 된다. 미국 존스 홉킨스 대학에서는 암치료에 4D 프린팅 기술 적용하여, 〈그림 11〉에서와 같이 몸속에서 스스로 조립되어 암세포 하나를 집어낼 수 있는 장치를 개발하기도 하였다^[28]. 향후 이러한 4D 프린팅 기술은 자가 변형이 가능한 생체조직부터 인체에 삽입하는 바이오 장기까지 다양한 분야에 활용 가능하고, 자가 조립 기술을 통해 암 치료까지 활용 범위 확대 중이다^[27]. 또한, 기존의 의료실습용 마네킹 같은 것은 혈관, 맥박, 피부 등이 인체와 유사한 의료 모형으로 의료 교육의 실제감을 더욱 증진시켜 줄 것이다.

IV. 결론

본 논문에서는 생체의료용 3D 프린팅 기술의 활용 분



야로 가상 수술 시뮬레이션과 환자 맞춤형 보형물, 환자 맞춤형 수술 도구, 치과 응용, 의료진의 교육 및 훈련 분야에 대하여 소개하였다. 그리고, 향후 생체의료용 3D 프린팅 기술의 활용 분야의 전망으로 장기 재생 분야와 의약 프린팅, 그리고, 생체의료 4D 프린팅 분야에 대하여 소개하였다. 아직까지 생체의료와 관련된 산업의 일부 영역에만 제한적으로 사용되고 있는 현재의 3D 프린팅 기술은 일반적인 의료 보조 장치, 수술 전 시뮬레이션, 의료 교육용 등으로 제작되고 있다. 최근에는 3D 스캐너와 결합하여 필요한 기관 및 장기를 디자인하고 3D 프린팅으로 생산하는 방식이 논의되고 있으며 심지어 장기 재생, 의약 프린팅, 4D 프린팅 등 다양한 기술 개발로 생체의료와 관련된 산업의 혁신적인 새로운 성장 동력으로 주목받을 것으로 예상된다. 따라서 3D 프린팅 기술로 환자의 수술 부위의 사전 연습이 가능함에 따라 조직 손상 최소화, 수술 성공률 향상 및 수술 시간을 획기적으로 단축함에 따라 환자 및 의료진의 편의성이 좋아질 것으로 예상된다. 또한, 전문가들이 3D 프린팅된 인체 모형을 통하여 수술 전 사전 연습이 가능함에 따라 의료 서비스 질이 향상되고, 의대생과 간호대생들을 위한 3D 프린팅을 이용한 새로운 교육 커리큘럼 구축을 통하여 양질의 우수한 의료진 육성이 가능할 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] 이창현, 의료산업에서 3D 프린터 활용과 전망, 정보통신기술진흥센터, 2014년.
- [2] 박석희, 바이오 소재의 지속적 개발과 3D 프린팅 맞춤형 기술활용 확대추세, 보건산업 동향, 28권, pp. 22-27, 2014년.
- [3] 이승재, 3D 프린팅 기술이 바꿀 보건산업의 미래, 한국보건산업진흥원, 2014년.
- [4] McKinsey&Company, Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy, 2013.
- [5] <http://www.mevis.de/loesungen/professional/mevis-distant-services-mds/>
- [6] <https://3dprint.com/105376/cleveland-clinic-3d-liver/>
- [7] 오왕균, FDM 방식의 3D 프린터를 이용한 골반 골절 환자의 맞춤형 모델제작, 한국콘텐츠평화 논문지, 14권, 11호, pp. 370-377, 2014년 11월.
- [8] http://www.samsunghospital.com/dept/board/deptCommonBoardDropView.do?page=&bno=2252&cPage=2&DP_CODE=CCT&BOARD_ID=B005
- [9] <http://yonseitoday.yonsei.ac.kr/eand/html/ystoday.asp?mid=n06&page=1&act=articleview&seq=20034>
- [10] 박기택, '3D 프린팅 의료혁명'은 이미 시작됐다, 청년의사, 2014년 9월.
- [11] 안치범, 손국희, 이진우, 종설 : 조직 및 장기 재생 분야에서의 3D 프린팅 기술의 적용 현황, 대한이식학회지, 29권, 4호, pp. 187-193, 2015년.
- [12] 하동현, 정진우, 이종원, 김성원, 조동우, 선천성 코 결여 환자의 성공적인 기관 재건을 위한 3D 프린팅 기술의 임상적 활용: 비공, 비강에서의 협착 방지용 환자 맞춤형 스텐트, 한국정밀공학회 2014년 춘계학술대회 논문집, pp. 227-228, 2014년.
- [13] <http://www.3dfft.co.kr/>
- [14] Oh-Ryong Kwon, Kyoung-Tak Kang, Juhyun Son, Yun-Jin Choi, Dong-Suk Suh, Yong-Gon Koh, The Effect of Femoral Cutting Guide Design Improvements for Patient-Specific Instruments, BioMed Research International, Vol. 2015, pp. 1-8, November 2015.
- [15] 박소현, 임상구, 양승윤, 김세현, 생체의료 분야 응용을 위한 3D 프린팅 기술, 한국공업화학회지, 18권, 1호, pp. 67-78, 2015년 2월.
- [16] <http://www.invisalign.com/>
- [17] P. G. McMnamin, M. R. Quayle, C. R. McHenry, and J. W. Adams, The Production of Anatomical Teaching Resources Using Three-Dimensional (3D) Printing Technology, Anatomical Sciences Education, Vol. 7, No. 6, pp. 479-486, November/December 2014.
- [18] <https://www.newscientist.com/article/dn24741-3d-printed-skull-simulates-sensations-of-brain-surgery/>
- [19] <http://www.monews.co.kr/news/articleView.html?idxno=57898>
- [20] R. Lanza, R. Langer, and J. Vacanti, Principles of tissue engineering, Elsevier Academic Press, 2007.
- [21] J. Malda, J. Rouwkema, D.E. Martens, E.P. Le Comte, F.K. Kooy, J. Tramper, C.A. Blitterswijk, and J. Riesle, Oxygen



- gradients in tissue-engineered PEGT/PBT cartilaginous constructs: measurement and modeling, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 86, No. 1, pp. 9–18, 2004.
- [22] A. Atala, Tissue engineering of human bladder, *British Medical Bulletin*, Vol. 97, No. 1, pp. 81–104, 2011.
- [23] P. Macchiarini, P. Jungebluth, T. Go T, M.A. Asnaghi MA, L.E. Rees, T.A. Cogan, A. Dodson, J. Martorell, S. Bellini, P.P. Parnigotto, S.C. Dickinson, A.P. Hollander, S. Mantero, M.T. Conconi, M.A. Birchall, Clinical transplantation of a tissue-engineered airway, *The Lancet*, pp. 2023–2030, Vol. 372, No. 9655, pp. 2023–2030, 2008.
- [24] <http://www.wakehealth.edu/WFIRM>.
- [25] M.D. Symes, P.J. Kitson, J. Yan, C.J. Richmond, G.J.T. Cooper, R.W. Bowman, T. Vilbrandt, L. Cronin, Integrated 3D-printed reactionware for chemical synthesis and analysis, *Nature Chemistry*, Vol. 4, pp. 349–354, 2012.
- [26] 임수연, 의료분야에서 3D 프린팅 기술의 융합, *과학기술정책*, 25권, 7호, pp. 10–13, 2015년 7월.
- [27] 정보통신산업진흥원, 의료 4D프린팅 산업은 우리가 선도한다, 2015년 7월 11일.
- [28] K. Malachowski, M. Jamal, Q. Jin, B. Polat, C.J. Morris, D.H., Self-folding single cell grippers, *Nano Letters*, Vol. 14, No. 7, pp. 4164–4170, 2014.



이정진

- 2000년 2월 서울대학교 기계항공학부 학사
- 2002년 2월 서울대학교 컴퓨터공학부 석사
- 2005년 3월 New York Institute of Technology 경영학 석사
- 2008년 8월 서울대학교 컴퓨터공학부 박사
- 2007년 10월~2009년 2월 울산대학교 의과대학 영상의학과 연구교수
- 2009년 3월~2013년 2월 가톨릭대학교 디지털미디어학부 조교수
- 2013년 3월~현재 숭실대학교 컴퓨터학부 부교수

〈관심 분야〉

영상 정합, 영상 분할, 3D 의료 프린팅, 컴퓨터 보조 수술, 가상 내시경 및 가상 수술, 변형체 모델링