

## 지능형 적층가공의 미래 군 의료체계 적용방안: 바이오프린팅 활용방안을 중심으로

김한수  
육군 소령, 미래기업경영원

### The Application Proposals of Future Military Medical System of Smart: Additive Manufacturing Focused on Bioprinting

Han-Su Kim  
Army Major, Mirae Institute of Business Management

**요약** 한국 육군에서는 저출산, 고령화에 따른 병역자원 감소 추세를 극복하기 위해 “트랜스 슈저 솔져”라는 프로젝트를 추진하고 있다. 이 프로젝트의 목적은 인공조직 및 장기의 이식을 통해 장기에 손상을 입거나 사지가 절단된 전투원을 치료하는 것을 포함하는데, 이러한 인공조직과 장기 제작을 구현하기 위한 기술 중 가장 근접한 기술이 바이오프린팅이다. 바이오프린팅은 일반적으로 상용화된 3D프린터의 출력방식과 비슷하지만, 세포를 출력한다는 점에서 차이점이 있다. 이에 따라, 출력 도중 세포가 손상되지 않고 생존하도록 하는 것이 중요함에 따라 조직공학자들은 3D 스캐폴드, 탈세포화 된 세포의 기질, 천연소재 등을 이용하여 세포의 생존력을 확보하는 연구를 진행하고 있다. 또한, 상용화된 바이오프린터가 출력할 수 있는 인공장기의 크기와 출력 속도의 한계로 인해서 최근 연구는 인공 각막과 피부와 같은 작은 크기의 인공조직 제작에 집중하고 있다. 이러한 연구들에도 불구하고 군에서의 바이오프린팅 활용방안은 부족한 실정이다. 바이오프린팅은 치료 목적 외에도 바이오센서, 강화된 장기, 그리고 지뢰탐지에도 적용할 수 있는 방안이 있어 더 많은 분야의 활용성을 검토할 필요가 있다. 본 논문은 지능형 적층가공에 대한 개발현황과 바이오프린팅을 활용한 군 의료기술에 대해 국내·외 개발 동향, 주요 성능, 운용개념 정립에 따른 개인 무기체계와의 연동 형태에 대해 정리하고자 한다. 본 논문에서 정리한 내용은 한국군에서 바이오프린팅 기술을 통한 군 의료체계 적용의 기술기획과 연구개발의 사전자료로 활용될 것이라 기대한다.

**Abstract** The "Trans-Super-Soldier Project" mentioned in "Korea Army Vision 2050", is intended to overcome declining military service due to an aging population and a low birth rate. The purpose of this project was to enhance survival by transplanting artificial tissues and organs into soldiers that have suffered amputation or organ damage. Bioprinting is a rising technology in the artificial tissue and organ fields, and cell printing is performed in a manner similar to that of 3D printing, but with some differences. In particular, cell viability must be considered during the printing process, and therefore, tissue engineers have been trying to improve cell viability using 3D-scaffolds, decellularized extracellular matrix, and natural materials. Recent studies on the development of artificial tissues have focused on small-scale applications such as artificial corneas and skin due to the limited printing speeds and sizes of commercialized bioprinters. However, proposals for bioprinting applications fall short of military requirements, and there is a need to expand the usability of bioprinting for treatment, biosensor and organ fabrication, and mine detection. This paper describes bioprinting applications for future military medical systems based on a review of recent studies.

**Keywords** : Bioprinting, Artificial Tissues, Organs, Trans-Super-Soldier, Additive Manufacturing

\*Corresponding Author : Han-Su Kim(Mirae Institute of Business Management)

email: theory80@naver.com

Received September 14, 2022

Revised October 18, 2022

Accepted December 7, 2022

Published December 31, 2022

## 1. 서론

과거의 의료기술은 응급처치, 질병 치료와 같은 생존이 목적이었다면 현대 의료기술은 이뿐만 아니라 성형, 피부치료 등 생활환경 측면까지 포함한다. 그렇다면 미래의 의료기술은 생활환경 측면을 넘어서 어떠한 방향으로 확장될 것인가? 미국 드라마 '600만 불의 사나이(1974~1978년)'는 美 공군 테스트 파일럿이 추락사고로 잃은 다리, 팔, 눈을 사이보그 기술을 통해 개조인으로 창조되는 내용이다. 이 드라마와 같이 미래 의료기술은 손상당한 근육과 장기들을 로봇이나 인공장기로 대체하고, 생체센서를 생체 내에 이식하여 실시간으로 생체정보를 수집할 수 있는 형태가 될 것이다.

이러한 미래 의료기술을 적용한 군사 분야 적용 방향을 한국 육군에서는 '육군 비전 2050'을 통해 제시하고 있다. 육군에서는 미래의 인구 절벽에 따른 병역자원 부족으로 군구조를 슬림형 구조로 개편하고, 이를 위해 미래 육군의 게임체인저 중 하나인 인간의 한계를 뛰어넘는 '트랜스 슈퍼 솔저'를 목표로 있다. 미래 육군의 의료체계는 사고로 절단된 팔을 뇌에 의해 자유롭게 통제되는 로봇 팔로 대체하고, 도마뱀 줄기세포를 이용하여 손상된 신체 일부를 재생하며, 나노기술을 활용하여 인체의 장기를 보강하거나 교체할 수 있을 것으로 전망하고 있다. 하지만, 기존 조직공학의 방법으로는 복잡하면서도 여러 조직의 결합이 필요한 장기들을 제작하는 것이 불가능하여 이를 극복하기 위한 다양한 소재 사용과 복잡한 형태 구현에 장점이 있는 적층제조 기술을 의료분야에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다.

적층제조 기술은 4차 산업혁명의 핵심기술 중 하나로, 전통적인 제조공정 분야뿐만 아니라 전자회로, 건물, 인공장기 등을 출력할 수 있어 광범위한 분야에 적용할 수 있다[1]. 특히, 3D프린팅은 다품종 · 소량 생산에 적합한 특징을 가지고 있어 CT, MRI, 초음파, X-ray 등의 환자 영상데이터를 이용해 환자맞춤형 제품 제작이 가능하여 의료분야에 활발하게 사용되고 있다[2,3]. 현재의 의료용 3D프린팅 기술은 환자 맞춤형 보형물, 인공관절, 임플란트, 수술 시뮬레이터 등의 개발에 적용하고 있다. 이러한 의료용 3D프린터의 궁극적인 목표는 인공장기를 제작하는 것이고, 오늘날 인공장기를 제작하는 가장 근접한 기술이 바로 바이오프린팅이다. 3D프린팅이 플라ستيك 필라멘트를 사용한다면 바이오프린팅은 살아있는 세포를 활용한 바이오잉크를 사용하는 것이다.

바이오프린팅은 기존 조직공학 기법과 비교하여 다양

한 장점이 있다. 바이오프린팅은 자동화 구축이 쉽고, 고정밀의 조직 및 장기를 제작할 수 있으며, 많은 기하학적 자유도 및 제어인자를 설정하면서 단백질, DNA, 약물 등의 다양한 재료를 프린팅할 수 있다. 이를 통해, 바이오프린팅은 복잡하고 정교한 생체모방 조직 구조를 구현할 수 있으며 질병 모델링, 신약 발견 및 테스트, 고 처리량 스크리닝, 재생 의학 등의 다양한 분야에 적용될 수 있다.

바이오프린팅을 이용한 인공장기 개발은 2000년대에 접어들면서 3D프린팅 기술의 상용화로 본격적으로 진행되기 시작했다. 2013년 미국 바이오프린팅 업체인 오가노보가 인공 간을 제작, 2016년 중국 레보텍이 원숭이의 지방층에서 추출한 줄기세포로 인공 혈관 제작에 성공했으며, 국내에서는 포스텍이 세계 최초로 인공 근육을 제작했다[4]. 그리고 2018년에는 영국 뉴캐슬대학교가 인공 각막을 선보였다[5].

바이오프린팅에 관한 연구는 민간기업, 연구소뿐만 아니라 미군 내에서도 활발히 진행되고 있다. 美 육군은 국방부(DoD, Department of Defense)에서 정한 우선순위 지침에 따라 「4D Bio3 프로그램」을 구성하여 차세대 군대를 위한 미군 의료체계의 구축을 목표로 파일럿 프로젝트를 진행하였다[6]. 또한 연방의료과학대학(USU)의 지원에 육군사관학교, 제네바 재단, NScript, Techshot 등 민 · 군 협력 체계를 바탕으로 프로젝트 그룹을 구성하였다. 이 프로젝트의 목표 중 하나는 바이오프린터를 휴대할 수 있도록 설계하여 전장에서 부상자들을 즉시 치료할 수 있는 의료체계를 정립하는 것이다. 최종적으로는 각개 전투원이 센서가 달린 소형 3D프린터를 몸에 부착하여 전투 및 의료에 필요한 물품을 직접 감지 및 조달할 수 있도록 하는 것이다. 美 육군사관학교에서는 26명의 생도가 인공 반월판, 인공 혈관, 생체기능성 붕대 제작 등의 총 7개 과제를 수행하였다.

장차 미래 전장 상황을 고려하여 한국군도 바이오프린팅을 이용한 미래 의료기술 발전을 위한 노력이 필요할 것으로 판단된다. 따라서, 본 논문은 바이오프린팅에 대한 기술설명과 국내 · 외에서 진행 중인 대표적인 개발 동향을 소개하고 바이오프린팅 기술을 활용한 무기체계와 전력지원체계의 발전방향에 대해 서술하였다.

## 2. 바이오프린팅 개요

바이오프린팅이란 생체적합성 재료를 이용하여 환자

의 조직이나 장기와 유사한 형태의 3차원 스캐폴드(3D-Scaffold), 그리고 세포의 성장을 도와주는 성장인자 등을 세포와 함께 프린팅하여 환자의 손상된 장기나 조직을 대체할 수 있는 인공조직 및 장기를 제작하는 것을 말한다.

## 2.1 바이오잉크 (Bioink)

바이오잉크는 살아있는 세포와 세포를 응집시키고 지지해주는 지지체를 같이 혼합한 바이오프린터의 소재를 의미한다. 바이오잉크는 생체적합성이 높은 천연 단백질(젤라틴, 콜라겐 등)을 하이드로겔화하여 제작하며, 세포의 생존력 및 분화를 촉진하고 인공 장기형태 유지를 위해 점성이 높은 소재를 사용한다. 바이오잉크의 세포들을 결집, 성장에 유리한 환경을 조성하기 위해 스캐폴드로 캡슐화를 하고, 3~4주 동안 바이오잉크의 세포는 바이오리액터에서 산소, 질소, 이산화탄소 및 수증기로 영양을 공급받아 빠르게 성장한다.

살아있으면서 작은 인공조직을 출력하기 위해서는 바이오잉크에 1,000만에서 2,000만 개의 세포가 필요하며, 고체 조직의 일부 또는 심장이나 심장과 같은 장기를 바이오프린팅을 하기 위해서는 100억에서 1,000억 개 이상의 세포가 필요하다. 따라서, 실제 심장 크기를 그대로 출력하고 장기의 기능을 구현하기 위해 바이오잉크의 세포를 더욱 많은 세포로 배양하면서 세포가 손상되지 않도록 출력할 수 있어야 한다. 이것을 위해 탈세포화 된 세포외 기질, 천연고분자 소재의 스캐폴드, 새로운 천연·인공 소재, 바이오프린팅 공정 등의 개발을 통해 극복하려는 연구들이 활발히 진행되고 있다.

## 2.2 3차원 스캐폴드 (3D-Scaffold)

스캐폴드란 세포가 새로운 조직을 구성하기 전까지 세포를 지지해주는 지지체를 의미한다. 일반적으로 격자무늬의 3차원 구조로 이루어져 있으며, 격자 사이사이에 세포가 안착할 수 있는 역할을 한다. 스캐폴드 제작에 많이 사용되는 합성 고분자인 PCL(Polycaprolactone)은 인체 삽입 후 체내에서 2년의 분해 기간을 가지며, 생체적합성을 가지고 있다. 이외에도 PLLA(Poly L-lactic acid), PLGA(Poly lactic-co-glycolic acid) 등의 다양한 합성고분자들이 스캐폴드 제작 원료로 사용되고 있지만, 더 뛰어난 생체적합성을 지닌 탈세포화 기법을 이용한 바이오 스캐폴드와 알지네이트, 콜라겐, 젤라틴 등의 천연고분자와 세포를 혼합한 3차원 스캐폴드를 제작하려는 연구들이 진행되고 있다[10].

## 2.3 탈세포화 된 세포외 기질 (Decellularized extracellular matrix, dECM)

세포의 생존성을 위해 기존 조직공학의 스캐폴드가 아닌 동물의 조직을 활용한 세포 생존환경을 제공할 수 있는데 그 방법을 탈세포화 된 세포외 기질이라고 한다. 탈세포화 된 세포외 기질 기법은 돼지 등의 피부에서 화학처리를 통해 세포가 제거된 물질을 뜻한다. 이 물질에 인체 세포를 주입해 만든 바이오잉크는 세포의 손상을 막고 프린팅 후 세포가 생존할 수 있는 환경을 제공함으로써 조직 및 장기의 고유한 미세환경을 그대로 모사할 수 있다. 또한, 프린팅 후의 세포 기능도 극대화한다.

## 2.4 바이오프린팅 방식

바이오프린팅의 출력방식으로는 압출(Extrusion), 잉크젯(Inkjet), 레이저(Laser) 기반 방식이 있다. 압출 기반 프린팅 방식은 점성이 높은 바이오잉크를 사용할 수 있으며 인체 규모의 조직 및 장기를 출력할 수 있어 바이오프린팅 분야에서 가장 많이 활용되고 있지만, 해상도가 낮고 출력 간에 노즐 벽과 세포 간 발생하는 물리적 자극에 의한 세포의 생존력 감소가 발생할 수 있는 단점이 있다. 잉크젯 기반 프린팅 방식은 10~50 $\mu$ m의 높은 해상도를 보이지만 세포의 농도가 낮고 점성이 큰 바이오잉크를 사용하기 힘들고 부피가 큰 출력물을 제작하기 힘들어, 피부 및 혈관 제작에 특화되어 있다. 레이저 기반 바이오프린팅은 출력 해상도는 높지만, 확장성이 부족하여 인체 규모의 조직 및 장기를 인쇄하는 데는 사용할 수 없다. 따라서, 완전한 기능을 가진 조직 혹은 장기를 구현하기 위해서는 여러 바이오프린팅 기법을 융합한 하이브리드 바이오프린팅 기법 개발이 필요하다.

# 3. 바이오프린팅의 활용사례

## 3.1 인공 각막

인공 각막은 바이오프린팅을 통한 인공장기 이식에 가장 근접한 초기 후보이다. 각막은 눈앞을 덮는 투명한 필름인데, 혈관과 신경이 부족하여 바이오프린팅에서 몇 가지 주요 기술적 요소를 고려하지 않아도 되어 다른 인공장기와 조직에 비해 쉽게 제작될 수 있다.

Precise Bio에서는 중간엽 줄기세포를 이용한 망막 패치 임플란트를 개발하고 있으며, 인간의 골수와 조직에서 발견되는 성체 줄기세포는 자가 재생하고 분화할

수 있다. 모든 줄기세포는 모든 종류의 세포로 변할 수 있으며, 성체 줄기세포는 배아 또는 태아에서 얻은 배아 줄기세포가 아니므로 윤리적 문제에 제한되지 않는다.

### 3.2 심근경색 치료를 위한 줄기세포 패치

2020년 포스텍 등 공동연구팀은 심근경색 부위를 개선하는 바이오잉크 심장 패치를 바이오프린팅으로 개발하였다. 심근경색은 심혈관이 막히거나 심장근육 전체 또는 일부가 손상되어 심장이 과사하는 병으로, 정맥이나 심장 부근에 주사를 놓는 줄기세포 치료법이 일반적이다. 하지만 이 방법으로는 전달할 수 있는 세포의 양이 제한적이지만, 바이오잉크 심장 패치는 훨씬 더 많은 세포를 환부에 직접 붙여 심근세포의 생존 기능을 강화할 수 있다. 돼지를 대상으로 한 전임상 실험 결과, 바이오잉크 심장 패치를 이용한 비교군이 기존 치료 방법을 통해 치료한 대상군보다 더 빠른 회복 속도를 보였다.

### 3.3 바이오센서

3D프린팅은 전자회로도 인쇄할 수 있는데, 세포와 전자회로를 동시에 인쇄하여 바이오센서를 개발하는 연구들도 진행되고 있다. 인공심장을 제작할 때 전자회로를 동시에 인쇄하여 스트레인게이지와 같은 센서를 심장으로 자연스러운 이식을 통해 센서 일체형 인공심장을 제작할 수 있다. 심전도 신호를 센서에서 수집하여 기존의 심전도 측정과 같은 간접측정법보다 훨씬 정확한 심전도 정보를 획득할 수 있게 된다. 실시간으로 심전도를 측정하다가 심정지와 같은 문제가 발생했을 때 센서에서 이를 감지하여 센서와 연결된 약물 전달기에서 약물을 전달하거나 제세동기를 통해 심장박동을 정상적으로 회복시킬 수 있다. 하버드대학교의 Lewis 교수팀은 바이오프린팅으로 스트레인게이지 센서를 탑재한 바이오센서 일체형 인공 심장근육 조직을 제작하여 인공심장의 박동 능력을 수치화한 연구를 통해 활용성을 검증했다.

### 3.4 인공심장 제작

이스라엘 텔아비브대 연구팀은 환자 세포 등을 이용한 인공심장을 바이오프린터로 출력하는데 성공했다[7]. 이 심장은 환자 본인의 세포와 생체재료로 제작해 거부 반응 위험이 매우 낮다는 장점이 있다. 세포는 하이드로겔과 혼합한 이후 심장 세포와 내피세포로 분화시켜 환자 면역체계에 적합하도록 심장혈관과 함께 프린트했다. 향후 배양을 통해 조직 성숙을 촉진하고, 전기신호를 통해

심장박동을 구현할 계획이다.

## 4. 바이오프린팅의 군 활용방안

인공장기 제작이나 줄기세포를 이용한 환부 치료기술의 군 적용방안으로는 앞서 언급된 미군의 바이오프린팅 프로젝트 진행 외에는 언급된 바가 없다. 그러나 미래 전장 환경은 각개 전투원에게 치명적인 피해를 주는 무기체계가 발달하면서 현장에서 신속하게 조치할 수 있는 전문 수준의 능력을 요구한다. 21세기 중반 이후 전장 환경은 과거의 고강도 분쟁에서 하이브리드 전략으로 테러, 합성생물학 등에 의한 잠재적 무기에 대응하기 위한 개인 전투원의 능력 향상이 중요하며, 이를 토대로 본 연구는 현재와 미래의 바이오프린팅 기술을 토대로 한 군 활용방안을 제안한다.

### 4.1 창상 · 화상 치료를 위한 피부 프린팅 기술

줄기세포를 이용한 환부 치료 또는 약물 전달 기술을 활용하여 창상 · 화상 치료를 위한 피부 프린팅 기술 또는 피복재 제작이 가능하다. 전투 중 화상으로 인한 부상은 전체의 약 5 ~ 20%로 주 손상 부위는 피부이다. 인체의 1차 방어막 역할을 하는 피부조직이 손상될 경우 외부 물질로 인한 감염 및 사망을 초래할 수 있으며, 전투 중 기폭 넓은 상처에 이식할 수 있는 건강하고 충분한 양의 피부가 상시 존재할 수 없다. 따라서 전투 중에는 폭발물 등에 대한 위협이 도사리고 있어 대체적 근손실(volumetric muscle loss)을 초래할 수 있다. 바이오프린팅으로 제작하는 피부조직의 경우 인공장기와는 다르게 제작의 규모가 작아서 현재 기술로도 충분히 적용할 수 있는 분야로, 생체모방형 조직체 개발, 근조직 재생기술 개발, 근 · 신경 조직 프린팅 및 재생기술 등 바이오프린팅 조직공학 연구 중 가장 활발히 진행되고 있다.

또한 세균감염을 방지하고 접착성이 뛰어나며 신속한 상처봉합이 가능하고 약물 전달도 할 수 있는 창상피복재도 제작 가능하다. 창상피복재는 환부의 수분을 유지하고 모든 의약품을 상처 가까이 잡아둠으로써 상처를 치유하는 원리이다. 하지만, 전장에서 부상병의 출혈을 막을 때는 소독할 여유가 없어 세균감염은 피할 수 없다. 이러한 세균감염 등을 막고 더욱 신속하게 상처를 봉합하고 환부를 치료할 수 있는 창상피복재를 제작할 수 있다. 한 연구에서는 동물의 배아세포에서 관찰되는 “이음새 없고, 흉터를 남기지 않는 치유과정”에서 영감을 받은

생체모방형 창상피복재를 3D프린터로 제작하였다[8,9]. 배아가 상처를 입는 경우 액틴이라는 단백질의 얇은 섬유가 상처의 가장자리를 오프림으로써 신속하게 치유하는데, 이러한 점을 모방하여 Fig. 1과 같이 창상피복재에 온도 민감성 폴리머를 혼합하여 피부에 부착했을 시 피부온도에 반응하여 창상피복재가 수축함으로써 바로 아래의 피부를 잡아당겨 상처의 가장자리를 오프리게 할 수 있다. 생쥐 생체 내 실험을 통해 생체모방형 창상피복재는 키토산을 사용하여 창상피복재가 수축 시 피부에 떨어지지 않아서 기존 1회용 창상피복재보다 17배 강력하게 접착되면서 1.5배의 상처 수축률을 보였다[10].

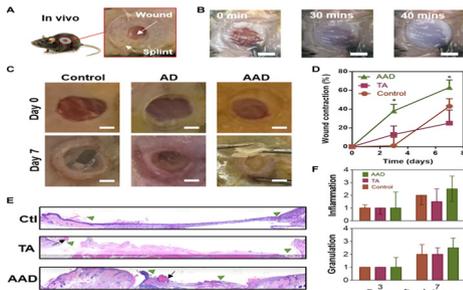


Fig. 1. In vivo wound healing with application of AAD[10]

또 다른 연구에서는 키토산과 팩틴을 혼합하여 스캐폴드 구조를 만들어 약물 전달에 유용한 창상피복재를 제작하여 상처의 수분을 유지하고 조직의 손상 없이 접착력이 유지되면서 스캐폴드 구조의 공간에 약물이 탑재되어 효과적으로 약물을 전달할 수 있다고 보고하였고[11], 식물세포의 근간을 구성하는 셀룰로오스 섬유를 나노 수준으로 추출하여 무게는 철의 5분의 1이면서 강도가 5배인 박테리아의 성장을 억제하는 창상피복재를 개발한 사례도 있다[12].

하지만 바이오프린팅을 이용한 창상·화상 치료기술을 전장 지역에서 활용하기 위해서는 기동성의 문제와 출력 속도를 해결해야 한다. 전장에서 부상병을 즉시 치료할 수 있어야 하는데 현재 바이오프린팅의 크기와 동작 방법은 전투 현장에서 사용되기 힘들다. 이를 위해서는 자동으로 환부의 크기와 종류를 분류할 수 있어야 하며, 휴대하기 쉬우면서, 출력 속도가 개선되어야 하고, 이동 또는 포격에 의한 진동 등이 있더라도 출력 시 문제가 없어야 하는 과제들이 있다. 따라서, 휴대할 수 있으면서 신속하고 정확한 출력이 가능한 바이오프린팅의 개발이 필요하다.

## 4.2 폭발물 감지용 바이오센서

바이오프린팅을 이용한 생체모방형 폭발물 탐지 센서를 제작한다면 무인 지뢰탐지 로봇을 개발할 수 있게 되어 지뢰탐지 시 발생하는 인명사고를 차단할 수 있다. 마약 및 폭발물을 감지하는 곳에는 항상 훈련된 개들이 있는데 이러한 후각 능력을 바이오프린팅으로 구현할 수 있다. 개의 후각세포를 프린팅하여 인공 개코를 모방한 센서를 제작한다면 상용 폭발물 검출기보다 훨씬 좋은 성능을 가진 센서를 제작할 수 있다. 이것은 폭발물뿐만 아니라 유해가스 등의 폭넓은 범위의 감지 기능을 가진 기술로 확장해나갈 수 있다. Fig. 2와 같이 개코의 모형을 본떠 제작한 인공 개코를 상용 검출기에서 부착하여 실제 호흡하는 원리로 프로그램을 재설정하여 폭발물 감지실험을 한 결과, 인공 개코를 부착하지 않은 상용 검출기보다 개가 호흡하는 것과 유사하게 구현한 인공 개코가 16배 더 좋은 성능을 나타낸 연구사례가 있으며[13], 2020년 에어버스社에서는 분자 화합물 냄새를 맡을 수 있는 생물 세포를 이용한 해파리 모양의 전자센서를 개발하기도 하였다. 해파리 모양의 전자센서는 세포의 후각 수용체가 공기 중에 어떤 물질을 파악하는 원리로, 공기 중의 화학물질을 10초 안에 판별할 수 있고, 항공기 내 코로나바이러스 검출을 목표로 개발되었다. 이러한 연구내용을 바탕으로 개의 후각세포를 바이오프린팅으로 출력하여 폭발물에 대한 후각 수용체를 만들고 개코의 모형을 3D프린터로 제작한 다음, 들숨과 날숨이 가능한 시스템을 구현하여 로봇에 탑재한다면 더욱 정확하면서도 인명피해가 없는 지뢰탐지 로봇을 개발할 수 있을 것이다.

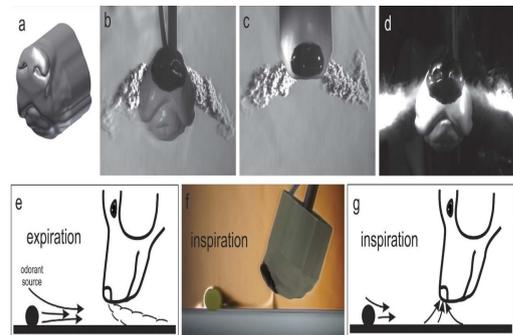


Fig. 2. Jet-assisted fluid entrainment extends the aerodynamic reach of the canine nose during activesniffing[13]

### 4.3 강화된 조직 · 장기 이식

강화된 조직 · 장기 이식은 2050년을 목표로 하는 육군의 개념군에 포함될 수 있는 기술로서, 바이오프린팅을 이용한 인공장기 이식을 넘어서 기존 장기의 기능을 뛰어넘은 강화된 장기, 안구, 피부, 심장 등이 이식하는 수준까지 도달할 수도 있다. Fig. 3의 개념도와 같이 ‘육군 비전 2050’에서 제시하는 트랜스 슈퍼 솔저는 로봇의 도움을 받아 더욱 강한 신체 능력을 보유하는 전투원을 의미하나 로봇의 기동에 따른 인체에 부과되는 물리적인 부하 등을 고려했을 때 획기적으로 상승시킬 수 없다. 이러한 강화 장기 이식이 보편화된다면 사고 또는 질병에 의해 사지가 절단되거나 장기의 손상에 의해 재기가 힘든 부상자를 더욱 강한 전투원으로 탈바꿈할 수 있을 것이다.



Fig. 3. trans-super-soldier (Concept Mapping)[14]

## 5. 결론

현재 바이오프린팅 기술이 실생활에서 적용하기에는 윤리적인 문제나 관련 법령의 제정도 이루어지지 않았다. 특히 바이오프린팅을 이용한 인공장기 제작은 현재 동물 임상시험에 그치고 있으며 인간에게 직접 이식하는 단계는 최소 10년 이상 걸릴 것으로 전망하고 있다. 또한, 수 cm의 인공장기를 제작하는데도 10시간 이상이 필요하고, 조직의 세포들이 생존할 수 있는 혈관 등도 동시에 출력해야 하는데 이러한 기술이 현재까지는 도달하지 못했다.

현재 바이오프린팅의 한계점을 극복하기 위해서는 첫 번째로, 여러 장점이 융합한 하이브리드 바이오프린터의 개발이 필요하다. 세밀하지만 작은 스케일의 혈관 제작 등에 유용한 잉크젯 방식과 큰 스케일 제작에 강점이 있는 압출 방식을 동시에 작동시킬 수 있다면 세포의 생존력을 향상시킬 수 있고, 여러 소재의 사용이 필요한 조직이나 장기 제작에도 유용할 것이다. 두 번째로, 바이오인

크의 소재 개발이 필요하다. 현재 바이오인크의 소재로는 알지네이트, 젤라틴 등이 많이 사용되는데 생체적합성이 더 뛰어나고 세포의 응집력과 세포의 생존력을 더 유지할 수 있는 천연소재 개발이 필요하다. 세 번째는 출력 속도의 개선이다. 출력 속도 개선은 바이오프린팅뿐만 아니라 모든 3D프린터의 과제 중 하나이다. 심장 크기의 인공장기의 제작이나 더 많은 분야에 활용할 수 있으나 현재 기술로는 수 cm 단위가 한계이다.

이러한 까닭에 바이오프린팅 기술을 먼 미래기술로 인식하고, 현재는 활용하지 못할 것으로 전망하는 사람이 대다수이다. 하지만, 본 연구에서 제시한 창상피복제나 폭발물 감지 바이오센서 등의 활용방안은 생체외(In Vitro) 모델로서, 인공장기 이식과 같은 많은 임상실험의 검증 작업이 수월하며, 윤리적 문제에 대한 법 제도 기준이 낮아 군이나 민간에 적용하기 수월하다. 3D프린팅이 단순히 기계적인 제조뿐만 아니라 전자회로, 건축 등에 광범위한 활용이 가능한 것처럼 바이오프린팅도 치료 분야에 한정하지 않고 폭넓은 활용방안을 식별한다면 군에서도 바이오프린팅 활용이 전투원 생존력 향상과 의료복지의 개선뿐만 아니라 무기체계 개선에 기여할 수 있을 것이다.

이를 위해 먼저 한국군의 자구적 노력으로 바이오프린팅에 관한 전문인력 확보가 우선 필요하다. 美 국방부는 「4DBio3 프로젝트」를 통해 전문인력 양성에 주력하고 있는데, 개략적인 방안은 육군사관학교 재학 시 다양한 프로젝트 참여, 졸업 후 연방의료과학대학원에 진학하도록 진로를 설계하고, 최종적으로 이러한 과정을 통해 양성된 전문인력이 바이오프린팅에 대한 전문가가 되도록 하는 인력관리 프로세스가 구축되어 있다. 또한, 전장 지역에서의 바이오프린팅 활용뿐만 아니라 야전 및 파병지에서 3D프린터를 이용한 원격 의료체계를 구축하고, 보급이 극히 제한된 우주 환경에서 바이오프린팅 사용을 시험, 검증을 통한 의료시스템의 구축을 목표로 하고 있다. 따라서, 한국군에서도 국방의학연구소, 국군병원, 정책부서, 그리고 민간병원 및 연구소와 협업을 통해 바이오프린팅의 활용방안을 꾸준히 탐구하고, 관련 교육 및 전문인력 양성 방안을 제시할 필요가 있다.

중세시대에서는 상상할 수도 없었던 외과수술은 근대 이후부터는 당연한 의료기술이 되었으며, 오늘날 인체 삽입형 보형물은 보편화되었다. 미래에는 인공장기 이식 기술이 발전하면서 좀 더 강하고 건강한 장기 이식에 대한 수요가 자연스럽게 발생할 것이고, 인공조직 · 장기의 시술이나 수술이 보편화될 것이다. 따라서, 미래 전장

에는 바이오프린팅 기술을 통해 화상, 사지가 절단, 장기 손상 환자에게 인공장기 또는 조직을 이식하여 치료하고 더 나아가 강화된 장기, 근육 등의 이식을 통해 전력 향상에 도움을 줄 수 있다.

본 논문은 미래 전장 환경에서 바이오프린팅 적용에 대한 필요성 및 의료기술의 획기적인 기술개발 동향과 군 활용방안에 대해 정리할 목적으로 작성하였다. 지금까지 정리한 내용은 한국군에서 바이오프린팅 기술을 통한 군 의료체계 적용의 기술기획과 연구개발의 사전자료로 활용될 줄 것이라 기대한다.

## References

[1] S. Lee, T. Kim, D. Hong, J. Ock, J. Kwon, E. Gwon, "A Review of Three-Dimensional Printing Technology for Medical Applications.", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 30, No.2, pp.213-225, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.3348/ksr.2019.80.2.213>

[2] J. Plocher, A. Panesar, "Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures.", *Materials & Design*, Vol. 183: 108164, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108164>

[3] J. Robert, Szczerba, "No Donor Required: 5 Body Parts you can make with 3-D printers", *Forbes*, June 2015.

[4] J. Jung, "Postech succeeds in manufacturing artificial muscles with 3D print.", *Korea IT News*, 2016.11.

[5] A. Isaacson, S. Swioklo, C. J. Connon, "3D bioprinting of a corneal stroma equivalent.", *Experimental eye research*, Vol. 173, pp.188.193, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exer.2018.05.010>

[6] Geneva Foundation, "4D Bio3 program completes first 3D bio-printing test experiment in space.", 2020.04.

[7] N. Noor, A. Shapira, R. Edri, I. Gal, L. Wertheim & T. Dvir, "3D printing of personalized thick and perfusable cardiac patches and hearts.", *Advanced Science*, Vol. 6, No.11: 1900344, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/adv.201900344>

[8] J. H. Tibbetts, "The Future of Bioprinting Multidisciplinary teams seek to create living human organs.", *BioScience*, Vol. 71, No. 6, pp. 564.570, 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1093/biosci/biab046>

[9] S. O. Blacklow, B. R. Freedman, M. Zeidi, C. Chen & D. J. Mooney, "Bio-inspired mechanically active adhesive dressings to accelerate wound closure.", *Science advances Journal*, Vol. 5, No. 7: eaaw3963, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw3963>

[10] <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aaw3963>

[11] J. Long, A. E. Etxeberria, A. V. Nand, C. R. Bunt, S.

Ray & A. Seyfoddin, "A 3D printed chitosan-pectin hydrogel wound dressing for lidocaine hydrochloride delivery.", *Materials Science & Eng*, Vol. 104: 109873, 2019.

[12] A. Rees, L. C. Powell, G. Chinga-Carrasco, T. G. David, K. E. Hill, "3D bioprinting of Carboxymethylated Periodate Oxidized Nanocellulose Constructs for Wound Dressing Applications.", *BioMed Research International Journal*, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/925757>

[13] M. E. Staymates, W. A. MacCrehan, J. L. Staymates, "Biomimetic Sniffing Improves the Detection Performance of a 3D printed Nose of a Dog and a Commercial Trace Vapor Detector.", *SCIENTIFIC REPORTS*, Vol. 6, No. 1, pp. 1.10, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1038/srep36876>

[14] trans-super-solider(Concept Mapping), Defense Agency forTechnologyandQuality.

김 한 수(Han-Su Kim)

[정회원]



- 2016년 8월 : 연세대학교 정경대 학원 정치학과 (정치학석사)
- 2020년 8월 : 목원대학교 일반대 학원 행정학과 (정책학박사)
- 2019년 11월 ~ 2021년 5월 : 육군 교육사령부 기획실, 전투발전부, 육군과학기술위원회
- 2022년 5월 ~ 현재 : 미래기업경영원 선임연구원

<관심분야>

전력지원체계, 미래 육군, 웨어러블플랫폼