

2017년 기술영향평가 결과보고

바이오 인공장기의 미래

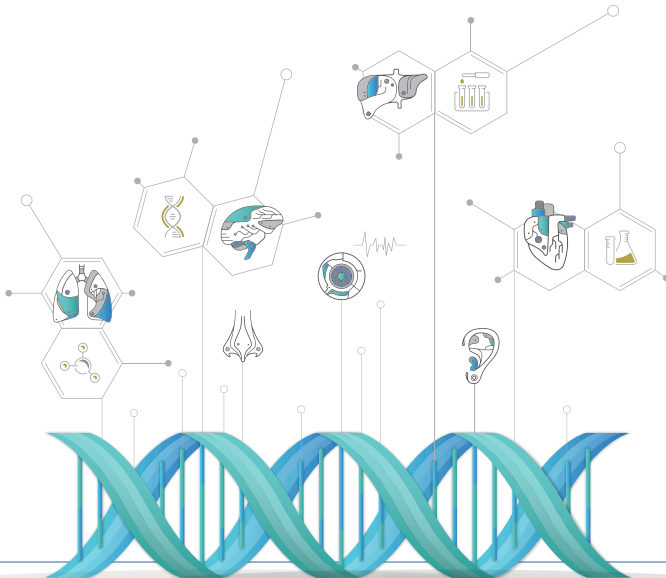
과학기술정보통신부
한국과학기술기획평가원(KISTEP)



2017년 기술영향평가 결과보고

바이오 인공장기의 미래

과학기술정보통신부 | 한국과학기술기획평가원(KISTEP)



바이오 인공장기의 미래

CONTENTS

들어가는 말

과학기술의 사회적 책임과 기술영향평가	04
기술영향평가의 시작과 발전	05
대한민국의 기술영향평가	07

Chapter I .

새 삶을 주는 미래 기술 바이오 인공장기

1. 바이오 인공장기란 무엇인가	12
바이오 인공장기 기술의 정의와 평가 범위	12
바이오 인공장기의 동향 및 발전 전망	16
2. 왜 지금 바이오 인공장기를 말해야 하나	20
장기 부족 문제를 해소해 줄 열쇠	20
후유증 및 사용 불편이 해소된 형태로 각광받을 듯	23
3. 바이오 인공장기 어디까지 왔나	25
동종장기 이식의 과거와 현재	25
바이오 인공장기의 과거와 현재	
- 이종장기	38
- 세포 기반 인공장기	51
- 전자기기 인공장기	60
우리나라 바이오 인공장기 기술의 현 위치	72

Chapter II .

바이오 인공장기 기술 발전을 위한 다섯 분야의 과제

1. 바이오 인공장기 기술과 경제	76
바이오 인공장기의 다양한 산업 활성화 효과	76
첨단 기술 융합체로서 연구개발에 미치는 영향	95
2. 바이오 인공장기 기술과 사회	103
사회적 평등 실현시킬 기술, 고비용이 걸림돌	103
사회적 비용과 국가 의료 재정에 미치는 영향	109
범죄에 미치는 영향과 사회적 인식 형성	112
국민 삶의 질에 미치는 영향	118
3. 바이오 인공장기 기술과 윤리	122
생명 연장의 열쇠, 윤리를 말하다	122
바이오 인공장기 이식자의 권리와 법률적 문제	135
4. 바이오 인공장기 기술과 문화	140
새로운 몸, 삶에 대한 새로운 가치관 열다	140
장기 교체라는 새로운 문화의 탄생	145
5. 바이오 인공장기 기술과 환경	148
바이오 인공장기가 동물 생태계에 미치는 영향	148

맺음말

바이오 인공장기를 우리나라 대표 미래 기술로 만들기 위한 정책 제언	153
기술 개발 활성화를 위한 다양한 지원 필요	154
맞춤형 지원이 기술 사업화 앞당길 듯	156
지나친 규제는 풀고 필요한 제도는 만들고	158
국민과의 소통으로 기술의 사회적 수용성 높여야	161
합리적인 기술 사용을 위한 의료 · 윤리 · 법률 정책 갖춰야	162
안전을 위해 사후 관리 강화해야	163

과학기술의 사회적 책임과 기술영향평가



호모 파베르(Homo Faber). 프랑스의 철학자 앙리 베르그송(Henri Bergson)은 인간의 본질을 ‘도구를 창조하는 존재’로 보았다. 인간은 문명이 시작된 이래로 끊임없이 무언가를 창조하고, 이를 삶에 이용해 왔기 때문이다. 그 과정에서 인간은 과학기술이라는 도구를 손에 넣었다.

과학기술은 19세기 산업혁명을 촉발하며 인간의 삶을 완전히 바꾸어 놓았다. 이후 사람들은 과학기술이 무조건 유익하다는 맹목적인 믿음을 갖게 됐다. 과학기술의 발전이 곧 생활 수준 향상과 문명 발전으로 이어질 것이라는 ‘기술낙관주의’ 혹은 ‘기술결정론’적 분위기가 팽배했던 것이다.

그러나 두 차례의 세계대전을 겪으면서 사람들은 그 같은 분위기에 회의를 품기 시작했다. 프리츠 하버(Fritz Harber)는 화학비료를 개발하여 인류의 식량난을 해결한 공로로 1918년 노벨 화학상을 받았다. 그러나 그의 기술은 제1차 세계대전 중 독가스 개발에 이용되어 나치의 유대인 대학살에 사용됐다. 제2차 세계대전이 끝날 무렵 이미 노벨상을

받았거나 나중에 받았던 수많은 과학자들과 수학자들이 미국 로스앨러모스에 모여 만들어낸 것은 끔찍한 살상 무기인 원자폭탄이었다. 현대로 접어들어 산업화로 인한 환경오염과 지구온난화로 인한 기후 변화도 겪게 됐다. 결국 사람들은 과학기술이 동전처럼 양면성을 가지고 있으며, 사용 목적에 따라 기회와 위험을 동시에 안겨줄 수 있는 양날의 검이라는 사실을 깨달았다.

1981년 노벨 화학상을 받은 폴란드 출신의 과학자 로알드 호프만(Roald Hoffmann)은 과학기술의 양면성을 그리스 신화에 나오는 켄타우로스에 비유했다. 과학기술은 온전한 괴수도, 온전한 인간도 아니며, 해결 능력이 있으면서도 선(善)을 추구하는 존재인 켄타우로스와 같다는 것이다. 우리의 삶을 또 한 번 획기적으로 변화시킬 것이라 예견되는 제4차 산업혁명도 희망과 함께 일자리 감소 등 여러 우려를 동반하고 있다¹.

○ 기술영향평가의 시작과 발전

이처럼 다양한 사례를 통해 과학기술의 양면성을 깨닫게 된 인류는 과학기술의 책임성에 대해 눈 뜨게 됐다. 또한 과학기술이 사회 구성원 전체의 공동자산이며, 책임 있게 사용할 때만이 그 가치를 제대로 꽃피울 수 있다는 사실을 각성하게 됐다. 과학기술의 변화와 발전에 사회 구성원들이 적극 참여하여 민주적인 통제를 할 필요가 있다는 인

¹ 다보스경제포럼은 2016년 ‘일지리의 미래’라는 보고서를 통해 4차 산업혁명의 영향으로 2020년까지 710만 개의 일자리가 사라지고 210만 개의 일자리가 생겨날 수 있다고 예견했다.

식도 생겨나기 시작했다. 그 결과 1970년대 미국에서 기술영향평가(TA: Technology Assessment)를 최초로 실시했다.

기술영향평가는 과학기술의 발달이 사회에 미치는 영향을 미리 예측하고 대응함으로써 긍정적인 효과를 극대화하고, 부정적인 영향은 최소화하자는 목적으로 시작했다. 이를 통해 기술의 바람직한 변화와 발전 방향을 모색하자는 것이다. 미국은 1974년 OTA(Office of Technology Assessment)를 두고 전문가 중심의 기술영향평가를 시행했으며, 1995년 OTA가 폐지된 후 현재는 GAO(Government Accountability Office)가 맡아 계속 시행하고 있다. 미국의 기술영향평가는 기본적으로 전문가들이 모여 해당 과학기술의 발전이 가져올 수 있는 경제적·사회적·환경적 영향을 평가하고, 정책 결정자들에게 정보를 제공하기 위함이다. 또, 과학기술이 가져올 득과 실을 분석하고, 필요에 따라 대안을 제시하기도 한다.

1980년대 후반 이후부터는 유럽 여러 국가들도 기술영향평가를 실시하기 시작했다. 공식적으로 수립된 최초의 기관은 1983년 프랑스의 OPECST(Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifique Technologie)다. 이후 영국, 네덜란드, 덴마크, 독일, 스위스 등 유럽 각국에서 다양한 형태와 방법으로 기술영향평가를 수행하고 있다¹⁾. 최근에는 유럽연합 단위로도 여러 평가가 활발히 진행되고 있다. 유럽식 기술영향평가는 미국식과 다르게 대체로 합의 회의를 통한 대중적 논쟁을 중시한다. 즉, 전문가보다는 일반 대중의 참여에 무게를 두는 것이다. 이는 기술영향평가가 신기술에 대한 정책 입안에 도움이 될 수 있는 정보를 도출할 뿐만 아니라 사회 구성원들이 새로운 기술을 이해하고 수용하며, 함께 비전을 세워가는 자리가 되길 바라기 때문이다.

○ 대한민국의 기술영향평가

우리나라에서는 2001년 과학기술기본법을 제정하고, 2003년부터 기술영향평가를 실시하고 있으며, 지금까지 총 17건의 기술영향평가를 수행했다.

과학기술정보통신부 산하 한국과학기술기획평가원(KISTEP)이 총괄과 진행을 맡고 있으며, 평가 방법은 미국식과 유럽식을 절충하여 시행한다. 대상 기술 분야 및 인문사회과학 전문가로 구성된 기술영향평가위원회와 일반 시민으로 구성된 시민포럼을 함께 운영하고 있으며, 일반 시민이 자유롭게 의견을 개진할 수 있는 온라인 의견 창구도 운영한다. 기술영향평가위원회, 시민포럼, 온라인 의견 창구를 통해 제시된 소수 의견은 Chapter II의 ‘이런 의견도 있어요’에 정리하였다.

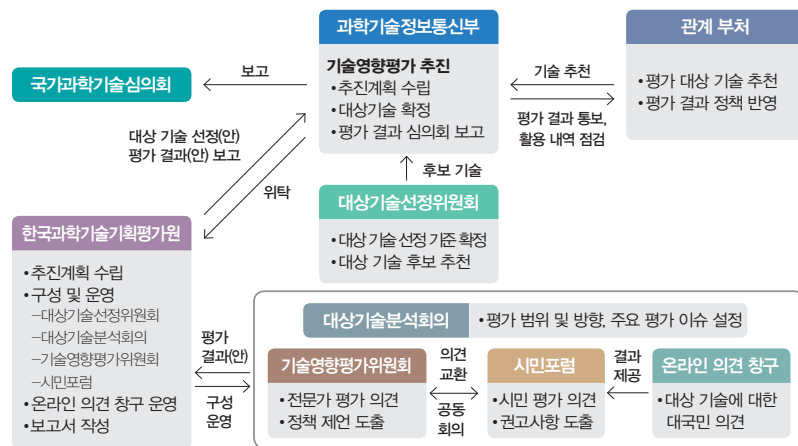
2017년 평가 대상 기술인 바이오 인공장기 기술은 과학기술, 사회과학, 언론, 사회단체 등 다양한 분야의 전문가 13인으로 구성된 대상기술선정위원회를 통해 선정됐다. 이후 5월부터 약 2개월 간 대상기술분석회의에서 기술명, 기술의 정의와 평가 범위를 명확히 했다. 더불어 관련 기술의 현재 동향 및 발전 전망을 조사하고, 주요 평가 주제를 도출했다. 대상기술분석회의는 대상기술 관련 산학연 전문가와 인문사회학자 8인으로 구성됐다.

이후 기술영향평가위원회와 시민포럼이 꾸려져 7월부터 10월까지 대상 기술인 바이오 인공장기 기술에 대한 본격적인 토론이 이뤄졌다. 기술영향평가위원회는 바이오 인공장기 분야의 다양한 산학연 전문가와 인문사회과학 전문가 15인이며, 시민포럼은 공모를 통해 선정된 다양한 연령, 성별, 직업의 일반인 15인으로 구성됐다. 이와 함께 온라인 의

견 창구도 함께 공개해 다양한 시민들의 의견을 모았다. 온라인과 오프라인 회의를 병행하며 진행한 기술영향평가위원회에서는 신기술이 초래할 파급효과에 대해 객관적으로 분석하고, 대응방안을 마련하는 데 초점을 맞추었다. 시민포럼과 온라인 의견 창구를 통해서도 국민들의 상상력 넘치는 다양한 의견들을 수용하고자 했다.

두 차례의 기술영향평가위원회와 시민포럼 공동회의에서는 전문가와 일반 시민 각각의 관점에서 기술에 대한 생각과 의견을 공유했으며, 취합된 결과는 공개 토론회를 통해 시민들에게 발표됐다. 기술영향평가 최종 결과는 관계 부처의 의견을 수렴해 2017년 12월 국가과학기술심의회에 보고됐으며, 앞으로의 부처별 관련 정책 수립에 적극 반영될 예정이다.

우리나라 기술영향평가 추진체계표



연도별 평가 기술표

2003	NBIT* 융합기술
2005	RFID**, 나노
2006	줄기세포치료 기술/나노 소재/UCT***
2007	기후변화대응 기술
2008	국가재난질환대응 기술
2011	뇌-기계 인터페이스
2012	빅데이터 분석기술과 활용
2013	3차원 프린팅/스마트 네트워크
2014	무인 이동체/초고층 건축물
2015	유전자 가위/인공지능
2016	가상·증강현실

* Nano Bio Information Technology : 나노기술, 생명기술, 정보기술을 결합한 미래형 융합기술

** Radio Frequency Identification : 무선데이터 송신장치

*** Ubiquitous Computing Technology : 언제 어디서나 네트워크에 접속할 수 있는 기술

2017년 기술영향평가 일정 및 과정 흐름도



새 삶을 주는 미래 기술 바이오 인공장기



바이오 인공장기의 미래

1. 바이오 인공장기란 무엇인가
2. 왜 지금 바이오 인공장기를 말해야 하나
3. 바이오 인공장기 어디까지 왔나

1. 바이오 인공장기란 무엇인가



○ 바이오 인공장기 기술의 정의와 평가 범위

“스티브 오스틴, 우주 비행사. 간신히 목숨만 붙어 있는 남자. 우리는 그를 다시 만들 수 있다. 우리에게겐 그럴 기술이 있다. 우리에게엔 세계 최초의 생체공학 인간을 만들 능력이 있다 ...”

1970년대 인기 TV 시리즈인 ‘600만 달러의 사나이’는 매회 이렇게 시작했다. 불의의 사고로 왼쪽 눈과 오른팔, 두 다리를 잃은 주인공 스티브는 20배 줌과 열 감지 기능을 갖춘 생체공학 눈, 자동차도 들어 올릴 수 있는 인공팔, 시속 100km로 달릴 수 있는 인공다리를 이식받아 특수 요원으로 거듭난다. 슈퍼히어로 급으로 악당들을 소탕했던 그의 활약상은 전 세계 시청자들을 사로잡았고, 우리나라에서도 방영되어 큰 인기를 끌었다.



미국 드라마 ‘6백만 달러의 사나이’ DVD 표지
(출처 : Universal Studios Home Entertainment)

드라마가 방영된 지 40여 년이 지났지만, 생체공학 인간 스티브를 만들 수 있는 기술은 아직 실현되지 않았다. 그러나 머지않아 손상된 신체를 대체할 기술이 개발될 것이라는 데는 많은 과학자가 의견을 같이한다. 최근 급격히 발달한 과학기술에 힘입어 앞으로 10년에서 15년 정도 후면 일부 바이오 인공장기 기술이 상용화되고 확산될 것으로 예견되고 있다.

바이오 인공장기는 향후 인류의 건강수명 연장과 건강 증진, 기능 강화에 매우 큰 기여를 할 것으로 보인다. 이에 따라 의료계, 노동 시장, 산업 등 사회와 경제의 다양한 문제에 변화를 불러올 것으로 예상된다. 또한 생명에 관련된 기술 고유의 특성 때문에 사회·윤리적인 논쟁을 낳을 것이며, 국민의 삶에도 큰 영향을 미칠 것이다. 이에 2017년 기술영향평가에서는 바이오 인공장기 기술이 사회, 경제, 문화 등 다양한 분야에 걸쳐 어떠한 영향을 미칠 것인가에 대해 미리 예측해 보고, 대안을 논의하기로 했다.

바이오 인공장기란 인간의 장기가 손상되어 더 이상 제 기능을 하지 못할 때, 이를 대체할 수 있도록 인공적으로 만들어진 것이다. 엄밀히 구분하자면 장기는 조직이 모여 일정한 형태를 가지고 특정한 작용을 하는 것ⁱⁱ기관을 말하지만, 이번 논의에서는 세포와 조직까지 ‘장기’에 포함하여 논의하기로 했다. 일반적으로 장기는 세포와 조직을 포함한 최상위 개념으로 사용되기 때문이다. 또한 인체의 일부분이 인공적으로 대체된다는 점에서는 일상에 미치는 영향과 일어날 수 있는 문제점이 비슷하다고 보았다. 단순히 인공장기라고 하지 않고 ‘바이오’란 단어를 붙인 이유는 이미 일반적으로 쓰이고 있는 ‘인공장기’는 단순한 기계적 장치 개념이 강해 현재 연구가 활발히 진행되고 있는 이종 혹은 개인 세포를 기반으로 하거나, 생체 시스템이 접목된 ‘장기 대체 기술’을 포괄하기에는 부족하다는 판단에서다.

바이오 인공장기는 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 먼저 ‘이종장기’ 기술이란 인간의 조직 및 장기를 대체하기 위해 특수하게 개발된 동물의 조직 및 장기를 인간에게 이식하는 기술을 말한다. ‘세포 기반 인공장기’는 세포 및 생체재료(biomaterial)ⁱⁱⁱ를 이용하여 장기를 개발하고 대체하는 기술이다. 마지막으로 ‘전자기기 인공장기’는 바이오 및 전자기계 기술을 융합하여 만든 장치로, 손상된 장기나 조직의 기능을 대체하는 것이다.

현재 널리 쓰이고 있는 단순 기계장치의 경우, 미래의 파급효과를 평

ii. 의약품을 제외한 인공, 천연 또는 그들의 복합재료로, 인체 내에서 단기 또는 장기간 조직이나 기관의 기능을 치료, 보강, 대체 또는 회복시키는 데 사용되는 재료

가하는 기술영향평가의 목적과는 맞지 않아 제외했다. 단순 지지대 역할을 하는 구조물이나 보형물ⁱⁱⁱ도 평가 대상에서 제외했다. 하지만 최근 생체 시스템과 상호작용하는 형태로 발전해나가고 있는 전자기기 인공장기의 경우 포함하기로 했다.

2017년 기술영향평가 대상기술의 범위			
	이종장기	세포 기반 인공장기	전자기기 인공장기
평가 범위	인간의 조직 및 장기를 대체하기 위해 동물의 조직 및 장기를 개발하고 이를 인간의 체내에 이식하는 기술	세포* 및 생체재료 등을 이용하여 생체 조직 및 장기를 개발/대체하는 기술 *체세포, 줄기세포 포함	바이오 및 기계·전자 기술을 융합하여 조직 및 장기를 대체하기 위해 인공적으로 만든 장치 ※ 인공뼈/관절, 연골 등 단순 지지대 역할만을 수행하는 구조물은 제외
핵심 기술	- 이식 가능한 이종장기 개발 기술 - 장기의 인체 내 생착 유도 기술(면역 반응 조절 포함) 등	- 줄기세포를 이용한 바이오 장기 개발 기술 - 3D 바이오 프린팅 기술 등	- 신체기능 복원 기기(인공 감각기, 신경망과 연결 가능한 인공의족/의수 등) 개발 기술 - 완전이식형 인공 장치 개발 기술 등

iii. 모양이나 형태를 보존해 주는 물질

○ 바이오 인공장기의 동향 및 발전 전망

현재 활용되고 있는 바이오 인공장기 기술은 인공피부나 연골과 같은 일부 구조적 조직에 한정돼 있는 상황이다. 또한, 기존의 기계적 인공장기는 장기부전 환자의 장기 기능을 완전히 대체하는 것이 아니라 장기 이식을 기다리는 기간 동안 일부 기능을 대체하거나 보조하는 역할에 그치고 있다. 그러나 최근 면역조절 기술, 역분화 줄기세포(induced pluripotent stem cell, iPSC) 분화 및 배양 기술, 3D 바이오 프린팅 기술 등 각종 관련 기술들이 급속하게 발전함에 따라 바이오 인공장기 기술의 발전 속도는 점점 더 빨라지고 있다. 따라서 10년~15년 후에는 동물 유래 세포나 조직, 환자 자신의 줄기세포를 이용한 이식용 세포나 조직이 일부 사용되는 단계까지 이를 것으로 보인다. 이식되는 부위의 특성에 따라 발전 속도는 다를 것으로 보이는데, 전문가들은 각막·췌도, 신장·심장, 간·폐 순으로 개발될 것이라 전망하고 있다.

이종장기 기술 중 돼지를 이용한 세포 및 조직 이식은 전 세계적으로 임상시험 단계거나 임상시험 도입 직전 단계에 이르고 있으며, 장기의 경우 영장류에 이식하는 연구가 활발히 진행 중이다. 이종장기 분야는 세포·조직·장기의 종류에 따라 면역학적 문제나 장기 생존 문제 등에 차이가 있어 발전 속도도 각기 다르다. 면역거부반응이나 이에 따른 세포 괴사 등의 한계점이 극복된다면 10~15년 후에는 일부 이종 세포·조직이 상용화될 것으로 예상된다^{iv, 2)3)}.

iv. 제5회 과학기술예측조사에 따르면, 개인 유전자 지도를 이용한 맞춤형 이종장기 배양 시스템의 국내 기술 실현 시기는 2030년, 국외 기술 실현 시기는 2027년으로 예측됐다.

세포 기반 인공장기 분야에서는 환자 자신의 세포를 활용해 제작한 인공피부, 연골 등이 이미 상용화됐다. 그 외의 맞춤형 인공조직이나 장기는 필요한 세포 및 활용하는 지지체의 종류에 따라 개발 단계가 다르다. 다만 오가노이드^v 형태의 ‘미니 장기’는 약물 및 화장품 시험, 질환 모델링 분야에서 빠르게 발전해 나가고 있다.

10~15년 후에는 몇몇 종류의 맞춤형 인공세포·조직이 상용화될 수 있을 것으로 보인다. 특히 인공혈관의 상용화 가능성이 매우 높다. 위장이나 귀, 기도, 심장 등은 임상단계에 진입할 수 있을 것으로 예상된다^{vi}.

현재 전자기기를 이용한 인공장기 기술은 인공심장처럼 동종 이식 수술을 기다리는 동안 장기의 기능을 일시적으로 대체하거나, 혈액 투석기나 인슐린 펌프와 같이 보조 또는 일부 기능을 회복시키는 데 사용되고 있다. 최근에는 단순한 기계장치를 넘어 신경신호나 근육의 움직임 등 생체정보와 상호작용하는 착용형·이식형 장치를 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 외부에 있는 다른 기계에 연결하지 않아도 독립적으로 작동하는 더 작고, 더 가벼워진 전자기기 인공장기^{vii}는 10년~15년 후 출현할 것으로 예상된다^{viii}.

v. 줄기세포 또는 장기 기원 세포로부터 분리한 세포를 3D 배양법으로 재조합하여 실제 장기와 유사한 기능을 재현하는 소형 장기

vi. 제5회 과학기술예측조사에 따르면, 역분화 줄기세포를 이용한 생체모사형 인공장기 기술의 국내 실현 시기는 2030년(국외 2026년), 3D 프린팅을 이용한 맞춤형 인공장기 제조 기술의 국내 실현 시기는 2027년(국외 2024년)으로 예측됐다.

vii. 웨어러블 인공신장이나 신경 자극을 통해 감각 혹은 마비를 복구하는 장치(인공눈·와우, 인공팔·다리 등)를 말한다.

viii. 제5회 과학기술예측조사에 따르면, 인체에 삽입되어 완전하게 독립적으로 기능하는 인공신장의 사회적 확산 시기가 2029년으로 예측됐으며, 완전 이식형 신경접속장치는 2033년 국내에 실현(국외 2027년)될 것으로 예측됐다.

바이오 인공장기의 기술 동향 및 발전 전망				
구분	현재	5년 이후	10~15년 이후	궁극적인 구현 기술
바이오 인공장기	(현재) 생체재료 기반의 인공피부, 인공연골 등 복잡한 신체 기능을 요하지 않는 조직은 상용화 — 일부 세포/조직은 임상시험에 성공했거나 기술 개발 중인 단계 ※ 현 장기부전 대응은 동종장기이식, 기계장치를 이용한 일시적인 기능 대체 및 보조 (향후) 세포 배양, 면역거부반응 극복, 3D 바이오 프린팅 등 기술의 발전에 따라 점차 고품장기 수준의 바이오 인공장기 제작·이식이 가능할 것으로 예상 — 전자기기 인공장기, 이종장기 및 세포 기반 인공장기 순으로 발전이 예상되나, 상용화 시점은 상대적인 기술 수준에 따라 차이 발생 예상			
이종장기	▪ 일부 세포/조직의 임상/비임상시험 성공 ※ 판막 임상시험 성공 ※ 각막, 췌도, 영장류 비임상시험 성공 ※ 해외의 경우, 각막 상품화(중국), 췌도 임상(일본, 뉴질랜드), 심장 비임상(미국) 단계	▪ 일부 조직의 상용화 ※ 판막 ▪ 일부 세포/조직은 임상 단계 진입 ※ 각막, 췌도 등 ▪ 일부 고품장기의 개발 ※ 신장, 심장 등	▪ 일부 세포/조직의 상용화 ※ 각막, 췌도 등 ▪ 일부 고품장기의 임상 단계 진입 ※ 신장, 심장 등 ▪ 일부 고품장기의 개발 ※ 간, 폐 등	면역거부반응 최소화 및 장기 생존력 증가로 주요 장기 대체 가능
세포 기반 인공장기	▪ 개인 세포를 활용한 일부 조직의 개발 ※ 피부, 근육 등	▪ 개인 세포를 활용한 일부 조직의 임상 단계 진입 ※ 피부, 근육 등 ▪ 개인 세포를 활용한 일부 고품장기의 개발 ※ 위장, 귀, 기도, 심장 등	▪ 개인 세포를 활용한 일부 조직의 상용화 ※ 피부, 근육 등 ▪ 개인세포를 활용한 일부 고품장기의 임상 단계 진입 ※ 위장, 귀, 기도, 심장 등	줄기세포 분화 기술 및 세포 생존율 보완으로 신체의 주요 장기를 개인 맞춤형으로 생산 가능

구분	현재	5년 이후	10~15년 이후	궁극적인 구현 기술
전자기기 인공장기	▪ 장기이식 전 일시적으로 기능을 대체하거나 보조하는 단순기계장치는 상용화 예) 혈액 투석기, 신장투석기 등	▪ 인간 생체정보와 상호작용하는 착용형/이식형 장치의 개발 및 임상 단계 진입 ※ 웨어러블 인공신장, 신경 자극을 통해 감각 혹은 마비를 복구하는 장치 (인공눈/와우, 인공팔/다리 등)	▪ 착용형/이식형 장치의 상용화 ※ 웨어러블 인공신장, 신경 자극을 통해 감각 혹은 마비를 복구하는 장치(인공눈/와우, 인공팔/다리 등)	주요 신체 장기를 완전 이식형 기계장치로 대체

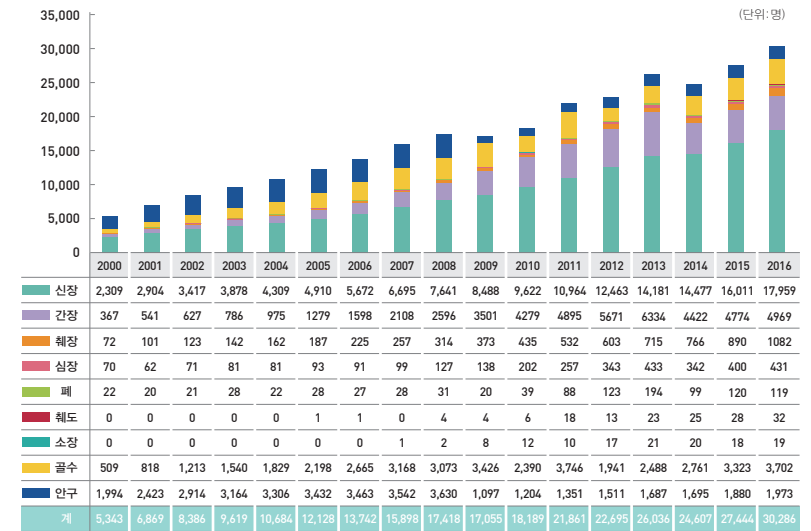
2. 왜 지금 바이오 인공장기를 말해야하나

○ 장기 부족 문제를 해소해 줄 열쇠

바이오 인공장기 기술은 현재 인간 생명 연장의 열쇠가 되어줄 미래 기술로 주목받으며 하루가 다르게 성장하고 있다. 바이오 인공장기가 기대를 모으는 가장 큰 이유는 동종장기 이식이 가진 여러 한계를 극복할 수 있을 것으로 보이기 때문이다.

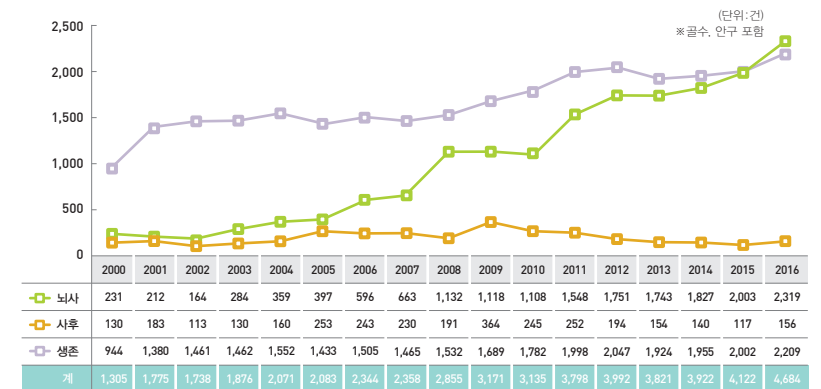
먼저 바이오 인공장기는 필요한 만큼 생산할 수 있어 현재 동종 이식을 위한 장기의 심각한 부족 상태를 해소할 수 있을 것으로 보인다. 현재 우리나라에서 장기 이식을 받기 위해 기다리고 환자는 30,286명에 이른다(2016년 기준). 그러나 실제 이식 건수는 4,684명으로, 대기자의 1/6에도 미치지 못하는 상황이다⁴⁾. 게다가 기대수명이 늘어 만성질환이 증가하는 추세에 따라 장기 이식 대기자 숫자는 해마다 늘어나고 있다.

장기 이식 대기자 추이(장기별)



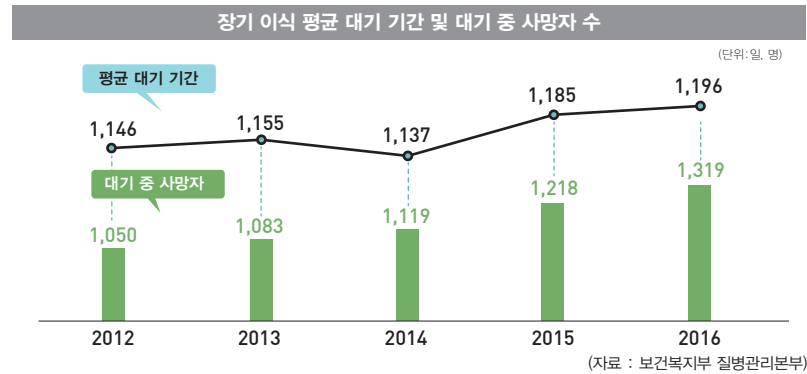
(자료 : 보건복지부 질병관리본부)

연도별 장기 이식 건수(2000~2016)

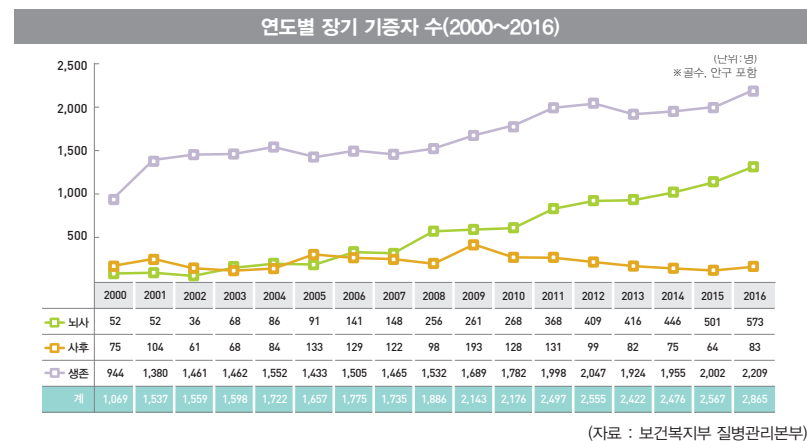


(자료 : 보건복지부 질병관리본부)

이식을 받기 위한 기다림도 길다. 우리나라에서 환자들이 장기 이식을 받기 위해 기다리는 기간은 2016년 기준 평균 1,196일로, 3년이 넘는다. 이식을 기다리다가 사망한 환자의 수도 매년 천여 명이 넘는다. 하루 평균 3명 이상이 장기 기증자를 기다리다 사망하는 셈이다.



한편 장기 기증자(장기 공여자) 숫자는 여전히 2천 명대에서 제자리걸음을 하고 있다. 우리나라 장기 기증자수는 2012년 2,555건, 2013년 2,422건, 2014년 2,476건, 2015년 2,567건, 2016년 2,865건이었다.



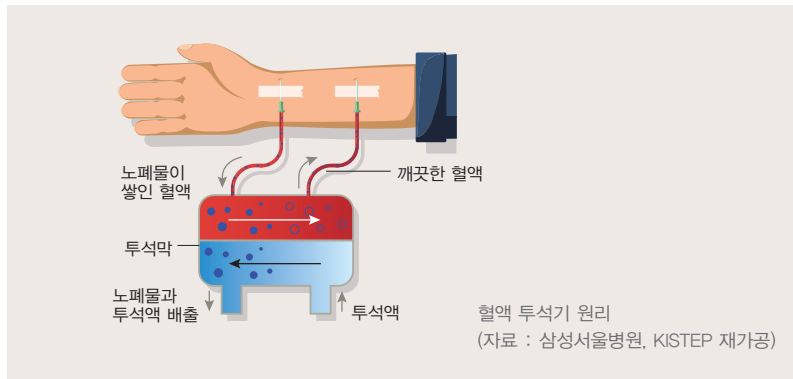
우리나라뿐만이 아니다. 미국의 경우 2017년 기준 장기 이식 대기자는 123,398명이나 되지만, 2016년 장기 이식을 받은 이는 약 16,000여 명밖에 되지 않는다. 심지어 장기 기증을 한 사람은 8,000여 명에 불과하다. 바이오 인공장기 기술은 이처럼 이식 장기 수요와 공급의 차이가 큰 상황에서 효과적인 해결안이 될 것으로 기대되고 있다.

○ 후유증 및 사용 불편이 해소된 형태로 각광받을 듯

개인의 세포를 이용한 바이오 인공장기가 개발된다면 동종장기 이식에서 일어날 수 있는 면역거부반응에서 자유로워질 것으로 기대된다. 동종장기 이식에서는 자가 이식이나 일란성 쌍둥이 간 이식이 아닌 이상 항상 면역거부반응이 일어나기 때문이다. 이를 막기 위해 면역억제제(immunosuppression)를 시도하지만 이로 인해 발생할 수 있는 부작용도 있다. 정상적인 면역반응이 일어나지 않기 때문에 일반인들은 걸리지 않는 바이러스(CMV: Cytomegalovirus, EBV: Epstein-Barr virus)나 박테리아(결핵균 *Mycobacterium tuberculosis*, 폐렴균 *Streptococcus pneumoniae* 등)에 쉽게 감염될 수 있고⁹⁾, 면역력 감소로 합병증이 발생하는 등의 위험 또한 감수해야 한다.

바이오 인공장기 기술은 현재 사용되고 있는 투석기나 심장 박동기와 같은 기계적 인공장기의 기술적 한계도 넘어설 수 있을 것으로 기대된다. 현재 사용되는 기계적 인공장기는 장기의 기능을 대체하기보다는 보조해 주는 데 그치고 있다. 또한 시간이 지날수록 노후화될 뿐 아니라 전력 공급이 어려워 소모성 부품을 주기적으로 교체해야 하는 기술적 한계도 있다. 예를 들어 인공폐는 3~5일 간격으로 인공 산화기

를 교체해야 하고, 혈액 투석기 형태의 인공신장 또한 주기적으로 여과막을 교체해야 한다. 인공심장 또한 5~10년 주기로 소모성 부품을 바꿔주어야 한다.

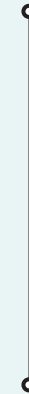


현재 기술로 실제 장기의 기능을 재현하기 위해서는 장치의 크기가 매우 커진다는 점도 문제다. 기계적 인공장기를 사용하는 환자는 장치를 부착하거나 카테터^{ix}를 삽입하기 위해 기계장치 이식을 위한 공간 확보 과정에서 감염 노출의 위험이 있다.

전 세계 인구의 고령화로 인해 장기부전 환자는 갈수록 늘어가는 추세다. 따라서 인간의 손상된 장기를 완전히 대체해 줄 바이오 인공 장기 개발에 대한 요구는 점점 더 거세어질 전망이다.

^{ix} 몸속에 고여 있는 물질을 배출시키거나 세정용 관류액을 몸속에 넣을 때, 심 혈행 동태를 측정할 때 사용하는 관 모양의 의료 기구. 고무나 금속을 이용하여 용도에 따라 다양한 크기와 형태로 만든다.

3. 바이오 인공장기 어디까지 왔나



◦ 동종장기 이식의 과거와 현재

손상된 신체의 대체를 시도한 역사적 기록들

바이오 인공장기 기술은 현재 얼마나 발전했을까. 바이오 인공장기 기술의 역사와 현재를 알아보기 전, 먼저 장기 이식의 역사에 대해 살펴보자.

이식에 대한 최초의 기록은 1700여 년 전까지 거슬러 올라간다. 4세기 무렵 소아시아(지금의 터키 지역)에는 성 코스마스와 성 다미안(St. Cosmas and Damian)이라는 쌍둥이 형제 의사가 살았다고 한다. 평소 가난한 이들을 치료해줘 신망이 높았던 형제는 유스티니아누스(Justinian I) 주교의 한쪽 다리가 썩어 죽을 지경에 이르자, 죽은 무어인(북아프리카인)의 다리를 이식했다고 한다⁶⁾. 여러 중세 화가들에 의해 그림으로 그려진 이 사건은 인류 최초의 다리 이식으로 추정되고 있다.



성 코스마스와 성 다미안이 유스티니아누스 주교의 손상된 다리 대신 무어인의 다리를 이식하는 장면을 그린 유화, The healing of Justinian by Saint Cosmas and Saint Damian (출처 : Museo di San Marco)

피부 이식에 관한 기록도 있다. <사미타>라는 인도의 고대 서적에 따르면, 인도에서는 기원전 800년경부터 피부를 이식하는 수술이 이뤄졌다고 한다. 고대 인도에서는 중범죄를 일으킨 사람들의 코를 자르는 형벌이 있었는데, 수스루타(Sushruta)라는 의사가 환자 이마의 피부를 잘라 코를 복원해주었다는 것이다. 1597년 이탈리아 볼로냐에도 피부 이식에 대한 기록이 남아 있다. 의사 가스파르 타그리아코치(Gaspare Tagliacozzi)가 환자의 팔에서 피부를 떼어내 이마에 이식했다는 것이다. 이는 현재 성형외과에서도 쓰이고 있는 피판(flap)술 개념으로, 자가 조직을 활용한 이식 기술이다.



타그리아코치는 팔의 피부가 이마에 붙는 동안 혈액을 공급받을 수 있도록 팔을 머리 위로 고정했다. (출처 : Rizzoli Orthopaedic Institute)

각막 이식도 비교적 오래전부터 시도된 것으로 보인다. 19세기 후반 독일에서 부분 각막 이식을 시행했다는 기록이 있고, 1904년 오스트리아, 지금의 체코공화국의 의사 에두아르트 짐(Eduard Konrad Zirm)이 사고로 사망한 소년의 눈에서 각막을 채취해 화상으로 실명한 환자에게 이식하는 수술을 시행해 성공했다는 기록이 있다⁷⁾.

장기 이식을 가능케 한 외과 수술법과 면역억제제의 발달

심장이나 간처럼 모양을 갖추고 있는 고형장기 이식은 20세기가 될 때까지 성공에 이르지 못했다. 이유는 크게 두 가지다. 외과 수술법이 충분히 발달하지 못했던 것과 면역거부반응 때문이었다.

이식수술과 같은 장기의 수술은 오랜 시간 매우 끔찍한 고통을 수반한다. 환자가 이를 버텨내게 할 수 있을 만큼 효과적인 마취제는 20세기에 들어 개발됐다. 1940년대 캐나다의 외과 의사 헤럴드 그리피

스(Herald Griffith)가 근육 이완제로 ‘인트라코스틴(Intracostin)’을 사용하고⁸⁾, 1951년 영국의 화학자 찰스 서클링(Charles W. Suckling)이 강력한 마취제인 ‘할로테인(Halothane)’을 개발할 때까지 긴 수술 시간은 환자들이 감당할 만한 것이 아니었다⁹⁾.

또한 장기는 무수히 많은 혈관이 연결되어 혈액으로 영양과 산소를 공급받는데, 이식하는 장기와 몸의 혈관을 연결하는 기술은 1910년대가 돼서야 개발됐다. 가장 먼저 개발된 것은 동맥을 자른 후 혈관 조직에 상처를 주지 않으면서도 잠시 혈액이 흐르지 않도록 집어줄 수 있는 동맥 집자라는 도구였다. 미국의 의학자인 알렉시스 카렐(Alexis Carrel)은 끊어진 혈관의 양쪽 끝부분을 삼각형처럼 만들어 봉합하는 ‘삼각봉합법(혈관문합술)’을 고안했다. 이 봉합법은 오늘날에도 널리 쓰인다. 카렐은 혈관봉합법과 장기 이식 연구에 대한 공로로 1912년 노벨생리의학상을 받았다.



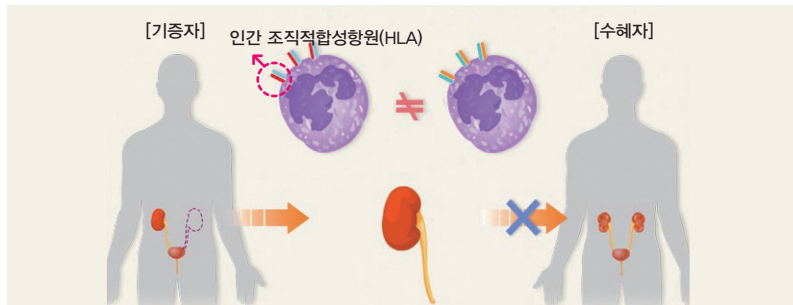
장기 이식에 꼭 필요한 외과기술인 혈관 삼각봉합법을 개발한 의사 알렉시스 카렐 (출처 : Nobel Media)

고형장기 이식이 어려웠던 또 하나의 이유는 면역거부반응 때문이다. 면역거부반응이란, 인체의 면역체계가 이식되는 장기를 외부 물질(Non-self : 비자기)로 생각해 이를 파괴하는 현상이다. 오랜 옛날부터 시도된 피부 이식도 다른 사람의 것으로 했을 때는 실패 확률이 무척 높았다. 각막 이식이 비교적 일찍 성공한 것은 우연이 아니다. 면역거부는 백혈구를 통해 일어나는데, 각막은 무혈관성 조직이기 때문에 다른 장기 이식에서 필요한 기증자와 수혜자 간 조직형 일치 정도가 수술 결과에 영향을 주지 않았던 것이다.

면역거부반응을 처음으로 연구한 사람은 영국의 과학자 피터 메더워(Peter Medawar)다. 그는 1943년 토끼의 피부를 다른 토끼에게 이식하는 연구를 통해 심한 거부반응이 나타나는 것을 발견하고, 이를 면역반응 때문이라고 주장했다. 또한 쌍둥이 소의 피부 이식 실험을 통해 쌍둥이처럼 태아 시절 세포 교환이 이뤄질 경우 면역거부반응을 일으키지 않는 ‘면역 관용(면역학적 내성)¹⁰⁾’이 일어남을 밝혀냈다. 그는 이와 관련된 연구로 1960년 노벨생리의학상을 수상했다.

1950년대에 이르러 과학자들은 면역에 대해 더욱 많은 것을 알게 됐다. 우리 몸이 외부에서 유래한 조직이나 장기를 거부하는 매우 복잡한 방어체계를 갖추고 있음을 하나둘 알게 된 것이다. 1954년 니컬러스 에이브리언 미치슨(Nicholas Avrion Mitchison)은 백혈구의 일종인 림프구들이 이식한 장기의 거부반응을 이끄는 주범임을 알아냈다¹¹⁾. 오스트레일리아의 의사이며 생물학자인 프랭크 맥팔레인 버넷(Frank Macfarlane Burnet)은 림프구가 외부 물질을 공격하는 후천적 면역의 비밀을 밝혀냈다. 또한, 1958년 프랑스의 장 도세(Jean Baptiste Gabriel Dausset)는 인간세포

에 조직적합항원(HLA: Human Leukocyte Antigen) 단백질이 있다는 것을 세상에 알렸다^x.



인간 조직적합성항원(HLA)과 이식거부반응. HLA는 백혈구 표면에 존재하는 항원으로 6번 염색체에 있는 유전자에 따라 결정된다. 장기 기증자와 수혜자의 HLA type이 맞지 않을 경우 이식거부반응이 일어날 가능성이 높아진다. (자료 : 보건복지부 질병관리본부, KISTEP 재가공)

우리 몸의 면역체계가 이식거부반응을 유발한다는 사실이 알려지면 서, 이식 수술을 할 때 면역체계를 약화시켜 거부반응을 줄이는 시도도 이뤄졌다. 처음에는 방사선을 쬌어 골수를 모두 파괴시키는 방법으로 면역반응을 감소시키려 했다. 그러나 사소한 감염에도 병에 걸리는 등 환자에게 극심한 부작용이 나타나 옳은 방법이 아님을 깨달았다¹²⁾.

그러던 중 1959년 로버트 슈워츠(Robert Schwartz)와 윌리엄 다메섹(William Dameshek)이 6-메캅투푸린(6-mercaptopurine)이라는 물질이 면역세포의 활동을 억제한다는 사실을 밝혀내면서 ‘면역억제제’ 개발이 시작됐다¹³⁾. 1960년대 초반 영국의 로이 칼느(Roy Calne) 박사는 ‘롤리팜’이라는

x. 우리 몸의 면역기관은 조직적합성항원을 통해 어떠한 세포가 자신의 것인지 아닌지를 구별한다. 조직적합성항원이 비슷한 사람끼리 장기를 이식하면 거부반응도 줄어든다.

개에게 신장 이식수술을 하면서 면역억제제 ‘아자티오프린(Azathioprine)’이라는 약을 사용했고, 수술은 성공적이었다. 이는 혈연 관계가 없는 다른 개의 신장을 이식하여 성공한 최초의 사례였다. 1964년 미국의 토머스 스타즐(Thomas Starzl)은 아자티오프린과 함께 스테로이드제를 사용하여 이식 환자의 거부반응을 크게 줄일 수 있었다¹⁴⁾.



면역억제제 아자티오프린을 사용해 개의 신장 이식 수술에 성공한 로이 칼느 연구팀과 신장 이식을 받은 개 롤리팜 (출처 : The Harvard Medical Library)

이후 획기적인 면역억제제가 등장하며 장기 이식은 커다란 전기를 맞게 된다. 1960년대 스위스 제약회사 산도즈(Sandoz) 사의 장 보렐(Jean Borel) 박사가 노르웨이의 흙 속에서 발견한 곰팡이의 부산물로 강력하면서도 부작용이 적은 면역억제제 ‘사이클로스포린(Cyclosporine)’을 개발한 것이다. 사이클로스포린은 1983년부터 사용되기 시작했고, FDA 승인을 받아 현재까지 쓰이고 있다. 현재는 사이클로스포린과 다른 면역억제제를 함께 사용하는 ‘칵테일 요법’이 널리 사용되고 있다.

인체 장기별 이식 기술의 발전사

이번에는 각각의 장기가 언제부터 이식되기 시작했는지 알아보자. 인류 역사상 가장 먼저 이식이 시도된 고형장기는 신장이다. 1933년에 파리에서 활동하던 러시아의 유리 보로노이(Yurii Voronoy)가 집도한 신장

이식 수술이었는데¹⁵⁾, 안타깝게도 환자는 면역거부반응으로 수술 후 이틀 만에 숨지고 말았다. 이후에도 대부분의 이식 수술은 면역거부반응을 해결하지 못해 실패했고, 단 몇 건만이 기적처럼 성공했다. 1950년 미국 시카고에서 혈액형만 동일한 타인의 신장을 이식받은 루스 터커(Ruth Tucker)라는 44세 여성은 이식 후 11개월을 더 살았다. 1954년 12월 미국 보스턴 하버드 의과대학병원의 조지프 머리(Joseph Murray)는 리처드 헤릭(Richard Herrick)이라는 환자에게 일란성 쌍둥이 형제인 로널드 헤릭(Ronald Herrick)의 신장을 이식했다. 3시간 30분에 걸친 수술은 성공적이었고, 리처드는 이후 8년을 더 살았다. 그러나 이 수술은 면역거부반응이라는 장애물을 넘었다기보다는 일란성 쌍둥이라는 조건으로 피했다는 평가를 받았다¹⁶⁾.



세계 최초로 일란성 쌍둥이 간의 신장 이식으로 건강을 되찾은 리처드 헤릭과 로널드 헤릭 형제
(출처 : 연합뉴스)

신장 이식과 췌장 이식이 함께 이뤄진 경우도 있다. 제1형 당뇨병은 당 분해 호르몬(인슐린)을 분비하는 췌장이 제 기능을 하지 못해 생기는 병이다. 당뇨병은 신장을 망가뜨리는데, 당뇨병 환자가 신장을 이식받더라도 췌장이 제 기능을 하지 못하면, 신장이 다시 나빠지기 때문에

신장과 췌장의 동시 이식이 수행되었다. 1966년 미국 미네소타 대학의 릴리하이(Richard Lillehei)와 켈리(William Kelly)는 세계 최초로 신장과 췌장을 동시에 이식하는 수술을 수행했고 성공했다¹⁷⁾.

신장 이식이 발전하면서 의사들은 간 이식에도 도전했다. 간은 신장보다 훨씬 크고 다루기 어려울 뿐 아니라, 혈액 공급이 중단되면 금방 망가지는 장기다. 또한 신장 이식은 투석 기계의 도움을 받으면 이식받은 신장이 제대로 역할을 할 때까지 환자가 생존할 수 있지만, 간은 이식받은 즉시 제 기능을 하지 않으면 환자가 사망하게 된다. 미국의 토머스 스타즐과 영국의 로이 칼드는 1963년 각각 간 이식을 시도했지만 두 환자 모두 면역거부반응으로 사망했다. 토머스 스타즐은 1967년 간 이식에 다시 도전했고, 결국 환자를 1년 이상 생존시키는 데 성공했다. 이후 꾸준한 연구로 간 이식 수술 기법이 발전했고, 수술에 성공하는 사례도 많아졌다. 하지만 여전히 환자의 4분의 3은 1년 이내에 사망했다.

간 이식 환자들의 생존율은 획기적으로 높아진 것은 1983년 면역억제제인 ‘사이클로스포린’이 개발되면서부터다. 현재는 간 이식 환자의 90% 이상이 일 년 이상 생존해 많은 환자들이 완전히 건강을 회복하고 있다. 한편 1989년 호주에서 건강한 어머니의 간 일부를 아들에게 이식하는 수술이 성공한 이후^{xi)} 현재는 주로 생체 간 이식 수술이 행해지고 있다.

폐 이식은 1963년 미국 미시시피 대학에서 제임스 하디(James Hardy),

xi. 성인끼리의 생체 간 이식의 경우 1993년 일본에서 최초로 수술이 시행됐다.

와트 웹(Watts Webb) 등에 의해 처음 시행됐지만, 수여자가 18일 만에 사망했다. 이후 15년간 폐 이식 역사에서 제일 오랫동안 산 사람이 6개월일 정도로 모두 성공적이지 못했다. 폐는 지속적으로 외부와 접촉하는 장기이기 때문에 면역거부반응을 제어하기 힘들다. 최초의 성공적인 폐 이식 사례는 1983년 캐나다 토론토의 조엘 쿠퍼(Joel D. Cooper)에 의해 시행된 것이라고 할 수 있다. 살아있는 사람끼리의 폐 이식은 1993년 미국에서 처음 이뤄졌고, 우리나라에서는 2017년 10월 최초로 시행됐다¹⁸⁾.

심장 이식을 처음 성공한 것은 1967년 남아프리카공화국의 외과의사 크리스티안 바너드(Christiaan Barnard)다. 그는 자동차 사고로 뇌사에 빠진 여성의 심장을 기증받아 불치의 심장병을 앓고 있던 55세의 남자 루이스 워시칸스키(Louis Washkansky)에게 이식했다. 수술은 성공적이었지만 환자는 면역체계 이상으로 폐렴에 걸려 18일 만에 사망했다. 바너드는 이듬해 다시 심장 이식 수술을 시도했고, 이 환자는 18개월 동안 생존했다.



세계 최초로 심장 이식을 성공시킨
남아프리카공화국 의사 크리스티안 바너드
(출처 : Encyclopedia Britannica)¹⁹⁾

최근에는 몇몇 나라에서 선천적 자궁기형으로 인한 불임을 치료하기 위한 자궁 이식도 시도되고 있다. 2002년 사우디아라비아에서 26세 여성에게 자궁 이식이 이루어졌으나 석 달 만에 이식된 자궁이 괴사하여 제거했다²⁰⁾. 2011년에는 23세 여성에게 자궁 이식이 시도됐고, 이식을 받은 여성은 정상적인 생리 주기에 접어들기도 했다²¹⁾. 2014년 스웨덴에서는 세계 최초로 자궁을 이식받은 여성이 아기를 출산했다²²⁾. 2017년 12월 미국 베일러대 병원에서도 자궁을 이식받은 여성이 출산한 사례가 학계에 보고됐다. 하지만 자궁을 이식할 때 면역거부반응을 제어하기 위한 강력한 약물을 장기간 사용해야 하기 때문에 출산을 1~2번 정도 하면 다시 제거해야 한다²³⁾.

우리나라 장기 이식의 역사

우리나라에서 장기 이식이 최초로 이뤄진 것은 1969년이었다. 성모 병원에서 어머니의 신장을 아들에게 이식하는 수술이 시행된 것이다. 이후 각막, 골수 이식 등이 시행됐다. 간 이식은 1988년 서울대학교병원에서 14세 뇌사자로부터 기증받은 간을 동갑내기 소녀에게 이식(생체 간 이식의 경우 1994년)하는 수술에 성공한 것이 첫 사례다. 1992년에는 췌장과 심장 이식도 성공했다. 1996년에는 폐 이식²⁴⁾(생체 폐 이식의 경우 2017년)²⁵⁾이 성공적으로 이뤄졌다.



1992년 우리나라 최초의 심장 이식 수술이 중앙병원에서 이루어졌다. (출처 : 연합뉴스)

우리나라는 여러 장기를 동시에 이식하는 고난도 수술이 가능하고, 장기 이식 후 부작용도 낮은 편으로, 동종 이식에 대한 의료기술은 이미 세계 수준에 도달했다는 평을 얻고 있다. 현재 신장 이식의 경우 30여 의료 기관에서 매년 1,000건 이상 시행되고 있으며, 간 이식 또한 전국 20개 이상의 병원에서 1,000건 이상 시행되고 있다²⁶⁾.

우리나라 장기 기증과 이식 현황

우리나라에서 장기 이식이 활성화된 것은 2000년대부터다. 1993년 대한의사협회에서 뇌사 판정 지침이 제시됐고, 1994년 서울에서 열린 아시아 이식 학회에서 상임이사국 17개 나라의 회원들이 뇌사 인정을 촉구하는 ‘서울 선언’이 계기가 됐다. 이후 1999년 ‘장기등 이식에 관한 법률’이 국회를 통과했고, 이듬해인 2000년 2월 공포되어 지금까지 시행되어 오고 있다. 2000년엔 국립장기이식관리센터(KONOS; Korean Network for Organ Sharing)가 발족되어 장기의 공정 분배를 원칙으로 이식에 관한 모든 것을 관리하고 있다.

현재 전 세계 장기 이식은 기증을 통해 이뤄지고 있다. 우리나라에서는 뇌 기능이 정지된 뇌사자의 장기를 기증하는 뇌사 기증, 사망(심장사)한 후에 기증하는 사후 기증, 살아 있는 사람끼리의 생체 기증을 허용하고 있다.

장기 기증의 분류	
구분	내용
뇌사 기증	뇌 질환 또는 교통사고 등으로 뇌간을 포함한 전체 뇌 기능이 완전히 정지되어 회복이 불가능한 상태의 뇌사자의 장기를 가족 또는 유족이 서면으로 신청하여 기증
사후 기증	심장이 완전히 정지한 후 안구 및 인체 조직을 기증
생체 기증	살아있는 사람으로서 19세 이상인 장기 기증자(living donor)가 부부 · 직계존비속 · 형제자매 · 4촌 이내의 친족 간, 타인 간을 이식 대상으로 선정하여 기증

(출처 : 보건복지부 질병관리본부)

뇌사란, 뇌 질환이나 교통사고 등의 외상으로 인해 뇌 기능이 손상된 상태를 말한다. 인공호흡기를 부착하여 맥박, 혈압, 호흡 등을 일시적으로 유지시킬 수는 있으나 스스로 숨 쉬는 것이 불가능하여 어떤 치료를 해도 2주 안에 사망한다. 뇌사자는 신장, 간장, 심장, 폐장, 췌장, 췌도, 소장, 안구 등의 장기를 기증할 수 있다. 심장사한 후에는 안구와 인체 조직(뼈, 연골, 근막, 건, 인대, 피부, 양막, 심장판막, 혈관)을 기증할 수 있으며, 살아있는 사람 간에는 신장, 간장, 췌장, 췌도, 소장, 골수 등의 장기를 기증할 수 있다.

뇌사 상태와 식물인간의 구분		
구분	뇌사 상태	식물인간
손상 부위	뇌간을 포함한 뇌 전체	대뇌의 일부
정신 상태	심한 혼수 상태(comatose)	무의식 상태(unconscious)
기능 장애	심장 박동 외 모든 기능 정지	기능, 사고 등 대뇌 장애
운동 능력	움직임 전혀 없음	목적 없는 약간의 움직임 가능
호흡 상태	자발적 호흡 불가	자발적 호흡 가능
경과 내용	필연적으로 심정지하여 사망	수개월~수년 후 회복 가능성이 있음
기타	장기 기증 대상이 됨	장기 기증 대상이 될 수 없음

(출처 : 보건복지부 질병관리본부)

○ 바이오 인공장기의 과거와 현재 – 이종장기

최초의 이종 이식과 이후의 발전

이종장기 이식의 권위자인 키이스 림츠마(Keith Reemtsma)는 인류 역사상 최초의 이종 이식을 그리스 신화에 등장하는 다이달로스(Daedalus)와 그의 아들 이카루스(Icarus)의 이야기에서 찾을 수 있다고 말한다²⁷⁾. 다이달로스와 이카루스는 크레타 섬에서 그리스 본섬으로 날아오기 위해 팔에 새의 날개를 붙였다고 한다. 신화에서는 이카루스가 태양에 너무 가까이 다가가 땅으로 추락했다고 하지만, 림츠마 박사는 그것이 초급 성 면역거부반응 때문일 것으로 추측한다.



그리스 신화에 나오는 다이달로스와 이카루스 이야기를 그린 그림
(출처 : Metamorphoseon libri)

신화가 아닌 실제 기록에서 이종 이식이 가장 먼저 시도된 예는 수혈이었다. 17세기 중엽부터 프랑스의 과학자들은 동물을 이용해 수혈을 연구했다. 한 예로 1660년대 프랑스 의사인 장 바티스트 드니(Jean Baptiste Denis)가 여러 차례 환자에게 양의 피를 수혈했다는 기록이 남아있다²⁸⁾.

그 다음으로 시도된 것은 피부 이식이었다. 19세기에 이르러 양, 토끼, 개, 고양이, 쥐, 닭, 비둘기에 이르는 다양한 동물의 피부를 인간에게 이식하려는 시도가 있었다²⁹⁾. 그러나 이 결과를 이종 이식이라고 보기는 어렵다. 성공했다고 여겨진 이식의 경우에도 동물의 피부로 덮은 부위의 피부가 스스로 재생됐던 것으로 여겨지기 때문이다.

1838년에는 돼지 각막을 인간에게 이식하는 시도가 있었다. 미국 뉴욕의 리처드 키쌌(Richard Kissam) 박사는 6개월 된 돼지의 각막을 청년에게 이식했고, 청년은 잠깐이나마 시력을 되찾을 수 있었다³⁰⁾. 1906년에는 염소의 신장을 사람에게 이식하기도 했다³¹⁾.

유인원 장기 이식의 잇따른 실패

미국 툴레인대학교의 키이스 림츠마 교수는 1963년 침팬지의 신장을 사람에게 이식했다. 그는 1960년대에 이와 비슷한 수술을 13건이나

수행했는데, 환자는 대부분 4~8주 사이에 사망했다. 단 한 명, 선생님
이었던 23세 여성은 건강을 회복하여 학교로 돌아갔고, 수술 후 9개월
을 더 생존했다. 또 같은 해 토마스 스타즐은 같은 해 콜로라도에서 개
코원숭이의 신장을 인간에게 이식하는 수술을 여러 건 시도했다. 결과는
림츠마 박사와 비슷했고, 장기 생존한 환자는 없었다. 최초의 폐 이
종 이식 수술을 시행했던 제임스 하디 또한 같은 해 심각한 혈관 질환
을 앓고 있던 환자에게 침팬지의 심장을 이식하는 수술을 했으나 환자는
몇 시간 만에 사망하고 말았다. 침팬지의 심장은 인간의 심장보다
훨씬 작아서 충분한 혈액을 순환시키지 못했던 것이다³²⁾.



장기 이식 수술의 개척자 중
하나인 토마스 스타즐
(출처 : 연합뉴스)

널리 알려진 이종 이식 수술 사례 중 하나는 1983년 레너드 베일리
(Leonard Bailey)가 개코원숭이의 심장을 베이비 페이(Baby Fae)라고 알려진
여자 아기에게 이식한 것이다. 당시에는 영아의 심장을 기증받는 것이
거의 불가능했기에 의료진은 개코원숭이의 심장 이식을 결정했다. 수
술 자체는 성공적이었지만 환자는 20일 후에 사망했다³³⁾.

톰 스타즐은 1990년대에 개코원숭이의 간을 성인에게 이식하는 수

술을 두 건 시도했고, 그 중 한 명은 70일 동안 생존할 수 있었다. 그러
나 이후 이종장기 이식 기술의 개발은 지지부진했다. 가장 큰 문제는
역시 면역거부반응이었다. 이종 간 이식의 경우 면역거부반응이 동종
이식의 경우보다 훨씬 더 심하게 나타나기 때문이다³⁴⁾.

이종장기 기술의 물꼬를 튼 형질전환 미니 돼지

면역거부반응을 해결하지 못해 정체됐던 이종장기 개발은 2000년
대 들어 급물살을 타게 됐다. 2002년 1월 미국 미주리 대학 랜덜 프래
서(Randall S. Prather) 박사팀과 바이오벤처 이머지 바이오세라퓨틱스
(Immerge BioTherapeutics) 사는 세계 최초로 인체에 거부반응을 일으키는 유
전자를 제거한 형질전환(transformation)^{xii} 돼지를 탄생시켰다.

이종장기 이식 시 일어나는 거부반응은 초급성 거부반응(HAR:
hyperacute rejection), 급성혈관성 거부반응(AVR: acute vascular rejection), 세포매개
성 거부반응(CMR: cell-mediated rejection)³⁵⁾ 순으로 나타난다. 최초의 형질전
환 돼지들은 이 중 초급성 거부반응을 일으키는 유전자를 제거한 것이
었다. 돼지의 장기를 사람에게 이식하면 사람이 가지고 있는 면역체계
(자연항체)가 돼지의 장기 표면에 존재하는 알파-갈락토오스(α -Gal)^{xiii}와 급
격히 반응해 이 중 초급성 거부반응을 일어난다³⁶⁾. 이식 후 초급성 거
부반응이 일어나면 이식한 장기를 못 쓰게 될 뿐 아니라 생명까지 위
험해진다. 때문에 초급성 거부반응을 해결할 수 있는 방법을 개발했다

xii. 형질전환이란, 유전자의 일부를 잘라내거나 다른 유전자 조각을 끼워 넣어 유전 형질을 변화시키는 기술을 말한다.

xiii. α -1,3-galactose

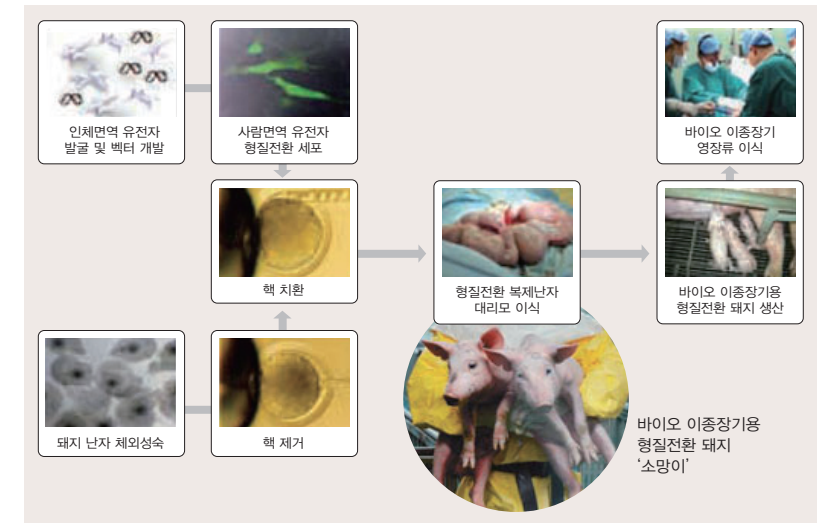
는 것은 이종장기 이식의 가장 큰 고비를 넘겼다는 것을 의미한다.

그렇다면 왜 이종장기 이식을 위한 형질전환 동물로 돼지가 선택됐을까. 초기에 많은 과학자들은 원숭이를 포함한 영장류의 장기를 이식에 이용하려고 했다. 유전적으로 가깝기 때문에 이식에 적합할 것이라 생각했기 때문이다. 그러나 대부분 영장류의 장기를 이식받은 환자는 길어야 며칠 정도 더 살 수 있었을 뿐이다. 또한 영장류의 장기 이식에는 몇 가지 문제점이 있었다. 영장류는 대부분 멸종 위기종인 데다가 한 배에 1~2마리 정도만 출산하고 성장하는 속도가 더디며 장기의 크기도 인간의 것보다 작은 경우가 대부분이다.

반면 돼지, 그 중에서도 작은 크기로 개량한 미니 돼지의 장기 크기는 인간의 장기와 비슷하다. 임신 기간도 127일로 짧고, 한 배에 다섯 마리에서 열 두 마리 정도의 새끼가 태어나 까다로운 조건 없이도 쑥쑥 잘 자란다. 사람과 유전적으로 너무 가깝지도 너무 멀지도 않으며, 인간과 오랜 시간을 같이 지낸 동물이어서 사람에게 치명적인 감염원을 보유할 가능성도 낮다. 또한 대량사육이 가능해 장기를 안정적으로 공급할 수 있다는 점도 큰 장점이다.

이종 이식 장기를 공급하기 위한 형질전환 미니 돼지의 개발은 지금도 계속되고 있다. 이 분야의 세계 최고 기술을 가진 나라는 미국으로, 2012년에는 초급성·급성 거부반응을 일으키는 유전자를 제거한 돼지를, 2014년에는 초급성·급성 혈관성 거부반응을 제어한 돼지를 개발했다. 2015년 형질전환 돼지의 신장을 원숭이에게 이식하여 5개월 동안 생존시켰고, 2016년에는 형질전환 돼지의 심장을 개코원숭이에게 이식하여 945일간 생존하는 기록을 세웠다. 최근 미국의 제약회사인

유나이티드 세라퓨틱스(United Therapeutics) 사는 연간 1,000개의 돼지 폐를 생산하기 위한 기업형 농장을 노스캐롤라이나 주에 설립하겠다고 밝혔다. 일본도 2004년부터 형질전환 돼지를 생산하기 시작했다.



핵을 제거한 돼지 난자에 인간에게 면역거부반응을 일으킬 수 있는 유전자를 제거한 돼지 체세포 핵을 주입해 수정시킨 뒤, 돼지 자궁에 이식해 키우는 방법으로 형질전환 돼지를 생산한다. (자료 : 농촌진흥청, KISTEP 재가공)

우리나라도 그 뒤를 바짝 쫓고 있다. 농촌진흥청 국립축산과학원은 2009년 초급성 거부반응을 일으키는 유전자를 제거한 형질전환 돼지 '지노'를 만들었고, 이듬해인 2010년에는 초급성·급성 거부반응을 일으키는 유전자를 제거한 '민음이'를, 2011년에는 급성혈관성 거부반응을 억제한 '소망이'를 개발했다. 2016년 7월에는 초급성과 급성혈관성, 급성 거부반응을 모두 억제한 '사랑이'를 탄생시켰다. 2018년부터는 사랑이의 체도, 각막 등을 원숭이에게 이식하는 실험에 들어가

고, 이 실험이 성공하면 사람을 대상으로 한 임상시험에 들어갈 예정이라고 밝혔다.



2011년 개발된 형질전환 돼지 소망이 1,2 (출처 : 연합뉴스)

이종장기 기술의 현주소



이종장기 국내외 기술 동향 (자료 : Nature, (주)엠플러스, KISTEP 재가공)

미국과 뉴질랜드, 중국, 일본에서는 돼지의 췌도를 사람에게 이식하는 임상시험을 실시하고 있다. 췌도(랑게르한스섬, Langerhans islet)는 췌장(이자)에 섬 모양으로 존재하는 내분비샘 세포 집단으로, 인슐린을 분비한다. 제1형 당뇨병은 췌도에서 인슐린 분비가 제대로 되지 않아 생기는 병이다. 이 경우 인슐린을 투여해 치료해야 하는데, 인슐린은 단백질이어서 입으로 복용하면 강한 산성인 위 안에서 분해되어 버린다. 이 때문에 주로 피부 아래의 지방층에 주사한다. 빈번한 주사의 고통을 참아야 하는 당뇨 환자들을 위한 새로운 대안이 바로 췌도 이식이다.

뉴질랜드의 세포치료 전문회사인 리빙 셀 테크놀로지(Living cell technologies: LCT) 사는 돼지의 췌도를 이용하여 제1형 당뇨병 세포 치료를 하기 위한 검증의 막바지 단계를 거치고 있다. 면역반응으로 췌도 세포가 파괴되는 것을 막기 위해 해조류 유래 반투막 캡슐로 감싸 인체에 이식하는 방식이다. 반투막 캡슐은 항체와 대식세포 등 인체의 면역세포가 췌도 세포를 파괴하는 것을 막아주는 동시에, 췌도 세포가 생존하고 성장하는 데 필요한 산소와 영양분은 통과시키고 생산된 인슐린은 내보내는 기능을 한다. 이식한 세포는 혈당을 인지하면 자동으로 인슐린을 분비하게 되는데, 효과는 1년 정도 지속된다. 리빙 셀 테크놀로지 사는 현재 일본의 오즈카 제약과 함께 벤처 회사를 설립하여 치료제(DIABECCELL®)의 품목 허가를 취득하고 제품화하기 위해 박차를 가하고 있다.

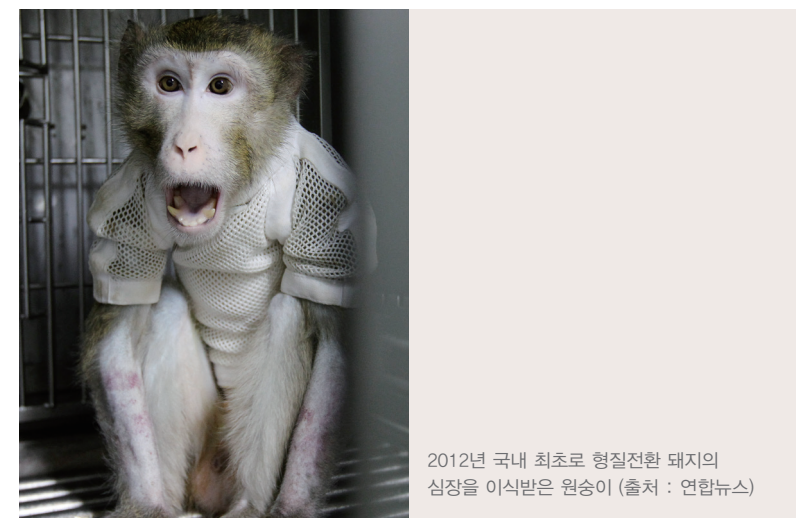


캡슐을 이용한 췌도 이식 개념도 (자료 : University of Waikato, KISTEP 재가공)

서울대학교 바이오이종장기개발사업단은 2016년 12월 돼지의 췌도를 원숭이에게 직접 이식하는 데 성공해 안정성과 효능을 입증했다³⁷⁾. 또한 캡슐을 이용하지 않고 췌도를 사람에게 직접 이식할 수 있는 WHO의 조건을 세계에서 유일하게 충족했고, 2018년 하반기에 세계 최초로 당뇨 환자 2명에게 이식 수술을 할 계획이라고 밝혔다³⁸⁾.

돼지의 각막을 원숭이에게 이식하는 실험은 상당히 좋은 결과를 보이고 있다. 세계적으로 3년까지의 생존율을 보이는 경우도 보고됐다. 우리나라에서도 각막 전체를 원숭이에게 이식하는 수술에 성공했다. 농촌진흥청과 건국대병원 연구팀은 이종 이식용 돼지 ‘민음이’의 각막을 필리핀 원숭이에게 이식시켜 약 8개월 동안 정상적으로 기능이 유지되는 것을 확인했다³⁹⁾. 이는 면역억제제 없이 안약만으로 200일 넘게 정상 기능을 유지한 국내 첫 사례이다. 중국 정부는 지난 2015년 4월부터 돼지 각막 판매를 승인하여 2016년에는 14세 소년이 돼지 각

막을 이식받았으며, 2017년에는 27세 청년이 돼지 각막을 이식받아 시력이 0.3까지 회복됐다⁴⁰⁾. 중국의 돼지 각막 이식은 면역반응을 줄이기 위해 각막 전체가 아닌 세포가 존재하지 않는 일부 조직을 대상으로 이뤄지고 있다.



2016년 농촌진흥청 국립축산과학원과 건국대병원 연구팀은 돼지 심장을 원숭이에게 이식해 국내 최장인 60일간 생존하는 기록을 세웠다. 같은 해 농촌진흥청과 서울대, 강원대 공동연구팀은 돼지의 간을 이용해 면역거부반응이 없는 이종 이식용 인공간을 제작하는 데 성공했다. 이 인공간은 형질전환 돼지 간을 이용해 지지체를 만들고, 역분화 줄기세포로 재세포화하는 방법을 활용해, 줄기세포를 이용한 맞춤형 인공간 개발에 한발 다가선 성과라고 보도됐다⁴¹⁾. 또한 2017년 서울대병원 연구팀은 돼지의 심장 외막을 이용해 토종 기술로 개발한 폐

동맥 인공심장 판막을 환자 10명에 적용한 임상시험을 성공시키기도 했다⁴²⁾.

현재 세계 각국은 이종장기 기술을 선점하기 위해 만전을 기하고 있다. 일본은 동물 유래 세포 및 장기의 인간 이식을 금지해 온 관련법을 개정해 ‘이종 이식’에 속도를 낼 방침이다. 미국 FDA도 다른 치료 방법이 없는 환자에 한해 이종장기 이식을 예외적으로 허용하고 있다. 곧 임상시험을 통해 안정성이 확보되는 대로 이종장기 이식을 확대할 태세다.

최근 국내에서도 이종장기 이식 관련 법령들이 재정비될 조짐을 보이고 있다. 2017년 12월 유전자 치료에 관한 요건을 완화하는 ‘생명윤리법’ 개정안이 국회를 통과한 데 이어 동물의 세포를 치료 목적으로 사용케 하는 ‘첨단재생의료의 지원 및 관리에 관한 법률안’도 발의된 상태다.

이종장기 기술 발전을 위해 풀어야 할 난제들

이종장기 이식의 최종 목표는 돼지의 심장, 신장과 같은 고형장기를 사람에게 거부반응 없이 통째로 이식하는 것이다. 그러나 최첨단 면역억제 기술이 모두 동원된 형질전환 돼지의 탄생에도 불구하고 간이나 폐의 이종 이식은 더디게 발전하고 있다. 항체 중심의 거부반응과 혈액 응고가 심한 장기의 특성을 극복할 수 있는 기술이 아직 개발되지 않았기 때문이다⁴³⁾.

현재 이종장기 이식 기술 개발의 또 다른 숙제는 이종 간 감염병 우려를 극복하는 것이다. 예를 들어 돼지 장기를 인체에 이식하면 돼지

들이 지니고 있는 레트로바이러스(PERV, porcine endogenous retrovirus)를 옮길지도 모른다. 이 바이러스가 돌연변이를 일으키면 침팬지로부터 퍼진 에이즈(AIDS)^{xiv}처럼 인류를 위협하는 심각한 감염병이 발생할 수 있다는 것이다. 실제로 기존의 이종 이식 사례 가운데 유인원의 장기를 이식받은 사람의 몸에서 유인원에게만 발견되는 바이러스가 검출된 적이 있다. 이 때문에 종을 뛰어넘는 감염병 확산에 대한 우려가 존재한다.

과학자들은 이 문제를 해결하는 데 유전자 가위^{xv}로 불리는 크리스퍼(CRISPR-Cas9) 기술에 희망을 걸고 있다. 2015년 하버드 의과대학 조지 처치(George church) 교수 연구팀은 유전자 편집 기술을 이용해 돼지의 세포에서 모든 PERV를 비활성화하는 데 성공했다고 발표했다⁴⁴⁾. 기존에 돼지 유전자를 편집하는 데는 한 번에 한 개씩, 수년이 걸렸지만, 크리스퍼 기술을 이용하면 여러 군데의 유전자를 한 번에 손볼 수 있어 그 기간을 1년 이내로 줄일 수 있다는 장점이 있다.

^{xiv}. 에이즈를 일으키는 인간면역결핍바이러스(HIV: Human immunodeficiency virus)는 아프리카 푸른 원숭이의 몸속에 존재할 때는 아무 문제도 일으키지 않던 유인원 면역결핍 바이러스(SIV: simian immunodeficiency virus)가 인간의 몸으로 옮겨오면서 변형을 일으킨 것으로 알려져 있다.

^{xv}. RNA와 단백질을 이용해 특정 유전자를 자르는 기술

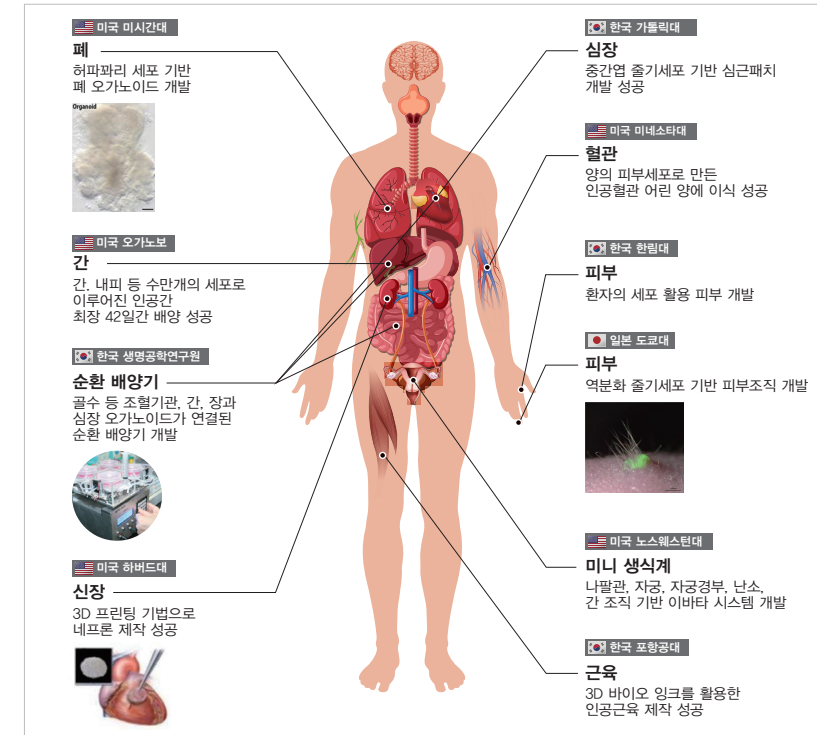
또 하나의 이중장기, 키메라 장기

2017년 1월 미국과 일본 연구진은 쥐(rat)의 몸에서 생쥐(mouse)의 췌장을 자라게 한 뒤, 그 췌도를 당뇨병에 걸린 생쥐에게 이식하는 데 성공했다. 췌장을 만들지 못하는 쥐의 배아에 생쥐의 유도만능줄기세포를 주입하는 방법을 사용했다. 이처럼 유전자를 변형시켜 어떤 동물의 몸에 다른 종(種)인 동물의 장기가 자라게 하는 것을 키메라(chimera) 장기라고 한다. 키메라 장기를 이식 받은 생쥐는 당뇨병이 완치되어 1년 이상 생존했다. 쥐와 생쥐는 언뜻 비슷해 보이지만 사람과 침팬지보다 유전적 차이가 클 정도로 전혀 다른 종이다.

이러한 연구 결과를 바탕으로 머지않아 원숭이나 돼지의 몸에서 사람의 장기를 키워 각종 질병을 근본적으로 치료하는 일도 가능할 것으로 기대된다. 한편 미국국립보건원(NIH)은 윤리 논란이 일면서 인간-돼지 키메라 연구를 금지했지만, 2016년 8월 장기 이식을 위한 연구에 한해 정부 지원을 확대하겠다고 밝혔다. 한국은 현재 다른 동물의 수정란에 인간의 줄기세포를 넣는 연구를 금지하고 있다.

○ 바이오 인공장기의 과거와 현재 – 세포 기반 인공장기

줄기세포 기술과 3D 프린팅 기술이 발전 이끌어



세포 기반 인공장기 국내외 기술 동향

세포 기반 인공장기 기술은 세포 및 생체재료를 이용하여 조직이나 장기를 개발하는 기술이다. 세포 기반 인공장기의 핵심 기술인 줄기세포와 3D 바이오 프린팅 기술 등이 최근 급속히 발전하면서 더 많은 관심을 받고 있다. 줄기세포는 이론상으로 인체의 모든 세포나 조직으로 분화할 수 있어, 이를 활용해 특정 조직이나 장기를 만들려는 연구가

세계적으로 활발히 진행되고 있다. 3D 바이오 프린팅은 인체 세포를 포함한 ‘바이오 잉크’를 삼차원 구조로 찍어내는 기술로, 다양한 인공 장기를 개발하는 데에 활용되고 있다.

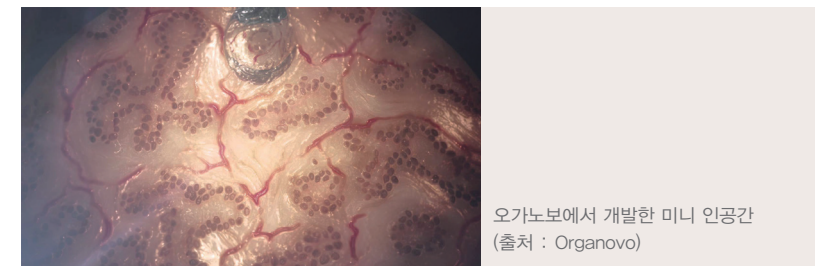
이미 생체재료와 타인 및 다른 동물의 체세포를 이용한 인공피부·뼈·혈액 등 조직 수준에서는 많은 개발이 이뤄진 상태다. 최근 줄기세포와 3D 바이오 프린팅 기술을 활용한 미니 간, 미니 폐, 미니 심장 등 오가노이드(미니 장기, 유사 장기)의 개발 성공 사례가 속속 보도되고 있다. 오가노이드는 세포 기반 인공장기의 중간단계일 뿐 아니라, 신약이나 화약품이 인체에 미치는 영향을 테스트하는 데 활용되고 있다.

세포 기반 인공장기는 궁극적으로 환자 자신의 줄기세포를 활용한 맞춤형 인공장기 형태로 발전해나갈 것으로 전망된다. 자신의 줄기세포로 만든 맞춤형 장기는 면역거부반응을 걱정할 필요가 없어 특히 각광받는 기술이다. 줄기세포를 이용하여 장기를 개발할 경우, 이론상으로는 인체의 어떤 조직이나 장기로도 만들 수 있다는 점도 장점이다. 현재의 오가노이드 수준을 넘어 장기 수준으로까지 제조하기 위해서는 앞으로 다양한 분야의 융합기술을 접목하는 노력이 필요할 것으로 보인다.

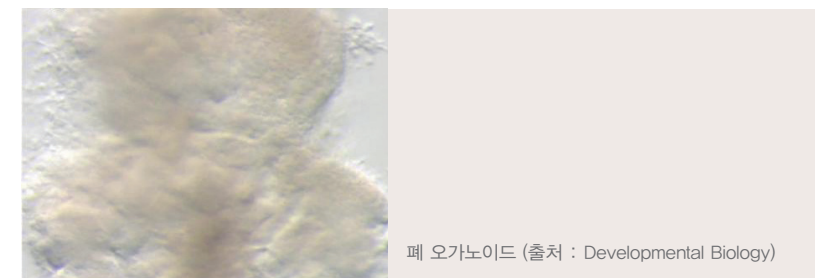
세포 기반 미니 인공장기의 등장

오가노이드 분야에서 가장 앞서나가고 있는 것은 인공간이다. 2013년 미국의 생명공학회사 오가노보(Oranovo)는 수만 개의 세포로 이뤄진 바이오 잉크와 자체 개발한 3D 프린터를 사용해 1cm가 채 안 되는 크기의 인공간 ‘ExVive™’을 제작하는 데 성공했다. 간세포와 간성상세

포, 내피세포 등으로 이뤄진 이 미니 인공간은 42일간 생명 활동을 유지했다. 이 미니 인공간은 2014년부터 신약 개발에 사용할 수 있도록 판매되고 있다⁴⁵⁾. 한편, 인도의 팬도럼 테크놀로지스는 2016년 인간의 간 생체 조직을 3D 바이오 프린터로 구현해냈다. 젤리 성분의 ‘바이오 잉크’로 원하는 모양의 지지체를 만든 다음 세포를 증식, 분화시켜 3차원적인 구조의 미니 간을 만들었다⁴⁶⁾.



미니 인공폐 개발도 한창 진행 중이다. 미시간 의과대학 등 다수의 기관이 참여한 연구팀은 2015년 3월 기증받은 폐의 줄기세포를 떼어 폐 오가노이드를 개발하고 있다고 밝혔다. 그리고 폐 세포를 100일 동안 배양해 가스 교환이 일어나는 허파파리를 생성시키는 데 성공했다고 발표했다⁴⁷⁾.



2016년 울산과학기술원과 미국 웨이크포레스트 재생의학연구소는 3D 바이오 프린팅을 이용하여 초소형 인공심장을 만드는 데 성공했다. 길이 0.25mm인 이 인공심장은 전기 자극을 주면 움직이고, 심장 박동 속도도 실제 심장과 동일하다. 연구진은 현재 미니 간 제작에도 성공했으며, 이후에는 심장 혈관과 폐도 만들 계획이라고 밝혔다. 같은 해 7월 미국 UC 버클리 연구진 등은 역분화 줄기세포를 이용해 스스로 뛰는 약 0.5mm 크기의 3차원 미니 심장을 만들었다고 발표했다⁴⁷⁾.



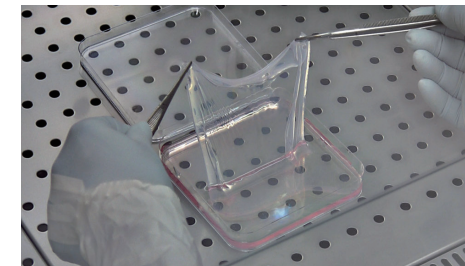
3D 바이오 프린팅한 인공심장을 보여주는 웨이크포레스트 재생의학연구소의 안토니 아탈라 교수 (Anthony Atala). 안토니 아탈라 교수 연구팀은 3D 바이오 프린팅 기술을 이용해 인공신장과 같은 인공장기 개발에 몰두하고 있다⁵⁰⁾. (출처 : Nature Biotechnology)

2013년 오스트리아 분자생명공학연구원은 성인의 피부 세포로 유도만능줄기세포를 만든 다음, 인간의 대뇌와 비슷한 신경세포 조직으로 성장시키는 데 성공했다. 그리고 이 뇌를 특별한 배양 조건에서 2개월 만에 최대 4mm로 키웠다. 완두콩보다 약간 작은 크기의 ‘미니 뇌’는 해마, 피질 등 인간의 뇌와 비슷한 구조를 갖췄고, 신경세포가 전기적 신

호까지 주고받을 만큼 기능도 유사했다⁵¹⁾. 이 밖에도 현재 갑상선, 췌장, 전립선 등 다양한 ‘미니 장기’가 개발되어 질병 연구와 약물 반응 검사 등에 활용되고 있다.

발전에 속도를 내고 있는 인공피부와 인공혈관

한림대 한강성심병원은 2015년 실제 피부처럼 진피와 표피를 가진 바이오 인공피부를 세계 최초로 개발했다. 사람의 피부는 각질층인 표피(상피 세포)와 콜라겐으로 이뤄진 진피(섬유아세포^{xvi)})로 구성되어 있는데, 현재까지 진피는 인공으로 만들 수 있지만, 표피는 환자 자신의 피부를 이식해야만 했다. 연구진은 3D 프린터로 피부 지지체를 제작하여 그 위에 배양한 상피세포와 섬유아세포를 얹어 세포들이 각자 자기 위치에 안착하도록 설계했다. 이로써 환자의 피부를 아주 적은 면적만 떼어내도 상피세포와 섬유아세포를 대량으로 배양할 수 있어 화상 등 피부 손상을 입은 환자를 안전하고 효율적으로 치료할 수 있게 됐다⁵²⁾.



줄기세포 기반 인공피부. 최근 벨기에 브뤼셀자유대학교 연구팀은 줄기세포로 인공피부를 만들어내는 데 성공했다. (출처 : Nature)

xvi. 진피 위쪽에 주로 분포되어 있으며 섬유성 결합조직의 중요한 성분을 이루는 세포로 피부를 탄력 있게 하는 콜라겐, 엘라스틴, 히알루론산 등을 합성한다.

캐나다의 토론토대학과 온타리오 주 바이오 창업·연구 지원기관인 마스 이노베이션(MaRS Innovation)은 모낭과 땀샘을 가진 이식 피부를 제작할 수 있는 3D 프린팅 기술을 개발하기도 했다⁵⁴⁾. 또, 일본 이화학연구소(RIKEN)와 도쿄대 등 공동연구진은 2016년 3월 쥐의 잇몸 세포로 만든 유도만능줄기세포^{xvii}로 모공과 피지샘이 있는 피부 조직을 개발하는데 성공했다고 밝혔다⁵⁵⁾.

이식용은 아니지만 피부 모델 마이크로칩 개발도 진행 중이다. 2017년 서울대병원에서는 1cm 크기의 실리콘 위에 인체 세포를 키워 피부 마이크로칩 개발에 성공했다. 이를 이용해 피부의 정상 상태, 염증 상태 및 약을 투여한 상태에서 각각 세포가 어떻게 결합하는지 알아볼 수 있으며, 알레르기 반응이나 자외선 손상 정도를 측정할 수 있다⁵⁶⁾.

세포 기반 인공장기 기술을 이용해 인공혈관도 만들고 있다. 1949년 쿤린(Kunlin)이 환자의 정맥을 떼어내어 동맥으로 사용한 이래, 인공혈관을 개발하고자 하는 노력은 계속되어 왔다. 현재는 폴리에스터(Dacron)와 고어텍스(Gore-Tex, 화학명으로는 폴리테트라플루오로에틸렌 expanded polytetrafluoroethylene)가 주로 쓰인다. 그러나 기존에 개발된 인공혈관은 직경이 3mm 정도로 크고, 필요한 길이나 형태로 제작할 수 없다는 한계가 있었다. 또한 인공혈관이 인체의 혈관과 연결되는 부위가 자연스럽지 않아 피가 엉기는 바람에 피떡(혈전)이 생기거나, 연결 부위가 인체의 재생 작용에 의해 지나치게 성장하는 부작용이 생기곤 한다. 인체

xvii. IPS(Induced Pluripotent Stem Cell): 체세포에 외래 유전자나 특정 단백질을 가해 줄기세포의 성질을 갖도록 유도한 세포. 배아 줄기세포처럼 모든 세포로 분화할 수 있고, 환자 자신의 세포를 이용할 수 있다. 역분화 줄기세포라고도 한다.

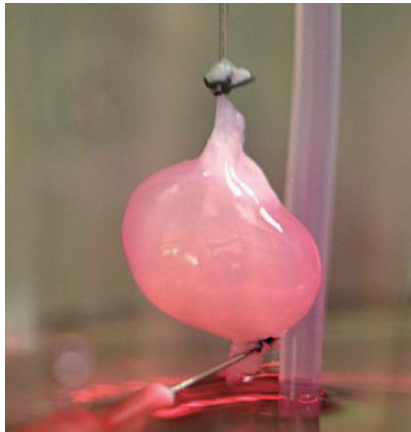
가 성장하면 그에 따라 혈관을 교체해줘야 하는 어려움도 있었다. 이를 극복하기 위해 최근 세포 및 3D 프린팅 기술을 활용한 맞춤형 혈관 개발 연구가 활발히 진행되고 있다.

미국 미네소타대학교는 2016년 9월 양의 피부 세포로 만든 특수 인공혈관을 생후 5주 된 어린 양에 이식하였고, 양이 성장해가면서 인공혈관도 함께 자라게 하는 데 성공했다⁵⁷⁾. 양의 피부 세포를 특수 튜브에 넣고, 세포 성장에 필요한 각종 영양소를 투여하여 혈관의 모양으로 세포 침착을 유도하는 방식을 사용했다.

가톨릭대 서울성모병원에서는 2017년 1월 3D 바이오 프린팅으로 죽은 심근 조직에 혈관이 생성되도록 돕는 심근 패치를 개발했다. 이 심근패치는 심장 줄기세포와 성체 줄기세포 종류인 중간엽 줄기세포를 3D 바이오 프린팅으로 이중배열하고, 내부에 혈관내피 성장인자를 넣는 방식으로 개발한 것이다⁵⁸⁾.

3D 바이오 프린터와 줄기세포로 만드는 인공신장

미국 매사추세츠 종합병원(MGH : Massachusetts General Hospital)은 2013년 살아있는 쥐(rat)의 신장을 떼어낸 후 세포를 모두 제거하고 결합조직만 남긴 후 다시 세포를 배양해 인공신장을 만들었다고 발표했다⁵⁹⁾. 이 인공신장은 생체 외(in vitro)에서 정상적으로 작동했고, 다른 쥐의 체내(in vivo)에 이식한 후에도 소변을 만드는 데 성공했다. 한편, 일본 자혜회의과대학은 2015년 9월 인체 줄기세포를 이용한 신장을 돼지와 쥐에게 이식하기도 했다.



미국 매사추세츠 종합병원에서
개발한 인공심장
(출처 : Massachusetts General Hospital)

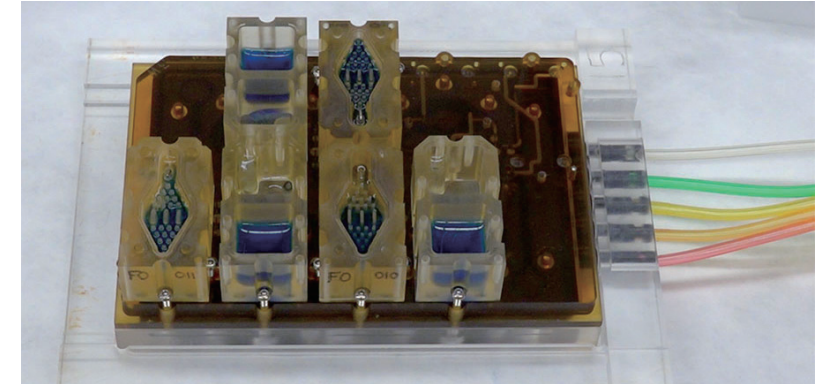
세포 기반 인공자궁의 출현

인공자궁은 배아 착상, 태아 성장, 출산까지 모든 부분을 총괄적으로 진행할 수 있는 유전학, 조직공학, 생체공학, 나노공학이 합쳐진 첨단 과학의 밀집체다. 현재 인공자궁은 동물 단계에서 연구 중이다.

미국 코넬대학교에서는 2002년 자궁 내막에서 채취한 세포로 인공자궁을 만들고, 쥐의 배아를 이식하여 다시 성인 쥐에게 이식하는 단계까지 성공했다⁶⁰⁾. 미국 노스웨스턴대학교 의대는 2017년 5월 3D 프린터로 만든 인공난소에 난포 세포(난자로 자랄 수 있는 세포)를 붙여 암컷 쥐에 이식한 뒤, 수컷 쥐와 교배를 통해 건강한 새끼를 출산했다고 발표했다⁶¹⁾.

한편, 노스웨스턴대는 2017년 3월 세계 최초로 나팔관, 자궁, 자궁경부, 난소, 간 등 살아있는 조직이 개별적으로 담긴 이바타(Evatar) 시스템도 개발했다⁶²⁾. 이바타 시스템은 인간의 월경 주기를 흉내 내는 칩 위의 미니 생식계라고 할 수 있다. 나팔관과 자궁, 자궁경부는 기증받은 인간의 조직, 난소는 생쥐의 조직, 간 조직은 인간에게서 채취된 것을

사용한 이 시스템은 각 조직의 반응을 쉽게 관찰할 수 있어 자궁질환이나 치료제 개발, 피임약 실험에 활용될 것으로 기대된다.



미국 노스웨스턴대에서 개발한 인간의 월경 주기를 흉내 내는 칩 위의 미니 생식계, 이바타
(출처 : Northwestern University)

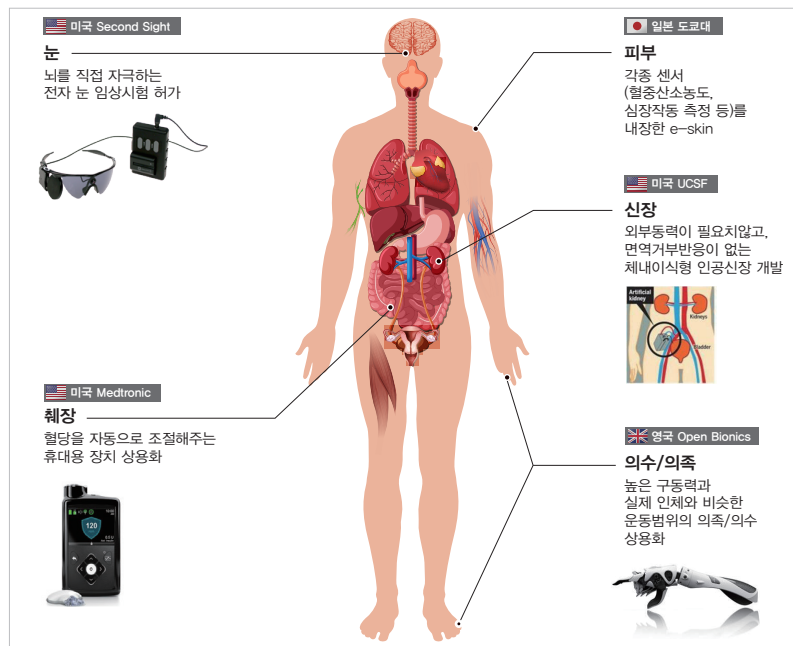
인공척수 등 다양한 세포 기반 인공장기 개발 줄이어

울산과학기술대학교(UNIST) 생명과학부는 2016년 바이오 프린팅으로 인공척수를 만드는 연구를 진행했다. 연구진은 환자의 줄기세포를 이용해 척수의 성분이 되는 신경세포와 성상세포를 맞춤형으로 만들어내는 수준에 도달했다고 밝혔다⁶³⁾. 한국산업기술대 사업단은 3D 바이오 프린팅 기술을 기반으로 체내에서 분해되는 연골 조직을 개발하는데 성공했다⁶⁴⁾. 포항공과대학교(POSTEC)에서는 2016년 11월 3D 바이오 프린팅과 골격근 조직 유래 바이오 잉크를 이용해 세계 최초로 실제와 흡사한 인공근육을 제작했다고 발표했다⁶⁵⁾. 연구팀이 개발한 인공근육은 전기 자극 반응을 받았을 때 실제 근육의 수축과 이완 운동을 비슷하게 모사할 수 있다고 한다.

○ 바이오 인공장기의 과거와 현재 – 전자기기 인공장기

체외형에서 체내 이식형으로 발전해가는 전자기기 인공장기

전자기기 인공장기는 전자 기술과 기계를 이용해 제작한 인공장기를 의미한다. 기존에는 장기 이식을 기다리는 동안 장기의 기능을 일시적으로 대체하거나 보조하는데 주로 쓰였다. 그러나 최근에는 신경신호나 근육의 움직임 등 생체정보와 상호작용하는 착용형·이식형 장치도 개발되고 있다. 앞으로 웨어러블 인공신장, 인공눈, 신경신호 기반 인공의수나 의족 등, 외부 기계에 의존하지 않고도 독립적으로 기능할 수 있는 형태의 전자기기 인공장기가 등장할 것으로 보인다.

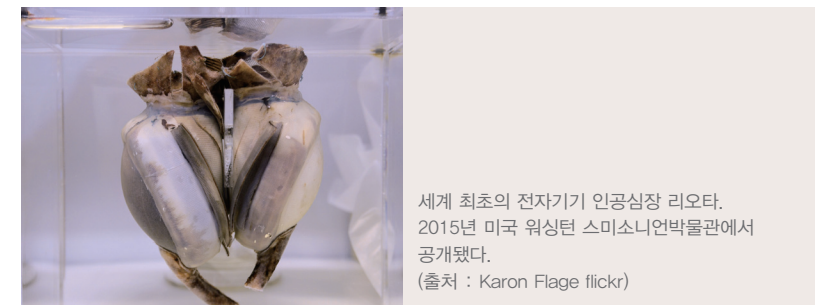


전자기기 인공장기 국내외 기술 동향

현재 상용화된 매우 초보적인 형태의 인공장기로는 환자 몸 밖에서 수 주간 가스교환을 하는 ECMO(extracorporeal membrane oxygenation), 수 시간 심장과 폐의 기능을 대신하는 CPB(cardiopulmonary bypass), TPLS(twin pulse life support), 혈액 투석기, 심실보조장치 등이 대표적이다. 이러한 기계는 인공장기가 아닌 체외보조장치로 분류된다.

갈수록 더 작고 가벼워지는 인공심장

전자기기 인공장기 중 가장 먼저 살펴볼 인공심장은 그 역사가 굉장히 길다. 1960년대 초반 미국 케네디 대통령이 인간의 달 착륙과 인공심장을 국가적 프로젝트로 추진한다고 선언하면서 개발이 본격화됐다. 그리고 1969년 미국 텍사스심장연구소의 도밍고 리오타(Domingo Liotta)와 덴튼 쿨리(Denton Cooly)는 인공심장 리오타를 개발하여 환자에게 이식했고, 리오타는 심장 기증자가 나타나기까지 3일 동안 환자의 심장 역할을 해냈다.



1982년에는 미국 유타대학교에서 설계책임자의 이름을 딴 인공심장 자르빅-7(Jarvik-7)을 개발해 환자의 심장을 떼어내고 그 자리에 성공적

으로 이식했다. 자르빅을 이식받은 환자는 112일 동안 연명했는데, 사후 부검 결과 인공심장은 정상적으로 작동했지만 감염으로 사망한 것으로 밝혀졌다. 1994년에는 자르빅과 비슷한 구조와 기능의 인공심장 하트메이트(HeartMate)가 FDA에서 인가됨으로써 상용화됐다.

그러나 이 같은 인공심장들은 병원에서 환자가 이식받을 심장을 기다리는 동안 일시적으로 생명을 이어가기 위해 사용됐다. 또, 커다란 압축공기 구동장치를 달아야 했기 때문에 환자가 일상생활을 할 수도 없었다. 이후 인공심장 개발은 심장을 제거하지 않은 상태에서 추가로 설치하여 심장 기능을 도와주는 심실 보조장치와 체내에 이식하는 인공심장으로 나뉘어 전개됐다.

인공심장의 분류	
분류	역할
보조 인공심장 (VAD : Ventricular Assist Device, 심실보조장치)	심장의 기능이 일시적 혹은 부분적으로 저하되어 회복이 가능한 경우 심장을 그대로 두고 이와 병렬로 연결해 심장의 기능을 부분적으로 대신함
완전 인공심장 (TAH : Total Artificial Heart, 완전치환형 인공심장)	전체 심장(좌우심실 모두와 좌우심방의 일부분)을 떼어내고 이식되어 그 기능을 대신함

(출처 : 식품의약품안전처)

2001년 미국 켄터키 주 루이빌대학 의료진은 7시간의 수술 끝에 ‘아비오코르(AbioCor)’라는 이름의 인공심장을 환자에게 이식하는 데 성공했다⁶⁶⁾. 아비오메드(Abiomed) 사가 제작한 무게 900g의 이 인공심장은 기존의 인공심장이 소형 냉장고 크기의 외부 기기에 연결됐던 것과는

달리 소형 배터리로 구동됐기 때문에 환자에게 이동의 자유를 주었다. 아비오코르는 2006년 FDA의 승인을 받았다.

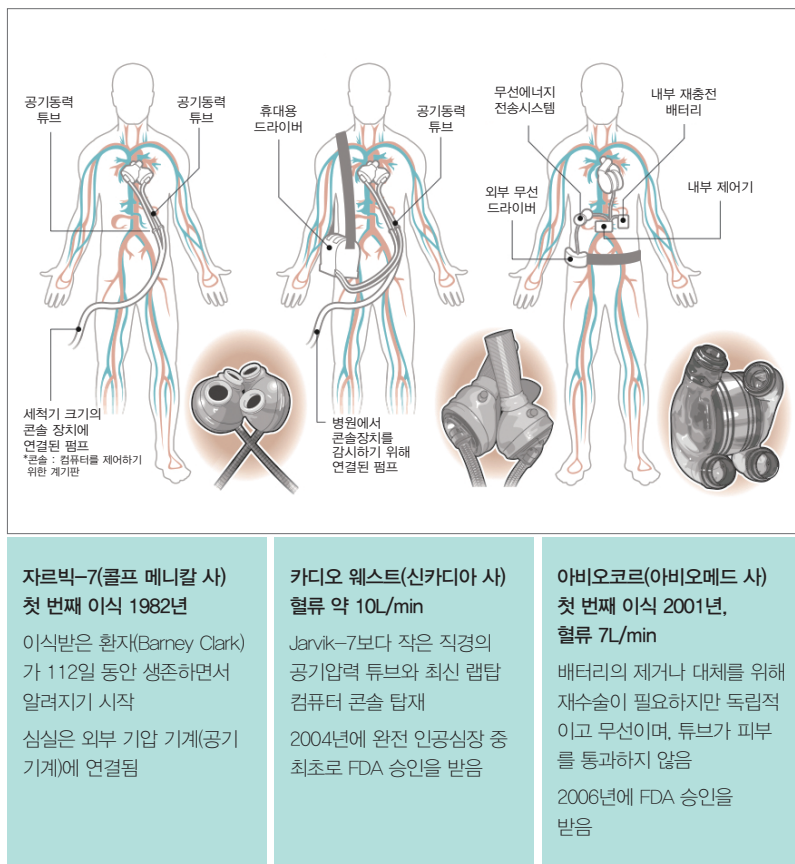


소형 배터리로 구동되는 인공심장 아비오코르
(출처 : Abiomed)

미국의 신카디아(CynCardia) 사에서도 환자의 심장을 제거하고 삽입하는 형태의 일시적 완전 인공심장(temporary total artificial heart)을 개발했다. 장기이식을 기다리는 동안 심장의 펌프 기능을 대신해 주는 생명유지 장치로 2004년 FDA의 승인을 받았다⁶⁷⁾.



심각한 선천성 심근질환으로 16세부터 투병하던 청년 스탠 라킨(Stan Larkin)은 병세가 악화되어 심장 이식만이 마지막 희망이었다. 그는 심장 기증자가 나타나기 전 555일 동안 신카디아 사의 인공심장을 이용하여 생명을 유지했다. 그가 백팩처럼 메고 있는 것은 인공심장 보조장치와 배터리다.



완전 인공심장의 변천사 (자료 : Reuters, KISTEP 재가공)

심장을 완전히 대체하는 것이 아니라 기존 심장에 부착하여 심실 기능을 보조하는 소라텍(Thoratec)사의 하트메이트3(Heartmate3)와 같은 보조 인공심장도 현재 개발되어 사용 중이다. 하트메이트3는 유럽에서 상용화된 보조 인공심장으로, 심첨부^{xviii}에 이식하여 사용한다⁶⁹⁾.

^{xviii} 심장의 뾰족한 끝부분. 심장의 꼭지점 부분

한편, 2014년 2월 미국 일리노이대학교의 어바나-샴페인 캠퍼스와 워싱턴대학교 공동연구팀은 3D 프린터로 무한동력 심장을 만들었다고 발표했다. 연구팀은 금형 막대에 컴퓨터로 스캔한 생체 조직을 덧씌워 크기 조절이 가능하고 움직임을 실시간으로 모니터링하며 조절할 수 있는 심장을 만들었다. 심장은 아직 토끼 심장 정도의 크기이며, 연구팀은 상용화를 위해서는 앞으로 10년 정도의 추가 연구 기간이 필요할 것으로 전망했다⁷⁰⁾.

새로운 희망이 될 인공췌장 · 신장과 인공눈

췌장의 인슐린 분비 이상으로 앓게 되는 당뇨병은 합병증을 일으켜 신장까지 망가뜨린다. 이처럼 당뇨 합병증으로 췌장과 신장의 기능을 잃은 환자들을 위한 전자기기 인공장기도 개발되고 있다.

현재 전자기기 인공췌장 형태로 쓰이고 있는 제품들은 대부분 몸에 착용할 수 있는 인슐린 펌프 형태로, 3일~7일마다 혈당 센서를 바꿔주고 인슐린을 충전해야 하는 한계를 가진 제품들이다. 예를 들어 미국의 의료기기회사 메드트로닉(Medtronic)이 만든 미니메드(MiniMed)는 소아 제1형 당뇨병 환자를 위한 인공췌장으로 판매 승인됐다. 하지만 약 12시간마다 인슐린 투여량을 조절하고, 1주일마다 혈당 센서를 교체해야 하며, 3일마다 인슐린을 충전해야 한다. 현재 세계 여러 나라에서는 기존보다 작고 가벼우며 정보 전송과 진단 및 치료가 동시에 이뤄지는 융복합 인공췌장을 만들고자 연구를 계속하고 있다.



신장 기능을 대체할 수 있는 전자기기 인공장기는 현재 혈액 속의 특정한 독소 물질만 제거해주는 혈액 투석기^{xix} 형태로 개발되어 사용되고 있다. 혈액 투석 방법은 1924년 독일의 조지 하스(George Haas)에 의해 처음 인간에게 시도됐고, 2차 세계대전 말인 1943년 네덜란드의 콜프(Willem Kolff)가 셀로판 막을 사용한 회전 드럼 투석기(rotating drum dialyser)를 개발함으로써 상용화됐다. 그러나 혈액 투석을 위해서는 환자가 주 12시간 이상 병원에서 보내야 하고, 투석기 연결을 위해 혈관 수술을 해야하기 때문에 미관상의 문제가 생긴다. 그래서 신장을 완전히 대체하는 체내 이식형 인공신장을 개발하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다.

미국 캘리포니아대학(UCSF)과 클리블랜드 클리닉, 오하이오 주립대학 등 미국의 10개 관련 전문가팀은 2010년부터 사상 최초의 이식용 인공신장을 개발하고 있다고 밝혔다. 2017~2018년 중 임상시험을 목표

xix. 튜브를 통해 환자의 혈액을 체외로 유도하여 투석막(셀룰로스, 폴리아미드 등) 통과해 노폐물을 제거 후 되돌려주는 체외순환 방법이 사용된다.

로 개발 중인 인공신장은 생물 반응기(bioreactor)와 실리콘 바이오 필터(biofilter)로 구성되어 있어 혈액으로부터 독성 물질을 걸러낼 뿐 아니라 신장의 대사 기능과 수분 조절 기능까지 함께 수행할 수 있다고 한다. 또한 인체의 혈압 외에는 배터리 등의 외부 동력이 필요하지 않아 면역 거부반응 없이 이식이 가능한 인공장기로 관심을 모으고 있다⁷¹⁾.

전기 자극 방식으로 볼 수 있게 해주는 인공눈에 대한 연구도 활발하다. 미국 세컨드 사이트(Second Sight) 사의 아르구스(Argus) II는 2013년 FDA 승인을 받았으며 임상시험을 실시했다. 아르구스 II는 안구와 안구 내부 망막 위에 시각 정보 수신기와 백금칩을 이식하고, 안경에 부착된 외부 카메라와 특수 휴대용 컴퓨터 기기를 연동시켜 시각 중추에 신호를 전달하는 방식이다. 완전히 시력을 상실한 환자에게 60개의 전극을 이용한 인공눈을 이식하자 시력이 일부 회복된 것을 확인했다.

국내에서는 2017년 6월 서울아산병원에서 망막색소변성 환자에게 국내 최초로 아르구스 II를 이식하여 성공한 바 있다. 아르구스 II를 이식받은 환자는 수술 한 달 만에 시력측정표의 가장 큰 글자를 읽을 정도로 시력이 회복됐다. 2017년에는 아르구스를 변형하여 시각 피질 표면에 전극을 넣는 오리온(Orion)이 FDA에서 소규모 조건부 시험 승인을 얻은 상태다⁷²⁾.



호주의 멜버른대학에서 개발 중인 바이오닉 아이(Bionic Eye)는 전극으로 눈 뒤 망막을 자극해 메시지를 뇌로 보내 빛을 인식시키는 방법을 사용한다. 초기에는 265개의 전극으로 시작했지만, 현재는 1,024개 전극으로 늘려 얼굴과 글씨 인식까지 할 수 있는 수준이다. 이 밖에도 독일의 레티나 임플란트(Retina Implant), 이스라엘의 나노 레티나(Nano-Retina), 프랑스 픽시움 비전(Pixium Vision) 등 주로 미국과 유럽을 중심으로 인공 눈 개발이 이뤄지고 있는 추세다.

우리나라 서울대학병원에서는 수술 부담을 줄인 소형 인공눈을 개발하여 토끼 등의 동물실험에 성공했다. 이 인공눈은 눈동자에 직접 자극기와 무선 수신기 같은 전자 부품을 이식해야 하는 기존 인공눈과는 달리 작은 장치를 안구 바깥쪽 옆에 붙이는 방식이어서 수술에 대한 부담이 적다는 것이 특징이다⁷³⁾.

생각만으로 자유롭게 작동하는 인공보철

국내 약 25만 명의 척수 손상 환자와 약 21만 명의 절단 환자들(2011년 기준)에게 희망적인 소식도 있다. 최첨단 전자 기술을 이용한 인공의수나 의족 같은 인공보철도 발전을 거듭하고 있는 것이다.

1940년대부터 개발이 시작된 인공의수는 현재 초기에 비해 크기나 무게, 착용감 면에서 상당 부분 개선됐다. 2010년대에 들어서부터는 로봇 기술을 이용한 인공의수·의족 기술은 물론, 감각 신경신호를 감지할 수 있는 바이오닉 림(bionic-limb) 기술로 발전하고 있다⁷⁴⁾.

2007년 영국의 터치 바이오닉스(Touch Bionics) 사는 최초의 판매용 전자공학 인공의수 아이 림(I-LIMB)을 개발했고, 최근에는 손가락 끝부분

의 압력을 측정할 수 있는 최첨단 센서가 붙어있는 아이 림 핸드(I-LIMB HAND)를 출시했다⁷⁵⁾.

2014년에는 스웨덴의 샬머스기술대학교에서 최초의 골 접합 인공의수를 개발했다. 환자의 피부에 센서를 부착하는 기존 방식 대신 티타늄 볼트를 이용해 인공의수를 환자의 남은 팔 끝(팔꿈치)에 고정하여 뼈, 신경, 근육과 직접 연결하는 방식이다. 남아 있는 팔 말단과 의수는 전선으로 연결되며, 전선은 마치 인체 신경처럼 감각에 대한 정보와 운동에 대한 정보를 상호 전달할 수 있도록 설계했다⁷⁶⁾.



루크암(LUKEArm)은 2016년 출시된 인공의수다. 루크암은 1억 2천만 원이 넘을 정도로 매우 비싸다. 사람마다 절단 부위와 팔의 굵기가 달라 맞춤형으로 만들어야 하기 때문이다. 영국 브리스톨에 있는 오픈 바이오닉스(Open Bionics) 사는 3D 프린터를 이용해, 맞춤형이지만 가격은 그리 비싸지 않은 인공의수를 개발하고 있다. 탄소섬유로 제작한 오픈 바이오닉스의 인공의수는 센서가 근육의 움직임을 감지해 의수를 제어하기 때문에 기존 보철보다 훨씬 민첩한 동작이 가능하다. 오픈 바이오닉스는 가볍고도 저렴한 의수를 보급하기 위해 의수의 3D 프린터

설계 도면을 일반인에게 공개하고 있다. 독일의 오토복(Ottobock) 사는 미군과 제휴하여 샤위나 등산, 달리기까지도 가능한 인공의족을 개발하는 중이다.

미국 케이스웨스턴리저브 대학교 연구팀은 감각신호를 느낄 수 있는 인공의수를 개발 중이며, 10년 안에 상용화할 것으로 기대하고 있다. 촉각 센서로 감각 신호를 수집하기 때문에 전기신호 형태로 뇌에 보내지 않고 손으로 만지는 것만으로 부직포인지, 샌드페이퍼인지 구분할 수 있는 인공의수다. 연구팀은 2017년 3월 사지가 마비된 사람의 머리에 전극장치를 이식해 스스로 근육을 움직여 식사를 할 수 있게 한 연구결과를 발표하기도 했다.

2017년 12월에는 미국 시카고대학교 의대 연구팀이 사고로 팔을 잃은 지 4~10년 된 붉은털원숭이 3마리에게 뇌 신경과 연결된 로봇 팔을 부착하여 의지만으로 공을 잡도록 하는 훈련을 시켰다고 발표했다. 미국 MIT는 2017년 한쪽 근육이 수축할 때 반대쪽 근육이 이완하는 움직임의 모방하여 인공의족의 정밀한 움직임을 향상시킬 수 있음을 쥐를 이용한 실험을 통해 증명했다.

인공보철에 관한 짧은 역사

현재 남아있는 최초의 인공보철은 기원전 1,000년 경 지어진 것으로 보이는 이집트 피라미드에서 발견됐다. 2000년 독일 뮌헨에 있는 루트비히-막시밀리안 대학의 안드레아스 네를리히(Andreas Nerlich) 교수 연구팀이 이집트 피라미드 묘실에서 발견한 여성 미라에는 생전에 절단된 것으로 보이는 오른 엄지발가락 자리에 나무로 깎아 만든 발가락 모형이 끼워져 있었다. 2011년 영국 맨체스터 대학 재클린 핀치(Jacqueline Finch) 교수는 엄지발가락을 사고로 잃은 실험자들에게 똑같은 형태의 나무 발가락을 착용하고 걸어보게 한 결과, 맨발로 걸었을 때보다 훨씬 자연스럽게, 힘을 덜 들고 걸을 수 있음을 알아냈다. 이로써 고대 이집트의 나무 발가락은 당시 최고의 생체공학 기술을 총동원해 설계한, 현존하는 가장 오래된 인공보철임이 증명됐다.



남아있는 가장 오래된 인공보철로 여겨지고 있는 이집트 미라의 나무 발가락 (출처 : Lancet)

한편, 이탈리아 카푸아(Capua)라는 도시에서는 기원전 3세기경의 것으로 보이는 청동과 나무로 만들어진 의족이 발견되기도 했다. 이후 16세기까지 다양한 형태의 의족에 대한 기록이 남아있다. 실제로 중세시대 유럽에는 <피터 팬>의 후크선장처럼 손목에는 갈고리를 달고 발목에는 책상다리 형태의 의족을 붙인 해적이 아주 많았다고 한다. 그러나 이러한 보철은 관절이 없기 때문에 자유롭게 구부릴 수 없어 활동에 큰 도움을 주지는 못했다. 그러다가 1500년대 중반, 앙브루아즈 파레(Ambroise Paré)^{xx}라는 프랑스의 유명 외과

xx. 중군 의사였던 그는 전장에서 부상을 입은 환자를 치료하다가 혈관을 묶어 지혈하는 '혈관 결찰법'을 고안한 의사로 유명하다.

의가 관절이 있는 의족을 발명했다. 그는 끈을 연결하여 팔꿈치 관절을 움직일 수 있는 의수도 고안했다. 32년간 전쟁터를 돌며 종군 의사 노릇을 했던 그는 전쟁에서 팔다리를 잃은 병사들을 돕고 싶었던 것이다. 앙브루아즈 파레의 발명 이후 20세기까지 의족과 의수 기술은 그리 큰 진전이 없었다. 의족은 조금 더 가볍고 튼튼한 재료로 보기 좋게 만들어졌고, 의수는 기계적인 방식으로 손가락을 움직일 수 있는 정도로 발전했을 뿐이다.

○ 우리나라 바이오 인공장기 기술의 현 위치

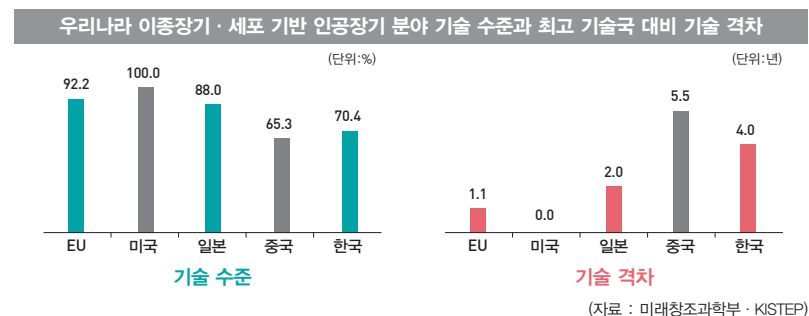
세계 속 우리나라 바이오 인공장기 기술 수준

세계가 앞 다투며 관련 기술을 개발하는 가운데 우리나라의 바이오 인공장기 기술은 현재 어느 수준까지 와 있는지 살펴보자.

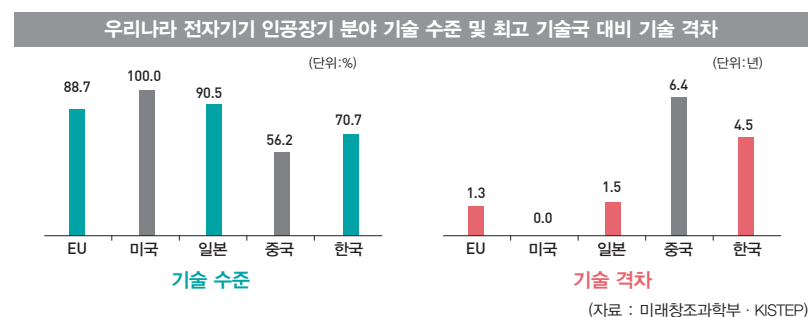
2016년 미래창조과학부와 한국과학기술평가원이 수행한 기술수준 평가에 따르면, 이종장기와 세포 기반 인공장기 기술을 선도하고 있는 나라는 미국으로 나타났다. EU, 일본, 한국, 중국 등이 그 뒤를 따르고 있으며, 우리나라의 기술 수준은 미국의 70.4% 수준으로, 기술 격차는 4.0년 정도인 것으로 조사됐다. 해당 연구에서는 “바이오 인공장기 개발 기술”이라는 기술명으로 평가가 진행되었으며, 이식 가능한 이종장기 개발 기술, 역분화 줄기세포^{xxi}를 이용한 바이오 장기 개발 기술, 세

^{xxi}유도만능 줄기세포(Induced Pluripotent Stem Cell)라고도 한다. 완전히 자란 체세포를 역분화시켜 배아줄기세포처럼 모든 세포로 분화할 수 있는 만능세포 단계로 되돌린 것이다.

포영양인자 등 생체활성물질 및 면역조절 치료제를 이용한 환자 맞춤형 조직 및 장기 복원 기술, 바이오 인공장기의 인체내 생착 유도 기술 등이 세부기술로 포함되었다.



전자기기 인공장기 분야의 최고 기술 보유국 또한 미국이다. 우리나라는 일본, EU 다음이며 중국이 그 뒤를 따르고 있다. 이 분야의 국내 기술은 미국 대비 70.7% 수준이며, 4.5년 정도의 기술 격차를 보이고 있다. 해당 연구에서는 “신체기능 복원기기 기술”이라는 기술명으로 평가가 진행되었으며, 인공감각기 개발(인공시각, 인공와우 기술), 신경망과 연결 가능한 인공의수·의족 개발 기술, 휴대할 수 있는 인공호흡기(폐) 개발 기술 등이 세부기술로 포함되었다.



국내 바이오 인공장기 관련 정부 추진 사업

우리나라는 현재 바이오 인공장기를 미래를 위한 주요 기술로 보고, 정책적으로 적극 지원하고 있다. 국내에서 바이오 인공장기 관련 정책을 추진하고 있는 주요 부처는 과학기술정보통신부, 보건복지부, 산업통상자원부, 농촌진흥청 등이 있다.

먼저 과학기술정보통신부에서는 공공복지안전연구산업, 중견연구자지원사업, 바이오·의료기술개발 사업 등의 일환으로 바이오 인공장기 기술 개발을 지원하고 있다. 이에 따라 시각장애인의 시각 기능 회복 기술, 줄기세포의 3차원적 분화 유도 및 조직 재생 기술, 생체 이식형 3세대 유연전극 나노복합소재 개발 등의 연구가 추진되고 있다.

보건복지부는 질병을 극복해 국민 건강을 증진하고, 삶의 질을 향상시키는 여러 사업을 지원하고 있다. 첨단의료기술개발사업, 질환극복 기술개발사업 등을 통해 이종장기 기술, 3D 바이오 프린팅 기술 등을 개발하고 있다.

산업통상자원부는 4차 산업혁명을 대비하는 미래 신산업 개발의 일환으로 바이오의료기기산업 핵심기술개발사업, 중소기업융복합기술 개발사업을 추진 중이며, 근골격 인공 대체 기기 기술, 인공혈관 제조 기술 등을 지원한다.

농촌진흥청에서는 바이오 인공장기 가운데서도 주로 이종장기 기술에 관련된 사업을 지원하고 있다. 동물바이오신약·장기개발사업을 진행하여 형질전환 돼지 생산 및 증식, 무균 돼지 생산 시스템 확립, 조직 및 장기 이식을 위한 면역 안전성 검증, 이종장기 영양류 이식 등을 추진하고 있다.

Chapter II

바이오 인공장기 기술 발전을 위한 다섯 분야의 과제

- 바이오 인공장기 기술과
1. 경제
 2. 사회
 3. 윤리
 4. 문화
 5. 환경

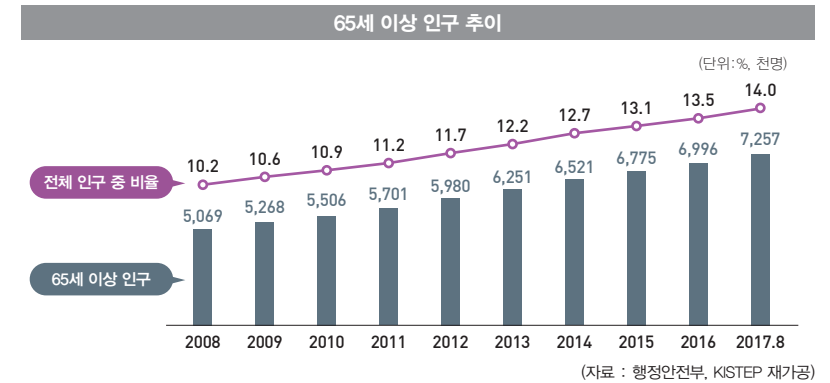
1. 바이오 인공장기 기술과 경제

○ 바이오 인공장기의 다양한 산업 활성화 효과

인구 고령화로 바이오 인공장기와 기존 산업 동반 발전

바이오 인공장기 시장은 세계적인 인구 고령화와 더불어 앞으로 급격히 성장할 것으로 전망된다. 우리나라는 2017년 8월 말 기준으로 ‘고령 사회’에 공식 진입했다. 지난 2000년 ‘고령화 사회’로 들어선 지 17년 만이다. 통계청이 2016년 미래 인구 추계를 통해 고령 사회 진입 시점으로 예견한 2018년보다 앞당겨진 것이다^{xxii,84)}.

xxii. 유엔(UN) 기준으로 한 사회의 65세 이상 인구가 전체 인구의 7%를 넘어서면 ‘고령화 사회’라고 하며 14%를 넘어서면 ‘고령 사회’라고 한다.

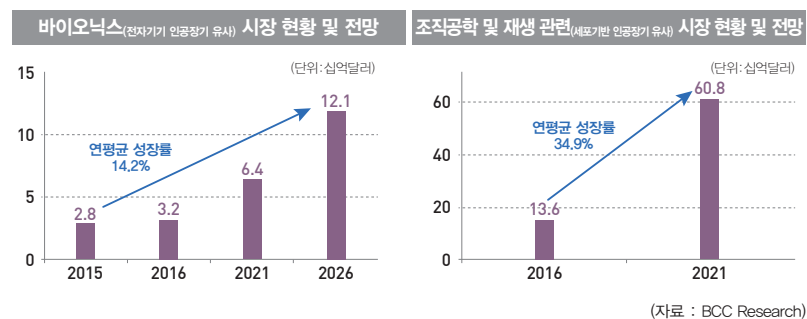


고령 인구가 늘어감에 따라 심혈관 질환, 신경 질환, 당뇨병, 골관절염 등 퇴행성 질환 및 말기 장기부전 환자의 숫자도 날이 갈수록 증가하고 있는 추세다. 장기 이식은 이러한 환자들의 마지막 희망이며, 궁극적인 치료법이라 할 수 있다.

그러나 현재 이식을 위한 장기의 공급은 매우 부족한 상황이다. 1장에서 살펴봤듯 우리나라는 물론 세계 모든 나라에서 장기의 수요와 공급 불균형이 심각하다. 우리나라에서 장기 이식을 받기 위해 기다리는 환자는 30,286명(2016년 기준)이지만, 장기 기증자는 2천여 명뿐이다. 바이오 인공장기 기술은 이렇게 안타까운 상황에 단비와 같은 존재가 될 전망이다. 수요는 점점 늘고 있지만 공급은 마음대로 늘릴 수 없는 이식 장기 수급 상황에 안정적이고도 새로운 공급처가 될 것이기 때문이다.

때문에 바이오 인공장기의 시장 전망은 밝다. 미국 시장 전망 기관 BCC 리서치(BCC research)에 따르면, 전자기기 인공장기에 포함되는 바이

오닉스^{xxiii}의 전 세계 시장은 2015년 28억 달러에서 연평균 14.2% 성장하여 2026년에는 121억 달러에 이를 것으로 전망하고 있다. 한편, 조직공학 및 재생 관련 시장(세포 기반 인공장기 포함)은 전 세계적으로 2016년 136억 달러 규모에서 2021년에는 608억 달러에 이를 것으로 예상된다. 연평균 34.9%라는 어마어마한 성장률이 기대되는 유망 산업인 것이다.



바이오 인공장기 시장의 예상 형태

기술영향평가위원회에서는 바이오 인공장기는 이종장기와 세포 기반 인공장기, 전자기기 인공장기의 세 분야가 서로 경쟁하고 또 보완해 가며 시장을 형성할 것이라고 전망했다.

먼저 바이오 인공장기의 기술들은 서로 경쟁적인 시장을 형성할 수 있다. 장기부전을 일으켜 장기 이식이 필요한 환자는 이종장기와 세포 기반 인공장기, 전자기기 인공장기 중 셋 모두가 아닌 하나를 선택하여 이식받을 것이기

때문이다. 경제 용어로 말하자면 각자가 서로 경쟁 관계에 있는 대체재가 되는 셈이다. 세 가지 기술은 현재 각 기술이 가지고 있는 약점을 성공적으로 해결하느냐 그렇지 못하느냐에 따라 앞으로 시장에서 차지하는 위치가 달라질 것으로 보인다.

예를 들어 이종장기는 감염 위험성, 면역억제제 사용, 사회적 거부감 등 상용화를 위한 숙제가 남아 있다. 이를 해결하지 못할 경우 다른 형태의 바이오 인공장기에 비해 시장이 작아질 수밖에 없다. 전자기기 인공장기는 지속적인 정비가 필요하다는 현재의 문제를 해결해야 하고, 타인의 줄기세포를 이용한 세포 기반 인공장기는 윤리적 문제를 풀어야 한다. 세 가지 기술 모두 안전성이라는 고지 또한 넘어야 한다.

세 기술이 만드는 시장이 보완 관계가 될 수도 있다. 각 기술의 장단점이 뚜렷하고 기술 발전 속도가 제각기 다르기 때문이다. 따라서 이식 대상자의 상태나 목적, 그리고 각 제품의 수준 및 기술적 한계에 따라 이식 대상 장기도 달라질 것이다. 경우에 따라 두 가지 이상의 기술을 순차적으로 사용하여 치료할 수도 있다.

예를 들어 대량생산이 비교적 쉽고 기술적 발전 속도가 빠른 전자기기 인공장기를 우선적으로 이식한 후, 기술 발전에 따라 이종장기 혹은 세포 기반 인공장기로 교체할 수 있다. 안전성과 윤리적 문제가 해결된 높은 수준의 세포 기반 인공장기나 이종장기가 개발된다면, 사용하는 동안 계속해서 정비를 해야 하는 전자기기 인공장기의 수요를 대체할 가능성이 있다.

한편, 신체 증강을 위한 이식에서는 전자기기 인공장기가 우선적으로 사용될 것이다. 예를 들어 우주 생활이나 수중 생활을 위해 강력한 폐나 심장 기능이 필요할 때는 이에 맞춰 설계된 전자기기 인공폐나 인공심장을 이식받을 수 있을 것이다. 군사적 목적을 위해 군인들이 사지의 기능을 크게 강화시키는 강력한 소재의 전자기기 인공의수나 인공의족을 이식받는 예도 생각해 볼 수 있다.

xxiii. 생물학(biology)과 전자공학(electronics)의 합성어로 전자기술을 생명체에 적용해 신체 기능을 향상시키는 기술. 생체공학(Biomedical Engineering)이라고도 한다.

다양한 관련 산업의 동반 성장 가능

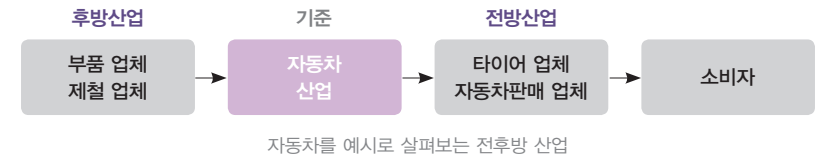
바이오 인공장기 산업의 발전은 기존의 다양한 관련 산업을 동반 성장시킬 것으로 보인다. 대표적인 예로는 재생의료^{xxiv} 산업이 있을 것이다. 현재 연구개발 중인 세포 기반 인공장기의 경우, 줄기세포 관련 기술이 핵심적으로 사용된다. 줄기세포는 인공장기뿐만 아니라 재생의료의 여러 분야에 활용되는 기술로, 현재도 노화와 심혈관, 신경, 정형외과적 치료는 물론 자가면역 질환 치료 등 다양한 목적에 사용되는 유망 기술이다. 따라서 바이오 인공장기 산업이 발달하면서 보다 정밀한 줄기세포 관련 기술이 개발된다면 재생의료 분야에서 전 세계적으로 막대한 영향력과 산업적 이익을 거둘 수 있을 것으로 보인다.

이종장기 기술의 발달도 줄기세포 관련 산업에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다. 최근 돼지 간의 세포를 없애고 틀만 지지체로 남긴 다음 인간의 줄기세포를 채워 인공간을 제작하는 등 줄기세포 기술을 활용한 새로운 형태의 이종장기가 개발되고 있기 때문이다. 이종장기 제작 기술은 기존의 유전자 치료 산업 발전에도 영향을 줄 수 있다. 형질전환 동물을 생산하는 과정에서 필수적인 유전자 편집 기술은 유전자 치료에서도 핵심기술로 활용된다. 이종장기 발전과 함께 유전자 편집 기술이 발전하면 유전자 치료 산업에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있을 것으로 보인다.

xxiv. 손상된 인체의 세포나 조직, 장기를 대체하거나 재생시켜 정상 기능을 복원하거나 새로 만들어내는 의료기술로 줄기세포 치료제, 유전자 치료제, 조직공학 등을 포함한다.

바이오 인공장기 전후방 산업의 성장

바이오 인공장기 산업의 전후방 산업 또한 활발히 성장해 나갈 것으로 예상된다. 전방산업과 후방산업은 전체 생산 흐름에서 산업의 앞과 뒤에 위치한 업종을 의미한다. 후방산업은 제품의 소재나 부품을 만드는 산업을 말하고, 전방산업은 생산된 제품의 판매와 관계된 산업이 주가 된다. 자동차 산업을 예로 들면, 제철 및 부품 산업 등을 후방산업으로 볼 수 있고, 자동차 판매 및 내비게이션 등 자동차 액세서리 산업 등이 전방산업이 된다.



바이오 인공장기 산업도 제품 라이프 사이클에 맞춰 다양한 전후방 산업을 함께 발전시켜나갈 것으로 기대된다. 예를 들어 세포나 조직을 배양하는 산업이나 생체재료^{xxv} 등 소재 생산 전문 산업이 활성화될 수 있을 것이다. 현재 개발 중인 세포 기반 인공장기는 주로 3D 바이오 프린터 등을 이용해 생체재료로 지지체를 만들고, 여기에 세포나 조직을 붙이는 형식이다. 3D 프린팅을 하기 위한 생체재료는 점도가 적당해 인쇄가 가능해야 하고, 인체에 들어가도 무해하고 안전하게 분해되는 등의 조건을 갖춰야 한다. 따라서 3D 프린팅에 보다 적합한 생체재료

xxv. 의약품 장치나 인공장기에 사용하는 재료로, 피부 외의 인체 조직과 접촉해 사용해도 안전한 물질을 말한다. 생체적합 재료라고도 한다.

개발 산업도 성장해나갈 것으로 보인다.

임상시험을 대행하는 보건의료 전문 산업^{xxvi}도 더욱 발전할 수 있을 것이다. 바이오 인공장기를 제품으로 제조하려면 안전성과 유효성을 검증하기 위한 임상시험이 반드시 필요하다. 전문성이 필요한 분야인 만큼 임상시험 일련의 업무와 관련해 기업과 병원 사이의 연계 역할을 수행하고, 임상연구를 대행하는 임상시험 전문 산업이 더욱 커나갈 수 있을 것이다.

바이오 인공장기 제작에 필요한 장비나 해당 장비의 부품 산업도 발전할 것으로 예상된다. 예를 들어 세포 기반 인공장기를 만들기 위한 세포 배양용 바이오리액터^[bioreactor]^{xxvii}와 바이오 프린터 등의 디자인 및 설계·제작 기술이 발달하면 관련된 기계 공학이나 소프트웨어 산업도 동반 성장하는 것이다. 세포 조직 배양 기술 관련해서는 세포를 기르는 배지^{xxviii}를 만드는 소재 산업도 함께 성장할 수 있다.

전자기기 인공장기 분야에서는 무엇보다 인체 안에서 안전하고 안정적으로 작동할 수 있는 미세한 기계 또는 그것을 만들 전기·전자 부품이 반드시 필요하다. 우리나라는 이미 휴대폰이나 반도체 등 경박단소^[輕薄短小]한 전자 제품 시장에서 세계적인 경쟁력을 가지고 있다. 따라서 전자기기 인공장기 산업은 우리나라 전자 산업의 새로운 수요처로 작용하며 함께 발전해 나갈 수 있을 것이다.

xxvi. CRO(Contract Research Organizations) 바이오 기업의 임상연구를 대행, 전문적으로 수행하는 기관

xxvii. 생물의 체내에서 일어나는 화학반응을 체외에서 이용하는 장비

xxviii. 미생물이나 동식물의 세포나 조직이 자라는 데 꼭 필요한 영양물질을 넣은 것

고부가가치 융합형 신산업과 의료동물 산업의 등장

바이오 인공장기 기술이 본격적으로 산업화되면 그와 관련된 분야에서 새로운 산업이 등장하고, 그에 따른 일자리 또한 만들어질 것으로 예상된다.

일단 바이오 인공장기 기술은 생명공학 기술^(BT)과 나노 기술^(NT), 정보통신 기술^(ICT) 등 다양한 과학기술과 융합할 수 있는 기술로, 이 과정에서 4차 산업을 선도할 고부가가치 신산업이 등장할 가능성이 매우 높다. 예를 들어 전자기기 인공장기의 한 분야라고 할 수 있는 인공보철 기술^{xxix}이 뇌과학 기술과 만나 뇌-기계 인터페이스 융합 산업으로 발전할 수 있을 것이다.

뇌-기계 인터페이스란 인간의 뇌 신경신호를 실시간으로 해석하고 활용해 생각만으로도 로봇이나 기계를 제어할 수 있는 기술을 말한다. 현재로서는 사지 마비 장애인의 뇌에 전극을 삽입한 후, 생각으로 로봇 팔을 움직여 음료수를 마시고 기타를 칠 수 있는 수준까지 발전했다. 앞으로 뇌의 어느 부분을 자극해야 원하는 신경신호를 발생시킬 수 있는지 정확히 파악할 수 있을 정도로 뇌과학 이론이 발달하고, 신경신호를 실시간으로 해석해 실제 신체의 일부처럼 반응할 수 있을 만큼 관련 기술이 발전한다면 본격적인 산업화도 가능할 것으로 보인다.

xxix. 문제가 생긴 운동, 감각, 인지 기능 신경을 대체할 수 있는 보조기를 말한다. 주로 절단 장애인이거나 전신마비 장애인, 파킨슨 등 퇴행성 신경질환 환자들이 활동을 도와주는 의족이나 의수 등의 보철을 가리킨다.



터치바이오닉 사의 인공의수를 착용한 한 여성이 2016년 10월 스위스 취리히에서 열린 제1회 '사이베슬론' 대회에 참가하여 의수를 이용하여 휴대폰을 조작하는 경기에 임하고 있다. (출처 : 연합뉴스)

전자기기 인공장기 기술과 생물학 및 의학, 전자공학 등 다양한 분야의 기술이 융합할 때 창출될 수 있는 신산업도 있다. 생체 적합성이 뛰어난 전극(생체 전극) 및 뇌 신호를 전기 자극으로 바꾸어 신경을 자극하는 장치(신경 자극기) 등 신경 보철 부품 산업이 그것이다.

바이오 인공장기 산업의 성장 과정에서 나타날 수 있는 또 다른 신산업으로는 의료용 동물 생산 산업도 있다. 이종장기 생산을 위한 의료용 동물 시장^{xxx}은 생쥐 등 기존의 실험용 동물 시장과는 완전히 별개로 형성될 것으로 보인다. 인간의 몸에 직접 적용해야 하는 의료용 동물은 실험용 동물보다 더욱 엄격하게 관리하고 규제해야 하기 때문이다. 현재 국내 실험용 동물 시장은 약 600억 원 규모⁸⁵⁾이며(실험동물 사육기 자체나 건축 관련 시장은 제외), 세계 시장 규모는 2018년 약 18억 달러에 이를 것으로 추정된다⁸⁶⁾. 이종장기를 위한 의료용 동물은 이보다 부가가치가 훨씬 높은 시장을 형성할 것으로 전망된다.

xxx. 실험동물 산업은 연구용 실험동물(당뇨병 생쥐, 암 생쥐처럼 질환 모델 동물)을 생산하는 산업과 이와 관련된 소모품을 생산하고 공급하는 산업을 포함한다.



서울대학교 specific pathogen free(SPF)^{xxx} 미니어저 돼지 - 바이오 인공장기 기술은 기존의 실험동물 시장을 넘어서 의료용 동물 시장이라는 새로운 시장을 창출할 것으로 예상된다. (출처 : 서울대학교)

산업 전 단계에 걸친 신규 서비스 산업 출현

제작부터 이식·사후 관리까지, 바이오 인공장기 산업 전 단계에 걸쳐 필요한 다양한 서비스 산업도 새롭게 생겨날 것으로 예상된다. 맞춤형 바이오 인공장기의 기획 및 설계 전문 업체, 유통·판매 전문 업체, 성능 및 유효성 평가·인증·검증 기관, 장기 이식 사후 관리를 전문으로 맡아서 하는 기업 등이 등장할 수 있다.

이를테면 이종장기나 세포 기반 인공장기의 안전한 운송을 위해서는 항온, 항습, 저충격, 바이오리액터 연결 등 까다롭고 특수한 조건을 갖춘 장비나 차량이 필요하다. 뿐만 아니라 배송 중 발생할 수 있는 사고나 이상 증상에 대처할 수 있는 전문 지식과 기술을 갖춘 전문 인력도 필요할 것이다. 때문에 보다 효율적이고 안전한 배송을 위한 새로운 유통 시스템이 탄생할 것으로 보인다.

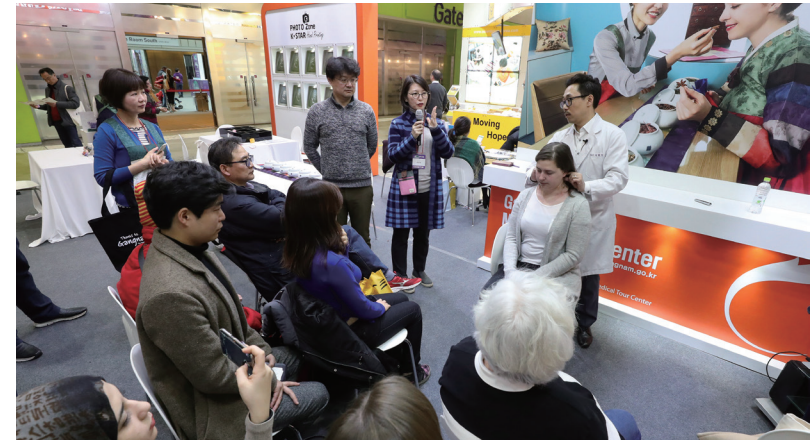
이식하는 과정과 관련된 여러 서비스업도 생겨날 수 있다. 예를 들면 '바이오 인공장기 이식 컨설팅 산업'과 같은 것이다. 사람마다 신

xxx. 특정한 병원성 미생물을 보유하지 않은 상태

체 조건이 다르고, 장기의 상태가 달라 자신에게 꼭 맞는 바이오 인공장기를 기획하고 설계할 전문가가 필요할 것이기 때문이다. 컨설팅을 통해 인공피부를 이식한다면 피부의 색이나 상태를 환자의 기호에 맞춰 제작할 수 있고, 유당불내증이나 알코올 해독 능력 부족 등 유전적인 약점을 가졌다면 그 부분을 보완한 인공장기를 디자인하고 생산할 수 있을 것이다.

병원에서 바이오 인공장기를 생산하고 이식도 하는 ‘원스톱 의료 서비스’의 등장도 예견된다. 정부가 정한 일정한 기준을 만족하는 시설과 의료 인력을 보유한다면 환자가 발생했을 때 병원에서 직접 필요한 바이오 인공장기를 만들어 바로 이식하고, 사후 관리까지 할 수 있게 하는 것이다.

새로운 형태의 ‘의료관광’도 출현할 수 있다. 현재 많은 관광객들이 성형외과 등 뛰어난 의료 서비스를 받기 위해 우리나라를 찾고 있다. 유명 성형외과가 밀집한 서울 강남구에는 성형외과 시술을 위해 매년 더 많은 수의 외국인 환자가 방문하고 있다고 한다. 한국보건산업진흥원 자료에 따르면 2016년 한 해 동안 외국인 환자 7만 6,385명이 강남을 방문했다. 이처럼 바이오 인공장기 이식 분야에서도 이식 사례가 늘고 우리나라 의료진들이 이 분야에서 세계적인 인정을 받게 된다면, 바이오 인공장기를 이식받기 위해 우리나라를 찾거나 우리나라 의료진을 찾는 환자가 늘 것이다. 이들을 위한 통역 등 서비스업 또한 생겨나고 발전할 가능성도 있다.



2017년 12월, 서울 강남구 코엑스에서 주한 외국인 박람회를 찾은 외국인 관광객들이 강남구보건소 부스에서 의료 서비스를 체험하고 있다. (출처 : 연합뉴스)

산업의 성장에 따른 일자리 변화

산업이 발달하면 당연히 그 산업에 종사하는 사람들이 많이 필요하고 일자리가 늘어나게 된다. 예를 들자면 바이오 인공장기 산업이 발달하면 이식외과 의사와 전문 간호사의 수요가 늘어날 것이다. 뿐만 아니라 의료 코디네이터, 외국인 환자를 위한 통역 인력 등 지원 서비스 관련 고용 효과도 클 것으로 예상된다^{xxxii}. 한국보건산업진흥원에 따르면, 의료서비스 취업유발 계수는 14.7명으로 자동차 8.8명, 반도체 3.2명을 크게 앞선다. 전후방 산업 및 파생 산업 등 관련 산업이 새로 생기거나 커지는 데 따른 일자리 창출 효과도 클 것이다.

한 가지 주목할 만한 점은 새롭게 생겨날 것으로 예상되는 일자리가 부가가치가 높은 고급 일자리일 것이라는 점이다. 특히 맞춤형 세포 기반 인공장기의 경우, 세포나 조직 등을 다루는 기술의 특성상, 기계에 의한 자동화된

xxxii. 보건 및 사회복지서비스 분야의 고용유발계수는 16.7로 전산업 평균(8.7) 대비 매우 높은 편이다. (통계청, 2014년 기준)

대량생산보다는 섬세한 수작업을 해내는 전문 기술 인력이 많이 필요할 것으로 보인다.

한편, 일자리가 줄어드는 분야도 생겨날 수 있다. 장기부전 환자나 신경계·근골격계 질환자들이 바이오 인공장기 이식으로 건강을 되찾는다면, 환자를 돌보는 일을 했던 간병인 같은 직종의 수요가 점차 줄어 것이다. 혈액 투석처럼 장기 이식을 받지 못하는 환자들이 이용했던 보조적 의료 서비스와 관련된 일자리도 줄어들 수 있다.

기존 치료 기기 및 치료제 산업의 재편

바이오 인공장기 기술의 발달은 기존 장기 치료기기 및 치료제 시장에도 영향을 미칠 수 있다. 현재 장기 이식은 약물 등으로 더 이상 치료가 어려울 경우 마지막으로 선택하는 치료법이다. 따라서 당장은 치료제나 치료기기 시장에 주는 영향이 적을 수 있다. 그러나 바이오 인공장기 기술이 고도로 발달하고 이식 비용이 충분히 낮아진다면 이야기가 달라진다. 장기에 문제가 생겼을 때 ‘약물을 이용해 치료할 것인가’, ‘바이오 인공장기를 이식받을 것인가’ 선택하는 시대가 오는 것이다. 이렇게 되면 같은 치료 목적을 갖는 약물 및 의료 기기 시장은 타격을 받을 수도 있다. 예를 들어 바이오 인공신장 이식이 일반화되면 투석 치료와 관련된 기기, 치료제 시장은 축소될지도 모른다.

장기 손상을 입은 환자들이 약물치료를 소홀히 해 치료제 시장에 부정적인 영향을 끼칠 수도 있다. 즉, ‘장기가 손상되면 치료하는 것보다 교체하는 것이 낫다’고 생각하는 이들이 많아지면서 소극적으로 치료할 가능성도 있는 것이다.

단, 바이오 인공장기 이식과 관련된 일부 치료제는 수요가 늘어나면서 더욱 큰 시장을 형성할 것이다. 예를 들자면 이종장기 이식이 보편화되면 면역 거부반응을 줄이기 위해 필요한 면역억제제 시장이 확대될 수 있다.

이런 의견도 있어요!

기존 의료 시스템 안에서의 점진적인 변화가 일어날 것

“바이오 인공장기 기술은 관련된 모든 기술이 한꺼번에 개발되는 것이 아니라, 기술의 난이도에 따라 순차적으로 발달될 것으로 예상됩니다. 단일 세포나 세포군부터 시작해 개발이 쉬운 조직·장기인 피부나 방광, 개발이 어려운 간이나 췌장 등의 순서로 개발될 것입니다. 따라서 그로 인한 경제적인 변화는 서서히 이뤄질 것으로 생각됩니다. 예를 들어 기존 직업군이 갑자기 사라지거나 새 직업군이 별안간 나타나는 등 단기간의 충격적인 변화보다는 기존 의료 시스템 안에서의 점진적인 변화가 일어나는 것이죠.”

고령층 경제 활동 증가로 일자리 경쟁 치열해질 수도

“고령층이 바이오 인공장기 이식을 적극 활용해 건강을 되찾게 되면 숙련된 기술과 업무 노하우를 경쟁력으로 하여 경제 활동을 계속할 수 있을 것입니다. 이로 인해 한정된 일자리를 두고 청년층과 경쟁을 벌일 수도 있고요. 장기 이식이 반드시 노동력을 회복시키지는 않겠지만, 시력이나 청력, 근력 등 특정 기능의 저하로 인한 업무 중단 사례는 줄어들 것입니다. 이로 인해 노동 가능 고령층이 증가해 청년층과의 일자리 경쟁을 벌이게 되면 세대 간 갈등이 일어나지 않을까 우려됩니다. 단, 일자리는 저출산으로 인한 전반적인 인구 감소, 로봇이나 인공지능에 의한 대체 등 다양한 요인에 영향을 받을 것이므로 바이오 인공장기에 의한 영향이라고 말하기엔 어려움이 있는 것 같습니다.”

.....

생산성 증가에 이바지할 것

“바이오 인공장기를 이식받아 빠른 시간 안에 건강을 되찾을 수 있다면, 환자 본인은 물론 간병을 하는 보호자의 노동력 또한 신속히 회복될 것입니다. 예를 들어 신장 이식을 기다리는 환자는 신장 공여자가 나타날 때까지 정기적으로 병원을 찾아 신장 투석을 받아야 합니다. 이 경우 환자는 일주일에 2~3번, 한 번에 4시간 이상 꼼짝없이 누워서 치료를 받아야 합니다. 이 환자가 바이오 인공신장을 이식받아 건강을 회복하면 신장 투석으로 병원에서 치료를 받는 시간과 비용을 아낄 수 있을 뿐 아니라, 간병이나 돌봄 노동이 더 이상 필요치 않을 것입니다. 또한 기능이 강화된 바이오 인공장기를 이용하여 더욱 효율적으로 일을 하는 상황도 생각해볼 수 있습니다. 예를 들자면 스마트 안구 혹은 스마트 치아(치아의 대체품으로 말을 입안에서 즉시 인식) 등이 개발돼 실시간으로 검색 기능을 활용하는 등 업무를 더욱 효율적으로 처리하는 데에도 활용될 수 있을 것 같습니다.”

.....

의료 인력의 쏠림현상이 나타나지 않을까...

“바이오 인공장기가 손상된 신체의 궁극적인 치료법으로 인정받고 산업적으로도 크게 성장한다면, 투자나 의료 인력의 쏠림현상이 나타나지 않을까 우려됩니다. 아름다움에 대한 관심이 높아지면서 많은 의료 인력이 성형외과, 피부과 등으로 몰려 외과 등 다른 분야에는 상대적으로 인력이 부족해진 현재 상황을 떠올려 보십시오. 따라서 바이오 인공장치 이외의 의료·바이오 산업의 균형적 성장을 위한 정부 차원의 지원이 반드시 필요하다고 생각합니다.”

.....

만성질환 치료제 시장이 위축되지는 않을 것

“바이오 인공장치 이식 기술이 확산되더라도 그 외 의료 산업은 위축되지는 않을 것 같습니다. 첫째, 신약 개발 산업의 경우 가장 큰 시장은 만성질환의 치료

약 시장입니다. 만성질환 중 암이나 고혈압의 경우 단일 원인이 아닌 복합 요인에 의해 발병되며, 한 가지 장기만을 대체해서는 치료할 수 없습니다. 둘째, 바이오 인공장치 이식으로 수명이 연장되면 오히려 연장된 사람들의 만성질환 발병 가능성이 높아지고, 그에 대한 진료 및 처방은 더 활발해질 것입니다. 또한 바이오 인공장치 이식 후에도 진료나 검진, 면역억제제 등을 복용해야 하므로 관련 산업이 위축될 가능성은 적다고 생각합니다.”

.....

이식 비용 저축으로 경제 침체 우려

“긴 수명에 대한 소망은 빈부를 가리지 않고 모든 계층에게 간절합니다. 기술 초기의 높은 이식 비용을 감당하기 위해 사람들이 저축을 지나치게 한다면 경제가 침체되지 않을까요. 이에 대비해 정부는 기술에 대해 과도한 기대를 하지 않도록 홍보하고, 기술 가격이 지나치게 높아지지 않도록 노력해야 할 것 입니다.”

다국적 기업의 시장 독점과 횡포 우려

바이오 인공장치 사업에는 오랜 기간 많은 자본 투자가 필요하다. 특히 사람에게 임상시험을 시작하기 전, 영장류 등에 대한 비임상시험(동물실험)을 거칠 때 막대한 비용이 든다.

또한 의료 분야의 특성상 제조 시설의 GMP(Good Manufacturing Practice)^{xxxiii}와 유통 기준이 엄격하게 정해질 가능성이 높고, 사고 방지를 위한 안전 기준 및 보상 기준 또한 높아질 전망이다. 때문에 제품의 생산·관

xxxiii. 식품·의약품의 안정성과 유효성을 품질면에서 보증하는 기본조건으로서의 우수식품·의약품의 제조·관리의 기준

리 비용을 낮추지 못하거나 시장 진입의 주도권을 놓칠 경우, 자본력이 풍부한 소수 다국적 기업이 시장을 독점할 가능성이 있다.

제품 생산 비용이 높아 자본력과 기술력을 가진 글로벌 다국적 기업을 중심으로 시장이 형성된다면, 상대적으로 자본력과 기술력이 부족한 국내 중소기업이 시장에 진입하기 어려울 수도 있다. 예를 들자면, 세포 기반 인공장기 산업의 경우 마스터 세포 은행(Master cell bank)^{xxxiv}을 보유한 다국적 기업이 기성품 형태의 세포 기반 인공장기를 비교적 쉽게, 저렴한 비용으로 생산해 시장을 선점할 가능성이 있다. 이처럼 다국적 대기업이 시장 선점 후 규모의 경제를 이용해 낮은 가격으로 제품을 생산·판매한다면 다른 후발 주자의 시장 진입이 어려워질 수 있다. 우리나라 의료기기 업체들이 대부분 중소기업이나 벤처기업인 현실을 볼 때 특히 우려되는 부분이다.

바이오 인공장기는 다양한 기술의 융합이 필요하고, 핵심 특허 및 신기술 의존도가 높은 기술이기도 하다. 미국, 일본, 유럽, 중국, 한국의 바이오 인공장기 관련 유효특허^{xxxv} 건수를 분석한 결과, 우리나라는 미국과 일본에 이어 유럽과 함께 3위를 차지했다. 전문가들은 바이오 인공장기는 아직 뚜렷한 선두주자가 없는 상황이어서 우리나라가 연구개발에 조금 더 속도를 낸다면 경쟁에서 충분히 승산이 있다고 말한

xxxiv. 오염되지 않은 순수한 단일개체로부터 유래되어 동질성이 입증되고 특성이 충분히 정의된 각종 세포의 집단을 안전하게 극저온에서 보관하고 있는 시설

xxxv. 한국과학기술기획평가원은 도출된 키워드 및 검색식을 적용하여 얻은 로데이터(Raw Data)에서 특허기술동향조사의 대상이 되는 바이오 인공장기 기술과 무관한 내용의 특허는 분석에서 제외하고자 노이즈제거 기준을 연구자와의 논의를 거쳐 작성했으며, 이를 기준으로 각 기술별 유효특허를 추출했다.

다. 반대로 연구개발이 지체되어 특허 경쟁에서 뒤처진다면 글로벌 다국적 기업들의 특허 선점으로 시장 진입에 어려움을 겪을 수도 있다. 일단 시장에 진입한 다국적 기업들이 이미 가지고 있는 특허기술을 통해 장기간 시장 독점을 유지할 가능성이 있기 때문이다.

국가별 바이오 인공장기 기술 유효특허 점유 현황(1996년~2017년)						
대분류	중분류	유효특허 건수				
		한국 (KIPO)	미국 (USPTO)	일본 (JPO)	중국 (SIPO)	유럽 (EPO)
바이오 인공장기 기술	이종장기 기술	47	79	41	31	50
	세포 기반 인공장기 기술	39	89	48	43	38
	전자기기 인공장기 기술	24	45	51	17	22
	총 계	110	213	140	91	110

(자료 : KISTEP)

다국적 기업이 바이오 인공장기 산업을 플랫폼 산업으로 발전시킬 경우, 독점은 더욱 공고해질 것이다. 여기에는 참고할 만한 예가 있다. 한 다국적 제약회사는 환자 맞춤형 면역 치료제를 개발한 후, 치료제를 사용해야 하는 치료 전 과정을 패키지로 상품화했다. 즉, 입원에서 혈액 채취, 가공, 운송,약품 제조, 치료라는 일련의 과정을 자사의 프로그램으로 만들어 판매한 것이다.

문제는 독점적 지위를 가진 외국 다국적 기업이 어떤 가격 정책과 공급 전략을 쓰는가에 따라 시장이 크게 출렁일 뿐 아니라, 우리 국민의 건강이 위협받을 수 있다는 점이다. 참고로, 지난 2011년 신종플루가 국내에 크게 퍼질 때 독감 백신을 제조하는 해외 제약사가 공급을 충분히 하지 않아 큰 곤란을 겪기도 했다⁸⁹⁾.

기술 선점을 한 나라가 다른 나라를 기술적으로 통제할 가능성도 무시할 수 없다. 한 마디로 ‘기술의 무기화’가 일어날 수 있는 것이다. 일례로, 현재 전 세계적으로 활발히 사용되고 있는 미국의 한 수술용 로봇은 구입을 했어도 일정 횟수를 사용하면 더 이상 사용할 수 없도록 잠금 상태가 된다. 수술용 로봇을 반드시 사용해야 하는 입장으로서 큰 압박이 될 수 있다. 또, 미국의 한 형질전환 동물 생산 회사는 형질전환 동물의 국제 표준을 만들고자 시도하고 있다. 만약 이것이 실현된다면 전 세계 어느 국가나 이종장기를 개발하려면 반드시 그 회사의 형질전환 동물을 구입해야 하는 일이 생길지도 모른다.

이런 의견도 있어요!

특허 출원 관련 관행 고쳐나가야

“바이오 인공장기 산업의 진입 장벽을 낮추기 위해서는 우수 바이오 인공장기 기술에 대한 독점권(특허권)을 부여하는 방법도 고려해 봐야 할 것 같습니다. 장기간 연구개발에 대한 보상을 확보해줌으로써 R&D 동기를 부여해 주는 것이죠.

또한 현행 국내법상으로는 질병의 진단 방법을 제외하고는 모두 특허등록이 가능하지만, 치료나 수술 방법 등과 관련된 부분은 산업상 이용 가능성이 없다는 이유로 특허등록을 허가하지 않는 편입니다. 의료행위의 공공성을 해치지 않는 선에서 이러한 관행을 고쳐나가는 것이 필요해 보입니다.”

◦ 첨단 기술 융합체로서 연구개발에 미치는 영향

생명 · 의료 분야 교육 & 연구 효율화 기대

바이오 인공장기 기술은 실제 장기의 형태와 기능을 모사할 수 있어 생명 · 의료 교육과 기초 및 응용 연구의 질을 크게 향상시킬 것으로 기대된다. 예를 들어 3D 바이오 프린팅을 활용해 형태적으로나 기능적으로 실제와 꼭 닮은 장기를 만들어 의과대학 학생들의 해부학 실습이나 환자의 수술 계획 및 연습에 활용할 수 있을 것이다. 또한 바이오 인공장기 기술로 질병 모델^{xxxvi}을 만들면 실험용 세포나 실험동물을 이용했을 때보다 효과적일 것으로 예상된다. 장기의 특성이나 질병에 대한 보다 실질적인 데이터를 확보할 수 있어 생물학적 이해도 증진에도 크게 기여할 것이다.

세포 기반 인공장기 기술에서 파생돼 개발 중인 오가노이드는 인간의 실제 장기와 매우 흡사한 생리 작용을 흉내낼 수 있는 ‘미니 장기’이다. 오가노이드를 신약이나 화장품의 효능과 안전성 검증에 활용하면 기존의 생체 실험을 대체할 수 있어 최근 많은 관심을 받고 있다. 현재 신약의 효능과 안전성 검사를 위해서는 생쥐 등 동물을 이용한 실험을 거치는데, 여기에는 실험동물의 고통과 희생이 요구돼 동물보호 차원에서 윤리적 논란이 발생한다. 또 아무리 사람과 비슷한 동물을 대상으로 실험하더라도 인간에게 적용했을 때와 다른 결과를 얻는 경우가 많다는 문제점도 가지고 있다. 신약 혹은 화장품을 개발하기 위해

xxxvi. 특정 질환을 연구하기 위해 실험용 동물이나 세포, 조직 등에 그 질환이 나타나도록 만든 것

다양한 후보 물질을 걸러내는 스크리닝 과정에 오가노이드를 활용한다면, 윤리적 문제를 감소시킴과 동시에 소요되는 시간과 비용을 대폭 단축할 수 있을 것으로 기대된다.



2013년 3월 한국동물보호연합 회원들이 서울 시내에서 화장품 동물실험 중단 촉구 퍼포먼스를 하고 있다. (출처 : 연합뉴스)

이런 의견도 있어요!

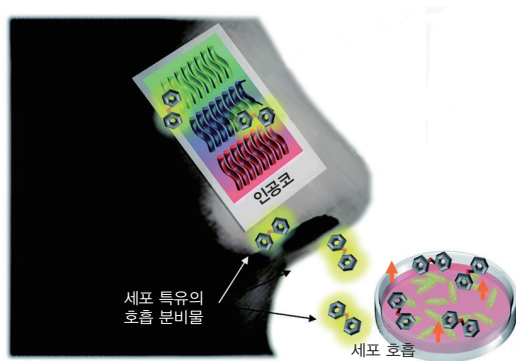
인공신체 해부 실습의 대체

“ 의과대학에서 진행하는 해부 실습은 죽기 전 기증에 동의한 이의 신체로 이뤄 집니다. 하지만 국내에서는 그 수가 부족해 외국에서 구매하는 실정입니다. 바이오 인공장기는 각종 수술 사례와 장기 이식 전후에 발생한 질병 사례를 직접 관찰하는 기회를 제공할 수 있을 것입니다. ”

융합연구 활성화로 연구개발의 패러다임 전환

바이오 인공장기 기술은 대표적인 융합기술이기 때문에 기술 개발 과정에서 다양한 분야의 전문 인력의 교류와 협력이 필수적이다. 여러 기술이 상호보완적으로 융합됨에 따라 과학기술 연구개발에 새로운 패러다임이 등장할 수 있을 것으로 기대된다.

융합된 기술은 이종장기나 줄기세포, 3D 프린팅 등 바이오 인공장기 개발 연구에서 뿐만 아니라 세포 및 조직 배양 시설과 같은 생산·공정 산업에까지 골고루 확산되어 응용될 수 있을 것이다. 또한 바이오 인공장기의 개발 과정에서 얻은 세부 기술은 센서나 로봇 등 타 기술 분야의 요소 기술에도 활용될 수 있을 것이다. 예를 들어 인공눈이나 귀, 코 등의 장기를 개발하는 과정에서 얻게 된 시각이나 청각, 촉각, 미각 등의 감각 기관 모사 기술은 특정한 화학약품이나 특정 신호를 검출하는 센서를 개발하는 데 쓰일 수 있다. 예를 들어 지난 2017년 3월 부산 대학교에서는 세포가 호흡할 때 나오는 물질을 분석할 수 있는 인공코를 개발했고, 이를 이용해 식품 원산지나 환경 호르몬 등을 검출할 수 있는 가능성을 열었다⁹⁰⁾.



부산대 연구진이 개발한 인공코 개념도. 부산대 공동연구팀은 2017년 3월 특이한 향을 가진 방향족 물질들을 분별·감지할 수 있는 새로운 개념의 인공코 개발에 성공했다. 인공코는 식품 원산지 판별, 환경 호르몬 감지, 암세포 감지 등 여러 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다⁽⁹¹⁾.
(출처 : Chemical Science, KISTEP 재가공)

바이오 인공장기 개발은 액추에이터 기술^{xxxvii}을 발전시켜, 로봇 기술 개발과 영향을 주고받으며 계속해서 업그레이드될 수 있을 것이다. 한 예로 최근에는 별도의 동력을 사용하지 않고 사람이 걸을 때의 다리 근육이나 힘줄의 움직임을 모방해 걷기, 달리기 등의 동작에 필요한 에너지를 줄여주는 외골격 로봇이 전 세계적으로 활발히 개발되고 있다. 외골격 로봇은 병사들의 피로도를 줄이기 위한 장치로 먼저 개발됐으나, 최근에는 의료용으로 활용하기 위한 시도가 이뤄지고 있다. 실제로 이스라엘의 리워크 로보틱스(Rewalk Robotics) 사는 하지 마비 환자의 보행을 도와주는 동력식 외골격 시스템 ‘리워크(Rewalk)’를 개발해 판매하고 있다⁽⁹²⁾.

xxxvii. 액추에이터는 동력을 이용해 기계장치를 움직이는 장치로, 인공팔이나 인공다리를 만드는 데 필수적이다.



미국 록히드마틴에서 개발한 외골격(Exoskeleton) 파워드 슈트 포티스(FORTIS). 전자기기 인공장기 중 인공보철은 이 같은 로봇 기술과 영향을 주고받으며 발전할 것으로 보인다. 록히드마틴 사는 포티스를 군사용으로도 개발하고 있다. (출처 : Lockheed Martin)

이 외에도 바이오 인공장기의 세부 기술을 통해 기존의 치료 기술이 발전할 가능성도 있다. 세포 기반 인공장기 기술을 활용해 굳이 장기 이식을 하지 않고도 장기의 손상된 부위의 조직만 대체해 치료하는 새로운 의료 기술이 개발될 수 있을 것이다. 또한 이종장기 개발 과정에서 축적된 면역학적 지식을 통해 동종장기 이식 성공률이 향상됨은 물론 장기 이식 후 관리 면에서도 기술적인 발전을 크게 이룰 수 있을 것으로 기대된다.

바이오 인공장기 기술 확산의 걸림돌

바이오 인공장기 기술이 본격적으로 활용되면 산업적으로나 연구개발 측면으로나 매우 긍정적인 영향을 미칠 것이다. 그러나 기술의 확산을 방해하는 장애 요인들 또한 아직 존재하는 실정이다.

먼저 바이오 인공장기의 산업화를 저해하는 기술적인 요인이 있다.

가장 대표적인 것이 면역거부반응이다. 우리 인체의 면역 시스템은 바이오 인공장기를 외부 물질의 침입으로 인식해 맹렬히 공격한다. 연구를 통해 이 문제를 해결해 나갈 때 비로소 바이오 인공장기의 성공적인 산업화에 이를 수 있을 것이다⁹³⁾. 면역거부반응은 특히 이종장기의 상용화를 가로막는 가장 큰 장벽이 되고 있다. 현재 이종장기 면역거부반응을 없애기 위해서 면역억제제를 사용하거나 장기 생산 동물이 가진 항원 유전자를 제거하는 기술이 개발되고 있다. 성공적인 이종장기 이식을 위해서는 인수 공통 감염병의 위험도 제거해야 한다⁹⁴⁾. 이러한 이종장기의 기술적 난제를 해결해가는 과정에서 수의학, 약학, 이식 외과학도 획기적으로 발전하게 될 것이다.

세포 기반 인공장기는 환자 본인의 세포를 활용할 경우 면역거부반응에서 자유로운 편이다. 그러나 다른 사람의 세포를 이용할 경우 면역거부반응이 일어날 수 있고, 감염병이 전염될 가능성도 있다. 세포 분화 과정에서 암세포나 원치 않는 조직으로 분화할 가능성 또한 기술 확산을 위해 해결해야 할 문제다⁹⁵⁾.

전자기기 인공장기의 경우에는 해킹이나 오작동의 위험을 해결해야 한다. 일부 전자기기 인공장기는 외부와 유·무선 통신수단을 이용해 생체정보나 기능 실행에 필요한 정보를 전달하기 때문에 해킹당할 위험이 있다⁹⁶⁾. 해킹은 민감한 생체정보를 유출시키기는 범죄이기도 하지만, 무엇보다 장기 오작동을 일으켜 생명을 위협할 수 있다는 점이 큰 문제이다. 이를 해결할 안전한 바이오 인공장기 전용 통신 기술을 확보한다면, 전자기기 인공장기 기술은 더욱 활발히 확산될 수 있을 것으로 보인다.

바이오 인공장기의 기술적 장애 요인	
구분	기술적 장애 요인
이종장기	· 형질전환 및 동물 바이러스로 인한 새로운 질환 발생 위험 존재 · 과도한 면역억제제 사용에 따른 감염병 확산 우려 · 자가면역 시스템으로 인한 급성 거부반응 발생 가능
세포 기반 인공장기	· 건강한 세포의 순수 분리 및 대량배양/보존, 원하는 세포로의 분화에 어려움 존재 · 종양 조직 혹은 원치 않는 조직으로의 분화 우려 · 세포 이식거부반응 발생 가능
전자기기 인공장기	· 제품에 저장되어 있는 생체정보가 해킹될 가능성 존재 · 신체 내에서의 기기 오작동으로 인한 부작용 발생 가능

바이오 인공장기 기술이 확산되기 위해서는 관련 법률 미비 등 제도적으로 부족한 점도 보완해나가야 할 것이다. 현재로서는 바이오 인공장기 연구개발을 제한할 수 있는 몇몇 규제 요소가 존재하고, 일부 기술에 대한 가이드라인이 명확히 마련되어 있지 않다. 따라서 관련 가이드라인과 규제 등을 하루빨리 명확하게 마련하는 것이 핵심 기술 확보와 기술 상용화를 위해 반드시 필요할 것으로 보인다.

다만, 상용화를 앞당기기 위해 무분별하게 임상시험이나 이식 수술을 시행한다면 오히려 산업 발전을 지체시킬 우려가 있으므로 주의해야 할 것이다. 조급한 상용화로 부정적인 결과가 거듭 나타난다면 산업화를 늦추는 결과를 불러올 수 있으므로 신중한 접근이 필요하다.

이런 의견도 있어요!

기술 완성 앞당기도록 윤리 규제 완화 필요

“현재 우리나라는 생명과학 연구를 하는 데 있어 강한 윤리적 규제를 받고 있습니다. 특히 지난 2005년 황우석 교수의 논문 조작 사건 이후 줄기세포 이용은 매우 까다로워졌습니다. 세계 각국에서는 줄기세포 이용에 대한 규제 완화가 이뤄지면서 관련 인프라 구축에 힘을 쏟고 있습니다. 우리나라도 더 많은 신기술이 개발될 수 있도록 자유롭게 연구할 수 있는 환경이 마련되어야 할 것입니다.”

.....

안전성 확보가 무엇보다 중요

“바이오 인공장기 기술의 경우 무엇보다 인체 안전성에 대한 문제를 해결하는 것이 중요합니다. 최근 무선 전력 전송을 통한 반영구적인 인공장기 기술들이 국내·외적으로 소개되고 있지만, 이런 기술들이 초래할 수 있는 인체에 대한 영향 평가는 아직 제대로 이뤄지지 않고 있습니다. 연구개발을 지원하는 것도 좋지만 인체 안전성 평가에 대한 엄격한 심사 또한 따라야 할 것입니다.”

2. 바이오 인공장기 기술과 사회



○ 사회적 평등 실현시킬 기술, 고비용이 걸림돌

건강 회복으로 사회적 평등 실현 가능

장기 이식이 필요한 이들은 대부분 심각한 만성질환이나 장애를 겪고 있는 이들로, 건강한 사람들이 평범하게 누리고 있는 기회를 놓치곤 한다. 친구를 사귀고 여가 활동을 즐기고, 결혼을 하고, 일을 하는 등의 사회·경제적 활동이 어려울 때가 많다. 그러므로 이들이 바이오 인공장기 이식을 통해 건강을 되찾거나 장애를 극복한다면 사회적 평등을 실현하는 또 하나의 계기가 될 수 있을 것이다. 사회적 평등이란 사회적 참여의 기회를 평등하게 누리는 것이기 때문이다.

특히 고령 인구가 전체 인구에서 차지하는 비율이 나날이 높아지는 지금, 고령 인구의 건강 문제는 사회적 평등 실현에 중요한 요건이 될 것이다. 참고로 2017년 기준 한국인의 평균 기대수명은 83.1세이나 건강수

명은 73.6세로 그 차이가 9.5년이나 됐다. 고령자들이 노화나 질병으로 오는 장기부전을 바이오 인공장기 이식으로 극복할 수 있다면 건강수명과 평균 기대수명의 폭이 이보다 좁아질 수 있지 않을까. 이로 인해 사회 구성원의 큰 비중을 차지하는 고령 인구가 다른 연령대의 사회 구성원들과 평등하게 사회·경제적 기회를 누릴 수 있게 될지도 모른다.

건강수명과 평균 기대수명의 차이(2017년 기준)					
구분	한국	일본	독일	미국	영국
건강수명(A)	73.6세	72.9세	78.5세	77.5세	76.7세
기대수명(B)	83.1세	84.8세	81.8세	80.9세	82.3세
건강수명-기대수명(A-B)	-9.5년	-11.9년	-3.3년	-3.4년	-5.6년

(자료 : 생명보험협회)

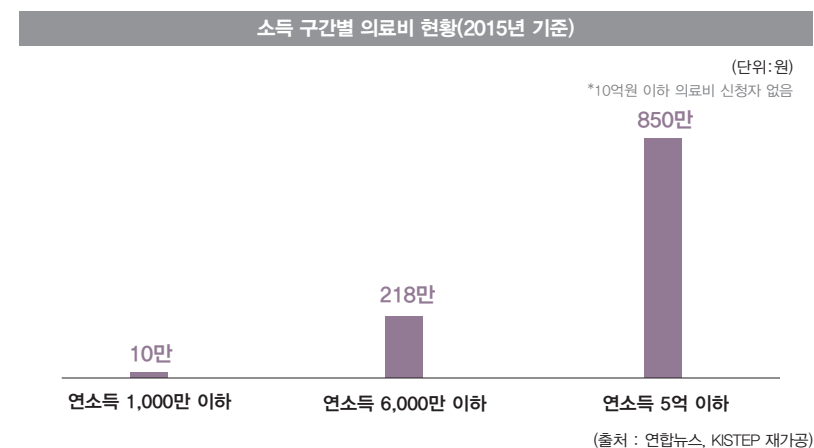
고비용·신체 강화용 이식은 불평등과 역차별 낳을 수도

바이오 인공장기의 상용화 초기에는 이식 및 치료 비용이 매우 높을 것으로 예상된다. 비용이 크게 낮아지기 전까지는 비용을 감당할 수 있는 경제적 능력이 있는 환자들 위주로 치료가 이루어질 것이다. 이러한 상황이 계속된다면 의료 불평등 문제가 생길 수 있다.

의료 불평등은 생명, 건강과 직결되는 문제인 만큼 국민적인 관심이 높기 때문에 논란이 될 경우 매우 큰 사회적 파급력을 가져올 것으로 예상된다. 지금도 의료에 대한 경제적 격차는 나타나고 있다. 소득 계층별 건강 상태에 대한 연구에 따르면, 저소득층의 건강 상태가 고소득층에 비해 나쁘고, 고소득층에게 의료 이용이 집중되어 있는 것으로 나타났다⁹⁷⁾⁹⁸⁾.

또한 우리나라 소득 상위 10% 국민은 소득의 8.9%를 의료비로 지출

하는 데 반해, 소득 하위 10% 국민은 소득의 33.7%를 의료비로 지출하고 있다⁹⁹⁾. 금액으로 보면 그 차이는 더욱 크게 다가온다. 2015년 연말 정산 의료비 공제 청구내역을 기준으로 보면, 연 소득 1천만 원 이하 국민은 연간 의료비로 평균 10만 원 정도를 쓴 반면, 연 소득 5억 원 이상인 국민은 연간 의료비로 평균 850만 원 정도를 써서, 최대 85배의 차이를 보였다¹⁰⁰⁾.



바이오 인공장기의 대량생산이 지연될 경우, 이 같은 의료 불평등은 더욱 심화될 것이다. 바이오 인공장기 치료 비용이 낮아지지 않아 이를 감당할 수 있는 부유층이 우선적으로 혜택을 볼 수밖에 없기 때문이다. 최근 개발된 획기적인 신약이나 치료법의 가격을 살펴보면, 미국의 한 제약회사에서 개발한 면역치료제 사용 시 연간 비용은 약 5억 원 정도, 널리 쓰이고 있는 제3세대 표적 항암제의 1년 치 가격은 1억 원 이상이라고 한다.

현재 개발된 전자기기 인공장기의 가격도 매우 높다. 2013년 기준으로 인공망막은 미화 15만 달러[한화 17억 원] 정도, 인공심장은 약 1억 5천만 원 정도로 알려져 있다. 다른 장기의 경우에도 보급 초기에는 이식 비용이 높게 책정될 가능성이 크고, 경제적으로 이를 감당할 수 있는 환자들이 우선적으로 이식을 받게 될 가능성이 크다. 이로 인해 의료 불평등 문제가 더욱 크게 불거질 우려가 있다.

한편, 바이오 인공장기 이식이 보편화되면 건강생명 연장을 위해서 뿐 아니라 신체의 특정한 기능을 극대화하기 위한 방법으로도 쓰일지 모른다. 예를 들어 운동선수가 더 좋은 성적을 내기 위해 바이오 인공장기를 이식받는 경우다. 만약 수영선수가 인간의 한계를 넘어서는 기능을 갖춘 바이오 인공심장을 이식받아 대회에서 뛰어난 기록을 낸다면 그에게 메달을 수여해야 할까, 스포츠맨십 위반으로 징계를 해야 할까. 지치지 않는 인공다리를 이식받는 학생이 대학의 체육학과 축구 전공 입시에서 좋은 성적으로 입학하게 됐다면 어떨까. 인공증강 팔을 가진 군인이 전투에 투입됐다가 항복한 경우, 무기를 가진 자로 봐야 할까, 아니면 무장 해제한 사람으로 봐야 할까.



절단 장애인인 남아프리카공화국 오스카 피스토리우스는 날 모양의 의족을 착용하고 2012년 런던 올림픽에 장애인으로서 최초로 출전하였다. 그는 이 올림픽에서 비장애인과의 경쟁해 200m 준결승까지 진출해 세계를 놀라게 했다. (출처 : 연합뉴스)

바이오 인공장기가 신체 기능을 회복시킬 뿐 아니라 강화시켜줄 수 있는 시대에는 그들을 사회적으로 어떻게 대우할 것인가 하는 문제도 발생할 수 있다. 현재는 심장이나 간 등의 주요 장기를 동종 이식받은 이들은 '장애인차별금지법'에 의거해 5급 장애인으로 분류된다. 5급 장애인은 지역가입자 건강보험 경감 등의 세제 혜택을 비롯한 복지 서비스를 받을 수 있다. 현행 제도를 그대로 적용해 바이오 인공장기를 이식받아 더욱 강력한 신체를 갖게 된 이들을 장애인으로 배려한다면 어떨까. 사회적 불평등을 줄이기 위해 마련한 복지 제도를 남용한 사례가 될 수도 있을 것이다.

이런 의견도 있어요!

비용이 높은 시기가 지나면 의료 평등에 기여할 것

“많은 사람들은 바이오 인공장기 기술이 사회적 격차를 벌리는 또 다른 원인이 될 것이라 우려하지만 이는 설득력이 떨어진다고 생각합니다. 바이오 인공장기는 '상한선'이 존재하는 기술이기 때문입니다. 이 기술의 목적은 '인간의 장기를 대체할 수 있는 수준'으로, 실용적이며 명확합니다. 컴퓨터 공학, 우주과학처럼 상한선이 없는 진보기술이 아닙니다. 이 수준에 도달하고 나면 그 이상의 기술에 대한 수요는 자연스럽게 줄어들 것입니다. 마치 사람들이 감기약이나 비타민제와 같은 기술에 일정 수준 이상의 효능을 요구하지 않는 것처럼 말입니다. 바이오 인공장기 기술을 비타민제와 완전히 같은 경우라고 볼 순 없지만, '최고급'을 지향하는 수요는 별로 없다는 점에서 동일하다고 생각합니다. 따라서 바이오 인공장기 기술이 일정한 상한선에 도달하고 나면, 개발 방향은 기술의 고도화에서 기술의 저비용화로 바뀌어 의료 평등에 이바지하게 될 것입니다.”

공공 의료 서비스의 질이 떨어질 수도

바이오 인공장기 기술은 이식받는 환자의 신체나 질병 상태에 따라 맞춤형으로 제작해 이식되는 개인화된 의료 행위로 발전할 가능성이 있습니다. 이럴 경우, 기술이 발달된다고 해도 반드시 대량생산을 통해 비용이 저렴해지거나 많은 사람들이 이용할 수 있는 보편적 서비스가 되지 않을 수도 있습니다. 그러면 결국 높은 비용을 감당할 수 있는 부유층들만의 의료 서비스가 되는 것입니다. 재정과 의료 서비스가 '고부가가치' 서비스인 바이오 인공장기 이식에 집중된다면 그 외의 일반적인 의료 서비스의 공급이 줄어들거나 질이 떨어질 가능성도 있다고 봅니다¹⁰¹⁾.

의료 서비스의 불균형 가져올 수도

바이오 인공장기 분야가 급속도로 발전해 만능치료법으로까지 여겨진다면, 훌륭한 의료 분야 인력과 기술이 집중돼 상대적으로 타 의료 분야 서비스의 질이 낮아지는 일이 발생하지 않을까요. 그렇게 되면 간단한 수술이나 처치를 받을 수 있는 병원조차 찾기 힘들어져 긴 거리를 이동해 특수 병원을 찾을 수밖에 없게 될지도 모릅니다. 의료 취약 지역의 사정은 더욱 나빠져 국민 건강 전체가 위협받게 될 우려가 있다고 생각합니다.

'명품 장기'... 선망의 대상

바이오 인공장기 산업이 활성화되면 특히 전자기기 인공장기의 경우 성능에 따라 가격이 다양해질 수 있을 것입니다. 같은 장기라도 가격에 따라 보급형과 고급형이 나뉜다면, 또 하나의 의료 격차가 발생할 것 같습니다. 고성능 바이오 인공장기를 이식받아 신체 능력이 향상된 사람들에게 대해 취업 등에서 우대해주는 역차별도 가능할 것 같고요. 이로 인해 '명품 장기'라는 이름으로 선망의 대상이 될 수도 있을 것입니다.

경제적 능력으로 삶과 죽음이 갈린다면...

누구에게나 치명적인 질병이지만 바이오 인공장기 이식만 하면 살 수 있는 병이 있다고 칩시다. 그런데 내게는 이식과 치료에 드는 돈이 없다면 어떨까요. 경제적 능력으로 삶과 죽음이 갈린다면 마음이 많이 아플 것 같습니다. 상대적 박탈감을 심하게 느낄 것 같아요.

◦ 사회적 비용과 국가 의료 재정에 미치는 영향

장기 입원 환자 치료 위한 사회적 비용 절감 기대

중증 질환 투병은 환자에게 신체적, 정신적 고통뿐 아니라 경제적인 부담도 안겨준다. 1장에서 언급한 바와 같이 현재 장기 이식을 받기 위해 치료하며 기다리는 기간은 평균 3년이 넘는다. 이 기간 동안 환자는 신체적으로 고통을 받는 것은 물론, 커다란 경제적 압박을 받게 된다. 막대한 치료비가 들 뿐 아니라 일을 할 수 없어 가계 소득이 줄어들 수 있기 때문이다. 예를 들어 만성신부전증 환자는 신장 이식을 기다리며 일주일에 2~3회 이상 병원을 방문해 1회 4시간 이상 걸리는 혈액 투석을 받는다. 이 때문에 학업이나 직장생활을 포기해야 하는 경우도 발생한다. 더 심각한 장기부전을 겪을 경우, 중환자실에서 오랫동안 투병을 하기도 한다. 환자 본인뿐 아니라 간병을 하는 가족들의 경제 활동도 타격을 받을 수 있다.

경제적 부담은 개인에게만 일어나지 않는다. 국가는 아픈 이들이 평등하게 치료를 받을 수 있도록 건강보험으로 의료비와 간병비를 보조

하고 있다. 생활이 어려운 이들에게는 생활비를 지원하기도 한다. 그렇다 보니 국가와 사회가 부담하는 비용이 만만치 않은 것이다. 바이오인공장기 기술이 발달해 장기부전 환자들이 건강을 빨리 회복할 수 있다면 이러한 사회적 비용을 일부라도 줄일 수 있을 것이다.



말기 신장병 환자들은 매 주 2~3회 이상 병원을 방문하여 혈액·복막 투석을 받거나 신장 이식을 받아야 한다. 사진은 설치형 혈액투석기의 모습. (출처 : 셔터스톡)

바이오닉스도 의료에 지출되는 사회적 비용을 줄이는 데 기여할 수 있을 것으로 보인다. 바이오닉스란 생물학(biology)과 전자공학(electronics)의 합성어로, 생체의 기능과 원리를 공학적으로 연구해서 얻은 지식을 기술적 문제에 응용하는 학문을 말한다. 의학적으로는 파손된 조직이나 신체의 일부를 기능성 인공물로 대체하는 기술을 의미하며 우리말로 생체공학이라고도 한다¹⁰²⁾. 현재 바이오닉스는 주로 사지 절단 장애인들을 위한 전자 인공의수·의족, 재활 보조 로봇 등을 만드는 데 활용되고 있다. 최근 재활치료에서는 신경신호 측정 및 자극 기술을 이용하는 바이오닉스의 활용 가능성이 점차 부각되고 있는 추세다¹⁰³⁾. 따라서 바이오닉스 기술은 불의의 사고로 신체 일부를 잃은 장애인의 재활을 도와 사회 참여 및 생산 활동 복귀를 앞당길 수 있을 것으로 보인다.

건강보험 등 국가의료 재정 악화시킬 수도

바이오 인공장기 이식과 치료에 관련된 비용이 클 경우 정반대로 사회적 비용이 증가할 수 있다는 우려도 존재한다. 앞서서도 말했듯이 바이오 인공장기 상용화 초기에는 이식에 큰 비용이 들어갈 것으로 보인다. 고가의 바이오 인공장기 이식 비용을 건강보험 급여를 통해 국가가 부담하게 되면 국가의료 재정이 크게 악화될 위험이 있다.

정부는 2017년 현재 63%인 국민건강보험 보장률을 2022년까지 70%로 확대하겠다고 발표했다. 따라서 현재 수억 원 대에 이르는 바이오인공장기 이식 비용에 국민건강보험을 보편적으로 적용한다면 그 부담은 상당히 커질 것이다. 생명 유지나 건강 회복을 위해 꼭 필요하지 않은 이식이 이뤄질 가능성도 있다. 이렇게 되면 국민건강보험의 재정 부담은 더욱 빠르게 나빠질 우려가 있다.

특정 세대나 계층으로 인해 국가 의료 재정 부담이 커진다면 사회적 갈등이 일어날 수도 있다. 앞서서도 말했듯 바이오 인공장기 기술의 가장 큰 수혜자 중 하나는 고령 인구가 될 것이다. 늘어나는 고령 인구의 바이오 인공장기 이식으로 건강보험 재정이 나빠져 보험료가 인상된다면 세대 간의 갈등이 발생할 가능성도 고려해볼 수 있다.

기술 초기의 높은 비용 부담 때문에 부유층이 바이오 인공장기를 주로 이식받는다면, 국민건강보험 혜택 때문에 의료 불평등이 더욱 심화된다는 논란이 일어날 수도 있다. 예를 들어 어떤 바이오 인공장기를 이식할 때 드는 총 비용이 1억 원이라고 하면, 비용의 70%를 건강보험에서 충당한다고 해도 3천만 원 정도의 개인 부담금이 발생한다. 1억 원에 비해서는 크게 낮아진 것이지만 3천만 원도 적지 않은 금액이다.

결국 3천만 원의 이식 비용을 감당할 경제적 여유가 있는 환자가 우선적으로 치료를 받게 될 것이다. 때문에 현행 국민건강보험 기준을 그대로 바이오 인공장기 이식에 적용한다면 국가 재정으로 부유층을 돕는다는 비판을 받게 될지도 모른다. 이로 인해 계층 간의 갈등이 커질 수도 있는 것이다.

◦ 범죄에 미치는 영향과 사회적 인식 형성

수급 불균형 해소로 불법 장기 거래 해결 기대

동종장기 이식, 즉 한 사람의 조직이나 장기를 다른 사람에게 기증해 이식하는 것은 인류애에 따라 자신의 소중한 생명을 나누는 숭고한 행위다. 따라서 세계 대부분의 국가에서는 이식을 위해 장기를 기증하거나 기증받을 때 금전적 대가를 지불하는 것을 금지한다.



지난 2014년 12월 서울 명동 거리에서 사랑의장기 기증운동본부가 국내 장기 기증운동 시작 23주년을 맞아 개최한 캠페인. 뇌사장기 기증인 가족, 신장 기증인 및 이식인, 장기 기증 등록자, 후원자 등 23명이 장기 기증 등록자 200만 명을 기대하는 거리 행진을 펼쳤다. (출처 : 연합뉴스)

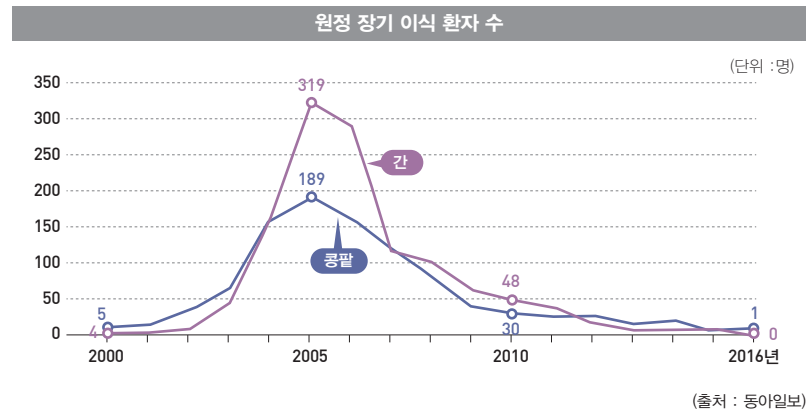
지난 2008년에는 세계이식학회와 세계신장학회의 의료 전문가들이 터키 이스탄불에 모여 이같은 원칙을 확인하고 장기매매와 해외 불법 이식을 막을 수 있는 방안을 논의한 후, ‘이스탄불 선언 (Declaration of Istanbul Custodian Group, DICG)’을 발표하기도 했다. 그러나 매년 장기 이식을 기다리다가 사망하는 환자가 1,000명이 넘는 정도로 수요와 공급의 차이가 큰 현실 때문에 일어나서는 안 될 일이 일어나기도 한다. 암암리에 환자들의 목숨을 불모 잡은 장기매매가 이뤄지는 것이다.

인간의 장기를 돈을 주고 사고파는 것은 엄연한 범죄이다. 때문에 매우 은밀히 이뤄져 정확한 통계를 낼 수는 없다. 그러나 질병관리본부에 따르면 지하철역이나 버스터미널 화장실 등에 나붙은 장기매매를 암시하는 불법 게시물을 매년 1,000건 가까이 적발하고 있다고 한다^{xxxviii}. 질병관리본부가 적발한 장기매매 관련 온라인 게시글 또한 2014년 기준 1,237건이나 된다. 방송통신심의위원회도 2015년 1년 동안 157건의 장기매매 알선 온라인 게시글을 적발했다고 밝혔다.

장기매매 및 불법 장기 이식은 국경을 넘기도 한다. 경희대학병원은 주요 장기이식 환자 관리병원 42곳을 조사한 결과, 국내에서 이식 수술을 받은 적이 없는데도 ‘이식 후 면역 치료’를 받고 있는 콩팥·간 이식 환자가 2000년에서 2016년 사이에만 2,206명에 이르렀다고 밝혔다. 평균적으로 1년에 130명 가까운 환자가 해외에서 출처를 알 수 없는

xxxviii, 2013년 1,128건에서 2014년 955건으로 감소하다가 2016년에는 1건으로 줄었다. 중국이 2008년 베이징 올림픽 이후 단속을 강화한 영향으로 보인다.

장기를 이식받고 있는 셈이다.



해외에서 장기 이식을 받을 경우 합병증 우려가 크고, 건강보험 등 각종 국가지원 의료혜택을 받지 못한다. 그럼에도 불구하고 해외 이식을 하는 대부분은 장기매매의 경우로 추정된다. 장기매매에서 거래되는 장기들은 대부분 경제적, 또는 정서적으로 취약한 계층을 착취해 얻어지기 때문에 문제가 더욱 심각하다. 장기매매를 다룬 최근 영화 <미생: 사라진 여자(2016)>, <청년경찰(2017)>에서도 피해자는 경제적으로 절박한 외국인이거나 가출해 가족과 연락이 끊긴 여성 등으로 나온다. 바이오 인공장기 보급으로 환자들이 더 이상 고통 속에서 불확실한 장기 이식을 기다리지 않아도 된다면, 장기매매 등의 반윤리적 불법 행위들도 줄어들 것이다.



2016년 개봉한 영화 <미생: 사라진 여자>에는 자녀의 수술비를 마련하기 위해 장기를 불법 매매하는 중국 동포 한매(공효진 분)의 이야기가 담겨 있다. (출처 : 메가박스(주)플러스엠)

전자기기 인공장기 해킹 등 신종 범죄 발생 우려

전자기기 인공장기의 경우 IT 기술을 적용한 일반적인 전자기기가 대부분 그렇듯 해킹이나 유사품 제조 판매 등의 범죄를 낳을 수 있다. 문제는 전자기기 인공장기의 해킹이나 유사품 제조는 다른 전자기기에서 발생할 수 있는 문제보다 훨씬 심각한 부작용을 발생시킬 수 있다는 것이다. 또한 기술의 특성상 환자의 민감한 개인 정보가 탑재될 가능성이 높다. 따라서 소프트웨어가 해킹된다면 개인정보 유출, 실시간 환자 상태 정보의 모니터링을 통한 사생활 침해 등이 벌어질 수 있다. 더 나아가 해킹을 통해 장기 기능을 원격으로 통제할 수 있다면, 타인에 의해 신체 기능이 임의로 조정 당하는 위험에 처할지도 모른다. 실제로 지난 2017년 8월 29일 미국 FDA는 세인트 주드 메디컬(St. Jude Medical)사가 만든 일부 심장박동기 모델이 해킹 위험에 취약하다고 판단해 자진 리콜 조치 명령을 내리기도 했다¹⁰⁵⁾.



바이오 인공장기가 불법적으로 유통될 위험도 존재한다. 기술이 널리 보급되기 전까지는 공급이 수요를 따라가지 못할 수 있기 때문에 정상적인 유통에서보다 더 높은 이윤을 노린 암거래 시장이 형성될 수 있는 것이다. 또한 유사 불량 제품이나 인증을 받지 않은 제품이 유통될 가능성도 있다. 정식 인증을 받지 않은 제품이 유통될 경우 피해는 심각할 것이다. 불량 제품의 오작동이 목숨을 좌우하는 치명적인 결과로 이어질 수 있기 때문이다.

이런 의견도 있어요!

불법 시술 관리 시스템 필요

“성형 수술의 경우처럼 불법 시술 문제가 발생할 수 있을 것 같습니다. 이를 막으려면 바이오 인공장기의 수요 및 공급을 엄격히 관리하고, 시술하는 병원을 철저히 관리할 수 있는 시스템을 구축해야 할 것입니다.”

위조 바이오 인공장치 유통 주의해야

“3D 프린팅을 이용한 바이오 인공장치 생산이 활성화된다면, 위조 장치들의 생산과 유통에 대해서도 경계해야 합니다. 컬러 인쇄술의 발달이 위조지폐 문제

를 불러일으킨 예를 볼 때 충분히 가능한 문제입니다. 3D 프린팅의 결과물에 대한 책임 문제나 저작권에 대한 법적인 조치도 추가로 마련돼야 할 것 같습니다.”

부정적인 인식으로 편견과 차별 발생할 수도

바이오 인공장치로 인해 생길 수 있는 또 다른 사회적인 문제로 편견과 차별을 들 수 있다. 기술 상용화 초기에는 바이오 인공장치 이식 환자들에 대한 이해 부족과 편견으로 사회적 거부감이 형성될 수도 있을 것이다. 인간은 아직 잘 알려지지 않은 것에 대해 동경과 함께 막연한 공포와 거부감을 가진다. 따라서 바이오 인공장치 기술이 널리 사용되지 않은 시기에는 바이오 인공장치를 이식한 이들에 대해서도 뚜렷한 과학적 근거 없이, 기존의 인식틀로 상상하고 판단해 편견을 가질 가능성이 있다.

특히 동물의 장기를 사람에게 이식하는 이종장기 기술의 경우 인간 정체성에 대한 논란과 함께 거부감이 크게 나타날 수 있다. 전자기기 인공장기나 세포 기반 인공장기의 경우에도 기술이 보편화되기 이전에는 편견 어린 시선을 받을지도 모른다. 이로 인해 취업이나 결혼, 보험 가입 등 사회 활동에서 차별을 받는 등 새로운 사회 문제가 발생할 수 있을 것이다. 그러나 이 같은 현상은 기술의 안전성이 점차 확보되고, 더 많은 사람이 기술을 활용하면서 올바른 정보가 함께 퍼지면 점차 해소될 수 있을 것이다.

이런 의견도 있어요!

차별 방지 교육 및 홍보 필요

“이종장기 이식을 받은 사람을 차별하면 해당 기술의 적용을 꺼리게 될 수 있으므로 차별 방지를 위한 내용을 학교나 매스컴을 통해 홍보하고 교육해야 할 것입니다.”

◦ 국민 삶의 질에 미치는 영향

건강 증진에 기여해 국민 삶의 만족도 증가

기술의 사회적 영향을 따질 때 빼놓을 수 없는 것이 사회 구성원 삶의 질에 미치는 영향이다. 삶의 질은 건강에 의해 크게 좌우된다. 따라서 건강수명을 향상시킬 수 있는 바이오 인공장기 기술은 국민 삶의 질과 행복도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

특히 오랜 기간 장기부전으로 고통 받던 환자에게 바이오 인공장기 기술은 삶의 질 향상에 크게 기여할 것이다. 장기부전 환자에게 장기 이식은 궁극적인 치료법으로, 만성질환으로 인한 장기부전을 극복할 수 있는 희망이 될 것이기 때문이다. 바이오 인공장기 이식으로 건강을 되찾은 이들은 일터로 복귀해 경제적 능력을 회복하고 보람을 찾을 수 있으며, 투병으로 잃었던 다양한 사회적 기회를 누릴 수 있을 것이다. 환자의 보호자들도 본래 삶의 자리로 돌아가 경제력 회복, 소속감 증대 등을 통한 행복을 되찾을 수 있을 것이다.

또한 장기 이식 대기자 중에는 기약 없이 기다려야 하는 상황 때문에 우울감을 호소하는 이들도 많다. 바이오 인공장기가 보급화되면, 기증자를 기다려야 하는 동종장기와는 다르게 수요에 따라 공급이 가능해져 장기 이식 대기 환자들의 정신 건강도 개선될 수 있을 것이다.



건강은 행복도와 삶의 질과 직결된다. 장기부전으로 투병하는 이들의 행복 지수와 삶의 질이 높기란 매우 어렵다. (출처 : 셔터스톡)

부작용과 부조화로 삶의 질 오히려 떨어질 수도

바이오 인공장기 이식과 회복 과정에서 문제가 발생한다면 삶의 질은 반대로 떨어질 수 있다. 이식 수술 후 재활 기간이나 일상으로 복귀하는 데 걸리는 시간이 예상보다 길어질 때도 그렇다. 이식된 바이오 인공장기에 기능적 문제가 발생하거나 예측치 못한 합병증이 발생할 때도 환자는 괴로움을 겪을 것이다. 이식 후에 특정 음식을 먹지 못하거나 특정 활동을 하는 데 제약을 받을 수도 있고, 거부반응이나 부작용을 막기 위한 약물을 계속해서 복용해야 할 수도 있다. 기술 개발

초기에 발생할 수 있는 이러한 상황들은 바이오 인공장기 사용자의 삶의 질을 떨어뜨릴 수 있는 요인이다.

예를 들어 이종장기의 경우 장기 이식에 의한 면역거부반응이나 동물 유래 바이러스로 인한 감염같은 부작용이 일어날 수 있다. 신종 감염병이 발생할 위험은 이종장기 이식을 위한 장기 적출과 처리, 운송 과정 전반에 존재한다.

바이오 인공장기 이식 과정에서 합병증이 일어나지 않으리라는 보장도 없다. 동종장기를 이식할 때도 위장관 합병증(점막염, 구토, 복통, 설사, 혈변, 맹장염 등)이 종종 일어난다. 바이오 인공장기 이식에도 이러한 합병증이 일어날 가능성이 있으며, 문제점을 해결하지 못한다면 이식 환자의 삶의 질은 오히려 저하될 수 있다.

바이오 인공장기 기술의 상용화 초기에는 이식된 장기와 기존 신체 기능과의 부조화로 인한 부작용이 나타나는 등, 새로운 건강 문제가 발생할 수 있다. 예를 들어 고령 환자가 바이오 인공심장을 이식받았다고 해 보자. 이식받은 바이오 인공심장은 20대나 다름없이 힘차게 뛰지만 다른 주요 장기의 기능이나 근력·외모 등은 그대로일 것이다. 이런 부조화는 생리적 부담을 줘 부작용을 일으킬 수도 있다. 또한 여러 장기를 교체해 전체적인 신체 기능이 좋아졌다고 해도 뇌가 그대로라면, 인지 및 사고 능력과 신체 능력의 균형이 맞지 않아 문제가 생길 수도 있다. 이처럼 발생 가능한 여러 가지 문제점들을 신중하게 고려해 기술을 적용할 때, 사회에 대한 기술의 부정적인 영향이 최소화될 수 있을 것이다.

이런 의견도 있어요!

가족 공동체가 무너지는 사회 문제 해결

“장기부전을 겪어 장기 이식을 기다리는 환자들은 대부분 중증질환자들입니다. 이들에게는 진단 및 치료, 수술 비용은 물론, 장기 입원과 통원 치료 등 회복 비용이 많이 듭니다. 바이오 인공장기 상용화로 치료 기간과 입원 기간이 크게 줄어든다면 환자들의 의료비 부담도 크게 줄어들 것입니다. 결국 치료비 부담 때문에 가족 공동체가 무너지는 사회 문제까지 해결할 수 있지 않을까요. 또한 현재 생체 장기 기증은 가족 간에 많이 이뤄집니다. 가족의 큰 고통을 외면할 수 없어 자발적으로 기증하는 것이 대부분이지만, 간혹 사회적인 시선과 가족의 압력에 의해 자의 반, 타의 반으로 선택하는 경우도 있다고 합니다. 바이오 인공장기 기술이 보편화하면 이러한 문제가 크게 줄지 않을까 생각합니다.”

고령층의 활발한 사회 참여 유도해야

“바이오 인공장기 이식 등으로 건강을 되찾고 오래 산다고 해도 노후가 제대로 대비되어 있지 않다면 무척 괴로울 것 같습니다. 나이 많은 환자가 바이오 인공장기 이식으로 건강해졌는데 퇴직 연령은 현재와 같다면, 일을 하지 못해 경제적으로 어려울 뿐 아니라 사회적 참여를 통한 자아실현의 기회도 잃게 될 것입니다. 이러한 부작용을 막기 위해서는 노인들이 복지 수혜 대상이 아니라 활발히 사회 활동에 참여할 수 있는 사회 구성원으로서 인식되어야 할 것입니다. 이를 위해 건강한 고령층이 스스로 참여할 수 있는 다양한 사회적 활동 기회가 만들어졌으면 좋겠습니다.”

3. 바이오 인공장기 기술과 윤리



○ 생명 연장의 열쇠, 윤리를 말하다

인체유래물 사용과 생명윤리

바이오 인공장기 기술은 생명과학의 대표적인 응용 기술로서, 건강 수명 연장의 열쇠가 될 것으로 기대되고 있다. 생명과학이란 여러 가지 생명에 관계되는 현상이나 생물의 기능을 연구해 의료 등 인류 복지에 활용하는 과학의 분야를 말하는데¹⁰⁶⁾, 1950년대 생명체 복제, DNA 구조 발견 등을 계기로 놀라운 속도로 발전해왔다. 생명과학은 최근 유전자 편집 기술, 줄기세포 치료 기술 등 획기적인 신기술을 속속 등장시키며 인류의 건강과 건강수명 연장의 꿈을 실현시킬 희망이 되고 있다. 그러나, 생명과학이 너무나 빠른 속도로 발달했기 때문에 기존의 윤리로는 판단하기 어려운 장면도 종종 생겨났다. 이러한 배경 속에 과학 발전이 인류와 지구상의 다양한 생명 종에 미치는 영향에

대한 윤리, 즉 ‘생명윤리’에 대한 논의가 시작됐다^{xxxix}.



1996년 영국 로슬린 연구소에서 태어난 최초의 복제 포유동물인 새끼양 돌리. 생명체를 복제하고, 유전자를 조작할 수 있을 정도로 급격히 발달한 생명과학 기술은 생명윤리에 대한 논의를 촉발했다. (출처 : 연합뉴스)

윤리란 무엇이 옳고 그른지 말하는 것이라기보다, 특정한 상황에서 무엇이 최선의 결정인지, 무엇이 최악을 피하는 것인지, 선행과 악행 사이의 균형은 무엇인지에 대해 말하는 것이다. 윤리는 우리가 이런 종류의 결정을 내릴 때 따라야 하는 원칙을 찾는 것이다¹⁰⁷⁾. 생명윤리도 마찬가지다. 과학이 인간과 다른 생명들에게 가장 좋은 영향을 미치도록 판단하는 데 필요한 원칙인 것이다. 바이오 인공장기 기술 역시 생명윤리적 관점에서 생각해 보아야 할 문제들을 가지고 있다.

먼저 세포 기반 인공장기 개발을 위해서 필요한 인체유래물에 대한 문제다. 인체유래물이란 인체로부터 수집하거나 채취한 조직, 세포, 혈액, 체액 같은 인체구성물이나 이것들로부터 분리된 혈청, 혈장, 염색체, DNA, RNA, 단백질 등을 말한다. 즉 인체에서 비롯된 모든 물질을

xxxix. 1970년 세포생물학자 반 렌셀레어 포터(Van Rensselaer Potter)가 쓴 〈생명윤리-미래로의 다리〉라는 책에서 ‘생명윤리’라는 단어가 처음 등장했다.

말한다^{xi}.

바이오 인공장기를 연구·개발하고, 이식하기 위해서는 인체유래물이 사용된다. 예를 들어 세포 기반 인공장기를 개발하기 위해서는 인체유래물인 인간 세포가 필요하다. 그런데, 현재 이식을 위한 조직이나 수혈용 혈액을 제외하고는 새로운 기술을 활용한 치료용 생체시료^{xii}의 공급을 규정하는 법률이 없다. 또한 인체유래물을 연구 목적으로 이용할 때는 ‘생명윤리 및 안전에 관한 법률(이하 생명윤리법)’에 따라 기증자의 법적 동의를 받아야 하지만 바이오 인공장치 제작처럼 치료 목적으로 이용할 때는 어떠한 규정도 없다. 따라서 바이오 인공장기를 만들기 위해 인체 세포를 얻거나 얻은 세포를 이용할 때 비윤리적이거나 불법적인 행위가 벌어져도 통제하기 어려울 수 있다.



2001년 서울 세종문화회관에서 열린 '생명윤리기본법(가칭)의 근본골격 마련을 위한 공청회'에서 동물마스크를 쓴 생명계 학대방지포럼 회원들이 인간과 동물을 이용한 실험을 반대하며 시위를 벌이고 있다. '생명윤리 및 안전에 관한 법률'은 2004년 제정되어 2005년부터 시행되었다. (출처 : 연합뉴스)

xi. 우리나라 생명윤리법 제2조 제11호에는 인체로부터 수집하거나 채취한 조직, 세포, 혈액, 체액 등 인체구성물, 인체구성물로부터 분리된 혈청, 혈장, 염색체 DNA, RNA, 단백질 등을 인체유래물로 규정하고, 이 같은 인체유래물을 인체로부터 수집하거나 채취하여 직접 조사, 분석, 수행하는 연구를 인체유래물 연구라 정하고 있다.

xii. 생물 기원의 시험, 검사, 분석 재료

생명윤리법에는 연구 목적으로 사용하는 것을 전제로 인체유래물을 무상 기증하도록 하고 있다. 그러나 바이오 인공장치 개발을 위해 사용되는 인체유래물에 이러한 기준을 적용할 지는 논의가 필요하다. 바이오 인공장기는 하나의 상품으로서 거래되어 이윤을 만들어낼 것이기 때문이다. 인체유래물을 제공하거나 얻는데 경제적 보상이 오고간다면 불법 장기매매처럼 비윤리적으로 보아야 할까. 아니면 제품 개발에 대한 기여도를 인정받아 이익을 나누는 것으로 간주해야 할까. 이에 대한 사회적 합의와 규제 마련이 필요할 것이다.

또 한 가지, 이미 한 차례 이식을 마친 바이오 인공장기도 인체유래물로 볼 것인가에 대한 논란이 일어날 수 있다. 외부에서 만들어져 삽입됐지만 결국 인체의 일부가 됐기 때문이다. 이식됐던 바이오 인공장기를 떼어내서 다시 유통하거나, 다른 사람에게 재이식할 경우, 인체유래물로 적용하느냐 마느냐에 따라 논란이 발생할 수 있는 것이다. 따라서 바이오 인공장치 상용화 환경을 대비해서는 인체유래물에 대한 정의를 좀 더 섬세하게 규정할 필요가 있다.

이런 의견도 있어요!

장기이식법 개정 필요

“현행 ‘장기등 이식에 관한 법률(이하 장기이식법)’은 자연장기만을 적용 대상으로 제정돼 있으며(장기이식법 제4조), 장기의 거래는 엄격하게 금지돼 있습니다(장기이식법 제7조). 그리고 현행 의료인(의사, 한의사, 치과의사, 간호사 등)의 자격정지 사유는 의료인이 의료법을 위반한 경우와 품위를 심하게 손상시킨 경우 등에 한정되어 있어, 의료인이 바이오 인공장치 매매 과정에서 인간의 존엄

성을 훼손하는 등 사회적인 비난을 받을만한 잘못을 저질렀더라도 그 의료인의 자격에 관한 제한을 강제할 수단이 없는 실정입니다. 이에 기존 장기 등 이식법 제2조에 바이오 인공장기를 장기의 일부로 정의해 법률의 적용 대상으로 삼고, 일정 상황에서 거래의 대상이 될 수 있도록 법 규정을 마련해야 할 것으로 생각됩니다. ☞

인간 정체성 혼란과 개인 자율성 침해 논란

바이오 인공장기 기술이 사회적으로 받아들여지고 널리 확산되는 단계에 이르면 장기부전으로 생명이 위급한 환자 외에도 다양한 목적으로 이식을 원하는 사람이 생길 수 있을 것이다. 이를테면 운동선수는 종목과 관련된 특정 신체 기능을 향상시키기 위해서, 군인들은 근력 증강을 위해서, 심지어 일반인들이 더욱 아름다워 보이기 위한 미용의 목적으로도 이식을 희망할지 모른다. 이러한 모든 요구를 받아들여 바이오 인공장기 이식을 허용하면 인간으로서의 정체성이 훼손되거나 혼란이 올 수도 있을 것이다. 이를 방지하기 위하여 바이오 인공장기 이식의 우선순위와 허용 범위를 정해야 한다는 목소리가 있는 것도 사실이다.

그러나 지나친 규제는 오히려 신체의 자유와 개인의 자율성에 대한 침해로 인식될 수 있다는 점도 생각해 보아야 한다. 우리나라 헌법 제10조는 국민의 자기결정권을 보장하고 있다. 자기결정권에는 성적 자기결정권, 생명과 신체의 처분에 대한 결정권, 피임결정권 등이 해당된다. 바이오 인공장기로 신체를 변형하거나 기능을 증강하는 것을 막는 행위는 ‘신체의 처분에 대한 결정권’을 부정하는 것으로 간주될 수 있는 것이다.

이런 의견도 있어요!

인공장기의 무기화 가능성

☞ 바이오 인공장기가 신체를 전쟁 무기로 개조하는 데 이용될 가능성은 없을가요. 예를 들면 최근 록히드 마틴이 연구 중인 착용형 로봇인 HULC는 관절 부위에 센서와 모니터가 달려있어 자신의 몸처럼 움직이면서 근력을 증강시켜준다고 합니다. 이와 비슷하게 인체 동기형 생체 소재와 티타늄을 합성한 인공장기(흉골, 두개골, 척추, 관절, 다리뼈 등)를 몸에 이식한다면 인간의 몸 자체가 전쟁 무기로 사용돼 윤리적 문제를 일으킬 수 있다고 생각합니다. ☞

우성 생명체의 탄생

☞ 좋은 유전자를 활용해 더 좋은 형질을 가진 인간을 만들려는 욕심을 가진 사람이 있다면, 유전자 조작을 통해 원하는 형질의 바이오 인공장기를 만들어 어찌면 위험할지도 모르는 우성 생명체를 탄생시킬 가능성도 있지 않을까요. 예를 들어 더 좋은 시력을 얻기 위해 매의 눈에서 추출한 성분을 삽입한 인공눈을 만들거나 알코올 분해 성분을 높이기 위한 특별 약물로 처리한 슈퍼 간을 만드는 것이지요. ☞

치료 목적으로 이식한 선수에 대한 역차별 우려

☞ 현재 스테로이드와 같은 신체 기능을 향상시키는 약물을 복용한 선수는 올림픽 출전을 금지하고 있습니다. 향후 바이오 인공장기 이식이 보편화돼 심폐 지구력, 근 지구력 등 신체적인 기능을 강화하기 위해 바이오 인공장기를 이식한 선수를 금지 약물을 사용한 것과 동일하게 바라봐야 할까요. 기능 강화를 위한 바이오 인공장기 이식자의 올림픽 참가를 허용한다면 이들이 월등한 신체적 능력으로 대회를 제패하는 불공정한 상황이 발생할 수 있을 것 같습니다. 반면 이를 허용하지 않는다면 치료 목적으로 바이오 인공장기를 이식한 선수의 경기 참가를

막아 역차별이 발생할 것 같습니다. 운동선수의 경우 어느 정도까지를 ‘스포츠 정신’을 훼손하지 않는 ‘이식 범위’로 볼 지 논의가 필요할 것 같습니다. 〰

종교적인 논란 일어날 수도

〰 종교에서는 생명을 탄생 및 소멸시키는 것을 신의 영역으로 봅니다. 따라서 바이오 인공장기 이식을 인간의 수명을 마음대로 조작해 신에게 도전하는 행위라고 보는 종교인들의 반발이 적지 않을 것이라 생각합니다. 장기 이식 중에서도 장애나 건강상의 불편을 극복하고자 하는 것이 아닌 수명 연장에 관련된 이식은 이러한 논란을 피할 수 없을 것 같습니다. 논란이 계속된다면 사회적으로도 부정적인 여론이 형성될 수 있을 것 같습니다. 〰

성별을 선택할 수 있는 시대가 온다면

〰 바이오 인공생식기를 이식하고, 필요한 호르몬을 정기적으로 공급받는다면 선택적인 남성과 여성의 구분이 무의미해지는 시대가 올 수 있지 않을까요? 그런 시대에 남성과 여성은 어떻게 정의해야 하는 걸까요? 이런 것을 항상 나쁘다고만 이야기할 수 있을까요? 성소수자들에게는 행복을 추구할 수 있는 소중한 기회가 되지 않을까요? 다만 성별을 후천적으로 마음대로 선택할 수 있게 된다면 사회적으로 큰 논란이 올 것이 예상됩니다. 기존 성별을 공개해야하는지 아닌지, 양성의 생식기를 모두 가지는 것이 괜찮은지와 같은 여러 문제가 제기될 것이고, 남성과 여성 중 어느 한 성별만 훨씬 더 많이 선택받는다면 결혼, 출산 등을 통한 공동체 유지가 어렵다는 문제점도 나타날 것 같습니다. 〰

성정체성 논란 올 수도

〰 바이오 인공장기 이식으로 성별을 바꾸거나 남성도 출산이 가능해지는 사회가 온다면 성 정체성 논란이 올 것 같습니다. 예를 들어 남성이 바이오 인공자궁을

이식받아 출산한다면 출산은 여성만이 할 수 있다는 보편적인 관념이 깨지고, 성 정체성의 혼란이 일어날 수 있을 것입니다. 관련된 예로 이런 뉴스를 본 적이 있습니다. 여성에서 남성으로 성별을 바꾼 한 미국인은 아내가 아기를 낳지 못하자 자신의 제거하지 않은 자궁으로 임신을 하고 출산을 했습니다. 그러나 그 과정에서 성 정체성에 혼란을 느꼈고, 남성으로서의 정체성을 확실히 하기 위해 생물학적으로도 남성이 되는 수술을 받게 됐다는 것입니다^{xii}. 바이오 인공생식기를 이식받아 성별을 바꾸는 것이 쉬워지는 시대가 오면 성 역할에 대한 고정 관념이 희미해지고, 성 정체성의 혼란을 느끼는 이가 많아질 것 같습니다. 〰

인공자궁 기술로 출산을 증가할 수도

〰 바이오 인공자궁 기술이 완벽히 개발되면, 자녀 임신과 출산의 첫 단계부터 인체와 분리된 인공자궁에서 할 수 있지 않을까요? 그렇게 되면 임신과 출산으로 인한 고통을 줄이는 또 하나의 방법이 될지도 모르겠습니다. 이러한 기술로 동성결혼이나 난임 부부의 출산이 늘어나 출산율 증가에도 기여할 수 있을 것이라 생각합니다. 〰

‘인간’에 대한 새로운 정의가 생겨날 것

〰 바이오 인공장기의 개발로 극단적인 경우 신체 기관의 50% 이상이 바이오 인공장기로 대체돼 생명을 유지하는 환자도 있을 것입니다. 이렇게 ‘사이보그형’ 인간이 생겨날 수 있으며, 이는 윤리적 문제를 야기할 수 있습니다. 인간의 수명을 연장하기 위해서 어디까지 과학기술이 허용돼야 하는가 등의 이슈는 철학, 윤리, 자연과학의 다양한 분야에서 논의와 사회적 합의가 이뤄져야 한다고 생각합니다. 〰

xii. 출처, 중앙일보 ‘아기 못 낳는 아내 위해 대신 출산한 남편’

임상시험에 대한 의료윤리적 부담 발생할 수도

바이오 인공장기의 개발 초기 단계에서는 임상시험을 할 때 안전성이 아직 확실히 검증되지 않은 치료법을 시술한다는 의료윤리적 부담이 발생할 수도 있다.

우리 인체의 구조와 기능은 매우 복잡하다. 현대 과학이 그 복잡하고 신비로운 메커니즘을 빠른 속도로 밝혀내고 있지만, 아직 알려지지 않은 비밀이 무궁무진하게 남아 있다. 이러한 이유로 바이오 인공장기의 안전성과 효과를 검증하기 위해 거치는 임상시험 결과를 정확히 예측하거나 통제하기 어려운 것이 사실이다. 아무리 비임상시험을 통해 어느 정도의 안전성을 인정받았다고 해도 인체에 적용했을 때는 전혀 다른 결과를 낳을 수 있다. 때문에 임상에 참여하는 환자의 안전성을 확신할 수 없다는 윤리적 부담이 있다.

현재 의료 관련법에는 치료법의 완벽한 안전성이 확보되지는 않더라도 치료 기회를 제공하는 것이 환자에게 이익이 더 크다고 판단될 경우, ‘치료적 연구’라는 이름으로 임상시험을 허가하고 있다. 모든 신약품의 임상시험은 안전성이 검증되지 않은 기술의 인체 적용이라는 윤리적 문제를 안고 있다. 문제는 바이오 인공장치 임상시험의 경우 제한된 기간 동안 진행되는 다른 치료법과는 달리 매우 긴 기간 동안 이뤄져야 할 필요성이 높다는 데 있다. 더불어 바이오 인공장기는 신체 내로 이식이 되는 기술이므로 다른 약물보다 실제 위험과 이익을 놓고 객관적으로 예측하기가 어렵고, 문제 발생 시 치료법에 대한 정확한 정보를 제공하기도 쉽지 않다. 이식이 완료된 후에도 평생 추적 관리를 해야 할 수도 있는 것이다. 때문에 바이오 인공장치 이식에 대한 임

상시험은 더욱 신중한 환자 동의 절차와 의료 윤리 준수 하에 진행돼야 할 것이다.

맞춤형 바이오 인공장기의 경우, 극히 개인화된 의료 시술이 필요하기 때문에 임상시험이 적절한가라는 의문을 낳기도 한다. 이식 대상자인 환자만을 위해 맞춤형으로 제작되기 때문에 다른 생체에 실험해 안전성과 효과를 검증한다는 것에는 한계가 있을 수밖에 없다.

이종장치 이식의 경우 동물의 세포가 다른 종의 동물 생체 내에서는 어떠한 상호작용을 하는지 밝혀지지 않은 부분이 많아 더욱 주의할 필요가 있다. 따라서 인수 공통 감염질환 등 혹시 일어날 지도 모르는 효과에 대해 환자 본인뿐 아니라 가족에 대한 평생 추적 모니터링이 필요할 수도 있다.

전자기기 인공장기는 기술을 완벽히 통제하기 어렵다는 한계를 가지고 있다. 전자기기 인공장치 중 체외에서 작동하는 기기는 통제가 비교적 쉽지만, 체내에 삽입하는 기기는 아직 오작동이나 해킹에 취약하기 때문이다. 앞으로 신경신호 전달 등 첨단 과학기술이 융합된 전자기기 인공장기가 개발된다면 오작동을 예측하기 더욱 어려울지도 모른다.

장치 이식에 대한 대기 수요가 많아 바이오 인공장기를 시급히 개발해야 할 필요성이 있는 것이 사실이다. 그러나 이 때문에 임상시험에 요구되는 의료 윤리적 요구 사항에 대한 고려가 느슨해지지 않도록 주의해야 할 필요가 있다.

종차별주의와 이종장기 이식

2017년 개봉한 봉준호 감독의 영화 <옥자>는 유전자 조작을 통해 탄생한 ‘슈퍼돼지’와 한 소녀의 우정을 그린 영화다. 슈퍼돼지 옥자는 오직 좋은 고기를 많이 얻기 위해 만들어진 생명체다. 영화는 인간의 이익을 위해 또 다른 종의 생물을 창조하고 희생시키는 것이 과연 옳은가에 대한 질문을 던지고 있다.



2017년 개봉한 영화 <옥자>는 식용을 목적으로 개발된 형질전환 돼지 ‘옥자’를 통해 인간을 위해 동물을 이용하는 것이 옳은가에 대한 질문을 던지고 있다. (출처 : (주)NEW)

오스트레일리아 출신의 철학자 피터 싱어(Peter Singer)는 이 질문에 단호히 답한다. 인간을 위한 동물의 희생을 당연히 여기는 태도는 성차별이나 인종차별과 다를 바 없는 ‘종차별주의’라는 것이다. 그는 종차별주의를 ‘자신이 속한 종의 이익을 위해 다른 종의 이익을 배척하는 편견 또는 왜곡된 태도’라고 정의한다. 종과 상관없이 지구상의 모든 생명체의 이익을 동등하게 고려해야 하며, 동물학대는 인간 중심의 비윤리적 행위라고 비판하고 있는 것이다.

바이오 인공장기에도 비슷한 논란이 제기될 수 있는 기술이 존재한다. 바로 이종장기 기술이다. 사람에게 이식할 수 있는 장기를 생산하

기 위해서는 다수의 동물을 희생할 수밖에 없다. 또, 형질전환 동물을 생산하기 위해 시도하다가 의도치 않은 돌연변이가 만들어질 수도 있다. 때문에 바이오 인공장기 기술의 발전은 동물과 관련된 다양한 윤리적 논란을 가져올 수도 있다.



동물의 무분별한 희생을 막기 위해 현재 많은 나라에서는 동물실험 조건을 매우 까다롭게 정하고 있다. (출처 : 셔터스톡)

현재 많은 나라에서 동물실험의 조건을 매우 까다롭게 정해놓고 있다. ‘인류 복지’ 혹은 ‘과학 발전’이라는 명분 아래 동물을 무분별하게 희생시키는 것을 막기 위해서다. 우리나라에서도 2008년부터 동물실험을 하기 위해서는 2년 마다 동물실험 윤리교육을 이수하고, 생명윤리위원회와 동물윤리위원회의 승인을 받아야 한다. 동물실험 윤리로 대표적인 것은 동물실험 대체(Replacement), 실험동물 수 감소(Reduction), 고통 최소화(Refinement)를 나타내는 ‘3R 원칙’이다. 바이오 인공장기의 개발 과정과 기술 확산 과정에서도 동물실험의 경우처럼 동물권 존중과 생명윤리에 관한 교육과 법적 체계가 정비되어야 할 것으로 보인다^{xliii}.

xliii. 현재 미국 식약청은 세포나 체조직 이식에 이용되는 동물들에게도 실험환경에서의 동물에 적용되는 IRB(임상시험심사위원회 Institutional Review Board)와 동물보호위원회의 규제를 적용하고 있다.

동물실험의 3R 원칙

대체(Replacement) : 동물 대신 세포나 조직배양, 수학적 모델로 동물실험을 대체하자는 원칙

감소(Reduction) : 유용한 목적에 활용하기 위한 동물실험에 최소한의 동물만을 사용하자는 원칙

정제(Refinement) : 동물실험을 하는 자는 실험 절차를 정교화하고, 동물의 고통이나 스트레스를 최소화하기 위해 마취제 등을 사용해야 한다는 원칙

이런 의견도 있어요!

‘동물복지 책임할당제도’ 도입 제안

“바이오 인공장기 도입을 위해서는 어느 정도의 동물 희생이 필요할 것 같습니다. 특히 이종장기의 경우 형질전환 동물을 생산하고 이용함으로써 이 문제와 직접적으로 관련이 있습니다. 동물권을 보호하기 위해서는 바이오 인공장기 기술 개발 기업과 ‘동물복지’를 위한 기관이 서로 상생 보조하며, 지속적으로 관리할 수 있는 제도가 도입돼야 할 것입니다. 한 가지 방법으로 ‘동물복지 책임할당제도’를 제안합니다. 바이오 인공장기 기술 개발 기업이 동물을 이용하는 만큼 동물 복지를 위해 공헌하도록 하는 것입니다. 이는 동물의 고통과 희생을 최소화는 데 도움이 될 수 있을 것이라고 생각합니다.”

동물 고통에 대한 연구를 통해 대응책 마련해야

“정부차원에서 ‘이종장기 생산을 위해 실험동물이 겪는 고통에 대한 연구’를 핵심 연구로 지정하고, 대응책을 마련해야 할 것입니다.”

기술이 발달할수록 동물 희생도 감소할 것

“세포 기반 인공장기와 전자기기 인공장기 기술이 이종장기 기술보다 먼저 개발되고 확산될 경우, 이종장기 개발을 위한 동물들의 희생은 점차 줄지 않을까 생각합니다.”

윤리 논란 없는 모피 코트의 등장

“모피 코트나 동물 가죽 의류, 상아 장식품 등은 환경운동가와 동물 보호가들로부터 지탄을 받는 대상입니다. 그러나 합성 섬유나 합성 수지로 만든 대체용품들은 그 특성과 완벽히 똑같은 것이 없어 한계가 있습니다. 바이오 인공장기 기술이 발달하면 이를 응용해 인공모피나 인공가죽, 인공상아 등을 제작할 수 있지 않을까요. 천연 재료와 똑같은 특성을 가진 인공재료들은 윤리적 논란 없이 소비자들의 기호를 충족시킬 수 있어 각광받을 것입니다.”

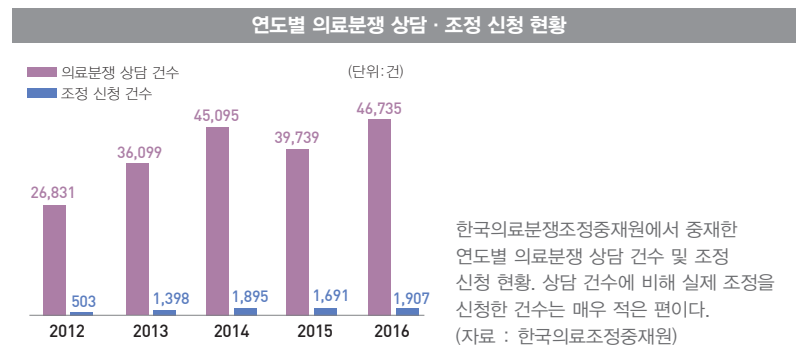
○ 바이오 인공장기 이식자의 권리와 법률적 문제

부작용 책임과 개인정보 활용, 저작권·재산권 분쟁 문제

바이오 인공장기의 이식 과정이나 회복 과정에서 부작용이 발생한다면 그 책임은 누구에게 물어야 할까. 이식한 바이오 인공장기로 인해 부작용(전자기기 인공장기의 오작동 등)이 생길 경우 환자는 치명적인 피해를 입을 수 있다. 피해를 당한 환자나 환자의 가족은 당연히 의료사고의 과실과 책임을 법적으로 따져볼 것이다. 이 때 잘못에 대한 책임을 바이오 인공장기를 만든 제조사(연구자)에 물을지, 이식을 수행한 의사에게

물을지에 대한 법률적 공방이 벌어질 가능성이 크다. 바이오 인공장기 기술이 확산돼 이식 건수가 늘어나면, 의료분쟁 가능성은 그만큼 증가할 수밖에 없다.

문제는 현행법상 의료사고의 입증 책임은 환자에게 있다는 것이다. 이 때문에 현재에도 전문적인 지식과 기술에 대한 이해가 요구되는 의료사고가 발생했을 때 지식이나 정보가 부족한 일반 소비자들은 보상을 요구하거나 분쟁에 대응하기가 무척 어려운 것이 현실이다. 소송을 제기한다고 해도 승소할 가능성이 무척 낮고, 손해배상액도 적은 편이다. 사법연감 등에 따르면 지난 2012년부터 2015년 사이 접수된 의료과실 소송은 총 4,109건에 이르지만, 1심 판결 결과 피해자들이 이긴 경우는 1.1% 수준인 41건에 그쳤다. 완전히 패소한 건은 1,003건(26.5%)에 달했다. 환자가 조정을 통해 병원에게서 받을 수 있었던 손해배상금 또한 신청한 금액보다 훨씬 적었다. 일례로 2016년 한국의료분쟁조정중재원에 접수된 조정 신청 건수는 1,907건이었고, 이들이 신청한 피해보상금액은 평균 7,475만 원이었지만 실제 받은 배상금은 평균 1,010만 원에 그쳤다¹⁰⁸⁾.



전자기기 인공장기에서, 법률적 공방이 일어날 수 있는 또 한 가지 문제는 건강 및 신체 정보에 관한 것이다. 환자에게 이식된 전자기기 인공장기에는 환자의 생체정보 등 건강과 관련된 많은 정보가 저장되어 있을 것이다. 문제는 환자에게 응급처치가 필요한 상황에 처했을 때다. 아무리 응급상황이라도 바이오 인공장기에 탑재된 환자의 건강 정보를 사용할 경우, 개인정보보호법에 저촉될 수 있다. 우리나라 개인정보보호법 제23조에는 ‘개인정보처리자가 건강에 관한 정보 등에 대해 정보 주체의 동의 및 타 법령에서 허용되지 않는 경우 처리해서는 안된다’고 정하고 있다. 이럴 때를 대비해 민감한 개인정보라 하더라도 응급상황과 같은 경우에는 환자나 제조사의 동의 없이도 필요 정보를 활용할 수 있는 예외를 두도록 법률을 개정할 필요가 있다. 어떤 경우에서도 환자의 목숨을 살리는 것보다 중요한 것은 없기 때문이다.

소프트웨어가 내장되어 있는 전자기기 인공장기 관련해서는 저작권·산권 관련 문제 또한 제기될 수 있다. 현행 저작권법 제101조에 따르면 전자기기의 프로그램 코드를 역분석할 수 있는 것은 ‘정당한 권한에 의해 프로그램을 이용하는 자’ 또는 ‘저작권재산권자의 허락을 받은 자’로 한정하고 있다. 이 법안에 따르면 전자기기 인공장기를 이식한 사람에게 응급상황이 벌어져 기기의 오류를 판단하기 위해 프로그램 역분석이 필요한 경우에도 저작권·산권 소유자인 제조업체의 동의가 필요하다. 결국 응급대처가 늦어져 환자가 큰 위험에 처할 수도 있는 것이다.

관련 법률 현황

(개인정보보호법 제23조) 개인정보처리자는 사상·신념, 건강에 관한 정보 등에 대해 정보 주체 동의 및 타 법령에서 허용되지 않는 경우 처리해서는 아니됨

→ 전자기기 인공장기 오류로 인한 응급 시술의 경우, 환자의 동의 없이 기기 내 건강정보 이용에 어려움 예상

(저작권법 제101조의 4) 정당한 권한에 의하여 프로그램을 이용하는 자 또는 저작재산권자의 허락을 받은 자에 한해 프로그램 코드 역분석 가능

→ 응급상황 시 전자기기 인공장기 기능상의 오류를 분석하기 위해서는 소프트웨어 역분석이 필요하나, 저작재산권 소유자인 제조업체 동의가 필요해 신속한 의료 대처에 어려움 예상

이런 의견도 있어요!

정보 부족으로 인한 소비자 피해 막아야

“바이오 인공장기는 고도로 발달한 첨단 기술의 총합체입니다. 따라서 제품이나 기술에 대한 이해가 부족한 일반 소비자의 입장에서는 인공장기의 기능상 오류 또는 오작동을 확인하기 어려울 수 있습니다. 제품의 오작동으로 사고가 발생할 경우 지식이나 정보 부족으로 충분한 보상을 받지 못할 가능성이 있습니다. 현재의 예를 들자면, 수술 과정에서 의료 과실이 일어나거나 자동차 급발진으로 인해 사고가 발생할 때, 그 책임을 입증하기가 쉽지 않습니다. 이와 비슷하게 다양한 기술이 융·복합적으로 접목된 바이오 인공장기 역시 오류나 오작동이 발생했을 경우 일반 소비자가 그 책임 소재를 파악해 법적으로 구제를 받기가 어려울 것 같습니다. 따라서 이를 막기 위한 대책이 필요합니다. 제품의 안전성을 확립하기 위해서는 체계적인 모니터링 및 인·허가 관리 기관을 만들어 운영해야 할 것 같습니다. 또한 바이오 인공장기 관련 의료분쟁을 전문적으로 다루는 중재기구도 필요할 것 같습니다.”

의료분쟁을 막기 위한 제언

“바이오 인공장기 이식의 보편화로 일어날 수 있는 의료분쟁을 미리 고려해 봐야 할 것 같습니다. 바이오 인공장기 이식자가 응급상황으로 병원에 갈 경우 의료진이 바이오 인공장기 이식 사실을 알 수 있는 체계가 있어야 오진이나 잘못된 치료로 인한 의료분쟁을 막을 수 있을 것입니다. 또한 장기부전의 상황을 맞은 환자라도 바이오 인공장기 이식을 원치 않는다면, 이를 거부할 수 있는 권리가 있어야 한다고 생각합니다. 이를 위해 환자가 올바른 정보 아래 바이오 인공장기 이식 여부를 결정할 수 있도록 바이오 인공장기 이식 후 발생할 수 있는 부작용, 또는 생존 기간, 생존 확률 등의 데이터를 모아 수치화하고 알려야 할 것입니다.”

4. 바이오 인공장기 기술과 문화



○ 새로운 몸, 삶에 대한 새로운 가치관 열다

‘호모 헉드레드’ 시대와 삶에 대한 인식 변화

2016년 10월 미국 앨버트 아인슈타인 의과대학의 쟈 비그(Jan Vijg) 교수 연구팀은 인간의 최대 수명이 115세라는 연구결과를 발표해 전 세계적인 주목을 받았다. 이 연구 결과의 근거는 전 세계 인구 패턴 분석으로부터 비롯된다. 1900년에 미국에서 태어난 아기의 평균 기대수명은 50세 정도였다. 2016년 태어난 아기의 기대수명은 79세다. 100여 년 사이에 인류의 기대수명은 급속히 증가해 무려 30년 가까이 늘어났다. 비그 교수 연구팀은 세계 40개 나라의 인구패턴을 분석한 결과, 100세 이상 초고령층 인구 증가 속도가 가파르게 늘어나다가 1980년대부터는 크게 느려졌다는 사실을 발견했다. 그러다가 그 속도가 1990년 이후 완전히 멈추었다는 것이다¹⁰⁹⁾. 이러한 연구 결과를 바탕으로

인간의 기대수명은 결국 115세보다 더 늘어날 수는 없을 것이라고 결론 내린 것이다. 연구 결과가 세계적인 학술지인 <네이처>에 발표되자 이를 반박하는 내용의 연구 결과도 속속 등장했다. 인간이 영원히 살지는 못하겠지만, 미래의 과학기술 발전으로 115세보다는 더 오래살 수 있을 것이라는 주장들이었다¹¹⁰⁾.

기대수명 논쟁을 차치하고라도, 인류는 현재 이 지구상에 나타난 이래 가장 장수하는 시대를 살고 있다. UN은 이미 2009년 ‘세계인구 고령화 보고서¹¹¹⁾’를 내놓으며 인류는 2020년 경 평균 수명이 100세에 이르러 ‘호모 헉드레드의 시대’를 맞을 것이라고 예견했다.



2017년 117세로 타계해 세계 최고령으로 기네스북에 등재된 자메이카의 바이올렛 브라운. 그녀의 타계로 세계 최고령자 타이틀은 일본 규슈 가고시마현에 거주하는 다지마 나비에게로 갔다. 다지마는 현재 117세로 브라운보다 5개월 늦게 태어났다. (출처 : 연합뉴스)

노화되거나 망가진 장기 하나를 바이오 인공장기로 대체한다고 해서 그 사람의 수명이 급격히 증가한다고 단정할 수는 없을 것이다. 인체는 수많은 장기와 조직, 세포가 유기적으로 작용하는 복잡한 시스템이기 때문이다. 인체의 다른 모든 부분이 함께 새로워지지 않는 한, 바이오 인공장기 이식으로 늘어나는 수명은 한계가 있을 것이다. 그렇다고 해도 바이오 인공장기 기술이 인류의 건강수명을 연장하는 데 큰

기여를 할 것이라는 점에는 많은 사람들이 동의한다. 바이오 인공장기 기술을 포함한 생명공학 기술의 발전으로 앞으로는 전보다 건강하게 사는 고령 인구가 더 많아질 것이다.

고령자가 신체적 불편함을 바이오 인공장기로 극복할 수 있다면, 더 활발하게 사회 활동에 참여하게 될 것이다. 길어진 수명에 맞춰 인생을 계획하고 살아가야 한다는 사회적 인식 또한 확대될 것이다. 과거에는 60대에 은퇴해 조용한 노후를 보내는 것을 당연히 여겼던 시대도 있었다. 그러나 기존에 인생을 유년기, 청년기, 중년기, 노년기 등으로 구분하던 것을, 앞으로는 더 자세히 나누어 구분하고 더 오래, 활발하게 사는 삶을 계획할 것이다.

미래에는 인생 이모작, 삼모작^{xliv}. 뿐 아니라 더욱 다양한 직업을 경험하며 살아갈 수 있을 것이다. 이에 따라 결혼, 육아, 교육 등에 대한 가치관도 바뀔 가능성이 있다. 부모 자녀와의 관계도 부양과 피부양의 역할에서 벗어나 새로운 관계를 정립해 나갈 것으로 예상된다.



2017년 미국 샌디에이고에서 열린 '락앤롤 샌디에이고' 하프 마라톤 대회에서 해리엇 톰슨(94세 · 가운데)이 결승선을 향해 뛰고 있다. 그녀는 이번에 하프 마라톤을 뛴 세계 최고령 여성으로 기록되었으며, 2년 전에는 마라톤 풀코스를 완주한 최고령 여성으로 기록되기도 했다. (출처 : 연합뉴스)

xliv. 전 생애 동안 2개 혹은 3개의 전혀 다른 직업을 가지고 살아간다는 뜻

장기부전이라는 치명적인 상황에서 벗어나 다시 건강하게 살게 된 이들은 보다 긍정적이고 적극적인 태도로 삶을 대하고 살아갈 가능성이 크다. 현재 장기 이식 수혜자의 삶의 질을 조사한 연구보고서들에 따르면, 이식 수술 후 대부분의 수혜자들이 가치관이나 라이프 스타일의 변화를 겪었다고 한다. 특히 중장년 이후 이식자들은 예후가 좋다면, 덤으로 얻게 된 생명에 감사하며 더욱 적극적인 태도로 삶을 대하게 된다는 것이다. 이를 볼 때 바이오 인공장기를 이식받아 건강을 되찾게 된 이들은 전보다 더 긍정적이고 열성적인 태도로 삶을 즐기고 활발히 활동하게 될 수 있을 것이다.

‘건강’에 대한 개념이 바뀔 가능성도 있다. 지금까지의 건강이란 ‘질병이 있다면 치료를 해 신체의 보편적인 정상 상태를 유지하는 것’이었다. 즉, 아프지 않은 상태를 건강하다고 했다. 그러나 바이오 인공장기 이식 기술이 보편화돼 질병 치료뿐 아니라 신체 기능 강화를 위해서도 사용된다면 이러한 정의가 달라질 수 있다. 아프지 않을 뿐 아니라 신체의 모든 부분이 기능적으로 완벽한 상태를 얻어야만 ‘건강하다’고 할 수 있는 정도로 건강의 기준이 상향될 것으로 보인다.

장기의 부품화로 생명의 소중함 퇴색할 수도

바이오 인공장기 이식 기술을 맹신하는 풍조가 퍼진다면 인체 장기는 ‘남으면 언제든지 바꿀 수 있는 것’이라는 인식이 생겨날 위험도 있다. 현대인들은 암이나 심혈관질환 같은 치명적인 질병을 피하고, 건강을 유지하기 위해 다양한 노력을 한다. 운동을 하거나 영양제를 먹고, 술을 줄이며 금연을 한다. 그러나 언젠가 간암에 걸려도 바이오 인공

간으로 손쉽게 교체할 수 있는 날이 온다면 음주에 대한 경각심이 매우 낮아질 지도 모른다.

문제는 기술이 완성되기도 전에 과도한 기대가 먼저 확산되는 것이다. 가까운 미래에 바이오 인공장기는 영구적인 사용 목적이 아니라 장기 이식을 기다리는 동안의 가교(架橋) 기술로써의 역할을 할 것이다. 기술은 아직 성숙하지 않았는데 기술에 대한 기대만 지나치게 높다면 건강 유지나 신체 보호를 위한 노력을 소홀히 해 문제가 되는 사례가 생길 수도 있다. 또한, 바이오 인공장기 연구나 이식을 위해 사용되는 동물이나 인체유래물(세포, 조직 등)을 가변이 여기는 분위기가 생길 지도 모른다. 결국 생명의 소중함에 대해 무감각해지는 생명경시사상의 확산이 우려되기도 한다.

이런 의견도 있어요!

심리의 중요성이 높아질 듯

“장기는 고칠 수 있지만 마음은 갈아 끼우지 못하므로 마음에 관한 연구, 즉 심리학의 중요성이 갈수록 더 높아질 것 같습니다. 심리 치료와 상담 또한 더욱 보편화되고 확산될 것 같습니다.”

◦ 장기 교체라는 새로운 문화의 탄생

맞춤형 신체 설계 문화의 등장

우리는 외모에서 마음에 들지 않는 부분이 있다면 미용성형 수술로 변형할 수 있는 시대에 살고 있다. 바이오 인공장기 기술이 고도로 발달하면, 마음에 들지 않는 신체 장기를 자신이 원하는 대로 바꿔가며 살 수 있게 되지 않을까. 사진작가가 더 잘 볼 수 있는 바이오 인공안구를 이식받고, 모델을 꿈꾸는 사람이 이상적인 비율의 바이오 인공팔과 다리를 이식받는 세상이 올지도 모른다. 해독력이 높은 슈퍼 간을 이식받는 애주가나 인공피부 이식으로 피부 색깔을 바꾸는 사람이 나타날지도 모른다. 이처럼 먼 미래에는 자신의 이상에 맞춰 신체를 마음대로 디자인해 변화시키는 새로운 문화가 생겨날 가능성이 있다.



현재 미용 성형수술을 하듯, 미래에는 바이오 인공장기 기술을 이용하여 신체를 선호하는 형질로 바꾸는 문화가 생겨날 지도 모른다. (출처 : 셔터스톡)

여기에 대한 걱정스런 시선도 있다. 자신의 형질^{xlv}을 원하는 대로 디자인하고 바뀌나갈 수 있는 시대가 온다면, 점차 더 나은 형질을 추구하고, 주기적으로 신체의 장기나 조직을 점점·교체하고 수리하는 등 기술 의존적인 문화가 발생할 수도 있다. 기술이 더욱 고도화돼 원하는 한 언제든지 신체 기능을 강화시키고 생명을 연장할 수 있다는 인식이 싹트면 물질만능주의로 변질될 가능성도 무시할 수 없다. 이같은 부정적인 문화가 확산되면 바이오 인공장기 보급 자체를 반대하는 사람들도 나타날 것이다. 결국 바이오 인공장기 기술에 대한 사회적 수용도가 낮아지고 반과학적 반기술적 정서가 퍼져 사회적 갈등으로 표출될 수 있으므로 이에 대한 대책 마련이 필요하다.

이런 의견도 있어요!

외모지상주의의 심화

“언젠가 바이오 인공장기 기술을 활용해 피부색을 바꾸거나 입체적으로 문신을 하고, 귀 모양을 달리하는 식으로 개성을 표현하는 날이 오지 않을까 생각합니다. 그렇게 된다면 외모를 보고 그 사람의 경제력을 판단하거나, 선호하는 외형적인 특징을 가진 사람을 우대하는 등 외모지상주의가 더욱 심화될 수 있지 않을까 걱정됩니다.”

xlv. 개별 생물체에게서 나타나는 모양이나 속성

액티브 시니어의 등장

“늘어나는 고령 인구들이 바이오 인공장기 기술을 통해 건강해진다면 적극적인 문화 향유 계층인 액티브 시니어(Active Senior)가 등장할 것 같습니다. 예술 분야를 예로 들면, 경험 많은 고령 예술가들이 활동을 지속적으로 활발하게 함으로써 문화 발전에 이바지할 수 있을 것 같습니다. 경제력 있는 선배 예술가들이 양질의 콘텐츠에 투자하고, 노하우를 전수함으로써 전반적인 문화 산업이 활성화되지 않을까요. 다만 소수의 예술가들이 너무 긴 기간 동안 독점적인 위치에 있을 경우 신진 예술가들의 데뷔와 활동에 방해가 될 위험도 있다고 생각합니다.”

세대 융합 콘텐츠의 등장

“고령자들이 바이오 인공장기로 건강을 되찾고 활발하게 문화를 향유한다면, 청년층과 노년층의 관점이 합쳐진 새로운 문화 콘텐츠가 탄생할 수 있다고 생각합니다. 청년층의 신선한 아이디어와 중장년의 노하우와 인프라가 결합한다면 새로운 세대 융합 콘텐츠가 생성돼 사업화할 수 있지 않을까요. 반대로 문화 콘텐츠가 특정 세대 위주로만 형성된다면 세대 갈등이 발생할 것 같습니다.”

5. 바이오 인공장기 기술과 환경



○ 바이오 인공장기가 동물 생태계에 미치는 영향

희귀 멸종 위기 동물의 수명 연장에 활용

‘외로운 조지(Lonesome George)’는 갈라파고스 제도에서 살던 마지막 ‘핀타섬땅거북’의 이름이다. 2012년 6월 24일 외로운 조지는 후손을 남기지 못하고 죽었다. 죽을 당시 추정 나이는 약 120세. 사람들은 이 거북을 번식시키려고 애를 썼지만 실패했고, 결국 ‘핀타섬땅거북’은 멸종하고 말았다.

바이오 인공장기 기술을 외로운 조지와 같은 멸종 위기 동물이나 희귀 동물에 적용한다면 어떨까? 생명을 연장하고 개체 수를 확보하는데 도움이 될 것이다. 이를 위해서는 서식지 회복 등 멸종 위기에 대한 근본적인 대책도 함께 고민해야 할 것이다.

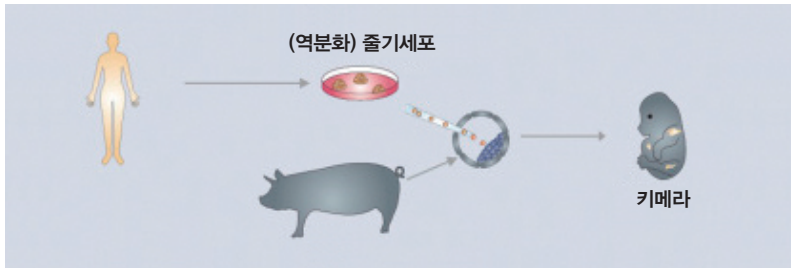


결국은 멸종하고만 갈라파고스 제도의 마지막 핀타섬땅거북 ‘외로운 조지’ (출처 : 위키미디어커먼즈)

변종 동물 발생으로 생태계 혼란 가능성도

바이오 인공장기를 연구·개발하는 과정에서 유전자 조작으로 동물의 형질전환을 시도할 경우, 생태계에 좋지 않은 영향을 미칠 가능성도 우려된다. 형질전환 동물이 실험실이나 연구실 밖으로 나가 실험동물이 아닌 동물과 교배나 번식을 하면, 또 다른 변종 동물이 나타나는 등 예측하지 못한 부작용이 발생할지도 모른다.

키메라 장기 개발이 환경에 나쁜 영향을 미칠 수 있다는 우려도 있다. 우리나라에서는 윤리적인 이유로 금지되어 있지만, 미국 등 키메라 장기 개발 연구가 진행되고 있는 나라도 있다. 키메라란 그리스 신화에서 사자의 머리와 양의 몸통에 뱀의 꼬리를 한 괴물의 이름에서 따온 용어로, 서로 다른 종의 유전자가 뒤섞인 종을 일컫는다. 키메라 장기는 다른 동물 배아에 인간의 줄기세포를 주입해 인간의 장기를 자라게 한 뒤 이식에 활용하는 식으로 연구되고 있다.



키메라 생성 과정. 돼지의 배아에 사람의 (역분화) 줄기세포를 삽입하면, 사람과 돼지의 세포가 뒤섞인 키메라가 생성될 수 있다¹¹²⁾. (출처 : Cell, KISTEP 재가공)

키메라 장기에 대해 걱정하는 사람들은 동물 배아에 주입된 인간 줄기세포가 원하는 장기가 아니라 뇌로 발달하는 경우, 인간과 같은 의식을 가진 존재가 생성될 수 있다고 우려한다. 또한 실험 과정에서 인간과 동물의 유전자가 마구 뒤섞인 잡종 생명체가 태어날 가능성도 제기한다. 이런 생명체가 연구실 밖으로 나갈 경우 생태계를 혼란시킬 수 있으며, 잡종 생명체를 처리하는 과정에서 윤리성 논란이 일어나거나 환경을 오염시키는 결과를 낳을 수 있다고 주장한다. 이같은 위험성을 예방하기 위해서는 연구 단계에서부터 환경단체와 기술전문가들이 함께 머리를 맞대고 다양한 가능성에 대해 의논하고 대책을 세워야 할 것이다.



이런 의견도 있어요!

폐기되는 장기로 인한 환경오염 가능성

장기간 치료를 받던 중증 질환 환자들이 바이오 인공장기를 이식받아 일찍 퇴원하면 치료과정에서 나오는 의료 폐기물이 감소돼 환경에 유익할 수 있을 것입니다. 그러나 질병 때문에 망가진 장기를 처리하는 과정에서 환경오염이

발생할 수 있다고 생각합니다. 특히 바이오 인공장기 기술이 보편화돼 이식 건수가 급격히 늘어나면, 적출 후 폐기되는 장기도 많아져 처리 과정에서 환경에 나쁜 영향을 미칠 수도 있을 것 같습니다. ☹☹

바이오 인공장기, 안전한 소재로 만들어야 할 것

바이오 인공장기 연구에 쓰이는 다량의 약품과 자원도 환경에 영향을 줄 것입니다. 앞으로 만들어질 바이오 인공장기는 유해한 약품이나 소재를 쓰지 말고 환경에도 영향을 미치지 않는 더욱 안전한 소재로 만들어지면 좋겠습니다. ☹☹

바이오 인공장기 재활용 방법도 고민해야

바이오 인공장기 사용이 늘어나면 그에 따른 종고 기기나 폐기물 처리의 문제도 나타날 것입니다. 바이오 인공장기 이식자가 사망했을 때, 이식된 바이오 인공장기만 떼어 처리할 것인지도 문제입니다. 한번 사용했던 바이오 인공장기는 내구성이나 위생 같은 문제 때문에 인체에 다시 사용하기는 어려울 것입니다. 그렇다고 기존의 쓰레기 처리 방식으로 묻거나 태우면 환경을 크게 오염시킬 것입니다. 대안으로 바이오 인공장기 관련 사고나 각종 의료 관련 연구에 재활용하는 것을 생각해 볼 수 있을 것입니다. 신체 해부 실습 등에 재활용하는 방법도 적극 고려해 보아야 할 것입니다. ☹☹

동물 사체 처리로 인한 환경오염은 감소할 것

오가노이드 등 바이오 인공장기 기술에서 파생된 기술로 동물실험을 대체할 수 있다고 생각합니다. 살아있는 동물을 이용한 실험이 줄어들면, 실험 후 사체 처리로 인한 환경오염은 줄어들지 않을까요. ☹☹

.....

이종장기 생산용 동물 폐기 방식에 대한 논의 필요

이종장기를 생산할 때는 대상 동물에서 필요 장기만 적출한 후 나머지 부분은 폐기하게 됩니다. 이종장기를 대량생산할 때 발생한 폐기물을 매장하면 지하수 오염 등 환경오염이 불가피할 것입니다. 그러므로 이종장기 폐기물을 처리하는 방식에 대해 논의가 필요하다고 봅니다.

바이오 인공장기를 우리나라 대표 미래 기술로 만들기 위한 정책 제언



진시황이 불로초를 찾기 위해 신하를 보내 세상 끝까지 뒤졌듯, 오래 건강하게 사는 것은 인간의 아주 기본적인 욕망이다. 바이오 인공장기는 불로초처럼 생명 연장의 열쇠가 될 기술 중 하나로 불린다. 기술이 완성되면 강력한 고부가가치 산업으로 발전할 것으로 예상돼 선진국들이 개발에 힘을 쏟는 분야이기도 하다. 우리나라도 아직 뚜렷한 강자가 없는 바이오 인공장기 기술의 각축장에 도전장을 던지고 연구개발에 힘쓰고 있다.

2017년 기술영향평가는 미래에 바이오 인공장기 기술이 본격적으로 상용화됐을 때 경제와 사회 등 국가 전체에 미치는 영향을 미리 생각해 보고 합리적인 대안을 찾기 위해 수행되었다. 여러 전문가들과 우리나라 과학기술 발전에 관심 있는 시민들이 머리를 맞대고 바이오 인공장기 기술의 좋은 영향은 극대화하고, 나쁜 영향은 최소화할 수 있는 방안을 의논했다. 대상기술의 명칭과 범위를 정하는 데도 치열한 토론이 벌

어질 정도로 쉽지 않은 과정이었지만, 2017년 기술영향평가 참여자들은 바이오 인공장기 기술이 우리 경제·사회·윤리·문화·환경에 미칠 다양한 영향에 대해 토론하며 다음과 같은 정책적 제언을 도출했다.

○ 기술 개발 활성화를 위한 다양한 지원 필요

바이오 인공장기 기술은 다양한 산업을 활성화시키고 신규 산업과 일자리를 창출하는 등 경제적으로 큰 잠재력을 가지고 있다. 거대 독과점 기업이 시장을 독식하는 것을 막고 우리나라가 세계 시장의 기선을 잡기 위해서는 정부 차원의 다양한 지원이 필요하다.

먼저 바이오 인공장기를 본격적인 산업으로 성장시키기 위해서 여러 핵심 기술을 개발해야 한다. 세포 분화 및 대량배양, 이식거부반응 극복 등 바이오 인공장기의 핵심 기술을 확보하는 것이 중요하다. 시장 선점을 위해서는 이종장기나 세포 기반 인공장기, 전자기기 인공장기 등 각 분야에 활용되는 요소 기술들을 최대한 발굴하고 지원해 세계적 수준의 원천기술을 확보해야 할 것이다. 또한 기술 개발부터 임상시험까지 효과적이고도 체계적으로 기술 확보가 가능하도록 단일화된 국가 연구개발 사업을 추진할 필요가 있다.

두 번째로 우리나라가 세계 기술 시장을 선점하기 위해서는 기술의 유효성과 안전성을 확보하는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위해 정부 차원의 적극적인 지원이 필요하다. 기술 개발 단계별로 안전성을 검증할 수 있는 기준과 절차를 마련하고, 제품 개발 이후에는 추적 관리, 유효성 평가와 인증, 제품 표준화를 위한 연구 및 관리 체계를 마련할 필요가 있다.

바이오 인공장기 기술 상용화를 위한 핵심 요소 기술(예시)	
이종장기	· 형질전환, 동물 바이러스 혹은 과도한 면역억제제 사용에 따른 새로운 질환 및 감염병 발생 가능성 검증 · 자가면역 시스템으로 인한 급성 거부반응 극복 기술 · 형질전환 무균배지 대량생산 기술 및 시스템 확보 등
세포 기반 인공장기	· 건강한 세포주의 확보 및 대량배양/보존 기술 · 특정 세포로의 분화, 분화된 세포의 배양/보존 기술 · 세포 미세 환경 구현 기술 · 종양 조직 혹은 원치 않는 조직으로의 분화 가능성에 대한 검증 등
전자기기 인공장기	· 신경조절 기술 · 근골격 기능 대체 및 증강 기술 · 생체정보의 해킹 방지 기술 · 신체 내에서의 기기 오작동 검증 등

(참고 : 국가중점기술 전략 로드맵(미래창조과학부('14)), 농림식품 과학기술육성 중장기 계획(농림축산식품부('13)))

또 한 가지 필요한 정책은 BT-ICT, BT-의료 분야와 같은 기술 분야 간, 혹은 연구계-산업계-부처 간의 융합 및 협업 연구 기반을 조성하는 것이다. 기존 기술을 고도화하고 기술과 산업 전방에 파급효과가 큰 바이오 기술(BT)을 중심으로 기술이 융합될 수 있도록 노력해야하며, 다양한 전문 인력들이 활발히 연구 협력할 수 있도록 도와야 한다. 바이오 인공장기 기술은 생명, 재료, 임상, 기계 등의 다양한 기술이 융합되는 광범위한 분야로 해당 전문가들의 장기간에 걸친 공동연구 추진이 중요하기 때문이다.

보다 효율적인 융합 연구를 위해서는 정부 부처끼리의 협업도 필요할 것이다. 현재는 연구개발[기초·원천·임상]은 물론 제품 인허가 등 상용화 과정까지 정부 부처별로 각각 분산 지원하고 있다. 바이오 인공장

기 연구개발에 대한 부처 간 중복 투자와 정책 혼선을 막기 위해서는 더욱 효율적인 지원 체계를 구축해야할 것으로 보인다.

○ 맞춤형 지원이 기술 사업화 앞당길 듯

기술 사업화와 산업 육성을 위한 지원도 필요하다. 우선 성공적인 기술 사업화와 산업화를 위해서는 전문 인력 양성에 대한 정책이 요구된다. 바이오 인공장기 기술을 하나의 산업으로서 꽃 피우기 위해서는 장기적으로 전문 인력을 배출하고 관리할 수 있는 국가 차원의 적극적 지원이 필요할 것으로 보인다. 연구개발 및 임상 전문 인력 확충을 위해 정부 연구개발 프로젝트에 신규 연구원 참여를 확대하고, 국내 대학에 관련 학과를 신설·육성하는 등 다각적인 노력이 요구된다. 학부 단계에서부터 생명·의료·공학 등 다양한 분야의 융합 교육을 통한 핵심 인재를 양성해 나간다면 바이오 인공장기 산업화에 큰 활력을 불어넣을 수 있을 것이다. 예를 들면 전자기기 인공장기를 개발할 의공학 전공자 육성을 위해 대학에 의용생체공학과와 같은 융합학과를 확대 개설하는 것이다. 또한 연구 기관의 학자와 실제 이식을 수행하는 병원 의료진 간의 인력 교류 및 연계가 강화된다면, 보다 빠른 기술 사업화가 가능할 것으로 기대된다.

연구개발 단계부터 사업화 관점을 고려한 체계적 지원도 마련해야 한다. 최종 수요처인 병원에서 기초·원천 기술의 개발부터 창업·사업화(제품 출시)까지 가능할 수 있도록 일원화해 지원하는 것도 한 방법일 것이다. 기업들의 적극적 참여를 유도할 수 있는 제도적 장치도 필요

하다. 바이오 인공장기 산업화는 막대한 개발 비용이 드는 일이다. 그래서 재정적 난관에도 굴하지 않고 제품 개발이라는 최종 목적지에 다다를 수 있도록 하려면 이러한 뒷받침이 필요한 것이다. 연구·제조업체(대학, 기업, 연구소)와 최종 사용자(의사, 병원)가 서로 긴밀하게 협력하고 데이터를 공유할 수 있는 체계를 구축해 실제적인 임상 근거를 착실히 확보해 나가는 것도 도움이 될 것이다. 특히, 바이오 인공장기를 실제로 시술하는 임상 의사들의 경험과 요구에 귀 기울일 수 있는 체계는 제품 혁신에 매우 중요하다. 의사와 병원이 주축이 되는 바이오 인공장기 연구센터 혹은 벤처기업의 창립을 독려하고 지원하는 방법이 한 예가 될 것이다. 한편으로는 바이오 인공장기의 재현성을 높이기 위해 국가 차원에서 환자 맞춤형 장기 설계나 제품 생산 전 과정에 대한 품질관리를 제공하는 시스템도 마련되어야 할 것이다.

바이오 인공장기 산업을 육성하기 위해서는 글로벌 시장을 선점하고 관련 신산업이 다양하게 생겨날 수 있도록 바이오 인공장기 생태계를 조성하는 것도 중요하다. 이를 위해 정부는 관련 기술의 창업·사업화를 촉진하고 민간투자를 활성화하는 등 종합대책을 마련해야 한다. 또한 바이오 인공장기 기술을 다양한 산업으로 접목시켜 관련 산업이 활성화되고 양질의 일자리가 늘어날 수 있도록 유도해야 한다. 예를 들자면, 줄기세포와 바이오 프린팅 기술을 접목해 오가노이드 생산 기술을 개발하고, 대량생산 시설을 만들어 일자리를 창출하는 것이다. 세포·조직 배양 등 기존의 관련 산업뿐 아니라 기술 개발에 활용되는 소재, 의료용 동물 생산, 센서 등의 부품, 장비 같은 다양한 전후방 산업도 함께 커나갈 수 있도록 적극 지원해야 할 것이다.

바이오 인공장기 연구개발과 사업 기획을 성공시키기 위해 고려해야 할 사항도 있다. 그 첫 번째는 기술 수요다. 국내 이식 시장의 현황과 실제 임상 경험 및 임상 현장의 수요를 정확히 파악해 기획에 반영해야 한다. 또한 기술에 대한 불필요한 논란과 의견 대립을 피하기 위해서는 지속적으로 국민의 의견을 수렴하고 소통의 장을 마련해 국민의 의식 변화를 꾀하는 것도 필요하다. 환경적 파급효과도 꼼꼼히 챙겨야 한다. 바이오 인공장기 생산 과정이나 비임상 과정에서 쓰이는 동물이 생태계에 미칠 수 있는 영향을 미리 예측하고 분석하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 연구단계에서부터 환경단체와 기술전문가 등의 분석과 의견을 수렴해 환경 및 생태계 보존을 위한 규제를 만들어야 할 것이다.

○ 지나친 규제는 풀고 필요한 제도는 만들고

우리나라의 현행 관련 법률에는 바이오 인공장기 산업 및 연구개발을 제한할 수 있는 규제 내용이 많다. 바이오 인공장기 기술의 조기 시장 진입을 위해서는 연구개발을 가속화함과 동시에 관련 규제 및 제도를 선제적으로 정비할 필요가 있다. 이를 위해서는 기술개발의 흐름에 맞추어 연구기관과 규제기관이 함께 연구개발 및 인허가 가이드라인을 만들어 나가야 할 것이다. 바이오 인공장기의 안전성과 유효성, 법적 규제에 대한 가이드라인과 평가 기준안을 명확히 마련한다면 기업들의 적극적인 참여 또한 끌어낼 수 있을 것이다. 단, 제도와 규제를 마련할 때는 환자들의 편익과 혜택에 대한 고려가 빠져서는 안된다.

바이오 인공장기 제품에 대해 조건부 허가를 확대 적용한다면 바이오 인공장기의 상용화를 촉진시킬 수 있을 뿐 아니라 환자들의 의료 혜택을 확대하는 효과도 있을 것이다. 예를 들어 전자기기 인공장기의 경우 식품의약품안전처의 승인이 있을 때만 사용할 수 있는데, 현재 승인된 것은 신장 투석기와 수술에 사용되는 체외기 뿐이다. 전자기기 인공장기의 하나인 인공심장의 경우, 미국에서 개발된 인공심장인 하트메이트Ⅱ가 FDA 승인을 받고 다양한 수술 사례를 쌓고 있는데 반해, 한국인공센터에서 개발한 KH-VAD^{xlvi}는 아직 비임상 단계에 머물고 있는 것도 이와 무관하지 않다. 하지만 빠른 기술 상용화만을 위한 허가절차는 환자들에게 큰 피해를 입힐 수도 있으므로 기술의 안전성과 유효성 역시 세밀하게 고려해야 할 것이다.

규제를 효과적으로 운영하기 위해서는 현장의 목소리에 귀 기울여 상시 수렴·개선하는 채널을 구축하는 것도 필요하다. 규제 맵을 구성하는 등 규제 개선 상황을 종합 점검할 수 있는 체계도 만들어야 한다.

또한 바이오 인공장기를 개발하고 이식하는 데 필요한 법적·제도적 장치를 구축해 나가야 한다. 현재로서는 바이오 인공장기 상품화를 위해 요구되는 임상시험과 관련된 규정이 미비한 실정이다. 예를 들어 전자기기 인공장기 관련 개발 및 임상시험 규정은 관리와 규제 중심으로 마련된 가이드라인 수준이다¹¹³⁾. 이종장기 분야를 보자면 현재의 기술 수준을 반영한 형질전환 동물 제조 및 이종장기 임상시험에 대한

xlvi. Venticle Assist Device. 심장의 기능을 대신하는 체외 제어 시스템. 환자의 심장 및 동맥과 연결된 혈액 주머니를 조절하여 혈류를 환자의 체내로 방출하는 양심실 보조장치다.

기준이 없다. 관련된 가이드라인은 있지만 10년이 넘도록 개정되지 않았다^{xlvi}. 이종장기 기술 수준이 오랫동안 정체됐기 때문이다. 이같은 가이드라인을 재검토해 명확하고 체계적인 법적·제도적 장치를 만들어 관련 연구와 산업화에 기준을 제공해야 한다. 바이오 인공장기 및 장기 이식을 전문적이고도 체계적으로 수행할 수 있는 전문병원을 설립하는 것도 고려할 사항이다.

바이오 인공장기 관련 법·규제 현황		
구분	현황	문제점
전체	바이오 인공장기 연구개발 정책 및 규제(인허가 등)가 부처별로 분산·운영	바이오 인공장기 기술 보급·확산에 어려움 발생
이종장기	이종장기 임상/비임상시험 등 가이드라인 미비 '06년 가이드라인 발간 이후 개정사항 없음	기술 환경 변화를 미반영
	이종 이식 및 의료용 동물 생산·공급에 대한 가이드라인 부재	법적 기준 부재로 이종 이식 연구 및 산업화에 어려움 발생
세포 기반 인공장기	생명윤리법에 기초연구와 임상연구를 구분하지 않은 포괄적 금지와 포지티브 방식 규제로 연구에 제한 ※ (예) 배아 연구는 화귀·난치병 치료 등에 대해서만 연구 가능	원천기술 확보 및 산업화에 어려움 발생
전자기기 인공장기	개인정보보호법 및 지식재산기본법에 모든 개인정보(건강정보) 활용 및 소프트웨어 오류 개선 시 환자 및 제조사 동의 절차 필요	기기 오작동으로 인해 응급상황 발생 시 의료진의 신속한 응급 대처(건강정보 추출, 소프트웨어 오류 개선)가 어려움

xlvi. '이종이식체제의 비임상 및 임상시험에 대한 가이드', '이종이식체제의 범위 및 원료동물 가이드', '이종이식체제의 품질관리 및 감염관리 가이드'가 존재하지만 2006년 이후 수정 사항이 없다.

○ 국민과의 소통으로 기술의 사회적 수용성 높여야

바이오 인공장기 기술의 사회적 수용성을 높이기 위한 정책도 필요하다. 바이오 인공장기는 생명과 건강 문제에 직결된 기술이다. 따라서 기술이 적용되면 국민들의 큰 관심을 모을 것이고, 다양한 담론들이 생겨날 것이다. 이때 새로운 기술에 대한 막연한 두려움 때문에 부정적인 의견이 먼저 퍼진다면 기술의 사회적 수용성이 크게 떨어질 수 있다. 반대로 기술에 대해 지나치게 높은 기대가 확산될 경우 생명경시 문화가 확산되거나, 기대와 실제 기술력의 차이로 혼란이 일어날 수도 있다. 이와 같은 부작용을 막기 위해서는 바이오 인공장기 기술에 대한 정확한 정보를 시민들에게 확실히 전달하는 것이 중요하다. 연구개발 단계부터 기술 수준이나 안전성 또는 부작용 등에 대한 자료를 투명하게 공개해 국민들에게 올바른 지식을 전달함으로써 기술에 대한 올바른 인식을 제고하는 것이 필수적일 것으로 보인다.

기술에 대한 사회적 합의를 이끌어내기 위해서는 대국민 소통도 지속적으로 강화해야 한다. 이를 위해서는 금번 2017년 기술영향평가 시민포럼과 같이 시민들이 기술의 사회·윤리·문화적 쟁점에 대해 토론할 수 있는 다양한 장을 마련해 대중적 담론을 형성하고, 사회적으로 합의할 수 있도록 해야 한다. 대국민 홍보를 통해 기술 정보를 널리 알리고, 다양한 채널을 마련하여 국민과 소통하는 등 기술에 대한 사회적인 검토와 합리적 대안을 끊임없이 탐색해 나가야 할 것이다.

○ 합리적인 기술 사용을 위한 의료·윤리·법률 정책 갖춰야

바이오 인공장기 이식에 대한 적절한 의료 정책 또한 마련해야 한다. 먼저 국가 의료 재정을 고려한 합리적인 보험급여 모델을 개발해야 한다. 보급화 초기에는 바이오 인공장기 이식에 높은 비용이 들 것으로 예상된다. 이로 인해 소득 수준에 따라 접근에 불평등이 생기지 않도록 국민건강보험 등을 통해 비용을 보조하게 될 것이다. 이 때 국민건강보험을 어느 범위까지 적용할 지, 소득 수준에 따른 국가의 의료비 보조는 어느 비율까지 할 지 등 관련 기준을 합리적으로 설정해야 할 것이다. 이는 사회적인 평등을 실현하기 위해 매우 중요한 과제이다.

또한, 기술이 충분히 발달하더라도 바이오 인공장기 기술을 단순 미용 등의 목적으로 무분별하게 사용하지 않도록 이식의 적용 범위에 대한 기준도 명확히 마련해야 한다. 이는 국가 의료 재정 낭비를 막아 사회적 비용을 줄이기 위해서도 반드시 필요하다. 바이오 인공장기 기술이 널리 보편화될 경우 유사 제품이 제조되거나 제품의 불법 유통·불법 이식 등의 범죄가 일어날 수도 있다. 이를 방지하기 위해서는 바이오 인공장기의 수요와 공급은 물론 이식 수행 병원도 관리할 수 있는 체계가 마련돼야 할 것이다.

바이오 인공장기 기술에는 인체유래물을 얻고 사용하는 데 관련된 문제, 동물권 문제 등 각종 생명윤리적 논쟁거리가 결부되어 있다. 이 같은 윤리적 문제 요소를 최소화하고 기술이 사회적으로 폭넓게 수용되도록 하려면 가장 먼저 바이오 인공장기를 연구하거나 이식하는 전문가들의 윤리 의식을 강화해야 할 것이다. 바이오 인공장기 연구자들은 인간 복제, 배아 파괴 등 윤리적 논란이 될 수 있는 사항에 대

한 연구 윤리 지침을 스스로 마련하고 이를 준수해야 한다. 또한 의료계는 바이오 인공장기를 이식할 때 의사의 재량을 넘어서는 비윤리적 행위에 대한 법률적 기준을 마련하고, 해당 의료인은 기준에 따라 책임지는 모습을 보여야 할 것이다. 바이오 인공장기의 연구 및 이식 과정에서 윤리성을 강화하는 것은 바이오 인공장기가 생명경시사상을 확산시킬 수 있다는 문화적 우려를 불식시키는 데도 큰 역할을 할 것이다.

전자기기 인공장기를 이식하는 경우에는 개인정보나 저작권에 대한 문제가 발생할 수 있으므로 이에 대비하는 방안 마련이 필요하다. 이식한 전자기기 인공장기의 오작동으로 환자가 위험에 처할 경우, 환자나 제조사의 동의 없이 응급 대처를 할 수 있도록 법률 개선을 검토해야 한다.

○ 안전을 위해 사후 관리 강화해야

바이오 인공장기 기술이 상용화되기까지는 앞으로 상당 시일이 걸릴 것으로 보인다. 따라서 그 전까지는 다양한 문제와 부작용이 발생할 수 있다. 정부는 이에 대비해 바이오 인공장기의 사후 모니터링을 철저하게 시행하는 체계를 구축해야 한다. 이를 위해서는 바이오 인공장기의 임상시험 및 제품 생산과 공급, 이식 행위, 사후 경과 등 전 과정을 모니터링하고 관리할 수 있는 국가적 시스템을 마련해야 할 것이다. 바이오 인공장기 이식자에 대한 이식 경과, 부작용 등에 대해 국가 차원의 통계 및 데이터 관리 또한 필요하다. 바이오 인공장기를 이식

받은 사람은 이식받은 장기와 기존 장기가 부조화를 일으켜 정신적·신체적인 부작용을 겪을 수도 있다. 이를 줄이기 위한 맞춤형 상담이나 치료 지원 체계도 요구된다.

바이오 인공장기 이식 후 부작용이 발생할 경우 해결할 방법도 마련해야 한다. 문제의 책임 소재가 제조자와 이식자 중 누구에게 있는지를 분명히 밝히고, 바이오 인공장기 관련 의료분쟁을 전문적으로 다룰 수 있도록 한국의료분쟁조정중재원에 전문 분과를 설치하는 것도 검토해야 할 것이다.

바이오 인공장기 기술은 성장 가능성이 클 뿐 아니라 생명공학 및 전자기계, 정보통신 등 여러 분야의 첨단 과학기술이 융합되는 분야로 그 파급력이 매우 크다. 또한 세계적으로 아직 뚜렷한 강자가 없는 새로운 분야이므로 연구개발을 통해 꾸준히 좋은 성과를 낸다면 우리나라도 충분히 승산이 있을 것이다. 2017년 기술영향평가 결과는 우리나라가 바이오 인공장기 기술 선진국으로 가는 소중한 첫 걸음을 내딛는데 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) 한국과학기술기획평가원 (2013) "R&D Inl, 시민참여형 기술영향평가를 통한 과학기술과 사회의 소통-유럽의 기술영향평가 사례를 중심으로"
- 2) 미래창조과학부 · 한국과학기술기획평가원 (2017) "제5회 과학기술예측조사 보고서"
- 3) 미래창조과학부 · 한국과학기술기획평가원 (2017) "기술이 세상을 바꾸는 순간"
- 4) 보건복지부 질병관리본부 장기이식관리센터 (2017) "2016년도 장기등 이식 통계 연보"
- 5) V Jha (2010) "Post-transplant infections: An ounce of prevention", Indian J Nephrol, 20, p.171-178
- 6) 리차드 고든 (2005) "역사를 바꾼 놀라운 질병", 에디터
- 7) WJ Armitage (2006) "The first successful full-thickness corneal transplant: a commentary on Eduard Zirm's landmark paper of 1906", Br J Ophthalmol, 90, p.1222-1223
- 8) R Harold (1942) "The use of curare in general anesthesia", Anesthesiology, 7, p.418-420
- 9) HD O'Brien (2006) "The introduction of halothane into clinical practice: the Oxford experience", Anaesth Intensive Care, 34, p.27-32
- 10) PB Medawar (1953) "'Actively Acquired Tolerance' of Foreign Cells", Nature, 172, p.603-606
- 11) NA Mitchison (1955) "Studies on the immunological response to foreign tumor transplants in the mouse. I. The role of lymph node cells in conferring immunity by adoptive transfer", J Exp Med, 102, p.157-77
- 12) TE Starzl (1995) "Peter Brian Medawar: Father of transplantation", J Am Coll Surg, 180, p.332-336
- 13) R Schwartz (1958) "Effect of 6-Mercaptopurine on Antibody Production", Proc Soc Exp Biol Med, 99, p.164-167
- 14) The NewYork Times (2017.03.05) "Pioneering Liver Surgeon, Dies at 90"
- 15) E Matevossian (2009) "Surgeon Yurii Voronoy (1895-1961) - a pioneer in the history of clinical transplantation: in Memoriam at the 75th Anniversary of the First Human Kidney Transplantation", Transplant international, 22(12), p.1132-1139
- 16) P Morris (2013) "Joseph E. Murray (1919-2012)", Nature, 493, p.164
- 17) AT Jiang (2014) "Simultaneous pancreas-kidney transplantation: The role in the treatment of type 1 diabetes and end-stage renal disease", Can Urol Assoc J, 8, p.135-138
- 18) SBS news (2017.11.17.) "[취재파일] 국내 첫 '생체 폐 이식'... 그들은 왜 의사면허를 걸었을까?"
- 19) The Editors of Encyclopaedia Britannica (1998) "Encyclopedia Britannica"
- 20) W Fageeh (2002) "Transplantation of the human uterus", Int J Gynaecol Obstet, p.245-251
- 21) O Ozkan (2013) "Uterus transplantation from a deceased donor", Fertil Steril, 100, p.41

- 22) M Brännström (2015) "Livebirth after uterus transplantation", Lancet, 385, p.607-616
- 23) 중앙일보 (2017.12.04.) "미국서 첫 자궁이식 출산 성공...2014년 스웨덴 이어 두 번째"
- 24) The Science Times (2005.04.01.) "장기이식의 역사와 현황"
- 25) 서울아산병원 (2017.11.16.) "서울아산병원, 생체 폐이식 국내 첫 성공"
- 26) 존 판던 외 (2016) "마취제 개발에서 이식수술까지", 다녔수레
- 27) K Reemtsma (1991) "Xenotransplantation-a brief history of clinical experience: 1900-1965", springer-Verlag, p.9-22
- 28) B Jack (2015) "Animals and Medicine: The Contribution of Animal Experiments to the Control of Disease", Open Book Publishers
- 29) T Gibson (1995) "Zoografting: a curious chapter in the history of plastic surgery", Br J Plast Surg, 8, p.234-42
- 30) AZ Crawford (2013) "A brief history of corneal transplantation: From ancient to modern", Oman J Ophthalmol, p.12-17
- 31) Raimund Margreiter (2017) "History of renal transplant"
- 32) DKC Cooper (2012) "A brief history of cross-species organ transplantation", Bayl Univ Med Cent, 6, p.49-57
- 33) LL Bailey (1985) "Baboon-to-human cardiac xenotransplantation in a neonate", JAMA, 254, p.3321-3329
- 34) CG Groth (1994) "Transplantation of porcine fetal pancreas to diabetic patients", Lancet, 344, p.1402-1404
- 35) HY Vanderpool (1999) "Xenotransplantation: progress and promise", BMJ, 319, p.1311
- 36) J Zeyland (2013) "Transgenic pigs designed to express human α -galactosidase to avoid humoral xenograft rejection", J Appl Genet, 54(3), p.293-303
- 37) 헤럴드경제 (2015.12.15.) "[의료계 단신] 서울대 의과대, 제11회 이종이식 서울 포럼 개최"
- 38) YTN science (2017.12.08.) "돼지장기로 '장기 부족' 해소한다...내년 첫 인체 임상 시험"
- 39) 연합뉴스 (2017.07.19.) "돼지 각막 이식받은 원숭이 234일간 정상 기능 유지"
- 40) 중국 인민보 (2017.08.18.) "Chinese man regains sight after pig cornea transplant"
- 41) 스포츠경향 (2016.12.27.) "농촌진흥청, 생체모사 이용 인공 간 개발 성공"
- 42) 한국일보 (2017.05.19.) "돼지 심장 외막으로 개발한 '인공심장 판막' 임상시험 성공"
- 43) 윤익진 (2016) "이종장기이식의 최신지견, 건국대학교 의학전문대학원 외과학교실", J Korean Soc Transplant, p.69-76
- 44) L Yang (2015) "Genome-wide inactivation of porcine endogenous retroviruses (PERVs)", Science, 350(6264), p.1101-4

- 45) 헬스조선 (2017.09.20.) "의료 보형물 맞추고, 자기 세포로 인공 장기 제작"
- 46) 글로벌이코노믹 (2016.01.11.) "인공간, 3D프린터로 만들어 진다...비용감축, 간이식에도 적용될 듯"
- 47) M Aurora 외 (2016) "hPSC-derived lung and intestinal organoids as models of human fetal tissue", Developmental Biology, 420, p.230-238
- 48) 조선일보 (2016.02.16.) "귀 종긋... 3D 프린터로 짚은 귀, 생체이식 첫 성공"
- 49) 동아사이언스 (2015.07.15.) "인간 줄기세포로 만든 0.5mm 심장이 뛰기 시작했다"
- 50) SV Murphy (2014) "3D bioprinting of tissues and organs", Nature Biotechnology, 32, p.773-785
- 51) 사이언스온 (2013.08.29.) "줄기세포로 인간뇌 닮은 '미니 뇌' 조직 만들어"
- 52) 중앙일보 (2015.04.26.) "화상 환자의 희망 '바이오 인공피부' 임상 눈앞"
- 53) T Hirsch (2017) "Regeneration of the entire human epidermis using transgenic stem cells", Nature, 551, p.327-347
- 54) CIO KOREA (2015.01.05.) "의료분야에서의 3D 프린터 활용 7가지 사례"
- 55) 매일경제 (2016.04.02.) "줄기세포로 모낭 · 피지샘 갖춘 인공피부 제작"
- 56) 연합뉴스 (2017.01.19.) "동물실험 대체할 수 있는 '인공 피부' 개발"
- 57) 연합뉴스 (2016.09.28.) "이식조직과 함께 '자라는' 인공혈관 개발"
- 58) 서울경제 (2017.02.09.) "3D 프린팅으로 심장세포 재생"
- 59) Science Daily (2013.04.14.) "Implantable, bioengineered rat kidney: Transplanted organ produces urine, but further refinement is needed"
- 60) EBS News (2016.10.13.) "여성의 몸 떠난 자궁, '인공자궁' 시대"
- 61) 서울경제 (2017.05.18.) "美서 3D 프린터로 쥐 인공난소 제작"
- 62) 서울신문 (2017.03.29.) "세계 최초 인공 여성생식기관 '에바타' 시스템 완성"
- 63) 동아사이언스 (2016.05.20.) "그 어려운 '인공 척수'까지...3D 프린터가 해낸다"
- 64) 의학신문 (2016.09.01.) "3D 바이오프린팅, 환자맞춤형 의료시대 앞당겨"
- 65) POSTECH (2014.06.02.) "국내 연구진, 3D프린터로 인공장기 찍는 시대 앞당긴다"
- 66) Texas Heart Institute (2017.12.27.) "AbioCor Implantable"
- 67) 연합뉴스 (2004.10.19.) "<의학> 美 FDA, 최초 인공심장 승인"
- 68) 서울신문 (2016.06.08.) "연구생명을 구하고, 농구까지 즐기게 도와준 인공 심장"
- 69) Medical Product Outsourcing (2017.08.28.) "FDA Approves Abbott's HeartMate 3 Left Ventricular Assist System"
- 70) 나우뉴스 (2014.03.04.) "영원히 가슴에서 '쿵쿵'... 무한동력 '인공심장' 개발"

71) Med device online [2016.02.17.] "World's First Implantable Artificial Kidney Could Enter Human Trials By 2017"

72) 매일경제 [2017.09.27.] "[최은수 기자의 미래이야기] '인공 눈' 속속 등장... 맹인 없는 세상 열린다"

73) 동아사이언스 [2015.01.06.] "[한국판 新 600만불 사나이 ②] 맹인 없는 세상 만드는 '인공 눈'"

74) RG Clement [2011] "Bionic prosthetic hands: A review of present technology and future aspirations", The Surgeon 9, p.336-340

75) Touch bionics [2017.12.17.] "i-limb ultra"

76) ScienceNordic [2014.10.13.] "Brain-controlled prosthetic arm connected to nerves"

77) IEEE Spectrum [2016.04.28.] "Creating a Prosthetic Hand That Can Feel"

78) 중앙일보 [2017.03.30.] "11년 꿈꿔 못한 사지마비 환자, 뇌 · 컴퓨터 연결해 스스로 식사"

79) 한국일보 [2017.11.29.] "팔 절단 원숭이, 마음으로 인공팔 움직여... 뇌신경도 재편된다"

80) 임창환 [2017] "바이오닉 맨", p.43-46

81) J Finch [2011] "The ancient origins of prosthetic medicine", Lancet, 377(9765), p.548-549

82) 피에르 제르마 [2004] "만물의 유래사", 하늘연못, p.144

83) 미래창조과학부 · 한국과학기술기획평가원 [2017] "2016년 기술수준평가보고서"

84) 조선일보 [2017.09.04.] "65세 이상이 14%... '고령사회' 공식 진입"

85) 식품의약품안전평가원 [2015] "국가 실험동물자원 관리방안 연구"

86) 식품의약품안전처 보도자료 [2014.10.22.] "질환모델동물 개발로 생명연구자원 확보 강화"

87) 매일경제 [2017.03.27.] "'일자리 금맥' 의료 · 바이오 규제제로산업으로 만들라"

88) 한국과학기술기획평가원 [2018] "과학기술예측 기반강화연구"

89) KBS News [2011.01.06.] "타미플루 부족...환자 증가에 재고 바닥"

90) 연합뉴스 [2017.03.07.] "식품원산지 · 환경호르몬 감지하는 '인공코' 개발"

91) 문종식 [2017] "Bioinspired M-13 bacteriophage-based photonic nose for differential cell recognition", Chem. Sci, 8, p.921-927

92) 임창환 [2017] "바이오닉맨", MID, p.25-26

93) 생명공학정책연구센터 [2006] "Technical Report-인공장기개발 및 장기 이식과 줄기세포(Stem Cell)"

94) 농림축산식품부 · 농촌진흥청 · 농림식품기술기획평가원 [2013] "[2013-2022] 농림식품과학기술 육성 중장기 계획"

95) 보건복지부 [2014] "질환중심 줄기세포/재생의료 치료기술개발전략로드맵"

96) 미래창조과학부 [2014] "국가중점기술 전략 로드맵"

97) 이용재 [2010] "소득계층별 건강상태에 따른 의료이용 형평성 분석", 한국사회정책, 17(1), p.267-290

98) 엄선희 [2010] "소득계층에 따른 보건의료 형평성: <한국노동패널> 자료를 중심으로", 보건경제와 정책연구, 16(1), p. 35-61

99) KBS [2016.02.06.] "최저소득층, 소득 34%가 의료비... 최상위 3.7배 부담"

100) 세계일보 [2017.10.29.] "[이슈+] 저소득층 의료비 연간 10만원... 5억 소득자는 850만원 썼다"

101) N Goodman, Letter [1996] "This is Where I Start to Draw the Line", British Medical Journal, 313

102) 두산백과 "바이오닉스"

103) 디지털타임즈 [2014.10.14.] "바이오닉스, 재활치료 새장 열 것"

104) 동아일보 [2017.09.11.] "한국선 기약 없어... '범죄'알지만 중서 1억 주고 콩팥 이식"

105) Food and Drug Administration [2017.08.29.] "Firmware Update to Address Cybersecurity Vulnerabilities Identified in Abbott's (formerly St. Jude Medical's) Implantable Cardiac Pacemakers: FDA Safety Communication"

106) 두산백과 "생명과학"

107) 존 브라이언트 외 [2008] "생명과학의 윤리", 아카넷

108) 서울경제 [2017.12.21.] "의료사고 느는데 보상은 여전히 부족"

109) Newsis [2016.10.06.] "'인간 최대 수명은 115세' 미 연구결과"

110) 헤럴드경제 [2017.06.29.] "인간 최대수명 115세 넘어설 수 있다"

111) UN [2009] "세계인구 고령화보고서"

112) J Wu [2016] "Interspecies Chimerism with Mammalian Pluripotent Stem Cells", Cell 168(3), p.473-486

113) 산업연구원 [2013] "미래 의료기기산업의 중심, 인공심장", 산업경제정보 제 571호

기술영향평가위원회

이영식	한양대학교 분자생명과학부 교수, 위원장
강현욱	울산과학기술원 생명과학부 교수
고은지	LG경제연구원 산업연구부문 연구위원
김현철	한국보건산업진흥원 R&D기획단 수석연구원
박경신	고려대학교 법학전문대학원 교수 / 참여연대 공익법센터 운영위원
박장환	한양대학교 의과대학 교수
박희제	경희대학교 사회학과 교수
백수진	국가생명윤리정책원 연구부장
양은경	SK바이오랜드 의학연구소 소장
양은경	한국과학기술연구원 의공학연구소 소장
윤익진	건국대학교 의학전문대학원 외과 교수 / 대한이식학회 상임이사
이명화	과학기술정책연구원 국가연구개발분석단 단장
이상욱	한양대학교 철학과 교수
이요훈	IT 컬럼니스트
조범래	(주)엠플러스 생명공학연구소 수석연구원

시민포럼

강영은	서울대학교 산업공학과 석사과정 학생
김경임	
김명인	한양대학교 경제금융학 학생
김성훈	
김은경	서울대학교 국토문제연구소
박주아	경희대학교 경영학부 학생
박상완	지담특허법률사무소 대표 변리사
송진호	현대제철 과장
이수인	국방과학연구소 연구원
이웅배	충청북도 지식산업진흥원 연구원
이원규	신안산대학교 생명환경공학 학생
정혜윤	성균관대학교 사원
조정훈	KAIST 과학기술정책대학원 석사과정 학생
최행수	융합기술경영S 대표
최효미	배재중학교 강사

한국과학기술기획평가원

안지현	미래예측본부 부연구위원
김지연	미래예측본부 연구원
최문정	미래예측본부 선임연구위원
유병은	미래예측본부 연구원
이승룡	미래예측본부 연구위원

그 외 도움주신 분들

강홍서	한국과학창의재단 과학문화진흥단 단장
고범준	변호사 고범준 법률사무소 변호사
김남형	충북대학교 식품생명 · 축산과학부 교수
김성주	성균관대학교 의과대학 의과학교실 / 삼성서울병원 이식외과 교수
김정석	가천대학교 보건과학대학 의용생체공학과 교수
김현호	가톨릭대학교 약학과 학생
노병규	한국인터넷진흥원 경영기획본부 본부장
박석희	한국생산기술연구원 마이크로나노공정그룹 선임연구원
박정규	바이오이종장기개발사업단 단장
박종래	서울대학교 재료공학과 교수
송 욱	포항공과대학교 화학과 학생
서중모	서울대학교 전기 · 정보공학부 교수
심규철	JBT 스마트재난관리연구소 소장
이선호	서울대학교 의학전문대학원 박사과정 학생
이성실	경북대학교 의학전문대학원 학생
이철주	고려대학교 공공정책연구소 연구위원
이현주	(주)로킷 전무
정초록	한국생명공학연구원 줄기세포연구센터 책임연구원
조선자	한국생명공학연구원 국가생명공학정책연구센터 연구원
지은경	포항공과대학교 화학과 석사과정 학생
최병선	바이오이종장기개발사업단 사무국장
하영진	한국에너지기술연구원 에너지정책연구실 책임연구원
함영삼	철도기술연구원 철도안전연구실 수석연구원
허 진	인천대학교 전자공학과 교수

과학기술정보통신부

이은주	과학기술정보과 과장
홍성덕	과학기술정보과 사무관
신수미	과학기술정보과 연구원

편저

박혜진	프리랜서 작가
------------	---------

온라인 의견 창구

<http://www.k2base.re.kr/foresight/ta/intrcn/endTaIntrcnMainFrame.do?pageNavi=bioOrg>

2017년 기술영향평가 결과보고

바이오 인공장기의 미래

| 지 은 이 | 과학기술정보통신부, 한국과학기술기획평가원(KISTEP)

| 발 행 처 | 한국과학기술기획평가원(KISTEP) 02-589-2200

| 발 행 일 | 2018년 4월 11일

| 홈페이지 | www.kistep.re.kr

| 편 저 | 박혜전

| 인 쇄 | 나모기획 02-503-5454

| 편 집 장 | 신동환

| 디 자 인 | 김유진

| I S B N | 979-11-87680-08-6

| CIP제어번호 | CIP2018007130

이 도서의 국립중앙도서관 출판예정도서목록(CIP)은 서지정보유통지원시스템 홈페이지(<http://seoji.nl.go.kr>)와 국가자료공동목록시스템(<http://www.nl.go.kr/kolisnet>)에서 이용할 수 있습니다.

2017년 기술영향평가 결과보고

바이오 인공장기의 미래

바이오 인공장기는 향후 인류의 건강수명 연장과 건강 증진, 기능 강화에 매우 큰 기여를 할 것으로 보인다. 이에 따라 의료계, 노동 시장, 산업 등 사회와 경제의 다양한 문제에 변화를 불러올 것으로 예상된다. 또한 생명에 관련된 기술 고유의 특성 때문에 사회·윤리적인 논쟁을 낳을 것이며, 국민의 삶에도 큰 영향을 미칠 것이다. 이에 2017년 기술영향평가에서는 바이오 인공장기 기술이 사회, 경제, 문화 등 다양한 분야에 걸쳐 어떠한 영향을 미칠 것인가에 대해 미리 예측해 보고, 대안을 논의하기로 했다.

본 책의 내용에 대한 무단 전재 및 복제를 금합니다.
본 책의 내용을 인용할 시에는 반드시 출처를 표기해야 합니다.
해당 저작물은 과학기술정보통신부, 한국과학기술기획평가원(KSTEP)
홈페이지에서 다운받을 수 있습니다.

	
공공누리	공공 저작물 자유이용허락
비매출/무료 03500	
	
9 791187 680086	
ISBN 979-11-87680-08-6	