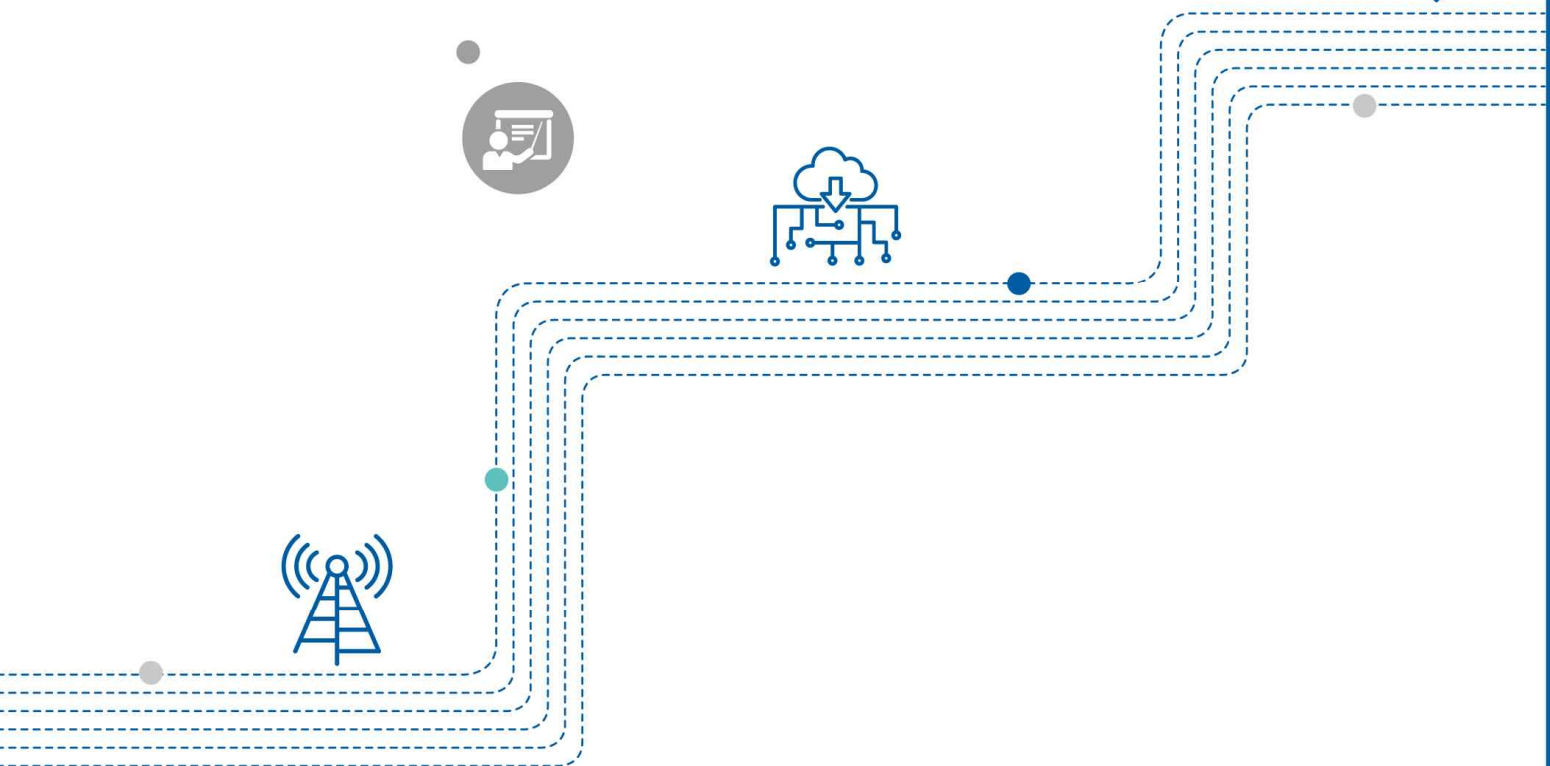


휴먼증강 기술 주요 동향과 R&D 시사점

정선화·최병철



본 보고서는 ETRI 기술경제연구본부 주요사업인 “ICT R&D 경쟁력 제고를 위한 기술경제 연구”의 결과물입니다.



* 본 보고서의 내용은 연구자의 견해이며 ETRI의 공식 의견이 아님을 알려드립니다.



Contents



I. 휴먼증강 기술의 정의와 분석범위	1
1. 휴먼증강 기술영역의 탄생 배경	1
2. 본 연구에서의 휴먼증강 기술 정의	2
3. 과제데이터 분석 기반의 휴먼증강 기술 분야	3
4. 국가과학기술분류체계 관점의 휴먼증강 기술 분야	6
5. 본 연구에서의 휴먼증강 기술 범위	9
II. 휴먼증강 주요 기술	11
1. 기반기술 : 뇌-기계 인터페이스	11
2. 인지능력 증강 기술	15
3. 신체능력 증강 기술 : 지각능력	17
4. 신체능력 증강 기술 : 운동능력	19
III. 기술분야별 연구동향과 특성	21
1. 기반기술 : 뇌-기계 인터페이스	21
2. 인지능력 증강 기술	24
3. 신체능력 증강 기술 : 지각능력	29
4. 신체능력 증강 기술 : 운동능력	33
IV. 시장특성 및 주요 플레이어 분석	36
1. 뇌-기계 인터페이스 시장전망	36
2. 휴먼증강 기술 시장특성	37
3. 분야별 주요 플레이어 분석	41
V. 국내외 R&D 정책 동향	46
1. 뇌연구 관련 R&D 정책 동향	46
2. 뇌-기계 인터페이스 관련 R&D 정책 동향	51
3. 근력증강로봇 관련 R&D 정책 동향	53
VI. 휴먼증강 R&D 및 정책적 시사점	55
1. 기술에 대한 수요와 관심 증대	55
2. 연구성과의 창출과 시장의 발전	58
3. 휴먼증강 기술 실현을 위한 극복 요소	61
참고문헌	64

표목차



[표 1] 휴먼증강 과제 - NTIS 과제검색결과 일부	4
[표 2] 국가과학기술분류체계에서 휴먼증강 기술	8
[표 3] 뇌연구 세부분야	13
[표 4] 뇌신호 측정기술 종류	14
[표 5] 근력증강로봇 세부기술	20
[표 6] 뇌-기계 인터페이스 연구의 주요 마일스톤	23
[표 7] 시장자료에서 포함한 뇌-기계 인터페이스 제품 및 서비스	36
[표 8] 응용분야별 시장규모 비중 변화	37
[표 9] 뇌-기계 인터페이스 제품 및 서비스 시장성 평가	37
[표 10] 해외 뇌연구 프로젝트	46
[표 11] 인지와 신체 기능 재활 목적의 DARPA의 뇌-기계 인터페이스 프로젝트	52

그림목차



[그림 1] 뇌공학, 생명공학, 유전공학, 로봇공학 분야에서 휴먼증강 기술 사례	6
[그림 2] 본 연구에서의 휴먼증강 기술 범위	10
[그림 3] 뇌-기계 인터페이스 구조	11
[그림 4] 우리나라 인구변화 전망	55
[그림 5] 가트너 하이프사이클에서 뇌-기계 인터페이스 기술 위치 변화	58

I 휴먼증강 기술의 정의와 분석범위

1 휴먼증강 기술영역의 탄생 배경

- 45억년 지구의 역사에서 인간은 약 6백만년전 영장류에서 분화되어 도구를 제작하고 사용할 수 있는 호모파베르¹⁾로 진화
 - 인간은 자신의 본성에 따라 도구를 만들어 사용하지만 도구는 인간능력 향상이나 외부와의 관계형성에 영향을 미침으로써 사회발전에 본질적인 변화를 가져왔음
 - 즉 도구는 석기시대, 청동기시대, 철기시대, 활자시대, 산업화시대, 정보화시대 등 사회와 시대를 규정
- 16세기 이후 도구는 과학기술로 진화하여 자연현상을 파악하고 이를 활용하여 인간의 능력을 제약하는 외부환경을 극복함으로써 인간에게 경제적 풍요를 제공하고 인간능력을 확장하는데 사용됨
 - 도구는 인간의 신체적 능력을 돕는 수단으로 사용된 사물이었지만, 과학이론과 결합된 도구는 기술로 진화하여 사물을 인간의 정신과 신체에 유용하도록 가공하는 수단으로 발전
 - 17세기 과학혁명 이후 기술은 인간의 삶의 질을 향상시키고 능력을 확장하는데 기여
- 최근 나노, 생명, 정보, 인지 과학기술의 융합발전에 힘입어 기술은 인간자체에 관심을 가지기 시작하였고 휴먼증강(Human Augmentation)이라는 기술영역이 탄생함
 - 인간의 능력향상과 수명연장에 대한 욕구는 과학기술과 결합하여 능력을 단순히 향상시키는 것을 넘어 인간 자체를 변형하는 인공적 진화에 주목하기 시작
 - 휴먼증강 기술은 미국 과학재단(NSF)이 2003년에 발간한 보고서 ‘인간능력 향상을 위한 융합기술: 나노기술, 바이오기술, 정보기술, 인지과학’에서 첫 언급
 - 보고서에서는 NBIC(Nano, Bio, Information, Cognitive) 융합기술을 통해 인간능력의 향상 및 증강이 가능하다고 강조하고 인간의 인지 및 신체 능력과 건강 및 수명은

1) 도구를 제작하고 사용할 수 있다는 관점에서 인간의 본질을 파악하는 인간관으로 프랑스 철학자 앙리 베르그송(1859년~1941년)이 제안



- 더 이상 자연적으로 주어지는 한계가 아니고 **유전자치료, 뇌-기계 인터페이스, 정보 과학기술** 등 융합기술의 도움을 받아 얼마든지 변화 내지 증강될 수 있다고 주장
- 휴먼증강을 기술개발 목표와 비전으로 설정하는 관점은 이후 윤리적 논쟁을 불러 일으키고 더불어 **트랜스휴머니즘²⁾**과 **포스트휴먼³⁾**에 대한 철학적 연구를 양산

2 본 연구에서의 휴먼증강 기술 정의

- **능력향상과 적용기술 범위 및 신체의 결합여부에 따라 다양한 휴먼증강 정의가 존재**
 - 기술공학적 수단을 통해 인간의 **인지, 정서, 신체 능력**을 통상적 범위를 넘어서는 수준까지 향상 시키는 기술 (포스트휴먼시대의 휴먼, 한국포스트휴먼연구소)
 - 질병이나 치료의 목적으로 접근하기도 하지만 **궁극적으로 인간능력을 향상시키는 방향의 기술** (감각의 미래, 카라 플라토니)
 - 뇌-컴퓨터 인터페이스(BCI)와 감성컴퓨팅 등 **컴퓨터와 인터넷을 이용해 인간의 생각과 감정을 제어하는 기술이 발전하면서 해당 기술을 인간에 적용하여 신체능력을 향상시키는 기술** (KOTRA)
 - **신체의 일부분에 결합되어 일반인의 인지 및 신체 능력을 향상시키는 기술** (인간-기계 인터페이스 하이프사이클 기술, 가트너)
 - **인간 신체의 한계를 일시적으로 또는 영구적으로 극복 가능하도록 하는 기술** (위키피디아)
 - **신체에 부착하거나 신체의 일부분으로 결합시켜 인체의 능력을 증강·보완**하고 인간의 의지에 따라 조절이 가능한 모든 기술을 **신체증강휴먼기술로 정의** (2017년 국가미래유망기술 상시 발굴 및 준비체제 정책지원 보고서의 12대 정책 프로그램 사전 기획서 중 신체증강휴먼 보고서, 한국연구재단)
 - 인간의 신체적, 정신적 상황을 이해하고 그 능력을 보완 및 증강시킬 수 있는 기술 (웨어러블컴퓨팅 기술 연구, ETRI)
- **다양한 휴먼증강 정의로부터 신체와의 결합, 기술공학적 수단, 인지 및 신체 능력**

2) 인간조건을 근본적으로 향상시킬 가능성과 그 가능성을 긍정하는 지적·문화적 운동

3) 현생인류를 더 이상 대변할 수 없을 정도로 철저히 변형되어 현 기준으로 인간으로 분류될 수 없는 존재

향상, 궁극적으로 인간능력 향상을 주요 키워드로 선별하여 본 연구에서는 휴먼증강을 다음과 같이 정의

(정의) 인간의 생물학적 인지 및 신체 능력의 증강을 목적으로 인간과 결합된 또는 공생하는 기술로, 초기에는 질병치료, 장애극복, 노화방지 등의 목적으로 개발할 지라도 궁극적으로는 타고난 인간능력을 향상시킬 수 있는 잠재력을 가진 기술

- 인지능력은 신체 내외부로부터 획득한 정보를 파지하고 활용하는 것으로, 구체적으로 기억, 생각, 감정, 판단, 학습, 추론 등을 포함하는 복합적인 능력으로 정의
- 신체능력은 신체 내외부로부터 자극을 수용하여 중추신경계로 전달하는 지각능력⁴⁾과 생물체의 움직임을 가능하게 하는 운동능력으로 정의

※ 본 연구에서는 적용되는 기술이 구분가능하고 구현되는 제품 및 서비스가 명확하게 달라 신체 능력 증강기술을 지각능력과 운동능력으로 나누어 분석

3 과제데이터 분석 기반의 휴먼증강 기술 분야

가. 국가 R&D 과제데이터 분석

- 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)에서 휴먼증강 정의에 따라 ‘휴먼증강’, ‘인지증강’, ‘감성증강’, ‘신체증강’, ‘근력증강’을 키워드로 사용하여 검색된 과제데이터를 분석⁵⁾
 - 전반적으로 뇌·신경계 기능 분석, 뇌신호 관측 및 조절 기술 등 **뇌공학** 분야 과제들이 주를 형성
 - 그 외 생체적합 재료 개발 등의 **생명공학** 분야 과제, 바이오마커 개발 등의 **유전공학** 분야 과제, 재활치료 및 생활지원 기술로 분류된 **근력증강로봇** 분야 과제, 약물전달최적화 기술 등의 **약물학** 분야 과제 등이 존재

4) 신체능력 중 지각능력은 외부환경으로부터의 지각으로 촉각, 후각, 미각, 청각, 시각이 있고, 신체내부로부터의 지각은 내장, 평형이 존재

5) 데이터분석 목적이 휴먼증강 기술범위 탐색이었기 때문에 증강이 직접 언급된 과제를 검색함으로써 데이터범위를 제한하여 휴먼증강과 관련 없는 과제수집을 줄이고자 하였으며, 과제검색 후 본 보고서에서 정의한 휴먼증강과 적합한 과제를 직접 선별하여 분석을 수행



표 1 휴먼증강 과제 - NTIS 과제검색결과 일부

연구기간	주관수행기관	과제제목	국가전략기술코드	연구개발단계
'17-'21	가천대	감각 통합 인지회로 연구를 위한 뇌기능 자기공명 영상기술 개발	뇌·신경계 기능 분석 기술	기초
'10-'19	가톨릭대	비침습적 뇌신경 자극을 통한 인체 촉각생성 유효성 검증 연구	뇌·신경계 기능 분석 기술	기초
'17-'19	경희대학교 산학협력단	근력증강로봇 제어를 위한 피부부착형 다중센서 통합모듈 및 강건한 운동의도 명령 생성기술 개발	재활 치료 및 생활지원 기기 기술	응용
'15-'18	경희대학교 산학협력단	사용자 의도에 능동적으로 대응하는 지능형 보행보조기기 개발	재활 치료 및 생활지원 기기 기술	응용
'15-'17	GIST	TCR z-IGSF4TM 카메라를 이용한 면역세포 치료기술 개발	바이오마커 개발 기술	기초
'18-'22	DGIST	인지기능 보조·증강을 위한 고해상도 하이브리드 뇌 인터페이스의 동물 적용 연구	뇌신호 관측 및 조절 기술	기초
'17-'21	ETRI	신체기능의 이상이나 저하를 극복하기 위한 휴먼 청각 및 근력 증강 원천 기술 개발	신체기능 복원기기 기술	기초
'03~'13	서강대	지능형 보행 보조기기 개발	-	기초
'14-'17	서울대	노인 잇몸뼈/턱뼈 재생 활성물질 실용화 연구	약물 전달 최적화 기술	개발
'15-'18	서울대	기억기능 향상을 위한 뇌네트워크 기반 뇌자극 기술개발	뇌·신경계 기능 분석 기술	기초
'16-'17	서울대	뇌자극을 통한 인간 촉각각에 대한 확장/축소/변조 기술 및 청각 정보 등의 다른 감각 정보를 촉각각 정보로 변환하는 기술 개발	뇌·신경계 기능 분석 기술	기초
'18-'22	서울대	지각 형성 메커니즘 기반 인지기능 증강을 위한 뉴로모듈레이션 기술 개발	뇌신호 관측 및 조절 기술	기초
'17-'20	성균관대	뇌신경재활을 위한 뇌영상 기반 고해상 맞춤형 비침습 신경조절 기술 개발	뇌신경계 질환 원인 규명 및 치료·예방기술	기초
'09-'14	연세대	바이오닉 인터페이스 기반 신경정보 제어기술	임상시험기술	개발
'19-'22	연세대	원천기억 강화 메커니즘 연구: 고령층 대상의 고해상도 신경조절기술	뇌신호 관측 및 조절 기술	기초
'18-'23	KAIST	Biomimetic Vision Recovery (인공시각 복원기술)사업	생체적합 재료 개발기술	기초
'10-'15	현대차	산업노동지원을 위한 착용식 근력증강 로봇 기술 개발	-	개발

나. 뇌공학, 생명공학, 유전공학, 로봇공학 분야에서 휴먼증강 기술

- (뇌공학) 뇌의 기능과 구조를 밝혀, 뇌 활동 이해, 조절, 조작, 외부 기기와 연결 구현
 - 바이오기술, 나노기술, 인지과학의 융합연구 분야로 뇌의 정보처리 매커니즘을 공학적으로 구현하고자 하며,
 - 뇌지도 작성, 인공 뇌 구현, 뇌-기계 인터페이스 개발이 주된 연구주제
- (생명공학) 인체를 부분으로 분해·해독·모방하여 역설계함으로써 신체능력 증강기술 구현
 - 공학과 생물학의 융합분야로 생명체의 기능을 연구해 그 기능을 공학적으로 구현하는 학문
 - 생명공학에서 휴먼증강 연구결과는 의료·국방 분야에서 가장 많이 응용
 - 의료분야에서는 사지교정장치, 골성장자극장치, 인공장기, 심장조율기, 심실보조장치, 뇌신경자극장치, 인공청각 및 인공시력 등의 분야에서 첨단제품들이 출시 중
 - 사람의 팔다리의 구성요소 기능 및 그들 사이의 상호작용을 구현한 근력증강기술은 바이오닉 의수·의족 및 근력증강로봇에 적용되어 의료와 국방 분야 모두에서 응용 범위를 확대 중
- (유전공학) 자연에 의해 진화된 유전자를 직접 조작하여 인체를 재설계
 - 생명체의 유전자를 조작하거나 가공하여 실생활에 적용하고자 하는 기술을 연구하는 분야로, DNA재조합, 세포융합기술, 핵치환기술의 3대 기술로 구성
 - 이 분야 기술은 암, 장애 등 질병치료 목적으로 시작되었으나, 개인맞춤형 약품으로 건강을 증진시키는 것에서 나아가, 인간 재설계가 이론적으로 가능한 유전자조작 기술로 발전 중
 - 인간계놈 완성과 크리스퍼(CRISPR) 유전자가위기술 개발로 현재 실현 가능성이 가장 높은 휴먼증강 기술로 주목받고 있음
- (로봇공학) 신체외부에 부착하여 신체능력을 증강시켜주는 기기 개발
 - 로봇의 설계, 구조, 제어, 지능, 운용 등에 관한 기술을 연구하는 학문 분야로, 기계공학, 전기·전자공학, 컴퓨터공학, 생체공학의 융합연구 분야



- 로봇공학에서는 휴먼증강 중 운동능력 향상과 관련된 **근력증강로봇** 연구를 수행
- 근력증강로봇은 본래 무거운 군사장비를 이동하기 위한 목적으로 개발이 시작되었으나 현재는 의료용, 노령인구용, 산업용, 군사용 등 다양한 목적으로 제품화됨

- 이 밖에도 **약물학**에서는 집행능력, 기억력, 창의력 등 인지능력을 향상시켜주는 약물이나 보충제, 그리고 스트레스, 우울증 등 약물치료제 연구가 진행 중

그림 1 뇌공학, 생명공학, 유전공학, 로봇공학 분야에서 휴먼증강 기술 사례

뇌공학 (Brain Engineering)	생명공학 (Bio Engineering)	유전공학 (Genetic Engineering)	로봇공학 (Robotics)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 뉴로모픽 칩 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 로이히(Loihi) ✓ 트루노스(Truenorth) ▪ 뇌지도 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 대뇌피질 뇌지도 ✓ 태아 뇌지도 ▪ 뇌-기계 인터페이스 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 헬스케어 ✓ 뉴로게임 ✓ 뉴로마켓팅 ✓ 스마트홈 제어  	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 교정용 장치 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 사지, 외골격 ✓ 골성장자극장치 ▪ 인공장기 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 장기, 바이오연료전지 ▪ 뇌/신경 자극장치 ▪ 인공시각  ▪ 인공청각 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 유전자 편집 기술 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 유전자가위 ✓ 유전자탐색기 ▪ DNA재조합 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 인슐린, 성장호르몬 ▪ 세포융합기술 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 암치료 ▪ 핵 치환기술  <ul style="list-style-type: none"> ✓ 복제 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 외골격근 로봇 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 전신착용 ✓ 상지착용 ✓ 하지착용 ✓ 하드 vs 소프트 타입 ✓ 신경정보 기반  ✓ 군사용 ✓ 의료용 ✓ 노령인구용 ✓ 산업용

4 국가과학기술분류체계⁶⁾관점의 휴먼증강 기술 분야

- **뇌과학, 생명과학, 보건의료, 기계, 정보통신**이 대표적인 휴먼증강 분야로 분석됨⁷⁾
 - 인간과학과 기술 → 뇌과학
 - 과학기술 → 생명 → 생명과학, 보건의료
 - 과학기술 → 인공물 → 기계, 정보/통신
 - 이 외에, 인공물 분야에서 재료, 에너지 등이 일부 포함⁸⁾

6) 과학기술분류체계(2018년 개정)는 인문사회과학과 과학기술 연구분야로 크게 나누고, 과학기술은 자연, 생명, 인공물로, 인문사회과학은 인간, 사회, 인간과학과 기술로 분류하고 있음

7) KISTI가 제공하는 미래기술지식베이스에서 본 보고서의 휴먼증강 정의와 부합되는 미래유망 기술을 선별 후 그들에 부여된 과학기술분류코드 중 빈도가 높은 기술을 정리·분석함

8) 인공장기, 인공피부 등 바이오재료, 인공장기에 필요한 바이오연료 등의 연구 포함

- **(뇌과학) 모든 분야가 휴먼증강 기술로 분류**
 - 뇌신경생물, 뇌인지, 뇌의약, **뇌공학** 등이 포함
 - 이 중 뇌인지 및 뇌공학 분야에서 뇌기능 규명 및 뇌질환 예방, 진단, 치료 연구를 중점적으로 수행

- **(생명과학과 보건의료) 이 분야 속한 기술의 절반 이상이 휴먼증강 기술로 분류**
 - 생명과학의 중분류 12개 중 6개 분야와 보건의료의 중분류 9개 중 5개 분야
 - 특히, **융합바이오** 및 **기능복원/보조/복지기기** 분야의 기술 전체가 휴먼증강 기술
 - 이 외, 유전자 치료, 세포/조직 공학, 유전자 의약품, 생체신호 측정/진단기기, 바이오 인공장기 등 인간의 생물학적 능력 증강과 관련성이 높은 기술이 다수 존재

- **(기계와 정보/통신) 로봇/자동화기계와 정보이론 분야가 휴먼증강 기술로 분류**
 - 기계는 중분류 12개, 정보/통신은 중분류 15개로 구성
 - **로봇/자동화기계** 분야에서는 **근력증강로봇** 분야
 - **정보이론**에서는 **인간-컴퓨터 인터페이스(HCI: Human-Computer Interface)**가 인간과 기계의 결합 및 공생을 구현하는 대표적 기술

- **이와 같이 뇌공학, 생명공학, 의공학, 유전공학, 정보과학, 로봇공학 등 여러 학문 분야에서 휴먼증강이라는 동일한 목표를 지향하면서 분야별로는 다른 접근법을 취하여 연구를 수행 중**
 - 휴먼증강 연구는 인공물보다는 생명을 연구하는 분야에서 중점적으로 수행 중
 - 구체적으로 로봇/자동화기계나 정보이론 등의 분야보다는 분자세포학, 유전공학, 융합 바이오, 의약품/의약물 개발, 기능복원/보조/복지기기 등에서 연구 수행
 - 인간과학과 기술로 분류된 뇌과학에서도 뇌질환 치료부터 집중력, 기억력, 집행능력 등 인지능력 향상을 위한 연구를 수행 중
 - 교정 및 근력증강을 목적으로 개발되는 근력증강로봇은 기능복원/보조/복지기기 분야와 로봇/자동화기계 분야에서 연구 중



표 2 국가과학기술분류체계에서 휴먼증강 기술

분야	대분류	중분류	소분류	
과학기술/ 생명	생명과학	분자 세포생물학	신호전달, 세포구조/운동, 세포분화/사멸, 막 생물학, 유전자 발현조절, 기타	
		유전학/유전공학	분자유전학, 세포유전학, 집단/인류유전학, 유전체학, 형질전환 생물모델, 유전자치료, 기타	
		발생/신경생물학	배아발생/기관형성, 내분비생물학, 생식생물학, 신경생화학/생리학, 신경질환생물학, 줄기세포생물학, 기타	
		생화학/구조생물학	단백질 구조와 기능, 핵산 생화학, 단백질체학, 당생물학, 지질생화학, 구조생물학, 기타	
		융합바이오	바이오칩, 바이오센서, 나노바이오소재, 바이오이미징, 시스템생물학, 생물정보학, 기타	
		생물공학	발효공학, 생물분리/정제, 탄수화물공학, 효소공학, 대사공학, 세포/조직공학, 생물청정기술, 기타	
	보건의료	의생명과학	의생명과학	생리학, 생물리학, 생화학, 분자세포생물학, 미생물/기생생물학, 면역학, 해부/조직/발생학, 약리학, 기초병리학, 유전학, 오믹스학, 생물정보학, 세포 및 조직 보존학, 기타
			임상의학	심장/혈관학, 소화기학, 호흡기학, 내분비학, 혈액/종양학, 비뇨기/신장학, 감염학, 신경과학, 정신의학, 근골격학, 생식기학, 피부/감각기학, 소아/산부인과학, 진단병리학, 진단검사의학, 영상의학, 마취과학, 알레르기/임상면역학, 수면의학, 예방의학, 응급의학, 법의학, 가정의학, 산업의학, 핵의학, 기타
		의약품/의약품개발	의약품/의약품개발	의약품 합성/탐색, 의약품 모델링, 약효검색, 체내동태/약물 대사연구, 임상약리, 의약품 제형개발/생산기술, 의약품 성분분석, 의약품 기준/시험방법 평가, 약물전달시스템, 단백질의약품, 효소의약품, 유전자의약품, 저분자의약품, 천연물의약품, 치료용항체, 백신, 세포/조직치료제, 시약/진단제, 바이오생체재료, 바이오인공장기, 기능성화장품개발, 기타
			치료/진단기기	생체신호 측정/진단기기, 임상화학/생물 분석기, 지능형 판독시스템, 중재적 치료기기, 방사선 치료기기, 수술용 치료기기, 수술용 로봇, 분자유전 진단기기, 초음파 진단기기, X-ray/CT, MRI, 핵의학/분자영상 진단기기, 기타

분야	대분류	중분류	소분류
		기능복원/ 보조/ 복지기기	신체기능 복원기기, 임플란트, 전자기계식 인공장기, 생체재료, 의료용 소재, 재활훈련기기, 이동지원기기, 생활지원기기/시스템, 인지/감각기능 지원기기, 기타
과학기술/ 인공물	기계	로봇/ 자동화기계	로봇 설계기술, 로봇 제어/지능화 기술, 로봇 비전/생산자동화기술, 기계자동화기술, 조립/정밀 이송기술, 자동화 관련 계측/센서 기술, 로봇/자동화기계 관련 S/W, 기타
	정보/ 통신	정보이론	컴퓨터이론, 알고리즘, 컴파일러, 프로그래밍 언어/자 언어 처리, 데이터베이스, 소프트웨어 공학, 오퍼레이팅 공학, 오퍼레이팅 시스템, 인공지능, HCI, 클라우드컴퓨팅/그리드컴퓨팅, 실시간 시스템, 정보검색, 기타
인문사회· 과학/인간 과학과 기술	뇌과학	뇌신경생물	신경발생 및 분화, 신경재생 및 사멸, 시냅스 및 신경신호전달, 뇌고위기능의 분자/유전신경생물, 시스템 통합조절 신경생물, 기타
		뇌인지	뇌인지 기초, 시스템신경과학, 행동신경과학, 뇌인지 기능매핑, 기타
		뇌의약	만성퇴행성 뇌질환, 급성뇌손상 질환, 정신성 및 중독성 뇌질환, 감각이상성 뇌질환, 기타 뇌질환, 기타
		뇌공학	뇌신호의 측정 및 분석, 뇌기능의 계산모델, 뇌기반 지능시스템, 뇌모방 소자, BMI, 기타

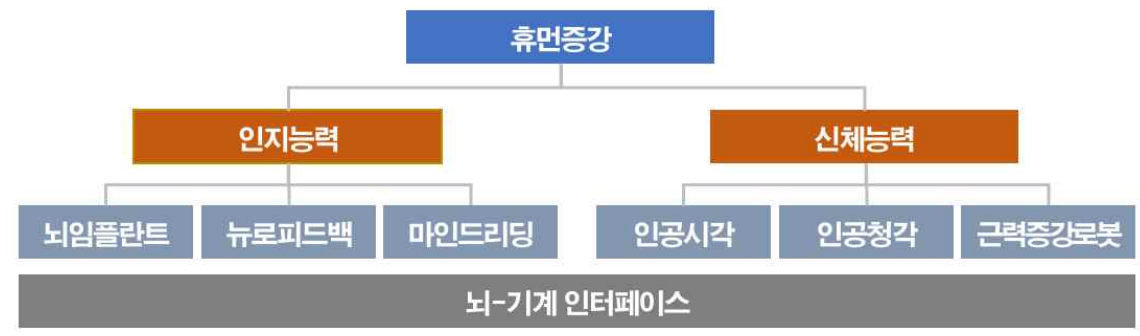
5 본 연구에서의 휴먼증강 기술 범위

- 본 연구에서는 휴먼증강 기술 범위를 휴먼증강 정의에 부합하며, 정보과학기술(IT)과의 연관성이 높고 이론연구에서 벗어나 시제품을 출시하여 현실세계에서 적용 가능성을 선보인 기술을 중심으로 기술 범위를 정함
- 이에 따라 인지, 지각, 운동 능력향상을 목적으로 제품 및 서비스를 출시하고 있는 다음 기술과 이들 모두에 적용되는 뇌-기계 인터페이스 기술을 선정
 - (인지능력) 뇌임플란트, 뉴로피드백, 마인드리딩
 - (지각능력) 인공시각, 인공청각



- (운동능력) 근력증강로봇
- 뇌-기계 인터페이스 기술(BMI: Brain-Machine Interface)을 좁게는 외부기기 제어에 국한하여 설명하기도 하지만, BMI 기술이 뇌 구조 및 기능 이해를 기반으로 뇌 활동을 측정·분석·해석한 결과를 활용하여 외부기기를 제어하는 기술이므로, 본 연구에서는 인지증강 주요기술인 뇌이해, 뇌조절, 뇌조작 기술과 연관성 그리고, 신체증강 주요기술인 제어기술과 연관성을 고려하여 BMI를 기반기술로 고려함

그림 2 본 연구에서의 휴먼증강 기술 범위



II 휴먼증강 주요 기술

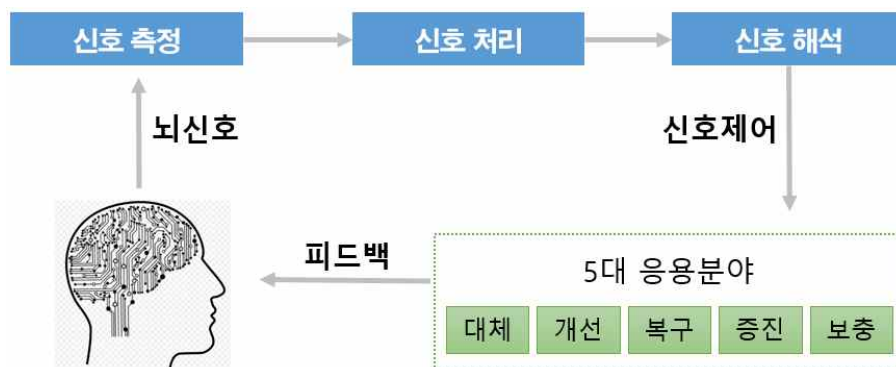
1 기반기술 : 뇌-기계 인터페이스 (BMI: Brain-Machine Interface)

가. 기술개요

- 정의

- 인간의 뇌를 기계와 연결하여 뇌 신경신호를 실시간으로 해석해 활용하거나 외부 정보를 입력하고 변조시켜 인간능력을 향상시키는 기술⁹⁾
- 뇌로부터 신경신호를 측정하는 방법에 따라 뇌파를 활용하면 BCI(Brain-Computer Interface) 기술, 미소전극을 활용하면 BMI(Brain-Machine Interface) 기술로 구분하였으나, 2000년 이후 동일한 기술로 분류

그림 3 뇌-기계 인터페이스 구조



- 시스템 구조

- (신호측정) 뇌로부터 다양한 종류의 신경신호들을 다양한 방법에 의해 측정
 - ※ 뇌-기계 인터페이스 기술은 응용 목적에 따라 뇌신호를 측정할 뇌영역을 결정해야 하므로 뇌영역 별 기능 정보는 매우 중요
- (신호처리) 노이즈 제거 등 신호 전처리 및 전처리 후 특징(Feature) 추출
 - ※ 측정한 뇌신호는 원하는 정보뿐만 아니라 인체의 기본생명 유지활동을 위한 생체신호 등 분석을

9) 2011년도 기술영향평가 결과(안), 뇌로 움직이는 미래 세상, 국가과학기술위원회, 2012



어렵게 하는 신호까지 포함되어 있으므로 노이즈 제거 등의 전처리 과정을 통해 이러한 신호를 제거하는 작업 필요

- (신호해석) 뇌신호 분류기술에 의해 사용자 의도 해석

※ 인공지능, 머신러닝, 딥러닝 기술 등을 적용해 뇌신호의 종류를 판별 및 해석

● 2가지 연구방향과 본 연구의 주요기술과의 관련성

- (생각만으로 외부기기를 제어하는 연구) 마인드리딩은 생각을 읽는 기술과 근력증강로봇은 사용자 의도를 파악해 외부기기를 제어하는 기술과 관련

- (외부정보를 뇌에 입력시키고 이를 변조함으로써 인지 및 지각 능력을 향상시키는 연구) 인공시각 및 인공청각은 지각을 향상시키는 기술과 뉴로피드백과 뇌임플란트는 뇌의 기능을 조절하고 변조하는 기술과 관련

● 5대 응용분야와 본 연구의 주요기술과의 관련성

- (대체) 질병이나 사고로 소실된 중추신경계 기능 대체 ☞ 인공지능, 인공청각

- (개선) 뇌신호를 처리하여 사지의 근육을 자극하거나 보조기 제어 ☞ 근력증강로봇

- (복구) 기능적 전기자극으로 소실된 중추신경계 복구 ☞ 뇌임플란트

- (증진) 뇌신호를 모니터링하면서 중추신경계 기능 증진 ☞ 뉴로피드백

- (보충) 인공팔, 인공다리 등 추가 기능 제공 ☞ 바이오닉 의수·의족

나. 세부 기술 분야

● 뇌 기능 및 구조 이해

- 뇌신경계의 신경생물학 및 인지과학적 이해를 바탕으로 뇌의 구조 및 기능의 근본원리를 파악하는 뇌연구 분야에서 연구수행

- 뇌연구는 본래 기초과학, 의학, 공학, 심리학과 다른 여러 분야가 서로 연관되어 있는 융합학문 형태로¹⁰⁾, 뇌신경생물, 뇌신경계질환, 뇌인지, 뇌공학 분야로 세분화됨

- 특히 뇌인지 및 뇌공학 연구는 본 보고서의 주요기술들과 밀접한 연관관계 형성

10) 뇌연구는 뇌과학, 뇌의약학 및 이와 관련된 모든 분야에 대한 연구(뇌연구촉진법 제2조)

표 3 뇌 연구 세부분야

세부연구	연구내용
뇌신경생물	뇌신경계의 형성과 기능에 대한 생물학적 운영 원리를 규명하고, 이를 바탕으로 응용기술을 개발하는 분야
뇌신경계질환	뇌의 구조 및 기능상의 결함 등에 기인한 신체적 정신적 질환 및 장애에 대한 원인규명과 이의 진단·치료·예방에 관한 분야
뇌인지	신경시스템이 외부로부터 정보를 받아들여 신경활동으로 전환하고 재구성하며 경험에 의해 변화하는 과정에서 형성되는 고등인지기능 연구와 그 응용기술 을 개발하는 분야
뇌공학	뇌의 구조와 기능을 측정 및 모델링하는 기술을 바탕으로 뇌신경계와 외부기기를 융합 하여 뇌신경계의 기능을 회복하고 증진시키는 기술을 개발하는 분야

출처: 뇌과학발전전략, 미래창조과학부, 2016.05

● 뇌신호 측정기술

- 뇌신호 측정기술은 모자나 헤드셋 형태의 장비로 머리 밖에서 측정하는 비침식형(noninvasive)과 외과수술로 뇌에 미소전극을 이식하는 침식형(invasive)으로 분류
- 비침식형 측정기술에는 뇌가 활동을 할 때 발생하는 전기신호인 뇌파(EEG)와 전기신호에 의해 생성되는 자기장 신호인 뇌자도(MEG)를 측정하는 방법과, 뇌가 활동하면서 소비하는 물질의 흐름을 측정하는 양전자단층촬영(PET), 단일광자단층촬영(SPECT), 기능적 자기공명영상(fMRI), 기능적 근적외선분광법(fNIRS) 등이 존재
 - ※ 비침식형 기술은 헬멧이나 헤드셋과 같은 저가장비를 사용하여 수술 없이 간편하게 측정할 수 있다는 장점과 시간해상도(temporal resolution)가 높은 장점을 가지고 있는 반면, 신호에 노이즈가 많이 발생할 수 있고 공간해상도(spatial resolution)가 낮다는 단점을 가지고 있음
 - ※ 뇌파는 편리하고 안전하고 저비용으로 실시간 뇌활동 정보를 측정할 수 있는 장점을 가지고 있으나 심장박동, 눈 깜빡임 등 생체신호정보의 잡음에 취약하고 낮은 공간 해상도를 갖는 단점 존재
 - ※ 뇌자도는 뇌파보다는 더욱 정밀한 뇌활동 정보를 측정하는데 유용
 - ※ 기능적 자기공명영상은 뇌 영역별 기능을 관찰할 수 있는 높은 공간 해상도를 가졌으나 실시간 측정이 어렵고 대형 측정기기가 필요하다는 단점이 존재
 - ※ 근적외선분광법은 기능적 자기공명영상에 비해서 가격이 저렴하고 뇌파에 비해서 정확하기 때문에 미래의 뇌신호 측정기술로 평가되고 있음
- 침습형 측정기술에는 대뇌피질 표면에 전극을 삽입하여 뇌신호를 측정하는 방법인 뇌피질전도(ECoG), 바늘모양의 전극을 뇌 깊숙이 이식하여 측정하는 LFP, MUA, SUA 등이 존재



- 이 밖에 단일 신경세포를 분리하여 유전자 발현 및 단백질 결합, 뉴런간의 연결성과 신경활성 변화를 종합적으로 분석하여 신경세포간의 기능적 네트워크를 파악하는 기술로 단일뉴런기록(Single Neuron Recording)기술이 존재

표 4 뇌신호 측정기술 종류

측정법		설명
비 침 식 형	뇌파 (EEG: Electro Encephalo Graphy)	두피에 전극(electrode)을 부착하여 뇌 활동에 의해 뉴런들의 발화를 통해 생성되는 전기활동을 측정하는 방법
	뇌자도 (MEG: Magento Encephalo Graphy)	뇌의 전기신호에 의해 생성되는 자기장을 측정하는 방법
	양전자 단층 촬영 (PET: Positron Emission Tomography)	방사성 동위원소를 포함한 방사성 의약품을 체내에 투입하여 뇌에서의 의약품 이동경로 또는 축적되는 부분을 관측하여 뇌 활동을 측정하는 방법
	단일 광자 단층 촬영 (SPECT: Single Photon Emission Computed Tomography)	감마선을 방출하는 방사성 의약품을 체내에 투입하여 뇌에서의 의약품 이동경로 또는 축적되는 부분을 관측하여 뇌 활동을 측정하는 방법
	기능적 자기공명영상 (fMRI: functional Magnetic Resonance Imaging)	뇌신경 세포들이 활동하면서 산소 소비량이 증가하고, 이를 보충하기 위해 그 구분의 혈류량이 증가한다는 사실에 착안하여 뇌 활동을 측정하는 방법
	기능적 근적외선 분광법 (fNIRS: functional near infrared spectroscopy)	적외선을 뇌에 투사하여 근적외선 영역대의 파장의 조사함으로써 뇌 활동을 측정
침 식 형	뇌피질 전도 (ECoG: ElectroCorticography)	수술을 통해 뇌 표면에서 신호를 측정하는 방법, 뇌 표면에서 측정하기 때문에 뇌에 직접적으로 손상을 주지는 않음
	LFP(Local Field Potential) MUA(Multi Unit Activity) SUA(Singa Unit Activity)	바늘모양의 전극을 뇌에 삽입하여 측정하며, ECoG에 비해 뇌에 손상을 줄 수 있으나, 상대적으로 더 좁은 뇌 영역의 변화를 측정할 수 있다는 장점 존재. 전극으로부터 측정된 신호의 처리방법에 따라 LFP(300Hz미만으로 저주파필터링), MUA(300Hz이상으로 고주파필터링), SUA(MUA를 스파이크정렬한 후 신호)로 구분

● 뇌신호 처리기술

- 뇌신호 처리기술은 전처리(Preprocessing)와 특징추출(Feature Extraction)단계로 구성되며, 세부목적에 따라 다양한 신호 필터링 처리 기술 등을 사용
- 분석에 적합한 신호획득을 위해서는 먼저 노이즈제거, 기준전압교정(Referencing) 등 신호 전처리를 수행하고,

- 그 다음 뇌신호 해석의 입력을 생성하기 위하여 시계열분석, 주파수분석 등을 활용하여 특징추출을 수행함

- 뇌신호 해석기술

- 뇌신호 해석기술은 뇌신호로부터 획득한 특징벡터를 입력으로 받아서 사용자의 행동 및 반응으로 분류 및 해석하는 기술
- 데이터 분포모델에 따라 다양한 분류기(Classifier)를 설계하여 사용
- 영상 및 음성 인식에서 사용되는 대부분의 분류기 적용 가능
- 주로 인공신경망(Artificial Neural Network)를 활용하고 있으며, 통계적 분류기법인 LDA(Linear Discriminant Analysis)와 SVM(Support Vector Machine)도 활용

2 인지능력 증강 기술

가. 뇌임플란트 (Brain Implant)

- 정의

- 신경계에서 기억을 관장하고 있는 신경회로 손상으로 인하여 기억의 저장 및 추출이 원활히 이루어지지 않는 경우, 손상된 신경회로를 대체할 수 있는 칩 이식을 통해 새로운 기억이나 지식을 생성하거나 기존의 기억을 삭제할 수 있는 기술¹¹⁾
- 알츠하이머환자나 치매환자, 해마의 신경회로가 손상되어 기억기능이 저하된 환자의 기억기능을 향진시키는 치료법으로 또는 범죄로 인한 트라우마를 겪는 환자에게 기억의 일부분을 제거하도록 도움을 주는 데 활용 가능
- 또한 선천적 학습장애나 인지장애가 있는 환자에게도 적용 가능

- 작동원리 : 중추신경회로, 해마에 이식된 뇌임플란트

- 기억형성에 가장 중요한 역할을 한다고 알려져 있는 해마에 칩을 이식하여 기억의 생성과 소멸을 조절
- 손상된 해마주변의 정상조직에 전극을 삽입하고 전극이 정상해마에서 방출된 전기

11) Engineering Memories: A cognitive neural prosthesis for restoring and enhancing memory function, Global Futures 2015 International Congress, 2013.



신호를 포착해 인공해마칩에 전송하면 인공해마칩이 손상된 해마조직 대신 전기 신호를 계산하고 계산된 신호를 다시 정상조직으로 보내 기억을 뇌에 저장

- 이 밖에 시각, 청각, 운동 능력 향상을 위한 바이오칩 연구가 수행되고 있음

나. 뉴로피드백 (Neuro Feedback)

- 정의

- 뉴로피드백은 뉴로테라피 또는 뉴로바이오피드백으로도 불리며 실시간으로 뇌파를 측정하여 뇌기능을 자가 조절하는 능력을 학습하는 바이오피드백의 일종¹²⁾
- 즉 뇌파를 측정 및 분석하여 자신의 뇌 활동 상태를 파악한 후 실시간 나타나는 뇌파성향이 건강한 패턴을 가질 수 있게 스스로 조절할 수 있도록 훈련시키는 기술

- 시스템 구성 및 작동원리

- (신호측정) 뇌로부터 뇌파를 측정
- (디지털변환) 전기신호를 디지털신호로 변환하여 모니터에 표시¹³⁾
- (신호피드백) 사용자는 다양한 노력을 통해 모니터에 나타나는 정보를 건강한 패턴으로 변화시키기 위해 노력하면서 인지능력을 향상시킴

(참고) 뇌파의 종류

- 델타파(1~4Hz)와 세타파(4~8Hz) : 수면, 마취, 졸림과 같이 의식이 저하된 상태에서 우세하게 나타나는 뇌파의 패턴
- 알파파(8~13Hz) : 안정상태에서 나타나는 뇌파의 패턴
- 베타파(13~30Hz) : 경우 느린 베타파는 집중상태, 빠른 베타파는 정서불안 및 각성상태에서 나타나는 뇌파의 패턴
- 감마파(30~50Hz) : 복잡한 계산, 추리, 판단과 같은 고도의 인지 작업시 나타나는 뇌파의 패턴

12) 과거에는 뉴로피드백을 BMI 기술범주에 넣지 않았으나 2010년 이후에는 뉴로피드백을 뇌 상태를 인식하는 BMI 기술의 일종으로 보고 포함시키는 것이 일반적인 경향임

13) 모니터에 전달된 정보는 실시간으로 변화하는 뇌파 그 자체일 수도 있지만 사용자가 쉽게 이해할 수 있도록 뇌파의 특정정보만을 선택해 그림이나 애니메이션 형태로 제공하기도 함

다. 마인드리딩 (Mind Reading)

- 정의
 - 뇌 활동 정보를 측정 및 분석하여 사람의 감정 및 생각을 이해하는 기술
- 시스템 구조 및 작동원리
 - (신호측정) 뇌로부터 신경세포 활동 측정
 - (신호처리) 잡음제거 등 특징추출에 적합한 데이터 생성
 - (신호해석) 특징추출 정보로 사람의 의도 및 상태 분석결과 도출
 - 전형적인 뇌-기계 인터페이스 시스템 구조(신호측정, 신호처리, 신호해석)를 따름
- 주요 응용 기술
 - 사람의 감정을 판단하는 기술
 - 사람이 머릿속에 그리는 이미지를 식별하는 기술
 - 사람이 머릿속에 그리는 생각을 음성이나 텍스트로 변환하는 기술

3 신체능력 증강 기술 : 지각능력

가. 인공시각 (Vision Bionics)

- 정의
 - 영상입력 장치를 통해 획득한 시각정보를 이미지 프로세싱과 같은 신호처리 후, 시신경에 이식되어 있는 미소전극에 전기신호를 가하여 시각정보를 대뇌로 전달하는 기술
 - 인공망막은 카메라를 이용하여 영상을 획득하는 방식과 눈에 들어온 빛을 포토 다이오드를 이용하여 전기신호로 변환하는 방식이 존재
- 작동원리 : 카메라 기반 인공시각
 - 안경 가운데에 위치한 소형 비디오카메라가 이미지를 획득해 휴대용 컴퓨터 프로세서로 전달



- 컴퓨터 프로세서가 전달된 영상을 시각정보로 변환하여 외부송신 안테나로 전송
 - 외부송신 안테나에서 시각정보를 내부수신 안테나에 무선으로 전송
 - 수신된 정보가 특수 내장회로에서 전기파동으로 변환되어 망막에 이식된 칩에 전달
 - 칩이 활성화되면서 수신된 영상정보에 따라 미소전극이 망막 신경세포를 자극
 - 뇌에서 시각패턴을 인식
- 이 밖에 카메라로부터 획득된 영상을 소리로 바꾸어 달팽이관을 자극하면 이 신호가 뇌의 시각피질에 전달되어 처리됨으로써 망막 자체가 손상된 시각장애인이 외부환경을 지각 가능하도록 하는 기술도 존재

나. 인공청각 (Ear Bionics)

- 정의
 - 손상된 청각세포¹⁴⁾를 대체해 뇌의 청각피질에 전기신호를 보내주는 장치
- 작동원리
 - 송화기가 소리를 획득해 언어합성기로 신호를 전달
 - 언어합성기에서 음성신호를 분석하고 데이터를 변조 후 외부송신 안테나로 전달
 - 외부송신 안테나에서 데이터를 내부수신 안테나에 무선으로 전송
 - 수신된 정보가 특수 내장회로에서 전기신호로 변환되어 와우에 이식된 칩에 전달
 - 칩이 활성화되면서 수신된 소리정보에 따라 미소전극이 청각세포를 자극
 - 뇌에서 소리를 인식
- 지각능력을 향상시키는 기술로 이외에 전자코, 오감센서 기술 등이 존재

14) 소리는 외이도를 통해 들어와서 고막과 이소골을 진동시키고 진동은 다시 달팽이관(와우)내에 있는 림프액 진동을 발생시킴. 림프액 진동은 약 1.5만개의 유모세포를 자극해 이 신호를 생체 전기신호로 변환하고 전기신호가 뇌에 전달되면 사람은 소리를 인식하게 됨

4 신체능력 증강 기술 : 운동능력

가. 근력증강로봇 (Exoskeleton Robot)

● 정의

- 인간의 신체로부터 생체신호를 측정하여 구동부를 제어하여 착용자의 신체능력을 향상시키고자 하는 장치¹⁵⁾
- 구동 메커니즘은 상지부와 하지부로 구분할 수 있으며 두 매커니즘을 동시에 지원 하는 형태도 존재
- 국방, 재난·안전, 의료·재활뿐만 아니라 제조, 건설업, 일반인 등 다양한 용도로 활용되고 있으며 휴먼증강 기술 중 응용범위가 가장 넓은 분야

● 근력증강로봇 종류

- 재료, 구조, 동작방식에 따라 외골격형(rigid exoskeleton)과 슈트형(soft exosuit)으로 구분
- 외골격형 시스템은 단단한 알루미늄이나 플라스틱의 프레임을 통하여 구동기의 회전력을 그대로 신체관절에 전달하기에 용이하다는 점과 신체외부에 위치하여 시스템 자체의 무게와 기반하중을 대신 지탱 가능하다는 장점이 있으나,
- 신체에 비해 크고 무거운 시스템이 비대해질 수 있으며 소재의 큰 관성이 시스템의 요구출력을 높여 전력소비가 크다는 단점이 존재
- 슈트형 시스템은 직물과 와이어 등으로 구성되어 가볍고 착용성이 우수하며, 근력 사용의 타이밍, 정확도, 유연성, 안정성 측면에서 장점이 있으나,
- 현재까지 개발된 직물형태의 구동기는 자체의 출력이 낮을뿐만 아니라 동력을 직선 운동만으로 신체에 전달할 수 있어 회전운동으로 변환하는 과정에서 동력전달 효율이 감소하는 단점 존재

● 핵심기술 요소

- (설계) 동력을 잘 전달하고 경량화를 위한 관절 구조 배치 및 경량화 설계기술
- (구동) 구동방식에 따른 동력을 생성할 액추에이터 기술
- (센싱) 사용자의 움직임 및 의도파악 기술

15) 중소기업 기술로드맵 2018-2020 : 로봇, 2018.



- (제어) 파악된 의도를 이용하여 위치 및 힘을 제어하기 위한 제어기술
- 이들 기술이 복합적으로 적용되지만 성능에 직접적인 영향을 주는 핵심기술은 액추에이터 기술과 사용자의 의도를 파악하는 기술

표 5		근력증강로봇 세부기술
분류		설명
기반 기술	설계	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 관절 구조 배치 및 경량화 설계 기술
	구동	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 모터 및 감속기 기술 ▪ 유압/공압 등의 큰 힘을 내기 위한 구동 기술 ▪ 높은 착용성을 위한 차세대 소프트 구동 기술
	센싱	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 뇌파, 뇌자도 등의 뇌신호 기반 동작의도 파악
	제어	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 실시간 제어 알고리즘과 이를 RTOS 구현 기술 ▪ 장치 드라이버 및 전원관리 등의 추가 요소 기술
데이터 관리	기구부 데이터	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 관절각도 및 각속도, 관절토크, 족저압, 배터리 잔량 등
	착용자 데이터	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 맥박, 호흡량, 산소포화도, 근전도 등 ▪ 착용자 나이, 성별, 신장, 몸무게 등

출처 : 2018년 중소기업 전략기술로드맵 : 재활훈련용 근력보조 웨어러블 로봇, 중소기업기술정보진흥원, 2017.

Ⅲ 기술분야별 연구동향과 특성

1 기반기술 : 뇌-기계 인터페이스 (BMI: Brain-Machine Interface)

가. 뇌 기능 및 구조 이해

- 본격적인 뇌연구와 뇌산업의 발전은 1990년대 미국을 중심으로 시작
 - 미국은 1990년대를 뇌의 10년(Decade of the brain)으로 선포하고 대학과 연구기관에 막대한 연구자금을 투입하기 시작하면서 이 분야에 대한 세계적인 관심을 불러일으킴
 - 유럽, 일본, 중국 등에서도 뇌연구에 국가적 차원에서 관심을 기울이면서 관련 연구가 수행되기 시작
 - 우리나라는 1998년 뇌연구촉진법을 제정하면서 본격적으로 뇌연구를 시작
- 첨단장비 개발과 혁신적 융합연구로 이론연구에서 벗어나 실증연구 단계로 도약
 - 뇌를 고해상도 영상으로 분석할 수 있는 첨단 뇌영상 촬영기법의 발전으로 뇌연구가 가속화
 - 2000년대에 들어서 뇌연구는 공학, 의학, 심리학과 융합연구가 이루어지기 시작
 - 2010년 이후 고성능컴퓨팅, 패턴인식, 빅데이터분석 기술의 발전으로 뇌로부터 획득 되는 대량의 데이터를 분석가능하게 됨으로써 가설중심 연구에서 데이터 분석을 통한 정보중심 뇌연구가 수행 중
- 언어, 감정, 지각, 작업, 판단 등 사람의 인지과정을 뇌영상과 신경회로 활성화에서 패턴을 찾아 이해하려는 연구가 활발하게 진행 중
 - 생명공학, 신경과학, 전기생리학, 뇌영상, 의학, 인지심리학 등 다양한 학문적 접근을 통해 행동과 인지기능간의 상호작용을 규명하는 연구가 확산
 - 언어, 사고, 추론 및 의사결정 이해를 연구하는 분야가 관심분야로 부각
- 선진국들이 대규모 연구자금을 투입하여 연구가 활발해지고 뇌산업이 육성되고 있지만 뇌과학 역사는 30년에 불과하고 아직은 밝혀내야할 미지영역이 많이 존재



나. 뇌신호 측정

- 20세기 초반 뇌파를 처음으로 측정하여 비침식형 기술이 개발된 이래로 대뇌심부에 전극을 삽입하여 신경세포의 활동을 측정하는 기술까지 개발
 - 1924년 독일 정신과 의사 한스 버거(Hans Berger)가 뇌파를 처음으로 측정하는데 성공
 - 1950년대 신경외과 의사인 와일더 펜필드(Wilder Penfield)와 허버트 야스퍼(Herbert Jasper)는 뇌전증 환자 치료 목적으로 심부뇌자극장치를 삽입할 위치를 밝혀내기 위한 방법으로 대뇌피질 표면에서 뇌파를 직접 측정하는 뇌피질전도(ECoG) 기술을 개발
 - 1972년 미국 MIT의 데이비드 코헨 박사는 초전도 양자간섭 센서가 부착된 뇌자도를 이용해 미세한 생체 자기장을 측정하는데 성공
 - 1970년 중반 인체의 대사활동이 활발한 곳에 모이는 성질이 있는 방사성 동위원소를 만들어 몸에 주입한 다음에 동위원소가 붕괴할 때 발생하는 감마선을 몸 밖에서 측정해서 동위원소의 분포를 영상으로 나타내는 양전자단층촬영(PET) 기술을 개발
 - 1990년 미국 AT&T 벨 연구소의 세이지 오가와 박사팀은 뇌가 활동할 때 많은 양의 산소가 필요한데 산소를 가진 산화헤모글로빈의 양이 증가하면 자기공명영상에 변화가 발생하는 현상을 이용하여 기능적 자기공명영상(fMRI) 기술을 개발
 - 뇌-기계 인터페이스를 위한 침식형 기술은 1998년 미국 에모리대 필립 케네디 교수 연구팀이 전신마비 환자의 뇌에 작은 칩을 삽입하는 데 성공하면서 본격적으로 연구되기 시작

- 최근에는 시간적 해상도가 높은 뇌파 또는 뇌자도와 공간적 해상도가 높은 기능적 자기공명영상 또는 기능적 근외적선분광법을 결합해서 보다 빠르고 정밀하게 뇌 활동을 측정할 수 있는 멀티모달 신호측정 기술 연구개발도 활발하게 이루어지고 있음

- 앞서 기술한 바와 같이 뇌신호 측정을 위한 연구는 어느 정도 발전이 이루어져 왔으나 이와 반대로 뇌에 신호를 입력하는 연구는 상대적으로 미비
 - 뇌에 전극을 삽입하여 신호를 국부적으로 전달하는 비침식형 방법이 주로 연구
 - 최근 특정 위치에 에너지를 전달하여 뇌 기능을 변화시키는 비침식형 기술(low intensity focused ultrasound) 연구사례가 발표되었음

다. 뇌신호 처리·해석

- 뇌신호 처리·해석 기술은 인공지능 응용 분야로 인공지능 및 기계학습 발전과 함께 성장할 것으로 기대
 - 뇌신호 측정 장치로부터 획득된 주파수 신호 및 영상 정보는 인공지능 기술 적용 측면에서 음성 또는 영상 정보와 그 특성을 공유하고 실제로 이 분야 전문가들이 관련 연구를 수행 중

라. 뇌-기계 인터페이스

- 1970년대 초 개념이 제안된 뇌-기계 인터페이스 기술은 1980년대 영장류 실험으로 인간에게 적용할 수 있는 가능성을 보여줌
 - 1973년 미국 UCLA대 자퀴스 비달 교수는 뇌-컴퓨터 인터페이스(BCI: Brain-Computer Interface)라는 용어를 처음으로 사용하면서 뇌의 전기신호로 사람과 컴퓨터가 서로 정보를 전달할 수 있다는 개념을 제안
 - 1980년대 존스 홉킨스대 연구팀은 원숭이의 뇌신호를 측정하여 움직임과 특정 뇌 신경세포 신호 간 상관관계를 밝혀냄으로써 이론의 토대를 다짐
- 1990년대 중반 이후 뇌연구에 대한 중점 투자로 뇌 작동원리가 조금씩 밝혀지고 2000년 이후 기계학습, 로봇 분야에서 기술발전으로 뇌-기계 인터페이스 기술도 함께 발전 중

표 6 뇌-기계 인터페이스 연구의 주요 마일스톤

년도	내용
1957	Djournalio & Eyrics, 청신경에 전기신호를 가하면 소리를 감지할 수 있음을 입증
1977	Jacques Vidal, 침식형 신호로 커서작동에 성공
1988	Mark Humayun, 시신경에 전기신호를 가하면 시각을 지각할 수 있음을 입증
1998	Phil Kennedy, 침식형 신호를 해석해 키보드로 단어를 입력하는데 성공
2004	브라운대, 침식형 신호를 해석해 로봇팔 제어에 성공
2008	ART, 뇌영상을 분석하여 사람이 보고 있는 문자나 도형을 재현하는데 성공
2012	스탠퍼드대, 뇌파를 분석하여 사람이 생각하는 글자를 알아맞추는데 성공



2 인공지능 증강 기술

가. 뇌임플란트 (Brain Implant)

- 뇌임플란트는 뇌-기계 인터페이스 기술 중 침식형 뇌신호 측정 기술의 응용 분야
- 최초의 뇌임플란트 장치는 심부뇌자극(DBS: Deep Brain Stimulation) 이라는 장치로, 이 장치는 우울증, 강박장애, 만성통증, 파킨슨병, 알츠하이머 등과 같은 신경정신질환의 치료에 활용 중
 - 심부뇌자극 장치는 뇌의 깊숙한 곳에 가늘고 긴 바늘을 꽂아 펄스형태의 약한 전류를 흘려보내서 뇌의 활동을 조절하는 장치로 1987년에 처음으로 소개되었고 1997년 미 FDA에서 파킨슨병 치료목적으로 사용을 승인
 - 치료효과는 보고되고 있지만 아직까지 신경회로에 영향을 미쳐 환자의 행동을 변화시키는 매커니즘은 거의 밝혀지지 않고 있는 상황
 - 뇌 깊숙이 전극을 삽입하는 기술이므로 다른 대안이 없는 중증환자에게 제한적으로 적용되고 있어 임상실험 대상 확보가 부족해 연구에 한계가 존재
 - 심부뇌자극 장치의 가장 중요한 연구 이슈는 동력을 전달하는 장치로, 뇌에 삽입하는 장치이기 때문에 배터리가 작고 가벼우면서 오래 쓸 수 있어야 하는데, 현재는 충전식이 아닌 경우 3~4년, 충전식인 경우는 5년마다 교체해야 하는 기술 수준
 - 인체에서 쓰지 않고 버려지는 에너지를 이용해서 전력을 획득하려는 바이오 연료 연구가 진행 중
- 인공 팔·다리, 키보드, 전자기기 등 외부기기를 제어하는 연구는 1990년 중반 최초 연구 결과가 발표된 이래로 지속적으로 많은 성과가 발표되고 있으나 아직은 제한된 환경에서 가능성을 보여주는 단계에 머물러 있음
 - 1998년 예모리대 연구팀이 전신마비 환자의 뇌에 전극을 심어 단순한 단어를 입력하는 실험에 성공한 것이 최초의 임상 사례이며, 이후 많은 연구가 발표되고 있음
 - 2000년 미국 듀크대 미겔 니콜렐리스 교수팀은 원숭이의 대뇌 운동영역에서 측정된 뇌신호를 실시간 분석하여 로봇팔을 구동시키는데 성공
 - 2004년 미국 브라운대 브레인게이트 연구팀은 사지마비 환자가 생각만으로 TV, 이메일 등 전자기기를 제어할 수 있는 기술을 개발

- 2012년 브라운대, 메사추세츠종합병원, 국가보훈처, 스탠퍼드대, 케이스리저브대 공동 연구팀은 사지마비 환자가 로봇팔을 제어해 커피를 마시는 실험에 성공
- 2014년 오하이오주립대 연구팀은 전신마비 환자의 뇌에 '뉴로브리지 칩'이라는 마이크로칩을 삽입하여 생각에 따라 손을 들어 올리는 실험에 성공하였으며 최근에는 손가락을 움직이거나 물건을 들어올릴 수 있을 정도로 발전
- 이 밖에 외과수술 없이 스텐트 시술로 전극센서를 심는 연구도 진행 중
 - 2016년 멜버른 대학 연구팀은 두개골을 여는 수술 없이 가느다란 철사장치로 대뇌피질 근처 혈관까지 전극이 달린 센서를 이동시켜 부착하는데 성공
- 미국의 브레인 이니셔티브 발표(2013년) 후 최근 5년 뇌임플란트 연구가 증가
 - DARPA는 UCLA와 UPenn(University of Pennsylvania) 연구팀을 선정하고 뇌임플란트 기술 개발에 4천만 달러를 투자
 - ※ UCLA연구팀은 기억형성을 관장하는 핵심영역인 내후각피질과 해마에 초점을 맞추어 기억복구용 보철 개발을 담당하고, UPenn 연구팀은 뇌의 여러 영역들을 모니터링하고 조절하는 기술 개발 중
 - DARPA는 또한 신경공학시스템디자인이라는 6천만 달러 연구예산 지원 프로그램을 마련하고 임플란트 형태의 뇌와 컴퓨터 사이의 광대역 인터페이스 개발을 위한 기초연구를 지원 중
 - ※ 브라운대, 컬럼비아대, 시력 및 청력재단, 존 B. 피어스 연구소, 버클리대, 파라드믹스를 연구기관으로 선정
- 뇌임플란트 분야에서 가장 주목받는 스타트업인 커널(Kernel)은 기억을 담당하는 뇌의 해마에 이식할 수 있는 작은 칩을 개발
 - 이 장치는 기억에 문제를 갖고 있는 환자의 특정 신경을 자극함으로써 뇌로 입력된 정보를 장기기억으로 전환하도록 도와줌
- 최근에는 테슬라가 뇌임플란트 분야에 관심을 가지고 투자를 진행하여 더 큰 주목을 받고 있음
 - 테슬라는 바이오인공지능 기업 뉴럴링크를 2016년에 설립하고 뇌에 작은 전극을 이식하는 신경레이스 기술을 개발 중



※ 신경레이스 기술은 액체 상태의 전자그물망을 뇌에 주입시키면 특정 뇌 부위에서 최대 30배의 그물로 펼쳐지면서 뇌세포 사이에서 전기 신호와 자극을 감지할 수 있는 기술로 알려짐

나. 뉴로피드백 (Neuro Feedback)

- 뉴로피드백은 뇌-기계 인터페이스 기술 중 비침식형 뇌신호 측정 기술인 뇌파를 사용하는 응용분야
 - 생각만으로 원하는 부위에 뇌 활동의 세기를 조절함으로써 정신 질환 및 문제를 치료
 - 약물실험이나 침식형 장치를 사용하는 물리적 실험과 달리 인체에 유해하지 않은 뇌파를 이용함으로써 임상실험이 쉽다는 장점 존재

- 1972년 미국 UCLA대 배리 스테르만(Barry Sterman) 박사는 뇌의 운동영역에 발생하는 뇌파인 SMR(Sensorimotor Rhythm)파¹⁶⁾를 뇌전증 환자가 자가 조절하도록 해 발작을 조절하는 데 성공하여 뉴로피드백의 치료효과를 입증
 - 이후 뉴로피드백 치료가 자폐, 우울증, 불면증, 불안장애, 주의력결핍과잉행동장애와 같은 다양한 정신질환을 치료하는데 우수한 효과가 있다고 보고됨
 - 2008년 캐나다 폴 스윈글(Paul Swingle) 박사는 뉴로피드백을 활용하여 주의력결핍과잉행동장애(ADHD)를 치료한 사례를 발표

※ ADHD 환자에게 영화 토이스토리를 보여주다가 뇌파에서 특정한 주파수가 커지면 영화를 중단하는 단순한 피드백을 줌으로써 치료효과를 입증

- 뇌파의 특성을 규정하는 뉴로피드백 프로토콜 연구가 개인 맞춤형 방식으로 전환
 - 초기 뉴로피드백은 뇌파의 일반적인 특성을 고려하여 뇌파의 느린 리듬을 강화하고 빠른 리듬을 억제하는 이완 프로토콜과 반대로 빠른 리듬을 강화하고 느린 리듬을 억제하는 집중 프로토콜을 사용하였지만 개인별 특성차가 커서 임상에서 효과가 없는 경우가 빈번히 발생
 - 2000년 이후 피검자의 정량적 뇌파진단 결과에 의존하여 뇌파의 특성을 결정하는 방식으로 전환. 즉, 피검자 뇌파 데이터를 기반으로 표준 뇌파범위를 설정하고 이를 벗어난 비정상 뇌파를 찾아서 정상범위로 조정하는 훈련을 수행

16) SMR은 12-15Hz 주파수 대역의 뇌파

- 뉴로피드백 프로토콜에 대한 체계적이고 학술적인 연구를 위하여 대규모 뇌파 데이터베이스 구축 필요
 - 뉴로피드백 대부분 제품들이 학문적 검증 없이 자체 데이터베이스를 기반으로 프로토콜을 개발하고 있어 제품의 신뢰도가 하락하고 기술 확산의 저해요인으로 작용
 - 국내 일부 회사에서 출시되는 제품 역시 선행 연구 논문에 기초하여 단순한 지표를 채택하고 있어 신경과학적 원리와 실험 방법에 입각하여 보다 체계적이고 학술적인 연구가 필요

- 뉴로피드백 치료효과에 대한 뇌의 작동 메커니즘을 규명하는 연구가 진행 중
 - 뉴로피드백의 효과를 인정하면서 그 원리를 플라시보 효과로 보는 견해가 존재했음
 - 최근에 뇌 활동을 영상으로 보여줄 수 있는 기능적 자기공명영상 기술이 발전하면서 이를 활용한 자가 뇌조절 또는 자기 치유를 뒷받침하는 연구결과들이 발표되어 그 작동 원리가 일부 밝혀지고 있음
 - 2007년 독일 튀방겐대 안드레아 카리아(Andrea Caria) 박사는 실시간 기능적 자기공명영상을 이용해서 피실험자 뇌의 오른쪽 섬엽 활동을 스스로 조절하는데 성공한 연구결과를 발표

다. 마인드리딩 (Mind Reading)

- 사람의 감정과 생각을 읽어내는 기술에 대한 많은 연구성과가 발표되고 있음
 - 주로 비침식형 뇌신호 측정 기술을 사용하여 왔으나, 최근에는 침식형 기술을 사용하는 연구결과들이 발표되고 있음

- 사용자의 감정을 읽어내는 기술 연구성과 사례
 - 2006년 미국 No Lie MRI 사는 진실을 말할 때 활동하는 뇌부위와 거짓을 말할 때 뇌부위가 다르다는 점을 착안하여 자기공명영상 기반 거짓말 탐지 기술을 개발
 - 2010년 그리스 아리스토텔레스대 바미디스 교수팀은 뇌파를 이용해 유쾌한 감정과 불쾌한 감정을 80%이상 정확도로 읽어내는 데 성공
 - 2012년 미국 MIT 솔로베이 교수 연구팀은 이마에 부착하는 근적외선분광법 센서로 사용자의 정신적 업무량을 측정하고 휴식필요 여부를 알려주는 장치를 개발



- 미국 MIT 미디어랩의 팬틀랜드 교수팀은 DARPA의 지원을 받아 외상후스트레스 장애(PTSD)를 스마트폰을 이용해서 진단하는 연구 프로젝트를 진행 중

● 사용자가 머릿속에 그리는 객체를 식별하는 기술 연구성과 사례

- 2008년 일본 국제전기통신기초기술연구소(ART) 연구팀은 기능적 자기공명영상으로 측정된 뇌영상을 분석하여 사람이 보고 있는 문자나 도형을 알아 맞추는 기술 개발에 성공
- 정지영상을 재현하는 기술에서 나아가 2011년 미국 UC 버클리대 잭 갈란트 교수팀은 동영상에서 객체의 윤곽을 약 75% 정도 일치율로 재현하는 기술을 개발
- 2018년 토론토대 연구팀은 피실험자에게 얼굴사진을 보여준 후 그 사람의 뇌파를 측정하여 흐릿한 수준으로 재구성한 기술을 발표

● 사용자의 머릿속 단어와 문장을 소리와 텍스트로 변환하는 기술 연구성과 사례

- 2012년 스탠퍼드대 연구팀은 스티브 호킹 박사의 시연으로 화제가 된, 뇌에 부착해 뇌파를 글자로 출력할 수 있는 ‘아이브레인’이라는 기술을 발표
- 2017년 페이스북은 생각만으로 1분에 100단어를 타이핑하는 것을 목표로 기술을 개발하고 있다고 발표
 - ※ 빌딩8이라는 비공개 조직을 두고 페이스북 이용자들이 생각만으로 메시지를 보낼 수 있는 기술을 개발 중
- 2018년 미국 MIT 미디어랩은 92%의 정확성으로 사람이 머릿속으로 생각한 단어를 읽어내고¹⁷⁾ 이를 텍스트로 변환하는 헤드셋 ‘알터에고(AlterEgo)’ 개발
 - ※ 알터에고는 15분 정도 사용자 커스터마이징 후 92% 정도 정확성으로 단어를 텍스트로 변환한다고 함
- 2019년 미국 컬럼비아대 저커먼연구소 연구팀은 침식형 뇌신호 측정기술을 이용하여 뇌전증 환자가 생각하는 숫자를 75% 수준의 정확도로 인식하는 기술을 발표
- 2019년 미국 캘리포니아대 호프스트라 노스웰 의대 연구팀은 두개골 안쪽 대뇌피질 표면에 전극패드를 부착하여 뇌신호를 측정하는 대뇌피질전도(ECoG) 기술을 사용

17) 사람이 말을 하는 것은 뇌가 얼굴 근육에 신호를 보내서 가능한 것인데, 연구에 의하면 소리를 내지 않고 마음속으로 무언가 생각을 하는 경우에도 뇌에서 얼굴로 근육신호를 보내는 원리를 이용하여 이 근육신호를 전극으로 포착한 후, 기계학습 시스템을 이용해 특정 신호를 특정 단어와 매칭하는 방식 사용

하여 사람이 머릿속으로 떠올린 단어와 문장을 음성으로 옮겨 주는 언어해독기¹⁸⁾ 개발. 쉬운 단어나 문장의 경우 69%의 정확도를 보여주고 있으나, 단어나 문장이 복잡해지는 경우 정확도가 47%로 감소하기도 하는 등 아직은 가능성을 보여주는 단계의 기술

- 숫자나 단순 단어를 떠올렸을 때 뇌신호를 감지하여 해독하는 것은 상대적으로 단순한 문제이지만 추상적인 문장을 해독하는 것은 아직까지 난제로 남아 있음

- 뇌파를 활용하여 생각만으로 외부기기를 조작하는 기술은 일부 상용화되어 제품 및 서비스가 출시 중

- 2009년 미국 위스콘신대 의공학에서는 뇌파로 사람의 마음을 읽고 명령을 실행하는 뇌-기계 인터페이스를 갖춘 휠체어를 개발
- 2010년 인텔에서는 뇌파로 작동하는 컴퓨터 개발 중에 있다고 발표
- 미국 뉴로스카이(NeuroSky)는 뇌파 기반의 인터페이스 마인드셋을 상용화
- 호주 이모티브(Emotive System)에서는 뇌파 기반의 인터페이스를 갖춘 게임 조작용 헤드셋을 판매 중
- 중국 하이얼은 IFA 2011에서 리모컨 대신 뇌파 감지 헤드셋으로 조작하는 차세대 스마트 TV 시제품을 공개
- 메르세데스 벤츠는 운전자의 뇌파를 모니터링하여 졸음운전을 할 경우 이를 감지해 알려주는 시스템을 개발
- 일본 도요타는 뇌파로 자동 변속되는 콘셉트 자전거를 개발
- 일본 닛산은 운전자의 뇌파와 눈의 움직임을 측정함으로써 방향전환, 가속 등 운전자의 의도를 파악하고 자동 조종하는 기술을 2018 CES에서 시연

3 신체능력 증강 기술 : 지각능력

18) MIT 미디어랩의 언어해석 기술은 15분 정도 커스터마이징을 하고 기계학습하면 92%의 정확도를 달성할 수 있다고 하나 아직은 음성인식 기술보다는 낮은 성능이지만 이는 뇌신호 데이터베이스가 구축되고 연구가 진전되면 빠른 시일 내에 현 음성인식 기술 정확도와 유사한 성능에 도달할 것으로 예상됨



가. 인공시각 (Vision Bionics)

- 카메라 기반 인공망막인 Argus가 2000년대 초중반 최초로 시각장애인에게 시술된 후 현재까지 200명 이상의 환자들이 시술을 받고 있음
 - 1988년 미국 남캘리포니아 대학의 마크 휴마이언(Mark Humayun) 교수팀은 시각장애인을 대상으로 망막 뒤에 위치한 시신경에 전기신호를 자극하면 뇌가 시각을 지각할 수 있다는 것을 실험으로 입증
 - 휴마이언 교수팀은 2002년과 2006년 사이 16개 전극을 사용하는 Argus 1을 환자 6명에게 이식하여 이들이 큰 글자를 보고, 컵, 접시, 칼 등을 구분하였다고 발표
 - 이후 60개 전극으로 구성된 Argus 2를 개발하여 2011년 유럽 CE와 2013년 미국 FDA에 의해 사용 승인을 받음
 - 현재 200명 이상의 환자가 이식받은 것으로 보고되고 있으며 우리나라는 서울아산 병원에서 2017년 처음으로 수술에 성공
 - Argus 2 다음 버전으로 240개 전극으로 구성된 장치가 개발 중

- 이 밖에 다양한 Argus 유형의 인공망막 개발 연구도 진행 중
 - 스위스 Intelligent Medical Implants사는 150개 플래티넘 전극으로 구성된 인공망막 Pixium IRIS를 개발하였으며, 2016년 유럽 CE는 IRIS 2의 사용을 승인함
 - 1995년 독일 본대학에서 개발한 인공망막 Epi-Ret은 아헨대학을 중심으로 Epi-Ret3이라는 이름으로 개발 중

- 포토다이오드 기반 인공망막은 2000년대 초 미국 옵토바이오닉스(Optobionics)에 의해 개발된 ARS와 독일 레니타임플란트사(Retina Implant)의 alpha-IMS가 존재
 - 포토다이오드 기반 인공망막은 1980년대 미국 옵토바이오닉스의 앨런 초우(Alan Chow) 교수팀에 의해 첫 연구됨
 - 앨런 초우 교수팀은 2002년 자체 개발한 인공실리콘망막 ASR을 망막색소변소성으로 거의 시력을 상실한 환자 6명에게 이식 후 이들이 기러기 무리 비행, 식탁보 무늬, 아내 얼굴을 알아볼 정도로 시력을 회복했다고 발표
 - ※ ASR은 핀머리 크기(2mm)에 머리카락보다 얇은 두께의 안구 내 빛을 동력원으로 하는 완전 삽입형 장치로, 광수용체 역할을 하는 3,500여개 미세광전지(Micro photodiode)가 있어 시상으로부터 빛을 전기신호로 전환하면 시신경에서 이를 감지해 대뇌 시각피질로 정보를 전달하는 방식

- 한편 2007년 독일 튀빙겐대 에베르하르트 쾰레너(Eberhart Xrenner) 교수팀도 광전지를 사용하는 인공망막 레티나임플란트를 개발하였고, 2013년 유럽 CE로부터 레티나임플란트의 상위 버전인 alpha-IMS의 사용승인을 받음
- 독일 레티나임플란트사는 1,500개의 전극으로 구성된 Alpha-IMS를 임상 실험 중
- 인공망막 기술은 고밀도 미소전극 어레이 개발, 고해상도 다채널 인공망막, 생체 적합형 장치, 인체에 무해한 전력공급이 주된 연구주제
 - 이 분야 연구자들은 사물 및 얼굴인식, 내비게이션 및 이동성 등을 위한 최소한의 필요사양으로 1,000개 이상의 전극이 필요하다는데 동의하고, 고밀도 미소전극 어레이 개발 및 고해상도 다채널 인공망막 구현을 목표로 연구를 수행
 - 세부적으로 망막의 곡선 형태에 적합하도록 얇고 유연한 기판 위에 전극을 제작하는 기술, 인체 내장형 기기 전원으로 최적의 자가발전 또는 무선 전력공급 기술, 생체적합한 장치에 대한 연구를 수행
 - 이러한 요구사항에 따라 인공망막 기술은 고집적 반도체 소자 및 MEMS 소자 제작 기술을 기반으로 무선통신기술, 마이크로 전력회로 기술, 무선 인터페이스 기술, 웨이퍼 레벨 패키징 기술 등의 통합 시스템 기술 형태로 발전
- 광유전학 기술¹⁹⁾을 활용한 인공망막 개발 연구도 진행 중
 - 전류는 퍼져 흐르므로 여러 신경세포를 자극하지만 빛은 직진성을 가지기 때문에 아주 좁은 영역의 신경세포만 선택적으로 자극하는 것이 가능하여 광유전자 기술에 많은 기대와 관심이 집중
 - 2011년 5월 미국 남캘리포니아대 앨런 호사저 교수 연구팀은 광유전학 기술을 이용해 눈이 먼 생쥐의 시력을 기초적인 수준까지 회복시키는데 성공
 - 젠사이트 바이오로직스는 2016년 최초로 광유전학 인공망막 임상실험을 시행
- 안구자체가 손상된 시각장애인들의 시력향상을 위한 연구성과도 발표됨
 - 카메라로부터 획득된 영상을 소리로 바꾸어 달팽이관에 전달함으로써 시각장애인이 뇌의 시각피질에서의 처리를 통해 외부환경을 보는 기술이 개발

19) 2004년 신경세포에 해조류에서 추출한 채널로돕신2라는 단백질을 바이러스를 이용해서 세포에 주입 후 특정파장의 빛을 비추어 단백질이 발현된 신경세포 활동을 마음대로 조절하는 기술



- 시력 저하 및 손실을 겪은 사람들이 아닌 일반인의 시력을 향상시키는 연구도 진행 중
 - 2015년 스위스 로잔공대 에릭 트렘블라이 교수팀은 캘리포니아대 조 포드 교수팀 과 공동으로 약 2.8배 확대가 가능하고 두께가 1.55mm 정도의 망원 콘택트렌즈를 개발
 - 2016년 캐나다 가쓰 웹 박사는 시력저하가 있는 사람의 시력을 교정해주는 것은 물론 건강한 눈(20/20)²⁰⁾을 가진 사람의 시력도 3배나 향상시켜주는 콘택트렌즈를 개발

나. 인공청각 (Ear Bionics)

- 1960년대 미국에서 최초로 단일채널 인공와우 이식수술에 성공
 - 1790년 이탈리아인 Alessandro Volta가 전기자극으로 소리를 들을 수 있음을 처음으로 발견
 - 1957년 프랑스인 Djournio와 Eyrices는 청각장애인의 내이에 전극을 삽입하고 전기자극을 가함으로써 음을 감지할 수 있음을 연구결과로 발표
 - 이후 1961년 미국에서 단일채널을 이용한 인공와우 이식수술을 처음으로 시행하였으며 1972년에는 단일채널 인공와우에 적용하여 착용 가능한 언어처리기를 개발
 - 1978년 호주의 Clark사는 10개 채널 전극을 이식 후 자극하여 전극의 위치에 따라 느껴지는 음의 높이가 다르다는 연구결과를 발표
- 1982년 다중채널 인공와우가 상용화되었으며 인공와우는 2012년 이미 30만 명 이상이 시술받은 대표적인 신경보철 기기
 - 다중채널 인공와우는 머리밖에 귀걸이 형태의 마이크 장치로부터 소리신호를 받아와서 주파수에 따라 분리한 다음 수술을 통해 미리 내이에 이식해 놓은 전극에 각 주파수에 해당하는 전류를 흘려보내는 기술을 채택
 - 이 분야 1위 기업인 호주의 코클리어사가 1982년에 최초로 상용화
 - 2012년 전 세계에서 인공와우 시술을 받은 사람은 32만 명을 넘어섰다고 보고됨

20) 정상적인 시력을 가진 사람이 바로 앞에서 봐야 하는 대상을 20피트(6미터) 떨어져도 잘 볼 수 있음을 의미

- 최근에 뇌의 청각피질을 직접 자극하여 소리를 듣도록 하는 기술이 대체 기술로 부상
 - 미국 프린스턴대와 존스홉킨스 공동연구팀은 소리를 전기신호로 변환해 청각신경에 전달할 수 있는 기술을 개발
- 또한 사람의 가청 주파수보다 훨씬 높은 소리를 들을 수 있는 연구도 수행 중

4 신체능력 증강 기술 : 운동능력

가. 근력증강로봇 (Exoskeleton Robot)

- 근력증강로봇은 2000년대 후반까지만 해도 기초연구라고 인식되어 온 분야였으나, 2010년대에 들어오면서 본격적으로 제품을 출시하기 시작
 - 최초의 근력증강로봇은 1960년대 중반 미국 GE가 개발한 하디맨(Hardi-man)으로 그 역사가 50년이 넘었으나 2000년 후반까지는 기초연구 단계에 머물러 있었음
 - 2000년 후반 이후 근력증강로봇에 적합한 고토크, 고출력 전기모터들이 개발되고 실시간 제어가 가능한 프로세서가 급격히 발전하면서 상용화 단계로 진입
- 초기에는 무거운 군사장비 운반 목적으로 개발
 - 2009년 미국 DARPA의 펀드를 받아 록히드마틴이 개발한 HULC(Human Universal Load Carrier)가 군사목적으로 개발된 대표적인 근력증강 로봇임
 - ※ HULC는 자체 무게가 37kg이며, 최대 하중을 탑재한 상태에서 행군 속도로 동력을 지속 공급할 때 8시간 동안 계속 작동 가능하고, HULC를 착용한 사람이 91kg 무게의 물건을 20km 이상 이동할 수 있는 것으로 알려짐
 - 세계 2위 군사용 로봇 기술을 보유하고 있는 것으로 평가되는 이스라엘은 주변국과 끈임 없이 전쟁을 치르는 와중에 군 인력 손실을 최소화하기 위한 목적으로 활발히 연구를 진행 중
 - 2011년 개발된 RB3D의 HERCULE은 프랑스 국방부와 DGA(Directorate General Armaments)의 지원을 개발된 로봇으로 약 100kg의 기반하중을 극복할 수 있으며, 최대 약 5시간 동안 시속 8km로 보행할 수 있다고 알려짐



- 군용목적으로 개발된 근력증강로봇 기술은 운동능력이 부족하거나 상실된 환자의 운동을 보조하거나 대체해주는 기술로 그 응용분야를 확장
 - 최근 NASA에서 우주에서 비행사의 근력을 유지하도록 돕고, 지구로 귀환했을 때 약해진 근력을 보조해 빨리 걷도록 도울 목적의 외골격 로봇 X1을 개발
 - 또한 장애인을 위한 보행보조기구 Ekso, ReWalk이 개발됨

- 특히, 고령화사회에 진입한 일본은 일상 및 근로현장에서 사용할 수 있는 로봇을 개발
 - Cyberdyne에서 2003년에 하지 외골격 로봇 HAL-3, 2006년에는 전신 외골격 로봇 HAL-5를 개발하였으며, HAL은 착용자의 근전도 신호(MEG)를 이용하여 착용자의 동작 의도를 파악하는 것이 특징
 - 혼다에서는 착용자의 체중지지 및 보폭관리를 목적으로 두 가지 형태의 보행 보조장치 WAD를 개발하였으며, WAD는 노약자들이 더 빠른 속도로 오랜 시간 보행이 가능하도록 도와줌
 - 파나소닉 계열의 Activelink 사는 유압기반의 고가반하중용 착용식 로봇인 Power Loader를 개발

- 슈트형 로봇 역시 DARPA의 지원을 받아 군인의 근지구력 향상을 목적으로 연구되기 시작하였음
 - 2006년 개발한 Soft ExoSuit가 대표적
 - 슈트형 로봇은 외골격형 로봇과는 다르게 부드러운 소재로 구성된 시스템으로 기존 외골격형 로봇의 단점인 무거운 무게에 의한 낮은 기동성을 개선하기 위해 가벼우면서 신체의 움직임을 방해하지 않는 시스템에 대한 연구가 진행 중
 - 가장 중요한 연구분야로는 무거운 전기모터나 유압모터를 대체할 수 있는 가벼운 동력원의 개발로 현재까지는 전기/유압 모터의 높은 출력과 정밀성을 대체하면서 유연하고 경량화까지 얻을 수 있는 동력원을 개발하지는 못하고 있는 실정
 - 지금은 동력원으로 비교적 가벼운 기존의 전기모터를 사용하고 그 외의 동력전달 매커니즘 및 골격을 유연하면서 가볍게 개발한 형태의 로봇이 연구되고 있음

- 최근에는 사람이 걸을 때 다리 근육이나 힘줄의 움직임을 모방해 걷기, 달리기, 높이뛰기 등의 동작에 필요한 에너지를 줄여주는 기술도 개발 중

- 벨기에 브뤼셀자유대 등 연구팀은 EC에서 275만유로를 지원(마인드워커프로젝트)받아 생각만으로 움직이는 로봇 다리를 개발
 - 하반신 마비 환자의 보행 보조도구 개발을 목적으로 하는 마인드워커 프로젝트는 뇌-기계 인터페이스, 가상현실, 기계제어 등 3개의 주요기술 개발로 구성
 - 마인드워커 프로젝트에서는 몸에 착용하는 로봇다리를 동작시키기 위해 어깨 근육에서 나오는 근전도 신호와 시각자극에 반응하는 뇌파신호를 사용
 - 마인드워커 프로젝트의 생각만으로 착용하는 로봇다리를 만든 것이 최종 목표

- 근력증강로봇은 경량화, 액추에이팅 기술 고도화, 센서 최소화를 통한 착용자 의도 파악 알고리즘 및 로봇 제어 기술 향상이 주된 연구주제임
 - 특히, 착용자 의도 파악 알고리즘 및 로봇 제어 기술은 힘 센서를 사용하지 않고 생체역학을 통해서 파악한 원리를 적용하여 모델링을 통하여 로봇과 착용자의 상호 작용 연구가 활발하게 진행 중



IV 시장특성 및 주요 플레이어 분석

1 뇌-기계 인터페이스 시장전망

- 그림 2에서 제시한 바와 같이 뇌-기계 인터페이스 기술을 기반 기술로 활용하면서 휴먼증강 기술 범위의 제품 및 서비스를 출시하고 있는 뇌-기계 인터페이스 시장을 살펴봄
- 영국 시장조사기관 Juniper Research는 뇌-기계 인터페이스 제품 및 서비스 시장이 2019년 30억 달러에서 2027년 176억 달러로 약 6배 성장할 것으로 전망 (CAGR 24.3%)
 - Juniper Research는 BMI 제품 및 서비스를 응용분야별로 아래 표와 같이 분류

표 7 시장자료에서 포함한 뇌-기계 인터페이스 제품 및 서비스

응용분야	제품 및 서비스	비고
의료	Cochlear Implants	지각능력 - 인공청각
	Visual Prosthesis	지각능력 - 인공시각
	Brain Rehabilitation	인지능력 - 뇌임플란트
	Limb Prosthesis	운동능력 - 사지보철
	Sleep Modification Tools	인지능력 - 뉴로피드백
일반 소비자	Gaming & VR	인지능력 - 마인드리딩
	Smart Home Control	인지능력 - 마인드리딩
	Guided Meditation	인지능력 - 뉴로피드백
자동차	ADAS	인지능력 - 마인드리딩
	BMI as a Control Interface	인지능력 - 마인드리딩
국방	Concentration Monitoring	인지능력 - 뉴로피드백
	Telepresence	운동능력 - 마인드리딩
	Exoskeleton Control	운동능력 - 근력증강
	Electrical Prescriptions	인지능력 - 뇌임플란트
	Threat Detection	인지능력 - 뉴로피드백
	SUBNETS(Systems-Based Neurotechnology for Emerging Therapies)	인지능력 - 뇌임플란트
	RAM(Restoring Acting Memory)	인지능력 - 뇌임플란트

출처: Brain Machine Interfaces 2018-2027, Juniper Research, 2018 발췌 및 재구성

- 예측기간 동안 의료시장의 시장규모 비중은 다소 하락하지만 여전히 절대적으로 큰 규모의 시장을 형성할 것으로 예측
- 의료분야(인공청각, 인공시각, 뇌임플란트, 사지보철 등)에서의 성공은 타 분야에서 이 기술에 대한 관심을 유도하여 점차적으로 타산업(일반소비자, 자동차)에서 시장이 형성될 것으로 전망
- 일반소비자 시장에서는 수면유도, 집중도향상 등 뉴로피드백 제품군이 출시
- 자동차분야에서는 ADAS 기능구현을 위해 BMI 기술 연구가 진행되고 있으며, 닛산이 이 분야를 주도하고 있고 벤츠, BMW, 르노, 현대 등도 연구수행 중

연도	의료	일반소비자	자동차	국방
2019	98.3%	1.1%	0%	0.6%
2027	84.3%	6.5%	6.4%	2.9%

2 휴먼증강 기술 시장특성

가. 제품 및 서비스의 시장성

- Juniper Research는 뇌-기계 인터페이스 분야 주요 제품 및 서비스에 대해 아래와 같이 6개의 항목을 선정하고 표9와 같이 시장성을 평가함
 - 소비자영향(제품확산 소요기간), 기술명확성(기술세부사양 표준유무), 사용자경험(제품사용 만족도), 생태계조성(BMI 기술 도입을 위한 산업생태계 준비 수준), 이 밖에 규제 및 비용 장벽 여부를 조사

제품 및 서비스	소비자 영향	기술 명확성	사용자 경험	생태계 조성	규제 장벽	비용 장벽	구분
Brain Rehabilitation	●	●	●	●	●	●	뇌임플란트
Electrical Prescriptions	●	●	●	●	●	●	
SUBNETS	●	●	●	●	●	●	
RAM	●	●	●	●	●	●	뉴로피드백
Sleep Modification Tools	●	●	●	●	●	●	



제품 및 서비스	소비자 영향	기술 명확성	사용자 경험	생태계 조성	규제장벽	비용장벽	구분
Guided Meditation	●	●	●	●	●	●	마인드리딩
Concentration Monitoring	●	●	●	●	●	●	
Threat Detection	●	●	●	●	●	●	
ADAS	●	●	●	●	●	●	
BMI as a Control Interface	●	●	●	●	●	●	
Gaming & VR	●	●	●	●	●	●	
Smart Home Control	●	●	●	●	●	●	
Telepresence	●	●	●	●	●	●	
Visual Prosthesis	●	●	●	●	●	●	인공시각
Cochlear Implants	●	●	●	●	●	●	인공청각
Limb Prostheses	●	●	●	●	●	●	근력증강
Exoskeleton Control	●	●	●	●	●	●	

구분	소비자영향	규제장벽	기술명확성	비용장벽	사용자경험	생태계조성
●	즉각	매우낮음	표준존재	매우낮음	매우 좋음	매우 좋음
●	<6개월	낮음	약한표준	낮음	좋음	높음
●	<1년	중간	약한경쟁	중간	중간	중간
●	<5년	높음	강한경쟁	높음	낮음	낮음
●	<10년	매우높음	표준없음	매우높음	매우낮음	매우낮음

출처: Brain Machine Interfaces 2018-2027, Juniper Research, 2018 발췌 및 재구성

나. 인공지능력 증강 기술 시장특성

● 뇌임플란트

- 뇌자극에 의한 신경학적 치료는 현재 뇌졸중 재활치료에 집중적으로 사용 중
- 이외에 파킨슨병과 같은 노인성 퇴행장애치료 및 간질치료에 장치가 개발되어 판매되고 있고(예: Brain Rehabilitation), 외상후스트레스장애 치료에도 활용 중(예: SUBNETS)
- 기억을 저장하고 조작하고 소멸하는 용도의 뇌임플란트 장치는 연구개발단계에 머물러 있음(예: Electrical Prescriptions, RAM)
- 고령사회로 접어들면서 뇌질환 인구가 증가함으로써 뇌임플란트의 잠재수요는 매우 클 것으로 기대되나,
- 시장성평가에서는 5점척도 기준 대부분 중간 아래의 점수를 부여받아 시장성이 낮게 평가되었으며 특히 소비자영향, 생태계조성, 비용장벽의 문제가 큰 것으로 조사

- 뇌임플란트 제품이 시장에 출시되어 주류 제품이 되기까지 장기 접근 필요

● 뉴로피드백

- 수면장애극복(예: Sleep Modification Tools), 명상유도(예: Guided Meditation), 집중력향상(예: Concentration Monitoring) 등을 위한 제품이 출시되고 있으며, 특별한 전문능력을 보유한 사람의 뇌활동 패턴을 활용하여 일반인의 능력을 향상시키기 위한 제품(예: Threat Detection)도 개발 중
- 뉴로피드백 제품군은 시장성평가에서 5점척도 기준 대부분 중간 위 점수를 부여받아 시장성이 매우 높게 평가되었으며, 특히 제품이 빠르게 출시되고 있고 규제 및 비용장벽도 낮은 것으로 평가되었으나, 상대적으로 제품 사용 후 만족도인 사용자 평가가 낮아 기술의 정확성 향상이 요구되고 있음
- 특정분야에서 우수한 집단의 뇌활동 패턴을 일반인의 능력향상을 위해 이용하고자 하는 분야 역시 아직은 제품이 상용화되기까지 수년의 시간이 필요하고 비용장벽도 존재할 것으로 분석됨

● 마인드리딩

- 뇌파를 활용하여 생각만으로 외부기기를 조작하는 기술은 게임이나 전자기기 등 일반 소비자 제품에 상용화되어 출시 중(예: Gaming & VR, Smart Home Control)
- 그러나 뇌파의 인식 정확도는 현재 90% 선으로 생각만으로 작동하는 휠체어처럼 정확한 구동이 중요하고 오작동이 치명적인 결과를 가져오는 제품에 및 서비스에 활용하기는 아직 어려운 수준(예: ADAS, BMI as a Control Interface, Telepresence)
- 마인드리딩 제품군은 시장성평가에서 정확도가 요구되는 기준에 따라 비교적 낮은 경우 5점척도 기준 대부분 중간 위 평가를 받아 시장성이 매우 높게 평가되었으나, 정확성이 높게 요구되는 경우 시장성이 낮게 평가됨
- 뇌신호 분석을 통해 운전 중 비상상황 시 운전자 반응과 제동의도를 파악하여 운전자가 동작하기 전에 차량을 자동으로 제동하는 뇌-기계 인터페이스 기반 운전자



보조시스템(ADAS: Advanced Driver Assistance System) 연구가 닛산을 선두로 벤츠, BMW, 르노, 현대 등 활발히 연구수행 중

- 자동차분야에서의 시장성공은 뇌-기계 인터페이스 시장성장의 기폭제로 작용할 것으로 기대
- 사용자의 머릿속 생각을 읽어내는 기술의 시장잠재력은 무궁무진하지만 현재는 제한된 환경에서 연구성과가 발표되는 단계에 머물러 있음

다. 신체능력 증강 기술 시장특성 : 시각능력

● 인공시각

- 인공시각은 상용화의 초기단계로 고밀도 미소전극어레이 개발, 고해상도 다채널 인공 망막 구현, 전력공급기술, 생체적합형 소재 개발 등 해결해야할 여러 문제가 존재
- 특히, 현 기술은 시각피질에 전기자극을 주는 경우 뇌에 상처를 내 시간이 지남에 따라 기기의 성능이 저하되는 문제도 가지고 있음
- 이러한 기술실현의 장애요인을 극복하기 위해서는 막대한 연구개발 예산 지원과 시간이 소요될 것으로 분석됨
- 시장성평가에서 5점척도 기준 대부분 하위 평가를 받았으며 비용장벽도 매우 높은 것으로 분석됨

● 인공청각

- 1964년 처음으로 환자에게 이식되었으며 1970년에는 다채널 장치가 개발되었지만 2000년대 초반이후 의료기기로 본격적으로 사용되기 시작
- 인공청각을 이식한 사람들은 청력검사에서 평균 80%의 문장이해력을 보여주고 있으며 표준 보청기의 10%의 문장이해력과 비교하여 매우 높음
- 시장성평가에서도 비용장벽을 제외하고는 5점척도 기준 중간 이상의 높은 평가를 받음
- 인공청각 제품가격은 3만 달러에서 최근 1.5만 달러로 절반가격으로 하락했지만 여전히

수술 및 재활 비용에 최소 10만 달러 이상(미국기준) 매우 많은 비용이 소요되고 있어 비용장벽이 존재하는 것으로 분석되고 있음

라. 신체능력 증강 기술 시장특성 : 운동능력

● 근력증강로봇

- 의료분야에서는 의수·의족에 뇌-기계 인터페이스 기술이 적용되어 시장성에서 기술 명확성과 사용자만족도 측면에 중간정도의 평가를 받았으며 나머지 조사항목에서는 낮게 평가되어 산업생태계 조성, 규제완화, 비용효율화 등이 요구되고 있음
- 근력증강로봇의 초기시장에는 군용목적의 근력증강로봇이 주를 이루었으나, 최근에는 근력이 필요한 산업현장용, 의료 및 재활용, 그리고 일반 노인인구의 근력증강 목적의 제품군들이 출시 중
- 시장성평가에서는 대부분의 조사항목에서 낮게 평가되어 사용자의 의도에 따른 제어의 정확성을 향상시키기 위한 뇌-기계 인터페이스 기술 발전이 요구되고 있음

3 분야별 주요 플레이어 분석

가. 인지능력 증강 기술

● 뇌임플란트, NeuroPace

- 뇌-기계 인터페이스 기술을 활용한 미국 소재 간질치료기기 제조업체
- 1997년에 설립되었으며 이식형 장치를 개발하기 위해 1.41억 달러 투자액을 모금
- 비정상적인 뇌신호를 탐지하여 자동조작되며 의사가 환자의 뇌활동을 모니터링 할 수 있는 기능을 제공하는 RNS 시스템을 개발

● 뇌임플란트, Kernel

- 뇌의 해마에 이식할 수 있는 슬립테크 개발



- 2017년에 1억 달러 투자액을 모금

● 뇌임플란트, Neuralink

- 테슬라 CEO 일론 머스크가 2016년에 설립한 바이오인공지능 스타트업
- 2017년 27백만 달러의 투자액을 모금
- 사람의 뇌에 신경레이스라는 칩을 이식해 컴퓨터와 연결하는 것이 목표
- 컴퓨터에 명령을 내리는 것에서 나아가 사람의 생각을 파일처럼 업로드하거나 다운로드 하는 것이 목표

● 뉴로피드백, InteraXon

- 2007년에 설립된 뇌파를 활용한 명상기기를 개발한 캐나다 소재 업체
- 대표제품으로 Muse 헤드셋을 출시
- 뇌파를 활용하여 사용자의 뇌활동을 해석 후 명상목적의 오디오 피드백을 제공

● 뉴로피드백, Halo Neuroscience

- 2013년에 설립된 미국 기반의 신생기업
- 현재까지 23.7백만 달러 투자액을 모금했으며 2018년 1월에는 시리즈B 기금으로 130백만 달러를 추가 모금함
- 대표제품인 Halo Sport는 뇌신호를 모니터링하기 위해 뇌파를 사용하지 않고 뇌의 특정부위를 자극하여 가소성 상태를 유도하는 뉴로프라이밍(Neuropriming) 기술을 사용
- Halo Sport는 뇌의 운동피질을 자극하여 뇌가 근육운동에 적응하고 학습하는 능력을 증가시켜 운동수행능력을 증가시킴
- 실제로 올림픽 400m 허들 선수, 마이클 틴슬리를 포함해 미국 대표팀 선수들이 사용했고 높은 사용자 경험 만족도를 보여주어 유명해짐

- 마인드리딩, NeuroSky
 - 한국인이 설립하였으며 실리콘밸리에 본사가 위치
 - 대표 제품은 염력 게임 포스트레이너
 - 세타파가 강해지면 게임 화면 속 공이 공중으로 부양하고 광선검에 불이 들어옴

- 마인드리딩, EMotive
 - 2011년에 설립된 미국회사로 뇌파 헤드셋을 개발
 - 뇌파를 기반으로 하는 뉴로피드백 시스템으로 감정 모니터링뿐만 아니라, 가상현실 및 실제현실의 물체를 제어하는 기술을 개발

- 마인드리딩, NISSAN
 - 자동차 분야에서는 닛산이 뇌-기계 인터페이스의 연구의 선두주자
 - B2V(Brain-to-Vehicle)로 불리는 뇌파 운전기술을 연구 중
 - 뇌파를 측정하는 모자를 착용하면 차량이 운전자의 의도를 파악해 브레이크를 밟거나 핸들을 자동으로 조작
 - 운전자의 동작보다 0.2~0.5초 빠르게 동작하는 것으로 발표

- 마인드리딩, Facebook
 - 2017년 페이스북은 뇌의 언어중추를 해독하는 프로젝트를 시작했다고 발표
 - 생각만으로 1분에 100단어를 타이핑하는 것이 이 프로젝트의 목표

나. 신체능력 증강 기술 : 지각능력

- 인공시각, SecondSight
 - 1988년에 설립된 미국에 기반을 둔 인공시각 신경보철 제조업체



- Argus 1의 임상실험이 2002년 6명의 환자를 대상으로 이루어졌으며, 그로부터 4년 뒤인 2006년 Argus 2의 임상실험이 멕시코에서 2건 실시되었고, 그 후 미국과 유럽에서 제한적으로 임상실험을 승인
- 뇌의 시각피질을 직접 자극하는 방식으로 작동하는 Orion 시스템을 개발 중에 있으며, 이 시스템이 성공적으로 개발되면 녹내장, 당뇨망막변증, 외상으로 인한 실명 등 적용환자의 범위가 확대됨으로써 인공시각 보철이 의료기기 시장에서 주요 제품이 될 수 있을 것으로 기대

- 인공청각, Cochlear Limited

- 인공청각 임플란트 및 관련 의료기기 분야의 선도적인 글로벌 제조업체
- 호주에 본사를 두고 1981년부터 인공청각기기를 제조
- 2017년 기준 9.93억 달러 매출을 거두었으며, 그 중 12%에 해당하는 1.2억 달러 정도를 매년 연구개발에 투자 중

다. 신체능력 증강 기술 : 운동능력

- 근력증강, Ekso Bionics

- 세계 근력증강로봇 시장 점유율 1위로 연간 100~400대의 로봇을 판매 중
- 군용 HULC, 재활치료용 eLEGS, 산업용 EksoVest와 Forties 로봇을 출시

- 근력증강, Rewalk Robotics

- Ekso Bionics와 함께 세계 근력증강로봇 시장을 선도하는 이스라엘 기업
- 대표제품으로 노약자 및 척추손상 환자를 위한 보행지원 로봇 Rewalk을 출시

- 근력증강, Tocuh Bionics

- 1960년대 설립된 전자의수 분야 세계 1위 기업

- 40여간의 노하우로 2007년 세계 최초로 판매용 전자의수 i-Lime을 개발
- 가장 최신 i-Lime 제품은 24종류의 서로 다른 그립 동작이 가능하고²¹⁾ 손가락 끝 부분에 압력을 측정할 수 있는 센서가 부착되어 물체를 잡을 때 압력조절이 가능

- 근력증강, Rythm

- 1919년에 설립된 독일회사로 의료보철 및 관련 장비 제조업체
- 최근에 뇌-기계 인터페이스 기술을 활용하는 사지 인공보철물 개발에 주력

21) 인간의 손으로 할 수 있는 복잡한 동작의 약 10% 정도에 미치는 수준



V 국내외 R&D 정책 동향

1 뇌연구 관련 R&D 정책 동향

가. 해외 : 21세기를 뇌의 세기로 선포하고 역대 최대의 연구비 투자

- 미국, 유럽, 일본, 중국은 21세기를 뇌의 세기로 선포하고 막대한 연구비를 투자 중
 - 1960년대 ‘우주를 정복하는 국가가 세계를 지배한다’는 냉전시대의 모토는 ‘뇌를 정복하는 국가가 미래를 주도한다’로 변경
 - ※ 선진 각국의 뇌 연구 관련 투자 규모는 과거 냉전시대 소련과의 경쟁에서 시작된 달 탐사 프로젝트에 비견될 만큼 방대
 - 뇌연구는 인류가 해결해야할 미래에 가장 기대되는 분야로 뇌의 이해 및 활용은 미래사회를 선도하고 삶의 질을 혁신할 것으로 기대
 - 이에 선진국들은 21세기를 뇌의 세기로 선포하고 프로젝트를 통해 인간 뇌에 근원적 이해에 도전하고 치매와 같은 뇌질환 극복을 위한 연구개발에 투자 강화 중

표 10 해외 뇌연구 프로젝트

국가	정책
미국	- 국립보건원(NIH) 인간커넥톰 프로젝트 투자 (2010년) - 오바마 정부는 BRAIN Initiative 발표 (2013년) - 구글의 커넥톰 프로젝트 (2014년)
EU	- 국가간 컴소시엄인 HBP 발표 (2013년)
일본	- 문무과학성의 ‘Strategic Research for Brain Science’ 프로젝트 (1997년) - Brain/MINDS 사업 착수 (2014년)
중국	- China Brain Project 발표 (2016년)

- (미국) NIH의 인간커넥톰 프로젝트 (HCP: Human Connectome Project)
 - 2010년 미국 NIH는 인간커넥톰 프로젝트에 **4천만 달러**를 투자한다고 발표
 - 인간커넥톰이란 인간 뇌의 신경세포들이 어떻게 연결되어 있는지 규명해 이를 도식화하는 것을 말함²²⁾

- HCP 프로젝트는 300쌍의 쌍둥이와 그들의 형제들로 구성된 1,200명의 건강한 성인을 대상으로 그들의 구조적·기능적 신경망 지도를 완성하는 것을 목표로 설정
- ※ 사람은 860억개의 신경세포가 존재하고 이들간의 연결인 시냅스는 100조 이상으로 알려져 있어 현 하드웨어 기술로는 구현하기 어렵다고 알려짐
- 신경세포 사이의 연결성지도를 만드는 일과 뇌 영역들 사이의 연결성 지도를 만드는 일로 나누어서 함께 진행 중
- 세부 연구과제에는 인간커넥톰 작성을 위해서 필요한 해상도가 높은 현미경 이미징 기술과 이를 통해 얻은 방대한 데이터를 처리할 분석 기술 개발을 포함하고 있음
- 2003년 인간게놈프로젝트를 통해 인간 유전체 지도가 완성된 이후 각종 질병진단 및 치료에 여러모로 이용되고 있는 것처럼, HCP를 통해 신경망 지도가 완성되면 유전적 요인으로만 설명하기 어려웠던 많은 뇌질환 진단과 치료뿐만 아니라, 인지 능력향상, 뇌모방 기계설계 등에 활용될 것으로 기대

- (미국) BRAIN(Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies) Initiative
 - 2013년 4월 오바마 정부는 NIH, DARPA, NSF 등 16개 유관기관이 연합한 국가 주도의 뇌연구 프로젝트에 10년간 30억 달러를 투자한다고 발표
 - 혁신적인 뇌공학 기술을 개발하여 유럽, 일본, 중국 등과의 뇌과학 분야 경쟁에서 선도적 위치를 선점하겠다는 목표
 - HCP에 이어 인간커넥톰 작성이 궁극적 목표이며, 세부적으로 뇌 신경 네트워크에서의 신경흥분패턴을 규명하고, 원인이 불분명한 알츠하이머, 파킨슨 등 다양한 뇌질환 매커니즘 규명 및 치료법 개발연구 수행
- (미국) 구글의 커넥톰 프로젝트
 - 2014년부터 구글은 뇌 신경망의 3차원 이미지 데이터를 분석해 뉴런에서 뻗어 나온

22) 미국 위스콘신주립대 존 화이트 교수가 1986년 시작하여 20년에 걸쳐 1mm 크기의 꼬마선충 뇌에 있는 302개의 신경세포와 그들간의 연결쌍 약 7,000여개에 대한 지도를 완성한 것이 최초의 커넥톰. 2013년 미국의 벤처기업인 오픈웜은 꼬마선충 커넥톰을 컴퓨터 시뮬레이션으로 구현하고, 2014년 해당 시뮬레이션을 로봇의 뇌로 작동하게 하여 로봇 제어에 성공. 2014년에는 미국 Allen 연구소가 쥐의 커넥톰을 발표. 연구팀은 EGFP(녹색형광물질)을 발현시킬 수 있는 아데노바이러스를 특정 뇌영역에 주입해 관심있는 신경세포들을 표지하고, 0.35nm 두께로 뇌를 절편화하고 이를 연속 이광자 현미경으로 촬영해 뇌의 하부 영역들간의 연결망을 작성함



신경돌기를 추적하고 이로부터 뉴런간 연결을 도식화하는 커넥톰 프로젝트를 추진 중

- 구글은 뇌 신경망의 3차원 이미지를 분석하는데 자사가 개발한 인공지능 기술을 활용함으로써 기존의 오류 분석시간을 1/100으로 단축시켰다고 발표함
- 사용된 인공지능 기술은 플러드 필링 네트워크(FFN)로 특정 이미지 픽셀을 파악한 후 객체 형태를 예측하는 인공지능 기술로 객체 예측 작업을 반복조정하면서 커넥톰을 작성
- 구글은 금화조 커넥톰을 작성하고 해당 연구성과를 2018년에 네이처지에 게재했으며, 현재는 미국 하버드대 휴즈 의학연구소와 공동연구로 초파리와 인간커넥톰 작성을 진행 중

● (유럽) 인간 뇌 프로젝트 (HBP: Human Brain Project)

- 2013년 EU는 25개국 135개 기관이 뇌과학 연구를 공동으로 추진하는 프로젝트에 **10년간 10억 유로**를 투자한다고 발표
- 슈퍼컴퓨터 등 ICT와 결합하여 인공뇌를 시뮬레이션 하는 것이 목표
- 미래의 의학 및 컴퓨팅 분야에 적용하기 위한 프로젝트로, 뉴로모픽컴퓨팅, 뉴로로보틱스 분야의 플랫폼을 구축할 계획
- 또한 인공뇌에 뇌질환을 발병시키고 그 치료법을 컴퓨터를 통해서 찾아내는데도 활용될 것으로 기대

● (일본) Strategic Research for Brain Science

- 1997년 일본은 뇌 연구개발에 대한 장기적인 구상 발표
- 1998년 이화학연구소(RIKEN)내 뇌과학연구원(BSI: Brain Science Institute) 설립하고, 2010년 약 3천억원의 예산을 지원
- 우울증, 치매, 발달장애 치료를 위한 뇌연구 및 뇌-기계 인터페이스 기술 개발이 목표

● (일본) Brain/MINDS(Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies)

- 2014년부터 **10년** 동안 진행되는 **300억원** 규모의 연구 프로젝트
- 영장류 뇌 이해를 통한 인간 뇌 이해 증진 및 뇌질환 극복이 연구의 최종목표

- 마모셋 원숭이 뇌지도 작성, 뇌지도 작성에 도움이 되는 최첨단 기술개발, 퇴행성 신경질환, 혈관성 뇌질환 및 신경재활 환자 임상연구 등 3개 프로젝트 추진

- (중국) China Brain Project

- 2016년에 15년 계획으로 MOST(Ministry of Science & Technology)와 NSFC(Natural Science Foundation China)에서 뇌 연구 프로젝트 발표
- 중국은 뇌질환 조기진단을 위한 효과적인 도구를 개발하고, 관련 질환 예방 및 치료를 위한 뇌 연구 및 기술개발 목표로 장기 프로젝트 수립
- 대뇌의 감지능력 탐구, 감정 형성과정 연구 및 지능기술 개발에 관한 연구 수행
- 동시에 뇌-기계 인터페이스 기술 개발 등 양방향 연구 수행
- 알츠하이머 등 뇌질환 이해 및 치료에 활용할 계획

- 미국, 유럽, 일본, 중국 등 주요국들의 대규모 프로젝트가 현재 진행 중이며 관련된 연구성과는 공개되고 있지 않음

나. 국내 : 10년 단위 뇌연구촉진기본계획 3차 수립 및 뇌연구 지원

- 1998년에 제정한 뇌연구촉진법을 기반으로 '뇌연구촉진 기본계획'을 수립
 - 1998년부터 10년 단위 기본계획이 수행되었으며 2018년 3차 기본계획이 발표됨
- (1차 뇌연구촉진 기본계획) 기초연구 기반 조성 및 뇌연구 주체별 연구역량 강화 목적
 - 한국뇌연구원 설립추진기획단을 구성(1998년)하고 뇌프런티어사업(2003년~2013년)을 통해 기초원천연구 기반 확보
 - 창의적 연구진흥사업, 우수연구센터사업, 국가지정연구실사업 등을 통하여 뇌분야 인력 양성
- (2차 뇌연구촉진 기본계획) 다학제 융합 및 핵심 기초역량 강화와 산학연 협력기반 구축 목적
 - 뇌분야 핵심 원천기술 역량확보와 뇌질환 등 사회문제 해결을 위한 뇌과학원천기술 개발사업 추진



- 2011년 한국뇌연구원과 KIST 뇌과학연구소를 설립하고, 2013년에는 IBS 뇌과학 이미징연구단 설립
 - 예산규모는 2008년 493억원에서 **2015년 1,243억원**으로 2배 이상으로 연평균 14.4% 증가
- 2016년 미래창조과학부는 2023년까지 뇌연구 강국을 목표로 ‘뇌과학 발전전략’을 발표
 - 2014년 기준 선진국 대비 72%인 기술수준을 2023년까지 90%로 향상을 목표로 4개의 핵심 뇌기술 조기 확보 과제 및 4개의 뇌연구 생태계 확충 과제 추진
 - 핵심 뇌기술 확보를 위해서 특화 뇌기능 지도 작성, 미래선점 뇌기술 개발, NI-AI 연계 뇌 연구 강화, 뇌질환 극복 연구 심화 과제 추진
 - 뇌 연구 생태계 확충을 위해 연구인력의 융합화, 연구자원의 안정적 확보, 세계 뇌 연구역량 활용 및 협력 강화, 미래 뇌산업 준비 등 과제 추진
- (3차 뇌연구촉진 기본계획) 뇌연구 경쟁력 강화 및 태동기 뇌산업 창출 목적
 - 뇌에 대한 근원적 이해 도전, 뇌질환 극복을 통한 국민부담 경감 및 삶의 질 제고, 뇌연구 기반 신기술 창출을 목표로 제시하고, 이를 달성하기 위한 6대 중점과제 발표
 - ① (인간 뇌에 대한 근원적 이해 도전) 연구자가 자유롭게 뇌작동 원리 및 뇌질환 기전 연구 등을 수행할 수 있도록 기초연구를 강화하고, 혁신적 뇌공학기술 개발을 기반으로 특화 뇌지도(뇌신경회로망 구조기능)를 구축하고, 경쟁형 R&D를 통해 글로벌 최초 지향 원천기술 개발 추진
 - ② (생애주기별 맞춤형 건강 뇌 실현) 치매, 우울증, 중독, 자폐 등 사회적 요구가 큰 뇌질환에 대한 투자를 강화하고, 질병별 코호트 및 빅데이터 구축 등을 통해 정밀의료 구현
 - ③ (뇌 작동원리를 타분야에 활용) 인공지능을 활용하여 뇌원리를 규명하고, 규명된 뇌원리를 활용해 차세대 인공지능, 뇌-기계 인터페이스, 뉴로모픽칩 등 4차 산업혁명의 핵심기반인 지능화 기술 개발
 - ④ (뇌연구를 통해 사회·문화적 행동 이해 제고) 미적 가치판단, 공감, 편견, 집단 갈등 등에 대한 이해를 위한 기초연구를 추진하여 이를 사회갈등 해소 등에 활용하고, 감성디자인, 뉴로마케팅, 신경건축 등에 대한 연구고도화 및 연구결

과물을 적용하여 일상생활에서의 편의성 및 만족도 등을 높혀 나갈 계획

- ⑤ (공유·융합을 촉진하기 위한 뇌연구 생태계 구축) 뇌과학 기술발전으로 발생 가능한 법적·윤리적 문제에 대응하기 위한 뇌신경윤리위원회 설치 및 뇌조직 분양 허용 등 규제개선을 추진하고, 미국, EU, 일본, 호주 등이 참여하는 국제 뇌과학이니셔티브(IBM: International Brain Initiative)에 참여하여 뇌과학 분야의 핵심정보(뇌지도 DB) 및 혁신적 기술 습득
- ⑤ (기술·창업 중심으로 태동기 뇌산업 육성) 정부 R&D 성과물의 사업화 촉진, 기업, 투자자, 연구자간 네트워크 활성화 등을 지원
- 뇌를 이해하면 치매와 같은 뇌질환을 극복하고, 4차 산업혁명이라는 큰 물결에 대응하여, 타 기술·산업과 융합하여 새로운 거대한 시장 창출이 가능할 것을 기대

2 뇌-기계 인터페이스 관련 R&D 정책동향

가. 해외 : 재활관점 인지·신체능력 증강 연구와 함께 윤리이슈도 연구

- (미국) DARPA는 인지와 신체 능력 재활을 위한 다수의 프로젝트 수행
 - 1974년 사람의 생체신호와 뇌신호를 이용하여 사람과 기계간의 직접적인 상호작용을 가능하게 하여 사람의 정서 및 인지능력을 파악하기 위한 목적으로 Closed Coupled Man/Machine Systems 프로젝트에 투자함으로써 뇌-기계 인터페이스 연구에 투자 시작
 - 2016년 신경공학시스템디자인(NESD, Neural Engineering System Design) 연구자금 지원 프로그램을 런칭하고 두뇌에 이식할 수 있는 임플란트 형태의 신경 인터페이스 개발에 6천만 달러를 투자하겠다고 발표²³⁾
 - 두뇌와 디지털 세계 사이에 광대역 소통 인터페이스 개발이 목표

23) 브라운대학교, 컬럼비아대학교, 시력 및 청력 재단, 존 B. 피어스 연구소, 버클리 캘리포니아 대학교 등 5개 연구기관과 파라드로믹스 1개 기업 참여하며, 이 중 4개 조직은 시력연구에 집중하고 나머지 2개 조직은 청력 및 말하기 영역의 연구 담당



표 11 인지와 신체 기능 재활 목적의 DARPA의 뇌-기계 인터페이스 프로젝트

프로젝트	연구목표
Revolutionizing Prosthetics (2006년)	인간의 감각운동 기능 재활
REMIND (2009년~2014년)	기억회복을 위한 BCI 시스템 개발
REPAIR (2010년~2015년)	뇌가소성을 설명할 수 있는 multi-scale의 생물학적 수학 모델 개발
RE-NET (2010년~2015년)	장기간 사용할 수 있는 안전하고 안정적인 BMI 시스템 개발
NESD (2016년~)	임플란트 형태의 광대역 신경 인터페이스 개발

- (유럽) BNCI(The Future of Brain/Neural Computer Interaction) Horizon 2020
 - 2010년부터 2011년까지 총 2년 동안 50만유로의 예산을 지원받아 수행되었던 Future BNCI 프로젝트의 후속 프로젝트
 - 2013년 11월부터 2015년 4월까지 90만유로의 예산을 지원받아 8개의 연구기관, 3개의 산업체, 2곳의 사용자 조직이 참여하여 추진
 - 기능이 저하된 사람들의 인지, 정서, 신체 능력을 향상시키기 위한 연구개발 및 윤리적 이슈 및 사회적 니즈 발굴을 포함한 BNCI 연구로드맵 완성이 목표
- (중국) 미국, 유럽, 일본 등과 비교하여 뇌연구 및 뇌-기계 인터페이스 연구지원 정책을 늦게 시작했으나,
 - 중국은 동물실험 규제가 비교적 약하다는 특성을 활용하여 미국과의 공동연구를 활발하게 수행함으로써 이 분야에서의 최신기술을 빠르게 흡수하고 있음
 - 또한, 알고리즘 및 아이디어를 겨루는 대회인 BMI Competition에서 지속적으로 좋은 성적을 달성 중

나. 국내 : 뇌연구 정책 내에서 지원, 뇌공학 투자는 상대적으로 저조

- 국가 차원의 뇌연구 중요성이 부각되면서 뇌연구 내에서 뇌-기계 인터페이스 기술 연구를 지원
 - 뇌과학 발전전략의 미래선점 뇌기술 개발 과제에서 ICT 융합을 통한 뇌기능 증진

기술, 로봇팔 제어를 위한 뇌감각 신호 활용기술 등 BMI 관련 기술 개발을 포함

- 미국과 유럽 등이 뇌연구와 관련하여 대부분의 예산을 뇌공학에 투자하는 것과 대조적으로 우리나라는 뇌공학에 대한 투자는 저조한 편
 - 2012년에서 2016년 사이 뇌연구 분야 정부투자액은 뇌의약학(40.7%) > 뇌인지(21.8%) > **뇌공학(16%)** > 뇌신경생물(15.8%) 순
 - 뇌의약학 분야의 경우 꾸준한 증가세를 보인 반면, 뇌인지, 뇌공학 분야의 경우 최근 급속한 증가세를 보이고 있음

3 근력증강로봇 관련 정책

- 근력증강 로봇은 의료, 국방, 재난, 제조, 물류 등 다양한 분야에서 사용되지만 관련 정책은 주로 의료분야에서 추진되고 있음

가. 해외 : 뇌-기계 인터페이스 기반 근력증강 로봇 연구 추진

- (미국) 미국 로보틱스 로드맵에서 재활로봇 연구 추진을 제시(2016년 11월 발표)
 - 재활치료 및 생활지원에서의 로봇활용 연구 추진
 - 전자의수 및 전자의족 및 웨어러블 로봇 관련 연구 추진
 - 뇌졸중, 치매 등 신경근계 질환 대응을 위하여 **BMI** 기반 웨어러블 로봇 연구 추진
- (유럽) 유럽 로보틱스 전략 연구 아젠다 2020에서 재활로봇 연구 추진을 제시(2016년 12월 발표)
 - 뇌신호 및 생체신호 기반 재활 및 치료용 웨어러블 로봇 관련 연구 추진

나. 국내 : 의료·재활 분야 로봇 연구 중점 추진

- 2014년 창조경제 실현을 위한 융합기술 발전전략의 15대 국가전략 융합기술에 신체 기능 복원 및 재활치료 기술개발이 포함



- 정부는 재난현장 대응기술을 위한 로봇 개발 계획을 기획하였으며, 2014년 재난대응 과학기술 역할 강화 3개년 실천전략에 재난대응을 위한 장비 탈부착식 굴절 로봇과 개인방호를 위한 실시간 위험감지 슈트, 근력강화 슈트 등을 포함
- 2016년에 발표한 대한민국 로봇산업 기술로드맵에서 **의료·재활 로봇을 중점 추진 연 구분야로 제시**
- 2017년 보건복지부는 산업통산자원부와 한국로봇산업진흥원과 함께 로봇보급사업의 일환으로 **의료·재활로봇 사업 확대** 추진
 - 2012년 보행재활로봇
 - 2013년 상지재활로봇
 - 2015년 체간보정재활로봇, 손재활로봇, 엔드이펙터형 보행재활로봇
 - 2016년 착용형 보행보조로봇
 - 2017년 외골격제어형 보행재활로봇과 상지재활로봇 중심으로 추진

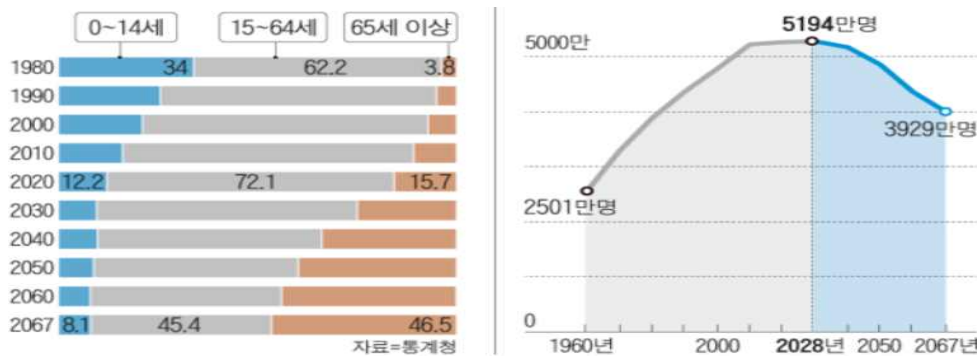
VI 휴먼증강 R&D 및 정책적 시사점

1 기술에 대한 수요와 관심 증대

가. 인구역학적 요인에 따른 휴먼증강 기술 수요 증대

- 통계청은 우리나라 인구가 2029년을 정점으로 감소할 것으로 전망
 - 통계청이 2019년 3월에 발표한 '장래인구추계(2017~2067년)'에 따르면, 우리나라 총 인구는 2017년 5,136만 명에서 2028년 5,194만 명까지 증가할 것으로 전망
 - 그러나 2029년부터는 감소세로 전환하고 2067년이 되면 3,929만 명까지 감소할 것으로 전망하고 있음
 - 이는 기존 발표에서의 추정²⁴⁾보다 인구정점이 더욱 빠르게 현실화되고 있음을 시사

그림 4 우리나라 인구변화 전망



출처: 인구절벽 눈앞..., 조선비즈, 2019.05.


- 저출산으로 인한 인구구조 변화로 생산가능인구가 지속적으로 감소
 - 우리나라 출산율은 2017년에는 1.05명으로 조사되었고 이 수치는 2021년에는 0.78명으로 더욱 하락할 것으로 전망(0.80 아래로 떨어지는 전 세계적으로 유일한 국가)
 - 2000년 통계작성 이후 처음으로 2018년에 생산가능인구가 전년 대비 감소(6.3만 명)

24) 2016년 발표에서는 인구정점을 2031년으로 추정함



- 2019년부터는 베이비붐세대(1955~1963년생)²⁵⁾가 고령인구로 편입되면서 생산인구 감소추세가 더욱 가속화 될 것으로 추정(2019년 생산가능인구가 24.3만 명 줄고 2025년에는 42.5만 명 감소할 것으로 전망)

- 고령인구 증가로 뇌관련 질환자 수 및 사회적 비용 증가가 예상
 - 2018년 65세 이상 전체 노인인구 738만 명 중 치매환자는 75만 명(10.16%)으로 추정
 - 초고령사회²⁶⁾로 진입하는 2026년에는 치매환자가 100만 명 이상, 치료법이 개발되지 않는다면 2050년에는 302만 명에 달할 것이라는 추정
 - 2017년 치매 관리비용은 연간 14.6조억 원을 기록(치매환자 1인당 관리비용은 2100만 원)

 뇌질환 치료에 집중적으로 활용되고 있는 뇌임플란트, 뇌인지 기능 향상을 위한 뉴로피드백, 시력 및 청각 기능 보조 및 향상을 위한 인공시각 및 인공청각, 근력 증강을 위한 로봇 기술은 **인구감소 및 고령화 시대에 보편적 복지기술로** 중요하게 자리매김할 것으로 기대


나. 21세기를 뇌의 세기로 언급할 만큼 뇌연구에 대한 관심 증대

- 1990년 미국을 시작으로 선진 각국들은 뇌연구에 박차를 가하고 있음
 - 미국은 인간커넥톰 프로젝트에 이어 BRAIN Initiative을 통해 인간 뇌지도 작성을 위한 기술개발에 총력을 기울이고 있으며,
 - 유럽은 HBP(Human Brain Project)에서 인간 뇌 시뮬레이터 구현을 위해 연구 중
- 뇌연구 분야의 발전과 기계학습, 빅데이터분석, 고성능컴퓨팅 등 주변 연구분야 발전으로 뇌연구에서 성과창출 가속화
 - 심리학, 의학, 공학 등 기존에는 독립적으로 연구를 수행했던 학문분야간 융합연구가 시작되고,
 - 20세기 후반 의학영상 기술과 컴퓨팅 기술의 발전으로 뇌내부를 들여다볼 수 있고 정신활동과 관련된 뇌신호 패턴을 분석가능하게 됨으로써,

25) 2018년 기준 약 719만 명으로 전체인구의 14.3% 차지

26) 전체 인구의 20% 이상이 65세 이상 노인인 사회

- 우주만큼 복잡한 뇌의 기능과 구조가 과거 30년에 걸쳐 빠른 속도로 밝혀지고 있음
- 거대 IT 공룡들이 뇌산업에 관심을 가지고 도전적 연구를 시작
 - 구글은 국가 프로젝트와는 별개로 자사의 인공지능 기술을 활용하여 인간 뇌지도 작성을 위한 연구를 수행
 - 페이스북은 SNS 소통방식에서 극적인 변화를 가져올 수 있는 생각만으로 메시지를 입력하는 마인드리딩 기술을 개발 중
 - 테슬라는 바이오테크 기업인 뉴럴링크를 설립하고 생각을 기계에 다운로드하고 업로드할 수 있는 뇌임플란트 칩을 개발 중

 선진 각국의 뇌연구 및 이를 활용한 뇌공학 투자는 뇌질환 예방과 치료로 국민 삶의 질 향상 등 보편적 복지실현 목적도 있지만 뇌를 조절하고 조작할 수 있는 기술을 구현하여 세상을 변혁할 만큼 파급력이 큰 신규 시장을 창출할 수 있는 뇌산업을 육성하겠다는 경제부흥 목적도 존재

다. 기대의 정점 단계에 있는 뇌-기계 인터페이스 기술

- 2010년 이후 세계 우수 기관들이 계속해서 뇌-기계 인터페이스를 유망기술로 발표
 - 2013년 BBC Tommorrow's World에서 유망기술로 선정('Your can upload the contents of your brain to a computer')
 - 2014년 다보스포럼에서 10대 유망기술로 선정(Brain-Computer Interface)
 - 2015년 한국과학기술정보평가원에서 11대 유망기술로 선정(생각대로 움직이는 기계 제어 기술)
 - 2019년 MIT와 WEF에서 10대 유망기술로 뇌-기계 인터페이스 선정
- 가트너는 2018년도 발표한 Emerging Technology 하이프사이클²⁷⁾에서 뇌-기계 인터페이스를 기대의 정점 단계에 진입했다고 분석함
 - 2013년 첫 등장 후 2017년까지 기술촉발(Innovation Trigger) 단계에서 점점 상승하여 위치하다가 2018년도 한 단계 더 진화해 기대의 정점 단계(Peak of Inflated

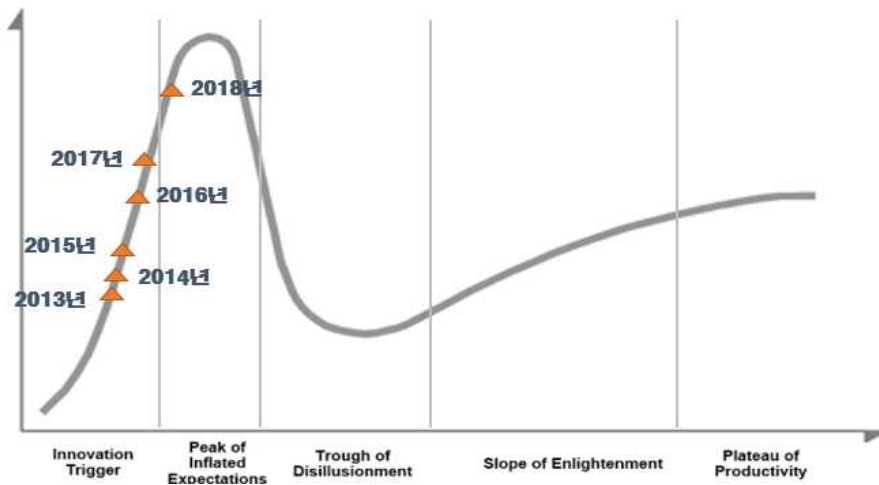
27) Human-Machine Technology 하이프사이클에서도 휴먼증강 소개



Expectation)로 그 위치를 변경

- 하지만 주류 기술로 편입되기까지 10년 이상 남은 기술로 평가하고 있음

그림 5 가트너 하이프사이클에서 뇌-기계 인터페이스 기술 위치 변화




👉 미래 유망기술을 발표하는 세계 유명 기관들이 지속적으로 뇌-기계 인터페이스 기술을 주목하고 관련 연구성과가 발표되면서 가트너는 2018년 뇌-기계 인터페이스 기술을 기대의 정점단계에 있다고 분석하였으나 주류 기술로 편입되기까지 10년 이상 남은 기술로 평가되고 있으므로 지속적인 연구투자 필요

2 연구성과의 창출과 시장의 발전

가. 최근 실용적이고 상업적 목적의 휴먼증강 기술 연구성과가 창출

- 뇌임플란트는 현재 뇌졸중 재활치료에 집중적으로 사용 중에 있으며, 이외에 우울증, ADHD, 만성통증, 파킨슨병, 알츠하이머, 외상후스트레스장애와 같은 신경정신질환 치료로도 활용
- 뇌신호 측정에서의 간편함과 안정성 덕분에 뇌파를 활용한 다양한 뉴로피드백 제품군이 일반소비자 시장을 형성

- 사람의 생각을 읽어내는 마인드리딩 연구에서 중요한 연구성과가 발표
- 지금까지 200명 넘게 인공망막을 시술받고 있으며 인공와우는 2012년에 이미 30만 명 넘게 시술되어 의료분야에서 보편적 기기로 인정
- 근력증강로봇은 초기 군용 로봇이 주였으나 최근에는 산업현장용, 의료 및 재활용 그리고 일반 노인인구의 근력증강 목적의 제품군들이 다수 출시 중


 인간의 정신과 신체를 최소 단위까지 역설계하면서 전에는 불가능했던 수준으로 이해하고 그 지식을 활용하면서 인간능력을 재건하고 회복하고 종국에는 타고난 능력을 증강시키는 방향으로 발전 가능한 휴먼증강 기술이 연구개발에서 성과를 올리기 시작하고 있으며 그 동안 이론입증 수준에 머물렀던 기술들이 상용화되어 보급되기 시작


나. 뇌-기계 인터페이스 시장은 일반소비자 시장을 형성하기 시작

- 의료와 국방에서 연구개발이 시작된 뇌-기계 인터페이스 기술이 실제 사용되기 시작
 - 특수 군부대를 중심으로 근력증강로봇이 배치되고 있으며 군인의 집중력 향상을 위해 뇌-기계 인터페이스 제품을 활용
 - 의료분야에서 뇌임플란트, 인공청각, 인공시각은 다른 대안 치료가 없는 경우 활용
- 뇌-기계 인터페이스 응용 의료기기 제품의 가격하락
 - 의료분야에서 뇌-기계 인터페이스 응용기기 사용이 증가하여 단위당 생산가격 하락
 - 인공청각은 초기에 3만 달러 이상 이었지만 최근 1.5만 달러로 절반 이상 가격 하락
 - 이러한 비용하락은 더 많은 수요와 더 많은 공급가격 하락이라는 시장의 선순환 구조를 형성함으로써 많은 환자들이 혜택을 받을 수 있을 것으로 기대
- 근력증강로봇 시장의 세분화 및 분야 확대



- 근력증강로봇은 수요분야의 특성에 맞추어 시장이 세분화되었으며 의료와 국방에서 시작된 시장은 제조, 물류, 일반소비자 시장까지 그 영역을 확대 중
- 특히 제조 및 물류 현장에서 근력증강로봇 도입이 빠르게 증가
- 근력증강로봇 시장 강국인 일본은 하네다 및 나리타 공항에 근력증강로봇 HAL을 도입했으며, 사이버다인은 노령자용 로봇 슈트를 시판하고 있으며 도요타는 재활 지원 로봇 웰워크(WelWalk)를 출시

 뇌-기계 인터페이스 시장은 단기적으로 수면유도, 명상, 집중력향상 등 뇌 신경신호 분석결과를 단순 응용하는 제품 및 서비스가 주류를 형성할 것으로 보이나, 장기적으로는 생각을 업로드하고 다운로드할 수 있는 뇌임플란트나 생각을 읽어 외부기기를 제어하는 등, 좀 더 복잡한 뇌 신경신호 정보를 요구하거나 **외부에서 뇌 신경신호를 직접 조작하는 기술이 적용된 제품들이 주류를 형성할 것으로 예상**

 따라서 다가오는 미래에는 휴먼증강 기술이 웹검색, 게임, 명상, 가상현실 등 디지털 세상의 무궁무진한 영역에 응용분야가 확대되면서 인간의 생활을 더욱 윤택하게 하는데 중추적인 역할을 담당할 것으로 기대

다. 생각이 현실로, 달라지는 미래

- 휴먼증강 기술은 영화 속 주인공을 현실 속 인물로 만들어가고 있음
 - 1973년 미국에서 방영된 TV 시리즈 ‘6백만불의 사나이’ 주인공은 망원경으로 줌인 하듯 먼 곳을 볼 수 있고 어둠속에서도 볼 수 있으며 콘크리트 벽도 파괴할 수 있는 팔힘을 보유하며 100m를 3.7초에 달릴 수 있었음
 - 본 보고서에서 다루고 있는 인공시각 및 근력증강로봇 기술은 더 이상 6백만불의 사나이를 드라마 속에만 두지 않고 현실에서 만날 수 있는 인물로 만들어가고 있음
- (단기) 휴먼증강 기술이 그리는 미래 시나리오
 - 뉴로피드백 기술이 학생들의 학습능력을 증진시키기 위하여 활용되기 시작

- 뇌파를 인식하여 사용자의 생각대로 동작하도록 휴대폰 사용자 인터페이스가 변화
- 기업이 제품에 대한 소비자의 무의식 반응을 읽어내는 방식으로 소비자 선호도 조사
- 뇌질환 환자의 병변 부위의 뇌활성도를 조작하여 뇌질환 치료

● (장기) 휴먼증강 기술이 그리는 미래 시나리오

- 보지 못했던 것을 보고, 들을 수 없는 것을 듣고, 느끼지 못했던 것을 느끼는 등 사람의 지각능력이 확장
- 뇌를 이해하는 기술은 사람들이 생각만으로 서로 의사소통을 가능하게 함
- 사람들은 감각기관을 거치지 않고 직접 뇌로 정보를 받아들이고 인터넷에 연결된 모든 컴퓨터의 연산능력을 갖고 인터넷에 연결된 사람들과 뇌로 직접 연결됨

☞ 장기 시나리오에서 그리는 휴먼증강 기술이 구현되면 과학기술이 인간에게 자연환경을 극복하고 경제적 풍요를 가져다 준 변화의 수준을 넘어 인간과 기계 그리고 인간과 인간 사이의 경계를 허물고 **인간의 본질을 변화시킬** 가능성이 존재

☞ 따라서 정부는 기술개발 육성정책과 함께 사회가 안전하고 지속적으로 유지 가능하도록 휴먼증강 기술 **연구개발**에 있어서 **윤리 가이드라인**을 마련할 필요성이 존재

3 휴먼증강 기술 실현을 위한 극복 요소

● 뇌 구조와 기능 이해 향상

- 뇌-기계 인터페이스 기술은 뇌활동을 실시간으로 해석해 활용하는 기술이므로 목적에 맞는 뇌신호를 측정하기 위해서는 뇌 구조와 기능 정보가 필요하고, 반대로 뇌 기능을 조작하고 조절하기 위해서는 신경세포간 정보처리 메카니즘도 알아야함
- 아직은 이러한 뇌 구조와 기능, 그리고 신경세포간 정보처리 과정이 공학적으로 역설계가 가능한 수준까지 밝혀져 있지 않아 뇌-기계 인터페이스의 복잡한 응용에 있어서 장애요소로 작용



- 하지만 인간 뇌 지도가 완성되고 뇌 시뮬레이터가 구현되면 이와 관련된 필요한 정보가 제공되고 연구될 수 있을 것으로 기대

● 뇌 신경신호 측정기술의 고도화

- 측정의 간편함과 안정성 때문에 뇌파는 현재 뇌-기계 인터페이스의 응용 제품에서 가장 많이 사용
- 그러나 뇌파의 인식 정확도는 90% 선으로 게임이나 수면유도 등 오류가 크게 문제가 되지 않는 곳에서는 응용 가능하나 생각만으로 혈체를 작동시키는 등 오작동이 사람에게 치명적인 경우에는 활용하기 어려운 수준
- 뇌파는 측정할 때 함께 획득되는 여러 생체정보 및 잡음 때문에 인식 정확도를 높이는 데 한계를 가지고 있고 이 때문에 뇌전도나 대뇌피질전도와 같은 다른 측정기술을 뇌파의 대안기술로 연구 중
- 또한 뇌임플란트 응용분야에 사용되는 전극칩의 경우 넓은 범위에서 신경신호를 측정할 수 있고 이때 얻어진 대규모 신경 데이터를 실시간으로 처리하는 기능을 갖춘 칩에 대한 개발요구도 큰 상황

● 생체 친화적 소재, 지속 가능한 배터리, 뇌 시뮬레이터 기술

- 침식형 기술은 뇌 깊숙이 전극을 삽입하는 기술이기 때문에 생체 친화적 소재와 동력을 제공하는 배터리에서 안정성이 보장되고 지속 가능한 기술이 필요(현재는 배터리의 경우 충전식이 아닌 경우 3~4년마다 충전식인 경우 5년마다 교체해야함)
- 전극을 뇌에 삽입한 후 문제가 발생하면 전극을 제거하는 어려운 외과적 수술이 필요하기 때문에 다른 치료 대안이 없는 환자만을 임상 실험할 수 있도록 허용하고 있음. 이 때문에 연구자들은 피실험자 확보가 어려워 연구의 한계를 겪음
- 뇌 시뮬레이터가 개발되면 임상실험 전에 시뮬레이터 내에서 가상실험을 먼저 수행함으로써 임상실험의 성공을 높일 수 있고 이로 인해 피실험자 확보가 좀 더 쉬워질 것으로 기대

● 휴먼증강 기술 연구개발의 윤리 가이드라인 마련 필요

- 대부분 휴먼증강 기술의 연구개발 초기 목적은 질환을 치료하고 약자를 돕고 장애를 극복하는데 있지만 이러한 기술은 필연적으로 일반인의 생물학적 한계를 초월하는

기술로 발전할 것임

- 생각이 행동만큼이나 외부환경에 영향을 미칠 수 있는 뇌-기계 인터페이스 기술이 보편화된 사회에서는 개인의 행동결과에 따라 유무죄를 판단하는 법치주의 시스템에서 생각까지 고려하는 사회유지시스템이 필요한지 논의 필요
 - 또한 타인이 나의 생각이나 행동을 동의 없이 인지하는 등 개인 프라이버시를 침해하는 문제가 대두될 수 있음
 - 더 나아가 휴먼증강 기술이 경제적인 이유로 누군가는 혜택을 받고 또 다른 누군가는 혜택을 받지 못하는 경우 인간의 생물학적 능력은 평등하게 주어졌다고 가정된 사회에서 인간이 태어날 때부터 또는 살아가면서 생물학적 능력이 기술로 달라질 수 있는 사회로의 변화 가능성도 존재
 - 이처럼 휴먼증강 기술은 법치주의 시스템의 토대를 흔들고 개인 프라이버시를 침해하고 인간의 생물학적 능력에서 양극화를 가져올 수 있는 기술이므로 연구자들은 기술개발에 있어서 윤리의식이 필요
 - 따라서 정부는 기술개발 육성정책과 함께 사회가 안전하고 지속적으로 유지 가능하도록 휴먼증강 기술 연구개발 윤리 가이드라인을 마련해야함
- 불법 활용방지와 안정성 확보 관련 법·제도 마련
 - 뇌 신경신호의 무분별한 상업적 활용, 허가받지 않은 불법적 활용 등을 미연에 방지하기 위하여 뇌 신경신호 사용과 관련된 법·제도·규제 마련 필요
 - 사용자의 제어능력, 뇌활동 패턴인식 오류로 인한 기계 오작동 등 문제를 사전에 정의하고 대응책 마련 필요
 - 인체에 삽입하는 침식형 기술의 경우 안전성 문제가 가장 큰 이슈이며 엄격한 안전성 기준과 평가체제 등 규제 마련 필요
 - 시장초기 기술의 안전성 및 정확성 부족으로 부작용이 발생하는 경우 부정적 인식이 확산되고 그 결과 시장발전이 저해되지 않도록 국민 이해 및 홍보도 필요



참고문헌

• 보고서

송재준, 인공와우이식, 대한의사협회지, 2007.

현병환, 뇌연구 동향과 향후 과제, 한국과학기술단체총연합회, 2011.04.

이천무, 뇌과학연구 동향 및 시사점, 한국과학기술기획평가원, 2011.09.

전황수, 뇌-컴퓨터 인터페이스 기술 및 개발 동향, 전자통신동향분석, 2011.10.

조동일, 인공망막 보철의 현주소 그리고 미래동향, IDEC Newsletter, 2012.01.

2011년도 기술영향평가 결과(안), 뇌로 움직이는 미래 세상, 국가과학기술위원회, 2012.

이월태, 포스트휴먼시대 인간과 기술의 소통모델: 네트워크 사이보그, 정보통신정책연구원 미래연구포커스, 2014.

장준영, 윤장우, 이전우, 배창석, 정호영, 이주연, 김주엽, 임지연, 민옥기, 뉴로시넵틱 인지컴퓨팅 기술 동향, IITP 주간기술동향, 2014.12.

우운택, 증강현실 그리고 증강휴먼, 한국인터넷진흥원 Power Review, 2015.08.

남창수, 김성필, D. Kruskenki, A. Nijholt, 뇌-컴퓨터 인터페이스 기술에 대한 국내외 연구개발 동향 조사 최조보고서, KSEA, 2015.12.

이종관, 포스트휴먼을 향한 인간의 미래, 정보통신정책연구원 미래연구포커스, 2015.

김정인, 윤선경, 오현경, 이승환, 주의력결핍 과잉행동장애 아동의 뉴로피드백 훈련에 대한 임상적 의의, JKNPA, 2015.

장재호, 송우근, 착용형 로봇의 기술현황, 기계저널, 2016.02.

Innovations in Human Enablement and Enhancement Technologies, Technavio, 2016.03.

배창석, 인공지능 및 인지 컴퓨팅 기술 동향, IITP 주간기술동향, 2016.03.

- 중국의 뇌과학 정책 및 연구 동향, 한중과학기술협력센터, 2016.03.
- 윤장우, 뇌과학 기반 인지컴퓨팅 기술 동향 및 발전 전망, IITP 주간기술동향, 2016.05.
- 뇌과학 발전전략, 미래창조과학부, 2016.05.
- Brain Computer Interface Opportunities, Frost & Sullivan, 2016.07.
- 김동화, 뇌-컴퓨터 인터페이스 기술 소개와 전망, NIA ICT Explorer, 2016.10.
- A Roadmap for US Robotics From Internet to Robotics, 2016.11.
- Robotics 2020 Multi-Annual Roadmap: for Robotics in Europe, Horizon 2020 Call ICT-2017, SPARC, 2016. 12.
- 이승민, 송근혜, 인체플랫폼, ETRI 기술경제연구본부 Insight Report, 2016.
- C.S. Nam, A. Wadson, I. Choi and M. Whang, Brain-Computer Interface: An Emerging Human-Computer Interaction Technology, Handbook of Human-Computer Interaction, Wiley Press, 2016.
- 권기선, 양준혁, 이지연, 노화대응 신체활력 기술개발 현황 및 제언, 한국보건사업진흥원 R&D조사분석팀, 2016.
- 중소·중견기업 기술로드맵 2017-2019, 중소기업기술정보진흥원, 2017.01.
- 배명남, 이강복, 방효찬, 인지 IOT 컴퓨팅 기술 동향, 전자통신동향분석, 2017.02.
- 진설아, 뇌임플란트 시대, 그 가능성의 한계는?, 과학기술정책연구원 Future Horizon, 2017.02.
- Mike Daily, Antti Oulasvirta, Jun Rekimoto, Technology for Human Augmentation, Computer, 2017.02.
- 김도영, 이재호, 박문호, 최윤희, 박윤옥, 뇌파신호 및 응용 기술 동향, 전자통신동향분석, 2017.04.
- 이재호, 김도영, 박문호, 최윤희, 박윤옥, DNA 응용 기술 동향, 전자통신동향분석,



2017.04.

Rob Tracinski, The Future of Human Augmentation and Performance Enhancement, RealClear Science, 2017.04.

2017 국가미래유망기술 상시발굴 및 준비체계 정책지원 보고서, 한국연구재단, 2017.06.

대한민국 로봇산업 기술로드맵, 산업통산과학부 & 한국산업기술평가관리원, 2017.06.

김문구, 국내외 휴먼증강 기술 동향, ETRI 내부보고서, 2017.06

김문구, 국내외 인지컴퓨팅 동향, ETRI 내부보고서, 2017.07.

김광훈, 고령화 사회 도래 및 핵심기술로 지속성장 기대, 뇌-컴퓨터 인터페이스(BCI), KISTI 마켓리포트, 2017.07.

이동우, 정준영, 김배선, 손용기, 신형철, 착용형 근력증강 기술 동향, 전자통신동향분석, 2017.08.

권준수, 국내외 정신건강분야 연구개발 정책 및 사업동향, KHIDI 전문가리포트, 2017.

정선화, 최병철, 뇌-컴퓨터 인터페이스와 결합한 휴먼증강기술, ETRI 기술경제연구본부 Insight Report, 2017.

Human Augmentation in Healthcare : Bionics, Organ, Replacement, Exoskeletons, and Robotics 2018-2023, Mind Commerce, 2017.

김상태, 커넥텀 프로젝트에 대한 소개와 전망, BRIC View, 2017.

김보람, 뇌연구 국내외 정책동향, 융합연구정책센터, 융합 Weekly Tip, 2018.01.

소아영, 두뇌 신경회로 모방 뉴로모픽칩, 융합연구정책센터, 융합 Weekly Tip, 2018.01.

제3차 뇌연구촉진기본계획(안), 과학기술정보통신부 생명기술과, 2018.03.

정윤기, 생각만으로 기계를 조작하는 뇌-기계 인터페이스 기술, 융합연구정책센터 융합 연구리뷰, 2018.04.

구자국, 단일뉴런분석기술, 한국뇌연구원, 2018.04.

Bradly Alicea, An Intergrative Introduction to Human Augmentation Science, ArXiv, 2018.04.

장재은, 김소희, 신권식, 강유나, 인간-기계 간 신호전달을 위한 고효율 뇌신경 탐침 기술, 융합연구정책센터 융합연구리뷰, 2018.04.

상용화 단계에 다다르고 있는 AI 이용 마인드 리딩 기술, IITP 최신 ICT 이슈, 2018.05.

공경철, 웨어러블로봇 : 사람을 사람답게 만드는 로봇 기술, ITFind Special Issue, 2018.07.

Hype Cycle for Human-Machine Interface, Gartner, 2018.07.

Brain Machine Interfaces 2018-2027, Juniper Research, 2018.

김문구, 박종현, AI 기반 감성증강 10대 유망 서비스 탐색, ETRI 기술경제연구본부 Insight Report, 2018.

김성우, 인공망막자극기 개발의 현황, 검안 및 콘택트렌즈 학회지 제17권 제3호, 2018.

• 책

뉴로피드백 입문, 최승원 등 저, 시그마프레스, 2012.

Brain-Computer Interfaces: Principles and Practice, Janathan Wolpaw, Elizabeth Winter Wolpaw, Oxford University Press, 2012.

커넥톰, 뇌의지도, 승현구 저, 2014.

감각의 미래, 카라 플라토니 저, 흐름출판, 2015.

뇌를 바꾼 공학 공학을 바꾼 뇌, 임창환 저, MID, 2015.

바이오닉맨, 임창환 저, MID, 2015.



포스트휴먼 시대의 휴먼, 한국포스트휴먼연구소·한국포스트휴먼학회 편저, 아카넷, 2016.

4차 산업혁명 - 이미 와 있는 미래, 롤랜드버거 저, 다산출판, 2017.

통제불능, 케빈켈리 저, 김영사, 2015.

인에비터블 미래의 정체, 케빈켈러 저, 청림출판, 2017.

신체설계자, 에덤피오리 저, 미지북스, 2019.

• 웹사이트

호모파베르, <https://ko.wikipedia.org/wiki/>

민병경, 뇌-컴퓨터 접속장치 기술의 현재와 미래,

<https://m.terms.naver.com/entry.nhn?cid=60264&docId=1968077&categoryId=60264>

미국방부, 뇌-컴퓨터 인터페이스 연구에 6천만 달러 지원, 블로터,

<http://www.bloter.net/archives/284769>

University of Twente, Department of Biomechanical Engineering, Mind Walker Exoskeleton, <https://www.utwente.nl/en/et/be/research/projects/MINDWALKER/>

Hype Cycle for Human-Machine Interface, 2018, Gartner, 2018.07,

<https://www.gartner.com/document/3882879?ref=solrAll&refval=223117555&qid=3e5fcd90e195ba2ecdbbfcaf>

미래기술지식베이스, KISTI, http://mirian.kisti.re.kr/futureknow/issue_1.jsp.

중소중견기업기술로드맵 2019-2021, 중소기업기술정보진흥원,

<http://smroadmap.smtech.go.kr/>

뇌에서 찾은 반도체의 미래, 뉴로모픽, SK 하이닉스, <https://blog.skhynix.com/2701>.

MIT Meida lab, Biomechatronics,

<https://www.media.mit.edu/groups/biomechatronics/overview/>.

Brain-Machine Interface, PNAS, 2013.11,

<https://www.pnas.org/content/110/46/18343>

Introduction to BCI(Brain-Computer Interface) 3. 뇌파측정 및 분석법, 2013,
<https://m.blog.naver.com/PostList.nhn?blogId=coolstu&categoryNo=45&listStyle=style1>

뇌 영상 분석을 통한 마음 읽기, 이성환,
<https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1968076&cid=60264&categoryId=60264>

AI Algorithm Can Read Your Mind, NVIDIA News Center,
<https://news.developer.nvidia.com/ai-algorithm-can-read-your-mind/>

뇌와 정보체, Busy, 2017, <https://busy.org/@etaclub/gyrp3-9>

DBS(Deep Brain Stimulation), 유튜브, 2017.11,
<https://www.youtube.com/watch?v=2wvj7XJrQW4>

Brain-Computer Interface Enables People with paralysis to control tablet devices, TechXplore, 2018.11,
<https://techxplore.com/news/2018-11-brain-computer-interface-enables-people-paralysis.html>

Bringing Brain Computer Interfaces Home, ALS Association, 2016.06,
<https://alsadotorg.wordpress.com/2016/06/02/bringing-brain-computer-interface-home/>

뉴로피드백 개요, 락싸,
<http://www.laxtha.com/Product.asp?x=2&y=17&z=29&infid=246>

Researchers watch video images people are seeing, decoded from their fMRI brain scans in near-real-time, Lifeboat Foundation, 2017.10
<https://lifeboat.com/blog/2017/10/researchers-watch-video-images-people-are-seeing-decoded-from-their-fmri-brain-scans-in-near-real-time>

• 뉴스기사

실명위기 환자들, 광유전학 기술로 다시 앞을 보게 될까, 동아사이언스, 2016.02,
<http://dongascience.donga.com/news.php?idx=10500>



망원 콘택트 렌즈와 링크 제어 안경 개발, IT News, 2015.02,

<http://www.itnews.or.kr/?p=12700>

생각만으로 성큼성큼... 입는 '로봇다리' 나온다, 조선일보, 2013.06,

http://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2013/06/10/2013061003095.html

Mind Reading Scientists Reconstruct Human Faces From Brain Scans,

HUFFPOST, 2017.06,

https://www.huffpost.com/entry/mind-reading-brain-reconstruct-face_n_5049255

웨어러블 로봇 시장 동향, 로봇신문, 2018.10,

<http://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=15187>

소프트웨어가 생각을 읽는 마인드리딩 기술이 온다, 테크플러스, 2018.06,

<https://blog.naver.com/tech-plus/221297394808>

인공망막 이식 첫 성공, 동아일보, 2015.05,

<https://news.naver.com/main/read.nhn?oid=020&aid=0002829643>

한국판 신 600만불의 사나이 : 청각장애 없앨 인공와우, 동아사이언스, 2014.12,

<http://dongascience.donga.com/news.php?idx=5802>

6백만불의 사나이의 실체는? 바이오 인공장기 기술의 미래, 사이언스타임즈, 2019.03,

<https://www.sciencetimes.co.kr/>

뇌 임플란트, 기억력 살려낸다, 사이언스타임즈, 2019.03,

<https://www.sciencetimes.co.kr/>

생각만으로 로봇을 조정한다, 테크플러스, 2019.04,

<https://blog.naver.com/tech-plus/221516871001>

뇌파만으로 게임하고, 드론 날리고... 실리콘밸리는 'BMI' 열공 중, 한국경제, 2019.01,

<https://www.hankyung.com/it/article/2019011164801>

이 장치 일찍 나왔다면.. 호킹박사의 영국식 억양도 들었을 텐데, 서울신문, 2019.04,

https://www.seoul.co.kr/news/newsView.php?id=20190425023003&wlog_tag3=naver

뇌 패턴 읽는 인공지능 출현...생각만 했는데 음성으로 술술, 매일경제, 2019.04,

<https://www.mk.co.kr/news/it/view/2019/04/258672/>

인구절벽 눈앞... 정부, 조선비스, 2019.05,

http://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2019/05/29/2019052902536.html

치매 간병살인 남의 집 일이 아니네, 경향신문,

http://news.khan.co.kr/kh_news/khan_art_view.html?artid=201905060912001&code=940100



저자소개

정선화 ETRI 미래전략연구소 기술경제연구본부 산업전략연구그룹 책임연구원
e-mail: sh-jeong@etri.re.kr Tel. 042-860-6511

최병철 ETRI 미래전략연구소 기술경제연구본부 산업전략연구그룹 그룹장
e-mail: cbc@etri.re.kr Tel. 042-860-1223

그 외 도움주신 분들

고순주 ETRI 미래전략연구소 기술경제연구본부 기술경제연구그룹 그룹장

송근혜 ETRI 미래전략연구소 기술경제연구본부 기술경제연구그룹 박사후 연구원

휴먼증강 기술 주요 동향과 R&D 시사점

발행인 한 성 수

발행처 한국전자통신연구원 미래전략연구소 기술경제연구본부

발행일 2019년 6월 28일



www.etri.re.kr

ETRI 한국전자통신연구원 미래전략연구소

34129 대전광역시 유성구 가정로 218
TEL.(042) 860-6114 FAX.(042) 860-6504

