

# 신경 인터페이스 기반 초감각 디바이스 기술 동향

## Neural Interface-based Hyper Sensory Device Technology Trend

김혜진 (H.J. Kim, nolawara@etri.re.kr)

응복합센서연구그룹 책임연구원/그룹장

변춘원 (C.W. Byun, cwbyun@etri.re.kr)

유연소자연구그룹 선임연구원

김성은 (S.E. Kim, sekim@etri.re.kr)

SoC 설계연구그룹 선임연구원

이정익 (J.-I. Lee, jiklee@etri.re.kr)

실감소자연구본부 책임연구원/본부장

Sensory devices have been developed to help people with disabled or weakened sensory functions. Such devices play a role in collecting and transferring data for the five senses (vision, sound, smell, taste, and tactility) and also stimulating nerves. To provide brain or prosthesis devices with more sophisticated senses, hyper sensory devices with a high resolution comparable to or even better than the human system based on individual neuron cells are essential. As for data collecting components, technologies for sensors with higher resolution and sensitivity, and the conversion of algorithms from physical sensing data to human neuron signals, are needed. Converted data can be transferred to neurons that are responsible for human senses through communication with high security, and neural interfaces with high resolution. When communication deals with human data, security is the most important consideration, and intra-body communication is expected to be a candidate with high priority. To generate sophisticated human senses by modulating neurons, neural interfaces should modulate individual neurons, and therefore a high resolution compared to human neurons (~ several tens of um) with a large area covering neuron cells for human senses (~ several tens of mm) should be developed. The technological challenges for developing sensory devices with human and even beyond-human capabilities have been tackled by various research groups, the details of which are described in this paper.

\* DOI: 10.22648/ETRI.2018.J.330608

\* 이 논문은 2018년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임[No.2017-0-00048, Skintronics를 위한 감각 입출력 패널 핵심 기술 개발].



본 저작물은 공공누리 제4유형  
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

### 최신 반도체, 하드웨어 기술 동향 특집

- I. 서론
- II. 감각-뉴런 신호변환  
초감각 센서 기술
- III. 뇌신경기반 감각  
인터페이스 기술
- IV. 인트라바디  
나노커넥텀 기술
- V. 결론

# 1. 서론

## 1. 개요

4차 산업혁명의 도래와 함께 인간-기계 간 경계가 해체되고 인간 자신의 기계화를 통한 휴먼증강 기술이 가속화되는 패러다임의 변화 속에서 인간의 생물학적 한계를 극복하여 삶의 편의성과 효율성을 줄 수 있는 초감각 디바이스 기술에 대한 요구가 급증하는 추세이다. 또한, 외부환경을 인식하고 스스로 상황을 판단하여 자율적 제어가 가능한 인공지능 로봇 기술은 인간과 로봇의 상호 협업 및 실질적인 교감을 위해 반드시 필요한 기술이며 인간의 시·청·촉·후·미각 오감을 모사한 센서 기술과 인공지능, 음성인식, 상황판단 기술의 융합을 통해 인간 수준 이상의 감각과 인지 기능을 부여하기 위한 기술개발이 활발히 진행 중이다.

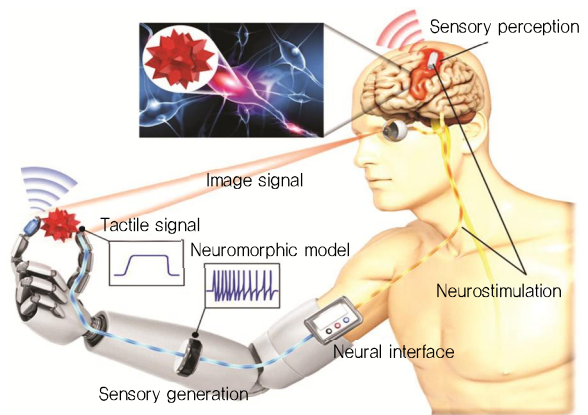
최근에는 장애 또는 사고로 손실된 감각에 대해서 인공 의수, 의족 등 인공보철 기기를 통해 감각을 재생하거나 증강하는 인공감각 구현에 대한 수요가 급증하고 있으며[1]-[3], 센서로부터 수집된 감각 정보를 신경 인터페이스를 통해 뇌에 전달, 인공지능을 통해 감각을 학습하고 인지하는 기술 전반에 대한 다학제 간 융합 연구가 미국 등 기술선도국을 중심으로 시작되고 있다.

## 2. 국내외 개발 동향

인간보다 정밀한 수준으로 인간의 감지 한계를 뛰어넘는 초감각 센서 기술과 뇌신경기반의 감각 인지-자극 인터페이스 기술은 편의성 및 효율성이 개선된 인공지능 로봇의 고도화에 기여하여 인간-기계 간의 실질적 상호 협업 시대를 가속화하고 감각을 재생 또는 증강하는 인공신경보철에 적용되어 고령화에 대비한 의료, 복지 분야에 활용될 것으로 기대된다[(그림 1) 참조]. 특히, 시각 및 촉각에 대응하는 초감각 디바이스 기술[(그림 2) 참조]은 기술적 파급성이 매우 높고 활용 분야도



(그림 1) 신경 인터페이스 기반 초감각 디바이스 기술의 활용 분야



(그림 2) 초감각 센서 및 신경 인터페이스를 통한 시·촉각 기반 초감각 디바이스 기술 개념도

광범위하므로 핵심 원천기술 개발을 통한 국가적 기술 경쟁력 확보가 매우 절실한 분야이다.

정부는 2016년 ‘로봇산업 발전방안’을 발표하고 로봇용 센서 부품산업 경쟁력 확보를 위한 진원을 추진 중에 있으며, 4차 산업혁명에 대응하는 융복합 및 첨단·고부가가치 소재부품 개발이 미흡하다는 지적에 따라 ‘제4차 소재·부품발전 기본계획’을 발표하고 2025년까지 사물인터넷(IoT: Internet of Things), 빅데이터, 인공지능(AI: Artificial Intelligence) 등 첨단 신소재·부품 유망기술 개발을 적극적으로 지원하고 있다[4].

뇌신경 인지 관련 국가 핵심과제로서, 유럽은 2013년부터 ‘Human Brain Project’를, 미국은 2014년부터 ‘BRAIN(Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies)’를, 일본은 2014년부터 ‘Brain/

MINDS(Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies) 프로젝트를 각각 10년에 걸쳐 추진 중이며 특히 미국이 주요국 중 가장 활발히 연구개발을 진행 중이다.

우리나라는 1차(1998년~2007년) 및 2차(2008년~2017년) '뇌연구촉진 기본계획'을 통해 뇌과학 연구 강화를 통한 뇌연구 신흥강국 도약의 기틀을 마련하였으며 과학기술정보통신부는 2017년 제3차 '뇌연구촉진 기본계획 공청회'를 통해 '인간을 대상으로 하는 뇌연구 확대', '사회문제 해결을 위한 뇌연구 강화', '미래를 대비하는 창의적 뇌연구 확산'을 3대 중점 추진 방향으로 설정하고 뇌연구를 통한 고령화 미래사회를 대비하겠다는 전략을 발표하였다[5].

본 기고에서는 인간의 손실된 감각에 대해 신경 인터페이스를 통해 인공감각을 재생 또는 증강할 수 있는 초감각 디바이스 기술에 대한 연구동향을 기술하고자 하며, 구체적으로는 인간과 동등 수준 또는 그 이상으로 감지 한계를 뛰어넘는 초감각 센서 기술, 뇌신경을 통한 감각 인지 및 제어 인터페이스 기술, 인체 내부를 통해 센서의 감각 신호를 척추 또는 뇌에 전달하기 위한 인트라바디 나노코넥티브 기술의 세 가지 핵심 기술 분야로 세분화하여 살펴보고자 한다.

## II. 감각-뉴런 신호변환 초감각 센서 기술

### 1. 개요

인간은 시·청·촉·후·미각 오감을 통해 외부환경의 변화를 감지하고 신경을 통해 감지된 정보를 뇌에 전달하며 상황을 판단하고 반응하게 된다. 이러한 인간의 감각 인지 과정은 매우 정밀한 감각 정보를 기반으로 하며, 수없이 다양한 정보를 통해 학습된 뇌는 정밀하고 고도화된 지능으로 반응한다. 급변하는 4차 산업혁명의 과도기에서 최근 이러한 인간의 감각 인지 메커니즘을 인공지능 로봇 또는 인공신경모형 등에 적용하고자 하는

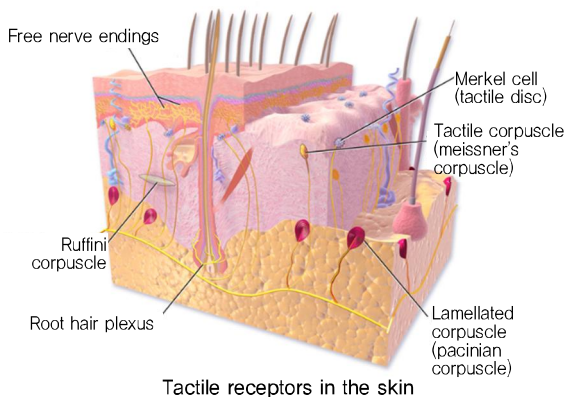
기술 트렌드가 급부상하고 있으며 특히 인간의 감지 능력 이상으로 정밀하고 민감하게 반응하는 센서 기술에 대한 개발 동향이 매우 활발하다.

인간의 감각을 정밀한 센서를 통해 로봇에게 부여하게 되면 인간과 같은 정밀한 움직임과 반응이 가능하게 되고 인간-로봇의 경계가 허물어져 로봇이 인간의 도구가 아닌 감성적 교류가 가능한 친구, 동료로서의 존재가 될 것으로 내다보고 있다. 또한, 감각기관이 손상된 경우 센서가 장착된 인공신경모형 또는 장치를 통해 감각을 재생, 복원함으로써 장애를 극복하고 자유로운 활동과 반응이 가능하도록 크게 기여할 것으로 보인다.

인간의 감각 기능에 필적할 만한 성능의 센서 개발을 위해 자연모사 또는 생체모사 기반의 수많은 센서가 개발되어 왔다. 그러나, 오감 센서 중 촉각에 해당하는 센서 기술은 인간의 피부와 같은 대면적, 고분해능, 고민감도, 광대역 감지 특성을 만족해야 할 뿐 아니라 압력, 진동, 온도, 습도 등 다양한 물리량을 감지할 수 있어야 하고, 표면질감이나 경도 등 수많은 정보를 동시에 감지할 수 있어야 하므로 기술적 난이도가 높아 인간과 동등 수준의 센서 개발도 쉽지 않은 실정이다. 따라서, 인간 수준 이상의 감지 성능을 갖는 촉각 센서 기술은 초감각 디바이스를 통한 인공감각 구현 기술에 있어서 가장 기본이 되는 핵심 기술이라 할 수 있으며, 본 절에서는 인간과 동등 수준 이상의 감지 성능을 갖는 초감각(촉각) 센서 기술 및 신경세포와의 인터페이스를 위한 감각-뉴런 신호 변환 및 패턴 알고리즘 기술에 집중하여 기술동향을 분석하고자 한다.

### 2. 인체 모사 고민감 초감각(촉각) 센서 기술

인간의 피부는 다양한 감각수용기(sensory receptor)로 구성되어 있으며 [(그림 3) 참조], 촉각 및 촉각의 속도와 강도, 진동, 변형, 압각, 간지러움, 온도(열자극, 냉자극), 털의 움직임, 통증 등을 감지한다. 감각수용기에



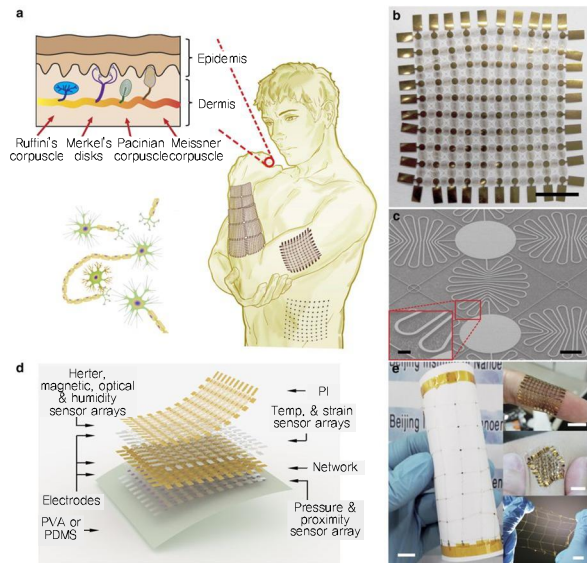
(그림 3) 인간 피부 감각수용기의 구조

[출처] Blausen.com staff (2014), "Medical gallery of Blausen Medical 2014", WikiJournal of Medicine 1 (2), DOI:10.15347/wjm/2014.010, ISSN 2002-4436, CC BY 3.0,

서 받아들여진 감각 신호는 일련의 전기신호(활동전위)로 변환되어 감각 신경세포를 통해 척수(spinal cord)로 전달되고, 척수의 신경로(tract)를 통해 대뇌(cerebellum)와 소뇌(cerebrum), 뇌줄기(brainstem) 등으로 전달되어 처리된다. 이러한 인간의 피부를 모사한 다양한 방식의 인공피부 기술이 보고되어 왔는데, (그림 4)와 같이 유연하고 신축 가능한 기판 상에 인간의 피부 감각수용기에 대응하는 다양한 개별센서들을 어레이 형태로 집적하여 개발하는 방식이 주요하다[6]-[8].

외부 자극이 인간의 피부 감각수용기에서 반응되고 이온채널이 열리면서 신호가 전달되는 원리를 모사한 인공피부 센서 기술도 개발되고 있다[9]. 이 기술은 국내 연구진이 개발한 기술로서, 압전 필름 및 인공 이온채널 시스템을 이용하여 자극에 대해 빠른 적응과 느린 적응의 두 가지 신호를 동시에 측정하게 하는 원리이며 혈압, 심전도, 물체 표면의 특징, 점자 구별 등 매우 정밀한 감지 성능을 보였다.

또 다른 방식의 촉각 센서 기술은 인간의 피부에 필적하는 고해상도 특성을 달성하기 위해서 바이모달 감지 소재를 이용하는 것이다[10], [11]. 하나의 소재로 두 가지 물성에 대해 동시 감지가 가능하므로 기존의 개별센서 집적 방식 대비 해상도를 높일 수 있고, 인간의 피부



(그림 4) 인간 피부를 모사하여 여러 개별센서를 집적하여 제작한 센서 매트릭스

[출처] Q. Hua et al., "Skin-Inspired Highly Stretchable and Conformable Matrix Networks for Multifunctional Sensing," *Nature Commun.*, vol. 9, Jan, 2018, Article no. 244, CC BY 4.0,

와 같은 정밀한 정보를 얻기 위한 센서 기술로서 많은 연구가 필요한 분야이다.

인간의 감각수용기 및 뉴런의 시냅스 전달 과정을 모사하여, 촉각 센서 및 인공 시냅스 트랜지스터를 연결한 인공 감각 신경 시스템에 대한 연구도 진행되고 있다 [12]. 센서로부터 전달된 신호를 시냅스 트랜지스터를 이용해 끊어졌던 바퀴벌레의 다리에 전달함으로써 경련 및 수축이 일어나는 실험에 성공한 초기 연구결과로서, 향후 촉각센서 및 인공시냅스 소자를 이용해 감각을 느끼는 인공사지 기술의 실현이 가능함을 보였다.

### 3. 감각-뉴런 신호 변환 및 패턴 알고리즘 기술

인간의 피부 감각수용기를 통해 입력된 감각 정보가 대뇌까지 전달되기 위해서는 입력된 신호가 전기화학적 신호로 변환되어야 한다[13]. 여기서, 전기적 신호는 일반적으로 활동전위를, 화학적 신호는 신경전달물질의 방출을 의미한다. 즉, 피부를 만지거나 꼬집거나 누르는

등의 외부 자극이 오면 세포막에 위치한 감각수용기의 모양이 변화하게 되고 이온통로가 열려 세포 안팎의 전압이 바뀌면서 탈분극이 일어나게 된다. 탈분극은 활동전위를 일으키고, 생성된 활동전위는 신경세포의 축삭을 따라 대뇌까지 전기적 신호로 전달되게 되는 것이다. 따라서, 손실된 감각을 재생하는 인공신경보철의 경우 촉각 센서를 통해 입력된 감각 정보가 신경 인터페이스를 통해 대뇌까지 전달되기 위해서는 아날로그 감각 신호를 신경 인터페이스에 전달할 수 있는 전기 신호로 변환해야만 한다.

이러한 전기신호 변환은 인체의 감각수용기와 유사한 방식의 뉴로모픽 알고리즘을 이용하게 되는데, 주로 센서의 출력신호에 따라 Izhikevich 뉴런 모델을 이용해 변환된 spatiotemporal 스파이크 패턴이나 아날로그 센서 신호의 FFT 스펙트럼을 이용하게 된다[14], [15]. 변환된 전기 신호는 뇌까지 전달된 후 감각 인지를 위해 딥러닝 등의 기계학습을 수행하게 된다. 즉, 센서로부터 얻어진 감각 신호를 전기신호로 변환하는 인공 감각 모델링 및 패턴 생성 알고리즘 기술은 인공신경보철 및 로봇 등에 인간과 같은 감각을 부여하고 인지하도록 학습하기 위한 필수적 기술이라고 볼 수 있다.

이러한 센서 신호 기반 감각 패턴 알고리즘 기술을 이용하여, 촉각센서로부터 얻어진 신호를 뇌로 전달하는 기초 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국 존스홉킨스대학은 전자피부를 로봇 손가락 끝에 부착하고 센서 신호를 전기신호로 변환하여 뇌로 전달해 인간 손과 비슷한 감각을 느끼게 하는 데 성공하였다[16]. 이는 뽀족한 것에 찔리는 통증과 비슷한 감각에 대한 초기 연구결과로, 다양한 촉질감 감지 및 신경 인터페이스, 뇌 감각 인지에 대한 연구는 향후 개발되어야 할 숙제로 남아 있다.

또한 스위스 로잔연방공과대학교(EPFL) 연구팀은 촉각 센서 신호를 뉴런 스파이크 신호로 변환하여 사람의 정중신경에 전달함으로써 질감을 구분하는 수준의 감각 피드백 기술을 개발하였으며[17], 미국 피츠버그대 재

활의학과 연구팀은 사지마비 환자의 뇌에 소형 전자장치를 넣어 로봇 팔을 움직이고 또 로봇 팔의 센서가 사물에 닿을 때의 촉감을 뇌에 전달하는 기술에 성공하였다[18].

### III. 뇌신경기반 감각 인터페이스 기술

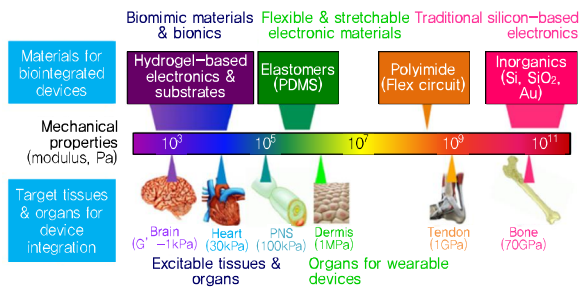
#### 1. 개요

인간의 감각 인지는 다양한 신체 부위를 통해 인가되는 외부 자극을 전기-화학적 신호로 변환하고, 이 신호가 신경세포 또는 신경다발을 통해 뇌로 전달되는 절차를 통해 이루어진다. 또한 인간은 뇌에서 특정한 목표를 위한 전기-화학적 신호를 생성하고, 이를 신경을 통해 감각 기관으로 전달하는 과정을 통해 신체활동을 제어한다. 많은 과학자, 의사 등이 이러한 인간의 감각 인터페이스 메커니즘에 대한 명확한 규명을 위해 오랜 시간 동안 연구를 수행하고 있지만, 인간의 DNA 지도 규명과 같은 확실한 결과를 도출해내지 못하고 있다.

그러나 최근에는 유전공학, 뇌 과학, 공학, 의학 등 다양한 분야 간의 융합 연구를 통해, 보다 발전된 형태의 연구 결과들이 많이 발표되고 있다. 정밀하게 뇌파 신호를 감지할 수 있는 전극 기술, 전기/광/초음파 등을 이용한 신경자극 기술, 그리고 인공지능 또는 딥 러닝 기술 등을 활용한 분석 기술 등을 통해 보다 명확한 인간의 감각 인터페이스 메커니즘 규명의 가능성이 높아지고 있다. 이에 본 절에서는 뇌신경기반의 감각 인터페이스 기술에 대한 최신의 연구동향을 소재, 감지 및 자극, 응용 분야로 구분하여 분석하고자 한다.

#### 2. 생체친화 소재 기술

뇌 또는 신경 신호 인터페이스를 위한 디바이스는 생체와의 물리적 접촉을 통해 신호를 인지하거나 자극을 인가하므로 체내 안정성, 신뢰성 등이 확보되어야 한다. 이를 위해서는 유연/신축 가능한 기판, 생체신호 감지



(그림 5) 응용 목적에 따른 기관 소재의 요구 조건

[출처] C.J. Bettinger, "Recent Advances in Materials and Flexible Electronics for Peripheral Nerve Interfaces," *Bioelectronic Medicine*, vol. 4, no. 6, pp. 1-10, CC BY 4.0,

및 자극 효율이 높은 전극 및 생체에 무해한 디바이스 봉지 등을 위한 재료의 개발이 필요하다.

일반적으로 뇌신경 디바이스용 유연 기판으로 PI (polyimide)나 파릴렌 계열(parylene-based)의 소재가 많이 활용되었으나[19], [20], 최근에는 신축 특성 확보를 위해 실리콘 계열의 일라스토머(silicone-based elastomer, ex. PDMS)가 많이 활용되고 있다[21]. 이러한 소재는 상대적으로 높은 투습률의 단점이 있지만, 높은 생체친화성을 가지고 있어서 많은 연구에서 표준기판으로 활용되고 있다. 또한 기관 재료의 선택은 디바이스의 응용 분야에 따라 달라질 수 있다. 응용 분야에 따른 소재의 요구조건을 (그림 5)에 나타내었다[22].

뇌신경 디바이스에 적용되는 전극 재료와 관련하여 최근에는 전하주입용량(CIC: charge injection capacity)을 향상시키기 위한 연구 결과가 많이 보고되고 있다. 정확한 생체정보를 인지 또는 자극하기 위해서는, 세포 단위 신호 감지/자극을 위해 최소한의 면적으로 전극을 구현하거나 선택적 신호 감지/자극을 위해 제한된 면적에 많은 개수의 전극 집적이 반드시 필요하기 때문이다[23].

CIC 향상을 위해 무기전극(inorganic electrode)에서는 Faradaic charge transfer 메커니즘을, 유기전극(organic electrode)에서는 Faradaic reaction 메커니즘을 최적화하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 무기전극 분야에서는 이리듐 화합물을 이용하여 0.1V 수준

의 생체 신호 감지가 가능하고, 신경자극 효율을 10% 이상 향상시킨 연구결과가 보고된 바 있고[24], 유기전극 분야에서는 PEDOT 재료를 활용하여 기존 대비 4배 이상 전극의 크기를 줄일 수 있는 연구 결과가 보고되고 있다[25].

뇌신경 디바이스 봉지를 위한 재료로는 낮은 생체 반응성과 유연성, 소수성 등의 특성이 우수한 파릴렌(parylene)과 같은 유기재료[26]와 하부 기관 및 전극 재료의 보호 특성이 우수한  $Al_2O_3$ 와 같은 무기 재료[27]가 많이 활용되고 있다. 그리고 최근에는 유기물과 무기물을 복합화하여 활용하기 위한 연구 결과들도 많이 발표되고 있다. 관련하여 마이크로웨이브를 이용하여 파릴렌-C와  $Al_2O_3$ 의 접착력을 향상시킨 결과에 대한 연구 결과가 발표된 바 있으며[28], 이러한 복합층을 활용하여 뇌신경 디바이스의 수명을 크게 향상시킨 연구 결과들도 함께 보고되고 있다[29], [30].

### 3. 뇌신경신호 감지 및 자극 기술

뇌신경신호를 감지 또는 자극을 위한 디바이스는 생체에 삽입하여 조직을 손상시키거나 염증이 발생하는 현상을 방지하기 위해서는 다양한 형태로 구부릴 수 있고 신축할 수 있는 기판에 전극이 구현되어야 한다.

최근에는 하이드로젤 계열(hydrogel-based) 기판에 전극 어레이를 형성하고, 고양이의 신경 신호를 감지한 디바이스의 개념 및 구현 결과가 보고되었으며[31], 생체 유해성을 최소화하기 위해 최근에는 파릴렌-C를 이용한 필름을 제작하여 디바이스를 구현한 결과도 보고되고 있다[32].

뇌신경신호를 자극하기 위한 수단으로, 최근에는 광을 활용한 연구결과가 많이 보고되고 있다. 미세한 광원 또는 이를 제어하는 기술을 활용하면 비침습적인 방법으로 뇌신경신호 자극이 가능하기 때문이다. 최근에는 영장류와 같은 큰 뇌를 가진 동물에 대한 광유전학

(Opto-genetics) 평가를 위해  $\mu$ LED 어레이의 구현 결과가 보고된 바 있으며[33], 하나의 디바이스로 뇌신경 신호 감지 및 자극이 모두 가능한 모듈의 개발 결과도 보고되고 있다[34]. 이러한 디바이스가 실제 동물 실험에 활용될 경우 자극에 대한 뇌파의 인지를 즉시 확인할 수 있기 때문에, 뇌신경기반 감각 인터페이스와 관련된 다양한 메커니즘 규명에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

#### 4. 뇌신경 기반 감각 인터페이스 기술의 응용

다양한 뇌신경기반 감각 인터페이스 기술에 대한 연구는 뇌/신경 계통의 질병 치료나, 노화 또는 상실된 감각의 재활 등을 위해 수행되고 있다. 이를 위해서는 뇌신경 디바이스가 무선 플랫폼에 기반한 신호의 전달과 전력 공급이 가능해야 한다. ETRI에서는 2018년부터 뇌파신호 인지 및 광자극이 가능한 복합 프론트 엔드 기술을 개발하고, 이를 무선으로 제어하는 임플란터블 능동전자소자 원천 기술에 대한 연구를 수행하고 있다.

미국의 DARPA에서는 이러한 형태의 플랫폼을 활용하여 보다 혁신적인 기능을 구현하기 위한 연구를 선행적으로 수행하고 있다. 2014년부터 수행중인 EelectRX라는 프로젝트에서는 초소형 임플란터블 칩을 체내에 삽입하여 인간의 자가 면역체계를 극대화하여 스스로의 질병을 치료하는 기술에 대한 연구를 진행 중에 있고[35], 2017년부터는 TNT(Targeted Neuroplasticity Training)라는 프로젝트를 통해, 두뇌에 초소형 임플란터블 칩을 삽입하여 단기간의 기억력을 극대화하는 기술에 대한 연구도 수행하는 것으로 조사된다[36].

이상에서 살펴본 바와 같이 뇌신경기반의 감각 인터페이스를 응용을 위한 최신의 연구들은 대부분 CMOS 기반 반도체 칩을 활용하는 데 초점이 맞추어져 있다. 그러나 이러한 디바이스들이 생체 내에 삽입되었을 때, 조직의 손상이나 염증의 유발을 방지하고, 정확한 신호를 인지하기 위해서는 유연하거나 신축이 가능한 형태



(그림 6) 유연기판상에 구현된 뇌신경기반 감각 인터페이스 기술 개념도

[출처] ETRI, ICT 미래원천 기획보고서.

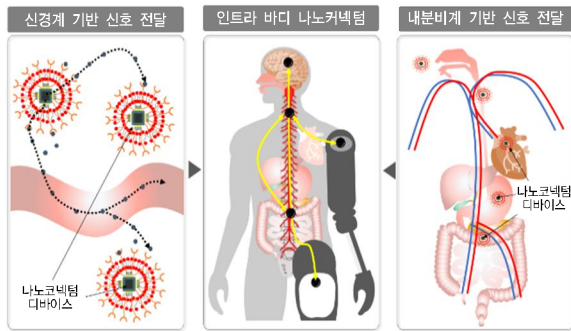
로 제작되어야 한다. 또한 명확한 메커니즘 규명과 다양한 분야에 응용을 위해서는 신호의 감지와 자극이 가능한 복합 어레이의 형태로 구현되어야 한다. 이를 위한 플랫폼의 예시를 (그림 6)에 나타내었다. 나아가 궁극적으로는 세포단위의 신호 감지 및 자극이 가능하도록 능동적으로 제어 가능한 고해상도 복합 어레이의 형태로 개발되어야 한다.

본 절에서 살펴본 뇌신경기반 감각 인터페이스 기술은 인류의 복지 증진 및 미래의 국가 경쟁력 제고를 위한 기반이 될 수 있는 분야이다. 또한, 기초원천 분야에 해당하는 기술 분야로 단기간의 성과 위주의 연구개발보다 장기간의 전략적인 투자가 필요할 것으로 판단된다.

## IV. 인트라바디 나노커넥팅 기술

### 1. 개요

인트라바디 나노커넥팅 기술은 미래에 인체 내 삽입되는 다양한 임플란터블 전자장치들 간의 유기적 연결을 위하여 필수적으로 요구되는 핵심기술이다. 이는 인체 내 초감각 센서와 신경 인터페이스 모듈의 직접적인 연결이 어려울 경우 초감각 센서의 정보를 인체의 신경 인터페이스 모듈에 연결하기 위한 신개념의 통신 기술로서 (그림 7)처럼 인체 내 신경계 및 내분비계를 활용



(그림 7) 인트라바디 나노 커넥텀 개념도

하여 인체 신호 체계에 교란을 주지 않는 범위에서 활용하게 된다. 인트라바디 나노커넥텀 기술은 인체 내 이미 존재하는 유기적 신호 전달 체계를 이용하는 인체 친화적 통신 기술이라 할 수 있다.

## 2. 인트라바디 나노커넥텀 신호 전송 방법

인트라바디 나노커넥텀에 관한 아이디어 발표 이후 관련 기술에 대한 관심이 높아지고 있으나 아직까지는 인체 내 세포들의 신호 전달 이론에 관한 원리 및 이론에 관한 연구가 대부분을 차지하고 있다. 인체 내 세포를 이용하여 신호를 전달할 수 있는 방법은 다양하다 [37]. 호르몬을 이용하는 방식, 중계 세포를 이용하는 방식, 신경 전달 물질 및 결합 기반 전송 방식 등 세포의 종류 및 전달 방법에 따라 그 방식도 세분화되어 있다. 이와 같이 인체 내 신호를 전달하는 방법 및 해당 세포를 자극하는 방식은 응용 분야에 따라서 다양한 형태로 나뉘어져있으며 활용 분야에 따라서 최적화된 신호 전송 방법을 채택하여 활용하는 것이 중요하다.

인체 내 신호 전송에 관한 대표적인 예로는 시냅스 기반의 신호 전달 방식이 있다. 잘 알려진 것처럼 뉴런과 뉴런의 접속 부위를 나타내는 시냅스를 기반으로 신호를 전달하는 방법이다. 이는  $Ca^{2+}$  이온 농도를 활용하여 신경 전달 물질을 전달하는 방식으로 인접한 세포들 간의 신호 전달을 바탕으로 릴레이 형식을 신호를 전달한다. 시냅스 기반의 신호 전달 방식은 신경 세포의

구성 형상에 따라 다양한 경로로 신호 전달이 가능하다. 이는 이온 농도를 활용하는 방식이라 비교적 신호의 전달 속도가 느리다는 단점이 있으나 인체 내 초단거리 신호 전달에 유용하게 활용되고 있다.

인체 내 단거리 신호 전달에는 세포 내 분자 모터 (molecular motors)를 이용하는 방법이 있다. 분자 모터는 세포 분열, 세포내 수송, 세포 운동 등을 조절하기 위하여 이온, 당, 아미노산 등의 물질을 미세소관(microtubules)을 통해 최종 목적지까지 운반하는데, 이 경로를 활용하여 단거리 신호를 전달할 수도 있다.

인체 내 중거리 신호 전달을 위해서는 주로 박테리아를 이용한 신호 전송 방식을 채택한다. 박테리아에 정보를 인코딩하는 방식을 채택하여 신호를 전달할 수 있다는 사실이 밝혀진 후 현재는 박테리아의 유전자 코드 변이를 통해 세포 단위의 통신을 위한 생물학적 회로 구현에 관한 연구가 진행 중이다[38].

인체 내 장거리 신호 전달을 위해서는 인체 내분비계에서 생성되는 호르몬과 같은 분자를 이용하여 혈류를 전송 채널로 활용하는 방법을 가장 효율적인 채널로 고려하고 있다. 인체 특정 부위에서 호르몬이 생성되면 이 정보는 혈류를 통해 인체 다른 특정 부위에서의 호르몬 생성을 자극하게 되며 신호를 전달하는 방식이다.

인체 내 신호 전송 거리에 따라 초단거리에서부터 장거리까지 거리별 최적화된 전송 채널에 관한 연구는 학계를 중심으로 이미 진행이 되고 있다[39]. 하지만 아직까지는 단일 전송 채널에 관한 연구가 대부분을 차지하고 있으며 대부분의 연구가 인체 내 전송 채널의 원리에 중점을 두고 있다. 향후 인트라바디 나노커넥텀을 구축하고 동시에 보다 다양한 응용 분야에 활용하기 위해서는 단일 전송 채널에 관한 연구, 분석과 함께 멀티 채널 전송 방법 혹은 이질적인 다수의 채널을 연계하는 방법에 관한 연구까지 진행되어야 인트라바디 나노커넥텀 기술의 목표인 초감각 센서의 정보와 인체의 신경 인터페이스 모듈간 연결이 가능할 것으로 예상된다.



### 3. 인트라바디 나노커넥텀 국내외 기술 동향

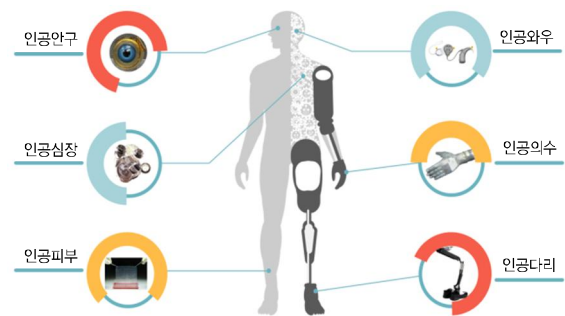
2015년 미국 조지아텍 I.F. Akyildiz 교수가 IEEE Communications Magazine에서 세계 최초로 IoBNT (Internet of Bio-Nano Things) 용어를 통해 인체 내 디바이스와 인체 세포 간의 네트워크 구축의 정의 및 기술 필요성을 발표한 이후 인체 내 디바이스와 인체 세포간의 네트워크 구축 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 이 개념을 바탕으로 인체 중심 3m 이내 네트워크 구성을 지원하는 BAN(Body Area Network)의 개념을 뛰어넘는 생체 친화적인 네트워크 구성을 위한 BAN2(Body Area NanoNetwork)의 개념이 소개되면서 인트라바디 나노커넥텀에 대한 관심이 높아지고 있다.

UC Berkeley 연구진은 체내 상태 파악과 디바이스 제어를 위한 모래 알갱이 크기의 인체 삽입용 센서 Neural Dust를 개발 발표하였으며[40], 같은 해 Google 과 GSK는 체내 바이오 신호를 제어하는 Bioelectronic Medicine 기술에 \$715 million을 투자를 결정하여 인트라바디 디바이스에 관한 연구를 지원하고 있다[41].

국내에서는 인체를 매질로 사용하는 온바디/인바디 인체통신 기술 및 임플란터블 디바이스를 위한 채널 모델 및 송수신 기술 연구가 한국전자통신연구원을 중심으로 연구되고 있으며[42], 한국연구재단의 ‘신진/중견 연구자지원사업’ 및 ‘기본연구지원사업’ 등을 통해 나노 기반의 바이오 센서 및 나노-바이오 인터페이스 기술 등의 요소기술에 대해 대학 단위의 소규모 연구가 진행되고 있다.

### 4. 인트라바디 나노커넥텀 활용 분야

인트라바디 나노커넥텀 기술은 ICT(Information & Communication Technology) 기술을 기반으로 인간의 수명을 연장하는 의공학 분야, 장애를 극복하는 휴먼 테크놀로지 분야 등에 활용될 수 있는 융복합 원천 기술로써, (그림 8)는 인트라바디 나노커넥텀의 활용 예시를



(그림 8) 인트라바디 나노커넥텀 활용 예시

보여 준다.

인트라바디 나노커넥텀 기술은 인체와 유기적 연결이 필요한 인공 장기 내의 초감각 센서에서 측정된 정밀한 수준의 생체 정보를 인체 내 다른 부위로 전달하기 위한 통신 수단으로 활용될 수 있으며 이를 통해 기존 유무선 통신 장치가 가지고 있는 불편함을 해결할 것으로 기대된다.

예를 들어 이들 인공 장기 내 장착된 초감각 센서는 그 역할에 따라 개인의 다양한 생체 정보를 측정하며 측정된 생체 정보를 다른 부위로 전달하게 된다. 이때 유선 방식을 통해 전달할 경우 케이블 주위 오염 및 감염의 위험이 상존하며 무선 방식을 통해 전달할 경우 개인 정보 보안 문제가 발생하게 된다. 측정된 개인 생체 정보를 인트라바디 나노커넥텀 기술을 활용하면 생체 감염 및 정보 보안 문제를 해결할 수 있는 인체 친화적인 통신 채널을 확보할 수 있게 된다.

더불어 인트라바디 나노커넥텀 기술은 인체 내 다수의 통신 채널 확보가 가능하여 임플란터블 전자장치들 간의 인체 내 네트워크를 구축하는데 필수적인 통신 기술이다. 이를 활용하면 다수의 통신 채널 확보를 통해 전자장치들 간의 대용량 데이터 통신이 가능할 수 있으며, 인체 내 끊어진 신경을 복원할 수 있는 우회 네트워크를 구축할 수도 있다. 더불어, 인체 내 다수의 임플란터블 전자장치들 간의 협업을 통해 동시에 전송되는 다양한 정보들을 복합적으로 비교 판단할 경우 인체의 이

상 유무를 보다 정밀하게 파악할 수 있으며 적당한 피드백을 통해 문제를 해결할 수도 있다.

예를 들면 혈관 및 장기에 존재하는 임플란터블 전자 장치를 통해 지속적으로 혈당치를 모니터링하고 인슐린 결핍의 측정 시 미리 계산된 양의 인슐린을 주입할 수 있으며 다른 예로는 세포 수준의 화학 요법을 사용하는 암세포 치료 분야에 사용함으로써 인체 내의 이물질 및 병원균의 존재를 확인하고 특정 이상 세포에 반응할 수 있어 미세지역에서 비침습적이며 안전하게 질병 치료를 유도할 수 있다.

인체 신호 전달체계를 이용한 인트라바디 나노커넥팅 기술은 세계적으로도 아직 기초적인 이론 연구 수준에 불과하며, 국내 연구개발 사례가 보고된 바가 없는 새로운 기술이나, 그 응용 분야가 다양하고 향후 기술의 발전 가능성 및 활용성이 높은 기술이다. 차세대 주력 산업이 인간을 중심으로 하는 BT 산업임을 고려할 때 국가 주도하에 장기적인 지원을 통해 관련 원천기술을 확보가 필요할 것으로 예측된다.

## V. 결론

본 기고에서는 인간의 감지 한계를 뛰어넘는 초감각 센서 기술 및 뇌신경 기반 감각 인터페이스 기술, 감각 전달을 위한 인트라바디 나노커넥팅 기술을 중심으로 한 신경 인터페이스 초감각 디바이스 기술에 대한 최신 기술 동향을 살펴보았다. 초감각 디바이스 기술은 절단 장애인, 마비 환자뿐 아니라 화상환자 등에게 손실된 감각을 재생하여 신체, 감각, 지능, 사회적 기능을 유지하고 향상시키는 재활 의학 분야와 인간의 인지 향상을 목표로 하는 휴먼증강분야에 크게 기여할 것으로 보인다. 또한, 인간의 뇌 구조 및 기능 모델을 기반으로 한 인간-로봇 협업 시스템 구축을 통해 기존 신경망 및 인공지능을 뛰어넘는 혁신적 개념을 제공할 수 있고, 공간을 초월하여 인간과 기계가 협업할 수 있는 ICT 기술의 핵

심 기술이 될 것으로 기대된다.

결론적으로, 신경 인터페이스 기반 초감각 디바이스 기술은 인공지능 로봇의 핵심 소재부품 기술로서 4차 산업혁명을 대비해 반드시 육성해야 할 기술이며, 또한 고령화에 대비한 의료, 복지 분야 핵심기술로서 원천기술 확보 및 국가 경쟁력 제고가 반드시 필요한 기술이다. 본 기술은 기고에서 살펴본 인공지능 로봇 및 인공신경모질뿐 아니라 몰입형 증강현실(AR: Augmented Reality)/혼합현실(MR: Mixed Reality), 스마트카, 모바일, IoT, 웨어러블 디바이스, 헬스 디바이스 등 사람과 접촉하는 각종 첨단 전자기기에 적용이 가능하므로 기술적 파급효과가 매우 크고 미래 신산업 창출에도 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 약어 정리

AI	Artificial Intelligence
AR	Augmented Reality
BAN	Body Area Network
BAN2	Body Area NanoNetwork
BRAIN	Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies
Brain/MINDS	Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies
CIC	Charge Injection Capacity
ICT	Information & Communication Technology
IoBNT	Internet of Bio-Nano Things
IoT	Internet of Things
MR	Mixed Reality
TNT	Targeted Neuroplasticity Training

## 참고문헌

- [1] 김병희, “로봇에게 촉감 입힐 인공신경 탄생,” 사이언스타임즈, 2018. 6. 1.
- [2] 노동균, “감각 가능 갖춘 의수·의족 나온다,” 조선일보, 2017. 10. 10.
- [3] 정재훈, “의족·의수도 마음대로 움직인다… DGIST, 말초신경

- 인터페이스 기술 개발” 전자신문, 2017. 06. 20.
- [4] 산업통상자원부, “제 4차 소재부품발전 기본계획,” 고시 제 2017-58호, 2017. 04. 26.
- [5] 한국뇌연구원, “제 3차 뇌연구촉진 기본계획,” <https://www.kbri.re.kr/new/pages/sub/page.html?mc=3652>
- [6] Q. Hua et al., “Skin-Inspired Highly Stretchable and Conformable Matrix Networks for Multifunctional Sensing,” *Nature Commun.*, vol. 9, Jan. 2018, Article no. 244.
- [7] J. Kim et al., “Stretchable Silicon Nanoribbon Electronics for Skin Prosthesis,” *Nature Commun.*, vol. 5, 2014, Article no. 5747.
- [8] M. Liu et al., “Large-Area All-Textile Pressure Sensors for Monitoring Human Motion and Physiological Signals,” *Adv. Mater.*, vol. 29, 2017, Article no.1703700.
- [9] K. Chun et al., “A Self-Powered Sensor Mimicking Slow- and Fast-Adapting Cutaneous Mechanoreceptors,” *Adv. Mater.*, vol. 30, 2018, Article no. 1706299.
- [10] F. Zhang et al., “Flexible and Self-Powered Temperature-Pressure Dual-Parameter Sensors Using Microstructure-Frame-Supported Organic Thermoelectric Materials,” *Nature Commun.*, vol. 6, 2015, Article no. 8356.
- [11] N.T. Tien et al., “A Flexible Bimodal Sensor Array for Simultaneous Sensing of Pressure and Temperature,” *Adv. Mater.*, vol. 26, 2014, pp. 796-804.
- [12] Y. Kim et al., “A Bioinspired Flexible Organic Artificial Afferent Nerve,” *Sci.*, vol. 360, 2018, pp. 998-1003.
- [13] P. Delmas et al., “Molecular Mechanisms of Mechano-transduction in Mammalian Sensory Neurons,” *Nature Rev. Neurosci.*, vol. 12, 2011, pp. 139-153.
- [14] M. Rasouli et al., “An Extreme Learning Machine-Based Neuromorphic Tactile Sensing System for Texture Recognition,” *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 12, 2018, pp. 313-325.
- [15] S. Chun et al., “Recognition, Classification, and Prediction of the Tactile Sense,” *Nanoscale*, vol. 10, 2018, pp. 10545-10553.
- [16] L.E. Osborn et al., “Prosthesis with Neuromorphic Multilayered E-Dermis Perceives Touch and Pain,” *Sci Robotics*, vol. 3, 2018, Article no. 3818.
- [17] S. Raspopovic et al., “Restoring Natural Sensory Feedback in Real-Time Bidirectional Hand Prostheses,” *Sci. Transl. Med.*, vol. 6, 2014, Article no. 222ra19.
- [18] 최영준, “마비 환자, 로봇 팔로 새 감각 얻다,” 동아사이언스, 2016. 11. 12.
- [19] S.T. et al., “Polyimide-Based Devices for Flexible Neural Interfaces,” *Biomed Microdevices*, vol. 2, 2000, pp. 283-294.
- [20] T. Stieglitz et al., “Implantable Biomedical Microsystems for Neural Prostheses,” *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol. 24, no. 5, 2005, pp. 58-65
- [21] L. Guo et al. “A PDMS-Based Integrated Stretchable Microelectrode Array (isMEA) for Neural and Muscular Surface Interfacing,” *IEEE Trans. Biomed Circuits Syst.*, vol. 7, no. 1, 2013, pp. 1-10.
- [22] C.J. Bettinger, “Recent Advances in Materials and Flexible Electronics for Peripheral Nerve Interfaces,” *Bioelectronic Medicine*, vol. 4, no.6, pp. 1-10.
- [23] J.H. Lee et al., “Soft Implantable Microelectrodes for Future Medicine: Prosthetics, Neural Signal Recording and Neuromodulation,” *Lab Chip*, vol. 16, no. 6, 2016, pp. 959-976.
- [24] Y.H. Kim, et al., “Iridium Oxide-Electrodeposited Nanoporous Gold Multielectrode Array with Enhanced Stimulus Efficacy,” *Nano Lett.*, vol. 16, no. 11, 2016, pp.7163-7168.
- [25] R.A. Green, et al. “Performance of Conducting Polymer Electrodes for Stimulating Neuroprosthetics,” *J. Neural Eng.*, vol. 10, no. 1, 2013, Article no. 016009.
- [26] S.A. Hara et al. “Long-Term Stability Of Intracortical Recordings Using Perforated and Arrayed Parylene Sheath Electrodes,” *J. Neural Eng.*, vol. 13, no. 6, 2016, Article no. 066020.
- [27] R.J. Narayan et al., “Medical Applications of Diamond Particles & Surfaces,” *Mater Today*, vol. 14, no. 4, 2011, pp. 154-163.
- [28] H. Noh et al., “Wafer Bonding Using Microwave Heating of Parylene Intermediate Layers,” *J. Micromechanics Microeng.*, vol. 14, no. 4, 2004, pp. 625-631.
- [29] X. Xie et al., “Long-Term Reliability of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Parylene C Bilayer Encapsulated Utah Electrode Array Based Neural Interfaces for Chronic Implantation,” *J. Neural Eng.*, vol. 11, no. 2, 2014, Article no. 026016.
- [30] R. Caldwell et al., “Analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -Parylene C Bilayer Coatings and Impact of Microelectrode Topography on Long Term Stability of Implantable Neural Arrays,” *J. Neural Eng.*, vol. 14, no. 4, 2017, pp. 046011:1-046011:21.
- [31] W.-C. Huang et al., “Ultrasoft Hydrogel-Based Neural Interfaces Fabricated by Aqueous-Phase Micro-

- transfer Printing,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 28, no. 29, 2018, Article no. 1801059.
- [32] W.S. Konerding et al., “New Thin-Film Surface Electrode Array Enables Brain Mapping with high Spatial Acuity in Rodents,” *Scientific Reports*, vol. 8, 2018, Article no. 3825.
- [33] R. Scharf et al., “A Compact Integrated Device for Spatially Selective Optogenetic Neural Stimulation Based on the Utah Optrode Array,” *Proc. SPIE*, vol. 10482, 2018, pp. 104820M:1-104820M:4.
- [34] A.C. Horváth et al., “A Multimodal Microtool for Spatially Controlled Infrared Neural Stimulation in the Deep Brain Tissue,” *Sensors Actuators B: Chemical*, vol. 263, 2018, pp. 77-86.
- [35] S. Anthony, “DARPA’s Tiny Implants will Hook Directly into Your Nervous System, Treat Diseases and Depression Without Medication,” *EXTREME TECH*, Aug. 29, 2014. <https://www.extremetech.com/extreme/188908-darpas-tiny-implants-will-hook-directly-into-your-nervous-system-treat-diseases-and-depression-without-medication>.
- [36] U.S. Department of Defense, “DARPA Funds Brain-Stimulation Research to Speed Learning,” Apr. 27, 2017. <https://www.defense.gov/News/Article/Article/1164793/darpa-funds-brain-stimulation-research-to-speed-learning/>
- [37] B. Alberts, “Essential Cell Biology,” Garland Science: New York, USA, 2010.
- [38] B.D. Unluturk, “Genetically Engineered Bacteria-Based BioTransceivers for Molecular Communication,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 4, Apr. 2015, pp. 1271-1281.
- [39] I.F. Akyildiz, “The Internet of Bio-Nano things,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 3, Mar. 2015, pp. 32-40.
- [40] R. Sanders, “Sprinkling of Neural Dust Opens Door to Electroceuticals,” *Berkeley News*, Aug. 3, 2016.
- [41] B. Hirschler, “GSK and Google Parent Forge \$715 Million Bioelectronic Medicines Firm,” *Business News*, Aug. 1, 2016.
- [42] 김성은, 박형일, 임인기, 오광일, 강태욱, 박미정, 강성원, “WBAN 인체통신 기술동향 분석,” *전자통신동향분석*, 제31권 제6호, 2016, pp. 31-38.