

2024 Vol.02

차세대리포트

뇌와 세상의 소통



펴낸곳

한국과학기술한림원

031)726-7900

펴낸이

유 옥 준

발행연월

2024년 12월

홈페이지

www.kast.or.kr

기획·편집

한국과학기술한림원 정책연구팀

콘텐츠

김준래 과학기술분야 전문 작가

디자인·인쇄

경성문화사

02)786-2999

이 보고서는 복권기금 및 과학기술진흥기금의 지원을 통해 제작되었으며,
모든 저작권은 한국과학기술한림원에 있습니다.



발간사

지난 2018년부터 발간되어 오고 있는 한국과학기술한림원의 차세대리포트는 ‘대한민국의 미래를 이끌어갈 젊은 과학자들의 지식과 경험을 활용하여 과학기술의 발전, 국가와 사회의 더 나은 미래를 만들어 가는데 기여할 수 있는 방법은 없을까?’라는 고민으로부터 시작되었다.

우수한 젊은 과학자들로 구성된 ‘한국차세대과학기술한림원(Young Korean Academy of Science and Technology, Y-KAST)’ 회원들을 비롯하여 과학기술 분야 최일선에서 활약하고 있는 최고의 젊은 과학자들이 중심이 되어 발간하고 있는 차세대리포트는 ‘디지털 치료기기’, ‘인공지능’, ‘우주개척’, ‘뉴로모픽칩’ 등과 같은 과학기술 관련 최신 이슈는 물론 ‘대학의 미래’, ‘과학자가 되고 싶은 나라를 만드는 방법’ 등과 같이 과학기술 분야와 관련된 다양하고 폭넓은 주제를 다루어 왔다.

올해로 창립 30주년을 맞이한 한국과학기술한림원은 차세대리포트를 통해 과학기술 분야의 최신 동향을 소개하고 사회적 이슈와 현안에 대한 대응 방향을 제시하기 위하여 주제의 선정에서부터 발간에 이르기까지 많은 고민과 논의의 과정을 거쳤다. 특히 우리 대한민국이 과학기술 강국으로 성장하고, 궁극적으로는 과학기술을 통해 국민 삶의 질이 향상될 수 있는 방향을 제시하기 위해 노력하였다.

‘뇌와 세상의 소통’은 이 같은 고민과 노력을 통해 선정된 주제 중 하나다. 뇌와 기계장치를 이어주는 BMI(Brain to Machine Interface) 기술은 사람의 생각을 포함한 감각으로 기계장치를 제어할 수 있도록 하며, 기계장치가 사람의 의도를 읽어낼 수 있게 한다. 이른바 사람의 감각이 기계장치를 통해 확장되면서 뇌와 세상이 새로운 방식으로 소통하게 되는 것이다.

그러나 BMI 기술의 상용화를 위해 고민하고 해결해야 할 과제들이 있다. BMI 기술이 안전하게 사용될 수 있도록 윤리적, 제도적 이슈에 대해 함께 고민해야 하며, 기술을 활용할 수 있는 사회적, 제도적 인프라 구축 등의 과제를 해결해 가야 한다. 이번 차세대리포트는 BMI 기술의 발전이 우리의 삶에 가져올 변화와 가능성에 대해 탐구하는 한편 BMI 기술의 발전을 위해 필요한 정책과 방향성을 담았다. 우리의 BMI 기술 경쟁력 강화와 상용화를 위한 과정에 있어 이번 차세대리포트가 작은 도움이 되기를 기대해 본다.

2024년 12월
한국과학기술한림원 원장
유 욱 준



함께해주신 분들



이현주 | KAIST 전기및전자공학부 교수

뇌파 측정 소자와 뇌 자극기기를 개발하여 양방향 뇌-기계 인터페이스 연구를 진행하고 있으며, 초음파 기반의 의료기기를 연구하고 있다.



박건혁 | 한국한의학연구원 책임연구원

한의학 이론을 활용한 뇌와 타 장기 간의 연계성, 한약을 통한 효율적 치료 및 질환 극복 등을 연구하고 있다.



박정환 | 서울대학교 의과대학 교수

인지행동의 기반이 되는 뇌 회로 신호전달의 기전을 수학적 해석, 분자세포생물학, 동물행동학 등을 활용해 규명하고, 이를 활용한 인지장애 치료법 개발을 연구하고 있다.

C O N T E N T S



들어가기

04

I. BMI 기술 개요 및 현황

08

1. BMI 기술 개요 및 최신 동향
2. 감각 별 BMI 기술 개발 현황

II. BMI 기술의 미래 전망

32

1. 사회 전반에 미칠 BMI 기술의 미래 전망
2. 감각 별 BMI 기술의 미래 전망

III. BMI 기술의 상용화를 위한 정책 제언

40

1. 윤리적 문제
2. 제도적 문제
3. 인프라 문제

맺음말

45



Brain Machine Interfaces

“그때는 막연한 상상이었지만, 지금은 가능한 현실이다.”

불과 수십 년 전만 해도 공상과학 영화에 등장하는 장면들은 불가능한 꿈으로 여겨졌다. 하지만 과학기술의 눈부신 발전은 이러한 꿈들이 상상으로만 끝나는 것이 아니라 현실이 될 수도 있음을 보여주고 있다.

지난 1970년대, TV 시청자들의 눈길을 사로잡았던 공상과학 영화 ‘6백만불의 사나이’와 ‘소머즈’에 대한 기억을 떠올려 보자. 당시 이 영화들은 아이들의 마음을 사로잡았고, 주인공들이 보여주는 초인적인 능력은 상상력의 끝을 넘나들었다.

우주비행사였던 ‘6백만불의 사나이’의 주인공은 사고로 부상을 입은 후, 최첨단 기술을 통해 망원경을 능가하는 놀라운 시각 능력과 강력한 힘을 가진 슈퍼맨으로 다시 태어난다. ‘소머즈’의 주인공 역시 비슷한 사고 후 첨단 시스템을 이식받아 가공할 청각 능력과 뛰어난 신체 능력을 갖게 된다.

이들의 초인적 능력은 당시만 해도 영화에서나 등장할 법한 상상에 가까웠다. 하지만 머지않은 미래에는 초인적 능력을 가진 사람들을 충분히 탄생시킬 수 있다는 것이 과학계의 시각이다. 바로 BMI(Brain to Machine Interface) 기술 덕분이다.

뇌와 기계장치를 이어주는 접속 시스템 정도로 해석할 수 있는 BMI는 뇌와 기계장치를 연결해 주는 시스템이 감지한 정보를 뇌에 전달하거나, 뇌의 명령을 기계장치에 전달하는 기술을 의미한다.

‘백만불의 사나이’가 가진 초인적인 시각 능력은, 인공 눈을 뇌에 연결함으로써 구현이 가능하다. 고해상도의 카메라를 눈 대신 사용하고, 그 영상 정보를 BMI 기술을 통해 뇌로 직접 전달하면, 먼 거리를 확대해서 보거나, 어둠 속에서도 사물을 식별하는 능력이 현실이 될 수 있다.

‘소머즈’의 뛰어난 청각 능력 역시 BMI 기술로 설명할 수 있다. 청각을 잃은 사람에게 인공 귀를 통해 소리를 감지하게 하고, 이를 뇌로 전달하는 방식이다. 사람의 귀로는 들을 수 없는 주파수를 감지하여 뇌로 전달할 수 있는 인공 귀를 개발한다면, 누구나 소머즈처럼 작은 소리나 특정 주파수의 소리도 들을 수 있게 되는 것이다.

시각과 청각을 사례로 들었지만, 인간의 나머지 감각들인 후각과 미각, 그리고 촉각도 BMI 기술을 활용하여 인공적인 시스템으로 변환할 수 있다. 사람의 코와 혀, 피부 등을 대체할 수 있는 인공 시스템들이 하루가 다르게 개발되고 있기 때문이다.

또한 BMI 기술의 발전으로 시각, 청각, 촉각, 후각, 미각으로 대표되는 인간의 오감 외에 또 하나의 감각이라고 불리는 ‘육감’에 대해서도 관심이 높아지고 있다. 육감이란 사람만이 가진 직관이나 예감, 혹은 설명하기 어려운 감각으로서, 흔히 ‘육감이 안 좋다’ 등의 표현을 사용하며 이 감각을 설명해 왔다.

물론 오감과 달리 육감은 그동안 과학적으로 분석하기 어려운 영역에 속해 있었기 때문에 제대로 된 연구가 진행되지 못한 것이 사실이다. 그러나 사람의 생각을 통해 육감도 제대로 형성이 된다는 사실이 밝혀지면서, 생각은 BMI 기술이 필수적으로 다뤄야만 하는 감각의 영역으로 확대되고 있다.



육감은 사람의 뇌가 오랜 시간 동안 쌓아온 경험과 지식을 통해 이루어지는 직관적 판단을 의미하는데, 생각은 이 같은 직관적 판단이 올바르게 내려질 수 있도록 논리적 사고를 보완하는 역할을 하기 때문이다.

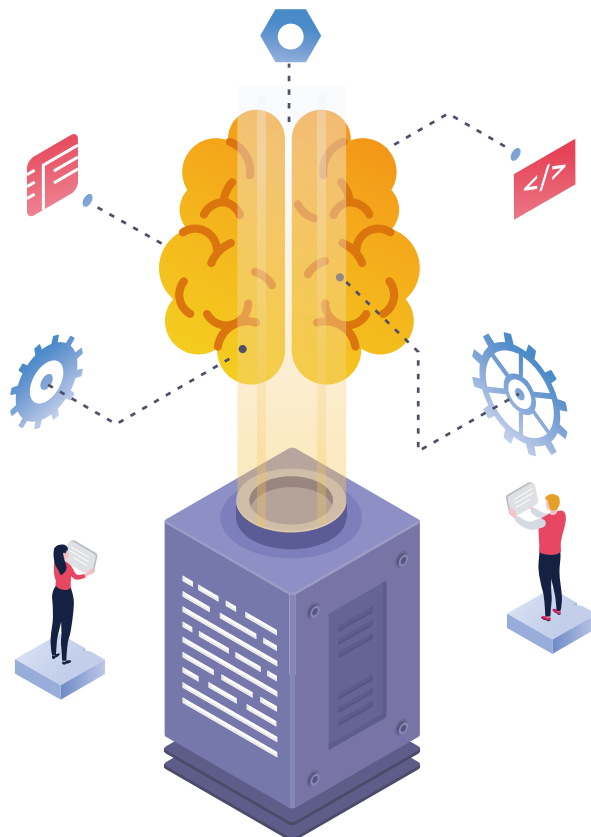
따라서 생각은 오감을 다루는 BMI 기술의 적용 범위를 한 단계 더 끌어 올려 거의 무한대의 영역으로 적용하게 만드는 감각이라고 할 수 있다. BMI가 뇌파와 뇌혈류, 그리고 뇌 자기장 등 뇌에서 발생하는 신호를 측정하여 컴퓨터와 연결하는 기술인 만큼, 생각만으로 컴퓨터를 조작하거나, 외부 기기를 제어할 수 있게 된다.

예를 들어, BMI 기술이 상용화되면 생각만으로 로봇 팔을 움직이거나 컴퓨터를 작동하는 것이 가능해진다. 척수 손상으로 인해 신체를 제대로 움직일 수 없는 사람들이 BMI 기술을 통해 자유자재로 자신의 의사를 표현하거나 기계를 조작할 수 있게 되는 것이다.

이뿐만이 아니다. 인공지능(AI)과 결합 된 BMI 기술은 사람의 뇌를 더 정확하게 해독하고 예측할 수 있게 되어 보다 정교한 상호작용이 가능해질 것으로 보인다. AI가 뇌파 신호를 분석하여 사용자가 원하는 명령을 미리 예측하거나, 더욱 복잡한 작업을 수행할 수 있도록 도와줄 수도 있다.

이번 차세대리포트의 주제를 ‘뇌와 세상의 소통’으로 정한 것도 바로 이런 이유다. BMI 기술이 단순히 뇌와 기계장치를 연결하는 것으로 그치는 것이 아니라 뇌를 통해 이루어지는 감각과 세상 간의 새로운 소통 방식을 제시하는 중요한 전환점이 될 것으로 전망되고 있기 때문이다.

이런 점을 고려하여 이번 차세대리포트는 다음과 같은 순서로 구성되어 있다. 첫 번째 장에서는 BMI 기술에 대한 개요와 현황, 그리고 각각별로 개발되고 있는 기술의 동향에 대해 다루고 있고, 두 번째 장에서는 각 감각과 관련된 BMI 기술의 미래상을 조망해 보았다. 그리고 마지막 세 번째 장에서는 BMI 기술을 발전시키기 위해 전문가들이 조언하는 정책 방안들을 제시해 보았다.



I BMI 기술 개요 및 현황



1 BMI 기술 개요 및 최신 동향

BMI 기술은 인간의 뇌가 발생시키는 신경 신호를 해석하고, 이를 컴퓨터나 기계로 전달하여 명령을 수행하도록 하는 기술이다. 사람의 뇌는 우리가 생각하거나 감각을 느낄 때 전기 신호를 생성한다. 이 신호는 신경을 따라 전달되어 뇌의 다양한 영역에서 해석되고 처리된다.

BMI 기술은 이러한 뇌파를 감지하고, 이를 분석하여 기계가 이해할 수 있는 명령어로 변환하는 과정이다. 이를 통해 사람은 생각만으로 기계를 조종하거나, 자신의 의도를 전달할 수 있게 된다.

뇌신경 신호에 대한 해석이나 기계를 위한 명령어 등 현재의 지식수준으로도 이해하기 쉽지 않은 용어들이 사용되다 보니 BMI가 최근에 개발된 기술이라고 생각하기 쉽지만, BMI 기술의 역사는 상당히 오래 되었다.

지난 1924년 독일의 한스 베르거가 최초로 뇌파(EEG)를 측정하면서, 뇌의 전기적 활동을 기록할 수 있다는 가능성을 연 것이 BMI 기술의 시작이었다. 이후 수십 년간 연구자들은 뇌 신호를 분석하고 이를 외부 장치로 전달하는 방법을 개발하기 시작했다.

1960년대와 1970년대는 BMI 기술에 대한 연구가 본격화된 시기였다. 당시 연구자들은 원숭이를 대상으로 뇌 신호를 통해 기계를 조작하는 실험을 성공적으로 수행했다. 1990년대에는 더 정교한 전극이 개발되었고, 이를 통해 개별 뉴런의 신호를 기록하고 해석할 수 있게 되었다.

2000년대에 들어 BMI 기술은 인간을 대상으로 하는 임상 연구로 확장되었다. 특히 2006년, 뇌에 전극을 이식한 환자가 생각만으로 컴퓨터 커서를 움직이는 데 성공한 사례는 BMI 기술의 가능성을 크게 입증했다.

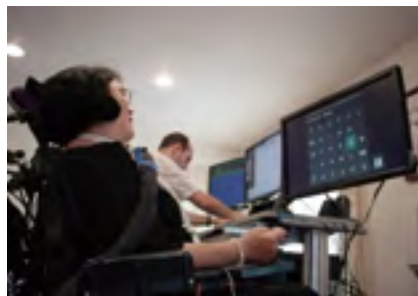
이처럼 BMI가 의학 및 신경과학, 그리고 공학을 기반으로 괄목할 만한 발전을 이루다 보니, 무엇보다도 장애인들을 위한 혁신적 도구로 주목받고 있다. 팔이나 다리를 움직일 수 없는 사람들은 뇌의 신호를 통해 로봇 팔을 움직일 수 있으며, BMI 기반의 의수나 의족은 사용자의 의도에 따라 자연스럽게 움직임으로써 기존의 의족보다 훨씬 높은 활동 범위를 제공해 줄 수 있다.

또한 테슬라의 창업자인 일론 머스크가 설립한 뉴럴링크(Neuralink) 역시 뇌에 작은 칩을 삽입하여, 이를 통해 생각만으로 컴퓨터를 제어할 수 있는 기술을 개발 중이다. 이

<그림 1> BMI 기술 임상 연구 사례



출처: VA NEWS(2022).



출처: TechCruncy(2017).



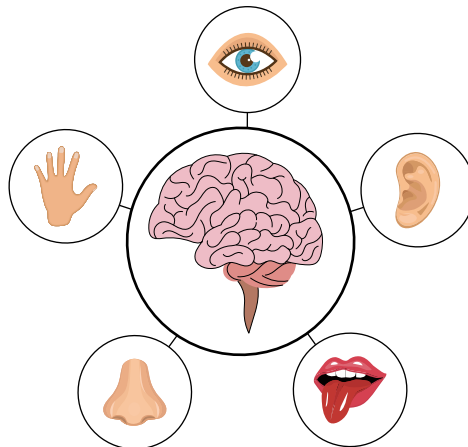
침은 뇌의 특정 부위에 전극을 연결하여 뇌파를 감지하고, 이를 즉각적으로 컴퓨터로 전송한다. 이를 통해 사용자는 생각만으로도 텍스트를 입력하거나, 가상현실에서 다양한 활동을 할 수 있다.

생각 외에도 BMI 기술은 인간의 오감을 보완하거나 확장하는 기능을 통해 장애를 극복할 수 있도록 도와주고 있다. 오감은 우리가 세상을 인식하고, 경험하는 데 있어 필수적인 요소들이다. 예를 들어, 시각 장애인을 위한 BMI 기반의 기기들이 개발되고 있는데, 이들은 카메라를 통해 촬영한 영상을 뇌로 직접 전달하여 시각 정보를 제공하는 역할을 한다.

청각장애인의 경우도 마찬가지다. 소리 관련 신호를 뇌에 직접 전달하는 기술을 통해 청각에 문제가 있는 사람에게 주변의 소리를 들을 수 있는 기능을 제공해 준다. 오감을 지원하는 BMI 기술들은 아직 초기 단계에 있지만, 미래에는 더 발전하여 일상생활에서 널리 사용될 가능성이 크다.

따라서 BMI 기술은 오감과 생각을 모두 포함하는 인간의 감각을 새로운 차원으로 확장하는 혁신적인 기술이라고 정의할 수 있다. 장애인들에게 새로운 가능성을 열어주고, 인간과 기계 간의 경계를 허물며, 사람이 세상을 인식하고 상호작용하는 방식을 근본적으로 바꿀 수 있는 잠재력을 지닌 기술이 바로 BMI인 것이다.

<그림 2> 오감과 생각



2 | 감각 별 BMI 기술 개발 현황

(1) 시각

우리는 눈을 통해 세상을 보고, 그 안의 다양한 정보를 받아들인다. 눈은 우리에게 세상과 연결되는 가장 빠른 통로다. 이 과정의 시작은 빛이다. 모든 사물은 빛을 반사하거나 직접 내보내는데, 우리가 그 빛을 통해 사물을 인식하게 되는 것이다. 눈은 바로 이런 빛을 받아들이도록 진화해 왔다.

눈의 가장 바깥쪽에는 투명한 막인 각막이 있다. 각막은 눈을 보호하며, 들어오는 빛을 굴절시켜 눈 안쪽으로 전달하는 중요한 역할을 한다. 그다음에 있는 홍채는 눈에 들어오는 빛의 양을 조절하는데, 홍채의 중앙에 위치한 작은 구멍이 바로 동공이다. 동공은 빛이 눈 안으로 들어가는 통로 역할을 한다.

빛이 동공을 통과하면 수정체를 지나면서 한 번 더 굴절되어 망막에 도달한다. 망막은 필름처럼 빛을 받아 이미지로 변환하는 역할을 한다. 여기에는 두 가지 중요한 세포가 있는데, 하나는 낮은 빛에도 민감하게 반응하는 막대세포(간상세포)이고, 다른 하나는 색을 구분하는 원추세포(원뿔세포)다. 이 세포들이 바로 빛의 정보를 해석해 뇌로 전달하는 역할을 한다.

뇌는 이렇게 전달받은 정보를 여러 단계를 거쳐 처리한다. 먼저, 가쪽무릎핵(lateral geniculate nucleus, LGN)에서 물체의 모서리를 중심으로 전체 모양을 간략하게 압축하는데, 가쪽무릎핵은 뇌의 시각 정보를 처리하는 과정 중 중간 정거장 역할을 하는 신경세포체다.

그 후 시각피질(visual cortex)이라는 부분에서 물체의 윤곽과 움직임을 분석한다. 이때 시각피질에서는 물체의 색상 차이를 분석하여 최종적으로 물체의 형태와 구조, 색깔 등을 인식한다.

이렇게 정리된 정보들은 후두엽이라는 뇌의 또 다른 부분으로 보내져 체계화된다. 후두엽은 다양한 시각 정보를 하나로 통합해서 우리가 보는 장면을 재구성하는 기능을 갖고 있는 부위다.

동시에, 방추상회(fusiform gyru)라는 뇌의 부위는 이미지를 더 단순화시키고, 편도체(amygdala)는 이 이미지에 감정을 덧붙인다. 마지막으로, 측두엽(temporal lob)에서는 이 정보의 의미와 기억을 인식하게 된다.

이처럼 복잡하고 정교한 과정을 통해 우리는 눈을 통해 단순히 사물을 보는 것을 넘어서, 그 의미와 감정을 느끼며 세상을 이해하게 되는 것이다.

사람의 눈을 모방하는 인공 눈 시스템

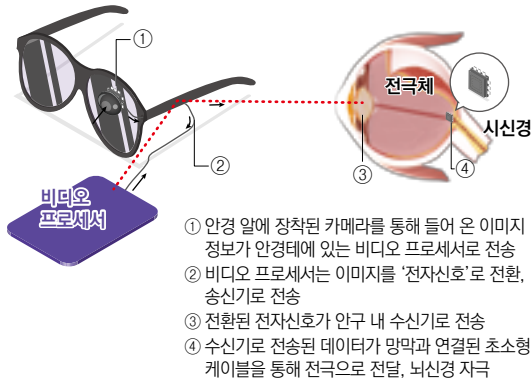
인간은 다섯 가지 감각, 즉 오감을 통해 세상을 이해하는데, 그중 약 60%는 시각에 의존한다고 알려져 있다. 그만큼 시각은 우리가 세상을 이해하는 데 있어 가장 중요한 감각 중 하나로 여겨지고 있다.

이런 점 때문에 인류는 오랫동안 시력에 문제가 생긴 사람들을 위해 ‘인공 눈’ 시스템을 개발하려고 노력해 왔다. 가장 오래된 인공 눈은 이란에서 발견된 것으로 약 4800년 전 만들어진 것으로 추정되며, 고대 이집트와 로마에서도 비슷한 인공눈이 발견된 바 있다. 하지만 초기의 인공눈은 단순히 외관상 비슷하게 만든 모형에 불과했다.

시간이 지나면서 의학과 기술이 발전하며 인공눈의 기능도 크게 향상되었다. 그 대표적인 예가 바로 세컨드사이트(Second Sight)라는 의료기업체에서 개발한 ‘아르고스(Argus)’라는 인공망막 시스템이다.

이 시스템은 환자의 눈에 인공망막을 심고, 특수 안경과 연결하여 망막의 신경세포를 자극해 이미지를 볼 수 있도록 돕는 방식이다. 이 기술은 시력을 잃은 사람들에게 빛을 되찾아주는 중요한 도구였지만, 한계가 있었다. 인간의 눈처럼 넓은 시야와 높은 해상도를 제공하지 못했던 것이다.

<그림 3> 아르고스의 작동원리(왼쪽)와 사용예(오른쪽)



출처: 서울신문(2009).



출처: MedicalXpress(2021).

인간의 눈은 독특한 돔형 구조의 망막과 망막 속에서 빛을 감지하는 세포인 광수용체로 이루어져 있다. 망막은 빛을 감지해 이를 전기 신호로 바꾼 다음, 뇌로 전달하는 복잡한 기능을 가진 눈의 부위다. 따라서 이를 인공적으로 재현하는 것은 대단히 어려운 일이다.

그런데 최근, 이런 한계를 극복할 수 있는 새로운 기술이 등장했다. 지난 2020년에 개발된 ‘기상증착법’이라는 기술이다. 기상증착법은 특정 물질을 화학적으로 반응시켜 원하는 형태를 만드는 기술로서, 인공 광수용체 개발에 활용되었다.

특히, 페로브스카이트(perovskite)라는 반도체 물질을 사용해 빛을 전기 신호로 바꾸는 과정이 더 정밀하고 빠르게 이루어졌다. 페로브스카이트를 이용한 인공 광수용체는 사람의 눈보다 빛을 감지하는 속도가 최대 5배 빠르고, 광수용체의 수가 10배나 더 증가할 수 있는 가능성을 보여주었다.

이로 인해 사람의 눈을 모방한 인공눈 개발이 현실에 가까워졌으며, 이 기술은 로봇이나 다양한 과학 기기에 활용될 수도 있다. 이러한 발전은 시력을 잃은 사람들에게 희망을 줄 뿐만 아니라, 인간의 시각 능력을 뛰어넘는 새로운 감각을 제공할 가능성도 열어주고 있다. 인공눈 기술은 미래의 시각 경험을 완전히 새롭게 정의할 수 있을 것이다.

시각을 활용한 가상현실과 아이트래킹 기술

오늘날 가장 주목받는 기술 중 하나는 가상현실이다. 가상현실은 컴퓨터가 만들어낸 이미지를 통해 특정한 환경이나 상황을 인공적으로 경험하게 하는 기술이다. 이 기술은 주로 헤드셋을 착용하고 시각적인 경험을 중심으로 이루어지지만, 촉각과 같은 다른 감각도 함께 사용될 수 있다.

이와 함께 발전하고 있는 또 다른 흥미로운 기술은 아이트래킹(eye tracking), 즉 시선 추적 기술이다. 이 기술은 지난 1976년에 발표된 눈과 마음 관련 가설에 기반을 두고 있다. 핵심은 시선 고정과 눈의 움직임 패턴에 있다.

시선 고정은 눈이 거의 움직이지 않고 특정 자극에 집중하는 순간을 의미하며, 이 과정에서 눈은 대략 250millisecond(ms) 동안 그 대상을 주시하게 된다. 이때 눈이 머무는 지점은 우리가 가장 관심을 두는 곳으로 판단된다. 반면, 눈의 움직임 패턴은 우리가 무엇을 보고 어떻게 의사결정을 내리는지에 대한 중요한 단서를 제공한다.

아이트래킹 기술은 사람들이 어느 곳을 보는지 분석하는 데 있어 매우 신뢰할 수 있는 방법으로 자리 잡았다. 특히 심리학이나 언어학과 같은 분야에서 오랜 기간 사용되어 왔고, 최근 들어서는 시장 조사, 광고, 브랜딩, 그리고 사용자 경험을 개선하는 분야에도 활발히 사용되고 있다. 이 외에도 가상현실과 증강현실 분야에서 눈의 움직임을 인식하여 화면을 조정하거나, 비디오를 재생하는 데에도 적용되고 있다.

이 기술은 또한 보안 분야에서도 활용 가능성이 크다. 예를 들어, 사용자의 홍채 인식을 통해 암호화를 적용하거나, 시선만으로 메뉴를 선택하는 기능도 가능하다. 가상공간에서는 캐릭터와 눈을 마주 보거나 시선이 가는 방향을 따라 이동하는 등의 방식으로 사용되고 있다. 아이트래킹 기술은 인간의 행동을 이해하고, 보다 나은 통찰력을 얻기 위한 강력한 도구로 발전하고 있다.

(2) 청각

우리 주변은 항상 다양한 소리로 가득하다. 새소리, 자동차 소리, 사람들의 말소리까지, 우리는 이 모든 소리들을 통해 세상을 느끼고 다른 사람들과 소통한다. 그런데 우리는 늘 이렇게 많은 소리를 듣고 있음에도 불구하고, 정작 소리가 사람의 뇌까지 어떻게 전달되는지에 대해서는 제대로 알지 못한다.

누군가 내 이름을 부르면 자연스럽게 고개를 돌리게 되는데, 이는 우리가 소리를 어떻게 듣고 인지하는지에 대한 궁금증이 생긴다. 많은 사람들은 ‘귀로 듣는다’라고 쉽게 말하지만, 소리를 인식하는 과정은 생각보다 훨씬 복잡하다.

소리는 귀를 통해 우리 몸속으로 들어와 외이, 중이, 내이를 거친다. 하지만 여기서 끝이 아니다. 소리는 신경세포에 의해 전기 신호로 바뀌고, 이 신호가 뇌로 전달된다. 뇌는 전달된 신호를 분석하고 필요한 정보를 추출하여 우리가 소리를 인식할 수 있도록 한다.

청각 정보가 뇌로 전달되는 길은 크게 두 가지다. 첫 번째는 ‘일차 청각 경로’로, 주로 달팽이관에서 나오는 신호를 뇌로 전달한다. 두 번째는 ‘비일차 경로’로, 모든 감각 정보를 뇌로 보내는 역할을 한다. 예를 들어, 잠을 잘 때는 일차 청각 경로는 작동하지만 비일차 경로는 잠시 쉬기 때문에 우리는 잠든 사이에 소리를 의식하지 못한다. 하지만 큰 소리가 나면 비일차 경로 덕분에 깜짝 놀라거나 반응할 수 있다.

결국, 우리가 소리를 듣고 인식하는 과정은 귀에서 시작해 뇌에서 완성된다. 소리가 귀를 통해 뇌로 전달되고, 뇌는 그 신호를 해석하여 우리가 소리를 느끼게 한다. 이 모든 과정 덕분에 우리는 일상생활에서 다양한 소리를 구분하고, 그 의미를 파악하며 살아갈 수 있다. 마치 복잡한 기계처럼 우리의 뇌는 소리라는 신호를 받아들이고 해석하는 놀라운 일들을 쉬지 않고 해내고 있는 것이다.

소리로 세상과 소통하는 사람의 뇌

소리는 우리 일상에서 매우 자연스러운 존재이다. 우리가 듣는 소리는 공기나 물과 같은 매질이 진동하여 전달되는 음파다. 이 음파는 눈에 보이지 않지만, 우리의 귀는 이

소리를 주파수에 따라 구별할 수 있다. 예를 들어, 사람은 약 20Hz에서 20kHz 범위의 소리를 들을 수 있으나, 나이가 들수록 들을 수 있는 소리의 범위는 줄어든다.

소리는 사람과 기계 사이의 소통에서 어떻게 사용될 수 있을까? 우리가 말하는 소리는 마이크를 통해 컴퓨터에 전달되고, 컴퓨터는 이 소리를 다양한 방식으로 처리한다. 반대로, 기계가 만든 소리는 우리의 귀를 통해 뇌로 전달되어 이해된다. 즉, 입은 스피커처럼 소리를 내고, 귀는 마이크폰처럼 소리를 받아들이며, 뇌는 이 정보를 처리하는 컴퓨터와 같은 역할을 한다.

그렇다면, 우리의 입과 귀 없이 뇌와 기계가 직접 소통할 수 있는 방법은 있을까? 예를 들어, 우리가 소리를 내지 않고 생각만으로 기계와 소통하거나, 매우 시끄러운 환경에서도 기계와 대화할 수 있는 방법이 있을까? 이러한 기술들은 현재도 연구되고 있는 흥미로운 주제이며, 미래에는 더 많은 가능성을 기대할 수 있다.

<그림 4> 소리를 통한 사람과 기계의 소통



출처: Frontiers(2016).

뇌가 만드는 소리를 해석하기

사람들은 대화를 통해 자신의 생각과 감정을 나누지만, 이 과정을 어려워하는 이들도 있다. 태어날 때부터 언어를 사용하는 데 있어 어려움을 겪거나, 사고 또는 질병 등의

원인으로 인해 말을 하지 못하게 된 사람들을 종종 만날 수 있다.

이 같은 경우는 대부분 뇌에 손상을 입어 언어장애가 발생하게 된 것인데, 세계적으로 매년 6,900만 명 이상의 사람들이 ‘외상성 뇌손상(TBI)’으로 인해 의사소통에 어려움을 겪고 있다. 이 같은 어려움을 겪는 사람들을 돕기 위해, ‘대규모 언어 모델(LLM)’을 기반으로 하는 BMI 기술이 빠르게 발전하고 있다.

실제로 지난 2023년, 미국 텍사스대학교 오스틴 캠퍼스의 연구진은 외상성 뇌손상을 가진 환자들이 서서히 회복할 수 있는 획기적 방법을 찾아냈다. 이들 연구진은 ‘기능적 자기공명영상(fMRI)’ 시스템을 사용하여 사람이 듣고 있는 언어를 전체 문장으로 해석할 수 있는 장치를 개발했다.

일반적인 MRI는 뇌의 구조를 촬영하지만, fMRI는 뇌의 활동을 평가해 특정 행동이나 생각에 따라 활성화되는 부위를 나타낸다. 연구진은 세 명의 참가자를 대상으로 실험을 진행했으며, 이들은 MRI 스캐너에 누운 상태로 같은 팟캐스트의 다른 에피소드를 16시간 동안 듣고, 몇 개의 TED 강연도 청취했다.

이렇게 수집된 데이터를 입력하며 해석하는 장치를 훈련시켰고, 이를 통해 특정 단어를 읽을 때마다 발생하는 뇌의 활동 신호를 예측하는 방법도 개발했다. 이 연구의 가장 큰 성과는 바로 전극을 뇌에 삽입해야 해석이 가능했던 기존의 침습적 방법을 비침습적인 방법으로 변경했다는 점이다.

fMRI 외에도 비침습적인 방법으로 뇌 활동을 측정하는 기술들이 있는데, 대표적으로는 자기뇌파(MEG)와 전기뇌파(EEG)를 활용하는 방법이 있다. fMRI는 큰 장비를 필요로 하지만, 뇌파 측정은 헬멧 정도의 크기 장비로도 가능하다.

지난 2022년, 프랑스의 PSL 대학교 연구진은 175명의 피실험자를 대상으로 데이터를 수집했다. 이들은 3초 동안의 뇌파 신호를 통해 1,000개 이상의 단어 중에서 평균적으로 최대 41%의 정확도로 단어를 식별할 수 있었다. 특히 일부 참가자들은 최대 80%라는 놀라운 정확도를 기록한 것으로 나타나 관심을 모았다.

또한 올해 2024년에는 침습적 방법이기는 하지만 전극을 뇌 표면에 이식하여, 실험 대상자가 생각만으로 떠올린 6개의 단어를 해석하는 연구를 성공시키기도 했다. 단어가 아닌 문장의 경우 정확도가 떨어지는 문제를 보이지만, 딥러닝 모델들이 빠르게 발전하고 있는 만큼 머지않은 미래에는 이러한 기술이 더 완벽해질 것으로 전문가들은 기대하고 있다.

소리를 뇌로 전달하기

말을 제대로 하기 어려운 사람들을 돕는 BMI 기술이 있다면, 소리를 듣지 못하는 사람들을 위한 BMI 기술도 당연히 존재한다. 바로 ‘인공와우’라는 장치로서, 청각과 관련한 신경세포가 손상된 사람들을 위해 만들어진 장치다. 인공와우는 소리를 듣는 중요한 역할을 하는 청각 신경을 직접 자극하여 뇌에 소리를 전달해 주는 역할을 한다.

인공와우 개발에 이목이 집중되고 있는 이유는 바로 청각장애인들의 삶의 질을 크게 개선해 주는 중요한 기술이기 때문이다. 전 세계적으로 약 4억 6천만 명의 청각장애인이 있으며, 인공와우 기술은 이들에게 새로운 소리를 들려줄 수 있는 희망의 기술이라 할 수 있다.

인공와우는 크게 두 가지 부분으로 나뉜다. 하나는 외부에 있는 장치이고, 다른 하나는 몸속에 심는 장치다. 외부 장치는 마이크가 있어 외부 소리를 받아들이고, 그 소리를 분석해서 전기 신호로 바꿔준다. 이렇게 바뀐 전기 신호는 몸속에 심은 장치로 전달되어 달팽이관에 있는 청각 신경을 자극한다. 이렇게 함으로써 뇌가 소리를 인식하면서 청각장애인도 소리를 들을 수 있게 된다.

현재 전 세계적으로 인공와우를 만드는 회사들 가운데 가장 주목을 받고 있는 곳은 우리나라의 ‘토닥(Todoc)’이라는 스타트업이다. 이 회사는 새로운 인공와우 장치를 개발하는 데 있어 32개의 전극을 사용하여 주목을 끌고 있다.

기존의 인공와우 개발업체들은 대부분 8개의 전극만을 사용하고 있는데, 최근 들어 전극의 수가 많을수록 소리를 더 잘 들을 수 있다는 연구 결과가 발표되면서 토닥의

시스템에 관심이 집중되고 있다. 토닥은 이 같은 연구 결과를 반영하여 더 많은 전극을 장착했으면서도 자동화된 인공와우 장치를 개발하는 작업에 박차를 가하고 있다.

(3) 후각

사람은 일상생활에서 다양한 냄새를 맡으며 살아가는데, 냄새를 맡는 과정은 코에서 시작된다. 공기 중에 떠다니는 작은 화학물질의 분자들이 코로 들어오면, 이 분자들은 코 안의 점액질에 녹아들게 된다. 그렇게 녹은 분자들은 후각 수용체라는 감각 기관을 자극하고, 그 정보가 뇌로 전달되어 우리가 냄새를 인식하게 되는 것이다.

후각은 우리 몸의 감각 중 가장 오래된 감각 중 하나다. 갓 태어난 아기들도 시각의 경우 성장하면서 발달하는 반면에, 후각은 태어날 때부터 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다. 사람의 유전자에는 1,000개가 넘는 후각 수용체가 있어서 무려 1조 가지나 되는 다양한 냄새를 구별할 수 있다.

후각의 또 다른 흥미로운 점은 냄새가 기억이나 감정과 깊이 연관되어 있다는 것이다. 누구나 한 번쯤은 특정한 냄새를 맡으면 예전의 기억이 떠오르거나, 그 냄새와 관련된 감정이 되살아나는 경험을 해본 적이 있을 것이다.

이는 후각이 다른 감각과 다르게 뇌의 ‘안와전두피질’이라는 영역으로 바로 연결되기 때문이다. 이 영역은 기억과 감정을 다루는 해마와 편도체와도 연결되어 있어, 냄새와 함께 기억과 감정이 함께 저장된다. 그래서 어떤 향기를 맡으면 예전에 맛봤던 음식이 생각나거나, 지난 추억이 떠오르는 것도 이 때문이다.

사람처럼 냄새를 맡는 인공 장치인 ‘전자코’

사람처럼 냄새를 맡을 수 있는 장치가 있다면 여러모로 편리할 것이다. 이를 위해서는 냄새 정보를 디지털화해야 하는데, 이런 작업을 수행하는 장치를 ‘전자코’라고 부른다. 전자코는 화학 센서나 가스 센서를 이용해 냄새를 감지하지만, 일반적인 가스 센서와는 다르게 소형화되어 있고, 디지털 기술과 결합되어 있는 것이 차이점이다.

전자코의 역사는 1962년 일본에서 시작되었다. 당시 반도체 제조 과정에서 가스 유출을 감지하기 위해 개발된 센서가 그 시초였다. 이 센서는 특정 가스가 있을 때 금속이 부식되는 원리를 이용했다. 이후 1987년에 한 과학 잡지에서 ‘전자코’라는 이름이 처음 소개되었고, 이후 이 기술은 급속도로 발전했다.

오늘날 전자코는 우주정거장의 공기 질을 모니터링하거나, 공장에서 화재 위험을 미리 감지하는 데 사용된다. 또한 공항에서 마약 탐지견을 대체하거나, 부패한 음식을 찾아내는 데도 활용될 수 있다. 심지어 환자의 호흡을 통해 초기 폐암을 진단하는 데도 쓰일 수 있어 그 활용 범위는 무궁무진하다.

우리나라에서도 전자코 기술은 발전을 거듭하고 있다. 2019년에는 한국전자통신연구원(ETRI)에서 폐암을 초기 진단할 수 있는 기술을 개발했다. 이 기술은 암세포가 분비하는 특정 유기화합물을 감지하는 센서를 이용해, 환자의 숨을 분석하여 폐암을 진단하는 것이다.

전자코가 가스를 감지하는 방법에는 여러 가지가 있다. 반도체 공정 기반의 센서들은 특정 물질이 센서에 닿으면 주파수가 변화하는 원리를 이용하기도 하며, 금속산화물 반도체 표면에 가스가 흡착될 때 저항이 변화하는 원리를 활용하기도 한다. 하지만 냄새를 구성하는 화학물질은 매우 다양하고 비슷한 성분을 가진 물질들이 많아, 특정 물질에만 반응하는 센서를 개발하는 것은 쉽지 않다.

이 문제를 해결하기 위해 여러 개의 센서를 사용하는 방법이나, 인공지능을 활용한 기계 학습 기술이 많이 연구되고 있다. 또 다른 방법으로는 인간의 후각을 모방하는 기술이 있다. 사람은 제한된 수의 후각 수용체로 1조 가지 이상의 냄새를 구별할 수 있는데, 서울대학교 연구팀이 유전공학 기술을 이용해 인간의 후각 수용체와 동일한 수용체를 세포 표면에 생성하고, 이를 나노튜브에 결합해 전류의 변화를 탐지하는 ‘바이오 전자코’ 기술을 개발한 바 있다.

미래에는 우리가 사용하는 스마트폰에 냄새를 감지하는 전자코 기술이 탑재될지도 모른다. 이 기술이 발전하면 스마트폰이 우리의 건강을 모니터링하거나 위험을 감지하는 데 사용할 수 있을 것이다. 그리고 한 단계 더 나아가, 우리가 맡는 냄새를

인식하고 저장하는 ‘디지털 트윈(digital twin)’ 시스템도 가능해질 수 있을 것으로 예측되고 있다.

디지털 후각 인터페이스로 냄새를 재현해 볼 수 있을까?

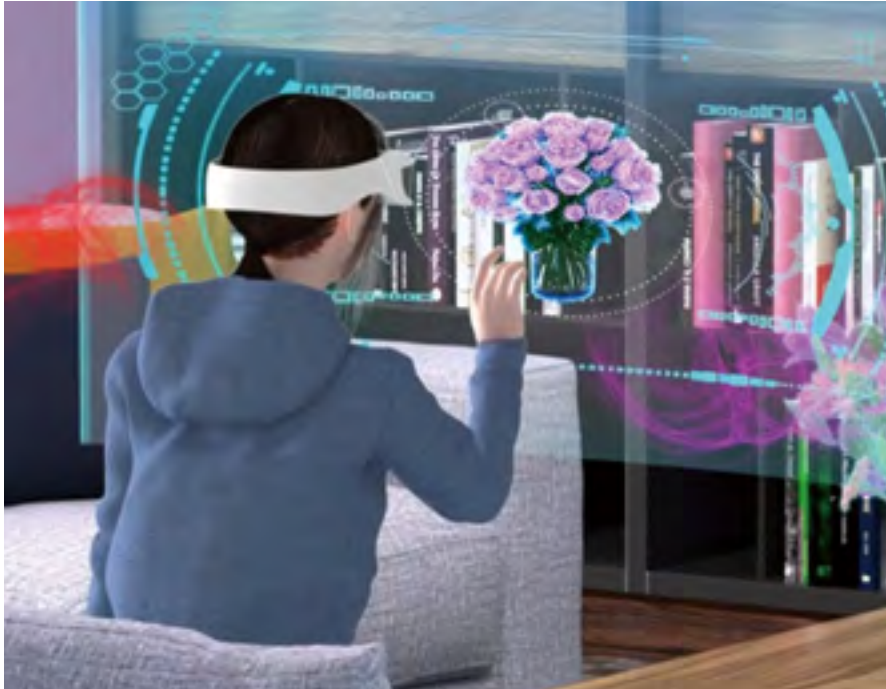
우리는 보거나 듣는 것을 다양한 방식으로 표현할 수 있다. 그림을 그리거나 노래를 부르며 감정을 전달할 수 있고, 손으로 무언가를 만지며 느낀 감정을 나눌 수도 있다. 하지만 냄새나 맛을 똑같이 재현하는 것은 아직 쉽지 않은 일이다. 만약 우리가 원하는 대로 냄새를 만들어낼 수 있다면, 가상현실이나 게임에서도 훨씬 더 생생한 경험을 제공할 수 있을 것이다. 또한, 소중한 기억이나 사람을 떠올릴 때 그 냄새를 다시 맡아보는 일도 가능해질지 모른다.

이러한 기술을 ‘디지털 향기 기술(digital scent technology)’이라고 부르는데, 사실 이 기술에 대한 연구는 오래전부터 있었다. 1950년대에는 영화관에서 특정 냄새를 발생시키는 ‘Smell-O-Vision’과 ‘Aroma Rama’라는 장치가 개발되었다. 그러나 이 장치들은 냄새가 영화 장면과 맞지 않게 전달되거나, 장치 소리가 커서 큰 인기를 끌지 못했다.

1999년에는 ‘DigiScents’라는 회사에서 ‘iSmell’이라는 컴퓨터용 장치를 선보였다. 이 장치는 128가지 주요 냄새가 담긴 카트리지를 사용해, 사용자가 특정 웹사이트에 접속하면 원하는 냄새를 만들어냈다. 이후에도 여러 회사들이 냄새를 디지털로 재현하는 기술을 개발하려고 노력했다. 냄새로 사람을 깨우는 후각 알람 시계도 만들어졌다.

하지만 냄새를 정확한 시간에 원하는 곳에 전달하는 것은 매우 복잡한 일이다. 인간의 후각 인지 과정이 워낙 정교하기 때문에, 이 기술은 아직 대중적으로 크게 확산되지는 못하고 있다. 그럼에도 불구하고, 디지털 향기 기술은 여전히 흥미로운 분야로, 언젠가 우리의 일상에 자리잡을 날이 올지도 모른다.

<그림 5> 디지털 향기 기술



출처: ScientificAmerican(2023).

(4) 미각

미각은 우리가 음식의 맛을 느끼고, 이로운 음식과 해로운 음식을 판별하는 데 있어 중요한 역할을 하는 감각이다. 미각은 크게 단맛, 짠맛, 신맛, 쓴맛, 감칠맛의 다섯 가지로 나뉘는데, 각각의 맛은 혀의 특정 부위에 있는 수용체에 의해 감지된다. 혀의 표면에는 유두돌기(papillae)라는 작은 돌기가 있으며, 이 돌기 안에는 미뢰(taste bud)라는 구조가 있다. 하나의 미뢰는 약 100개의 미세포(taste receptor cell)로 이루어져 있는데, 이 미세포들이 음식의 화학물질과 반응하여 전기신호를 만들어 낸다.

이 전기신호는 미신경(gustatory nerve)을 통해 뇌로 전달되며, 뇌에서는 이 신호를 분석해 우리가 느끼는 맛을 인식하게 된다. 이렇게 미각 신호가 복잡한 과정을 거쳐 뇌에 전달되면, 우리는 단순히 맛을 느끼는 것을 넘어 그 맛이 무엇인지 정확히 구별할 수 있게 된다. 바로 미각이 단순한 감각으로만 존재하는 것이 아니라, 우리의 생존을 돕는 필수적 감각임을 알려주는 기능이다.

현대판 기미 상궁이라고 할 수 있는 전자혀

우리의 혀는 단맛, 짠맛, 신맛, 쓴맛, 감칠맛을 감지하여 다양한 맛을 느끼게 한다. 문제는 그런 맛의 평가가 사람마다 모두 다르기 때문에 상당히 주관적일 수밖에 없다는 데 있다. 따라서 과학자들은 오래전부터 맛에 대해 더 정확하고 객관적으로 평가할 수 있는 시스템을 개발하고자 노력했다.

그리고 마침내 그런 시스템 개발에 성공했는데, 바로 ‘전자혀(electronic tongue)’다. 전자혀는 맛을 이루는 화학물질에 반응하는 센서로 구성되어 있으며, 음식이나 음료의 다섯 가지 기본 맛을 정량화할 수 있다.

전자혀는 실제로 ‘맛’을 느끼는 것이 아니라, 음식 속 화학물질의 성분과 조성을 분석하여 데이터를 수집한다. 이렇게 수집된 데이터는 특히 제약, 식음료, 의료 연구 등 다양한 분야에서 유용하게 활용된다. 따라서 사람의 주관적인 맛 평가에 비해 전자혀는 훨씬 더 객관적이고 일관된 결과를 제공할 수 있다는 것이 특징이다.

현재 전자혀 기술은 놀라운 발전을 이루었다. 개발 초기만 해도 단순히 화학적 성분을 인식하는 데 그쳤지만, 이제는 인공지능을 통해 더욱 정교하고 정확한 맛 평가가 가능해졌다. 또한 전자혀는 식품 분석뿐만 아니라 폐수 오염 수준을 측정하는 등 환경 보호에도 기여하고 있어, 산업과 비산업 분야 모두에서 중요한 역할을 하고 있다.

전자혀 기술의 다양한 적용 사례

전자혀 기술은 다양한 분야에서 활발하게 사용되며 많은 이점을 제공하고 있다. 특히 식음료, 제약, 의료 분야에서 그 활용이 두드러지고 있다.

식음료 산업에서는 와인, 커피, 유제품 등의 품질 관리와 맛 분석에 전자혀가 사용된다. 이 기술은 와인의 숙성 정도나 커피의 풍미를 일관되게 평가하여 최적의 맛을 유지하고 품질을 보장한다. 또한, 신제품 개발 과정에서도 전자혀는 새로운 음료나 식품의 맛을 테스트하고 개선하는 데 큰 도움이 된다.

지난 2023년에는 DGIST와 KAIST의 연구팀이 인공지능을 도입한 전자혀 시스템을 개발하여, 인간의 주관적 맛 평가를 객관적이고 일관되게 대체하는 데 성공했다. 이 시스템은 6가지 와인의 맛을 95% 이상의 정확도로 구별해내며, 유사한 와인을 제안하는 기능도 포함하고 있다. 이는 전자혀가 식품 개발과 품질 관리에서 중요한 도구로 자리를 잡아가고 있음을 보여준다.

제약 산업에서도 전자혀는 중요한 역할을 하고 있다. 약물의 맛을 평가하고 최적화하여 환자의 복용 순응도를 높이는 데 기여하며, 특히 고령자나 유아를 위한 약물 개발에서 전자혀의 활용이 더욱 부각된다. 예를 들어, FDA 승인을 받지 않은 약물의 맛을 평가할 때 전자혀를 사용함으로써 부작용과 위험을 최소화할 수 있다. 이를 통해 약물 복용의 순응도를 높이고, 승인 전 테스트 과정에서 낭비를 줄일 수 있다.

의료 분야에서는 전자혀가 질병 진단에도 활용된다. 환자의 타액을 분석하여 당뇨병이나 신장 질환 등의 조기 진단에 도움을 주는 것이다. 타액 속 화학 데이터를 분석함으로써 질병을 정확하고 안정적으로 진단할 수 있다.

산업시장 예측 전문매체인 'Future Market Insights'에 따르면, 2023년 전자혀 시장 규모는 약 4억 3400만 달러에 달하는 것으로 나타났으며, 연평균 성장률은 4.5% 정도의

<그림 6> 전자혀를 통한 식음료, 의료, 환경 분야 적용 모식도



출처: 서울대학교 박정환(2024).

가파른 상승세를 보일 것으로 전망됐다. 이러한 성장세는 전자허 기술의 발전과 다양한 산업에서의 활용 확대에 따른 것으로, 앞으로 전자허의 경제적 가치와 적용 가능성은 더욱 커질 것으로 보인다.

(5) 촉각

촉각은 우리의 피부가 외부 자극에 반응하는 감각이다. 물체를 만질 때 그 물체가 매끄러운지 아니면 거친지, 또는 단단한지 부드러운지 등을 판단하게 해주는 감각인 것이다.

이러한 촉각 자극은 감각신경의 말단에 위치한 ‘마이스너 소체(Meissner’s corpuscle)’를 통해 뇌에 전달된다. 마이스너 소체는 손바닥이나 발바닥과 같이 주로 털이 없는 피부에서 발견된다. 이 외에도 소체 중에는 압력감을 인식하는 ‘파치니 소체(Pacinian corpuscles)’와 온도감각을 인식하는 ‘루피니 소체(Ruffini corpuscle)’ 및 ‘크라우제 소체(Krause corpuscle)’ 등이 있다.

신체에서 발생한 촉각 신경신호는 시상(thalamus)이라는 곳을 빠르게 지나간다. 시상은 모든 감각 정보가 집결되는 곳으로서, 일종의 감각 정보 중계국이라 할 수 있다. 여기서 신호는 대뇌의 체성감각피질로 전달되는데, 체성감각피질은 촉각의 기본적인 정보가 우선적으로 감지되는 부위다. 이후 더 세밀한 질감 등의 정보는 2차 체성감각피질로 전달되어 처리된다.

이처럼, 촉각 정보는 신체의 여러 부위에서 수집되어 뇌에서 다양한 처리를 거쳐 인식된다. 그리고 이런 과정 덕분에 우리는 물체의 다양한 특성을 느끼고, 이에 적절히 반응할 수 있다.

휴머노이드 시대를 열 촉각센서의 열쇠, 텔레햅틱스

휴머노이드 로봇이 인간처럼 느끼고 행동하기 위해서는 기술적으로 수많은 난제를 풀어야 하지만, 그중에서도 대표적 문제라면 촉각 기능을 구현하는 것을 꼽을 수 있다.



촉각 기능을 구현하기 위해 필요한 기술은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 물체를 만질 때의 힘과 위치를 전달하는 ‘역감재현(Force Feedback)’ 기술이고, 둘째는 물체의 표면 질감과 진동을 피부로 전달하는 ‘진동 촉감 재현(Vibrotactile Feedback)’ 기술이다.

이러한 기술의 기초가 되는 것이 바로 햅틱 피드백 기술이다. 햅틱 피드백 기술은 스마트폰이나 웨어러블 기기에서 사용되는 진동 모터를 중심으로 발전해왔다. 사용자가 화면을 터치할 때 발생하는 진동이 대표적인 예이다.

이 기술은 디지털 인터페이스와 상호작용을 가능하게 해주는 시작점으로서 해당 기술을 발판으로 최근에는 인간의 피부가 다양한 촉감을 감지하는 원리를 모사한 새로운 기술이 개발되고 있다.

햅틱 피드백 기술은 촉각 센서, 신호 처리, 전달, 분석을 모듈화하여, 온열감, 표면 거칠기, 미끄럼 등의 다양한 촉감을 식별하고 동작을 구분할 수 있도록 한다. 이를 통해 압력, 진동, 온도, 질감 등을 동시에 제공할 수 있는 현실감 있는 촉각 피드백이 가능해질 것으로 기대를 모으고 있다.

또한, 평면 디스플레이의 한계를 극복하기 위해 투명 유연 촉각 센서도 개발되고 있다. 이 센서는 휘거나 말아도 되는 얇고 투명한 폴리머 필름으로 만들어져, 광섬유가 휘어지더라도 빛을 손실 없이 전달할 수 있는 전반사 원리를 이용한다. 필름 외부에 접촉이 가해지면, 빛이 지나가는 경로가 바뀌는 원리를 이용해 촉각을 구현한다. 이 센서는 전기전자적 요소가 없어서 물에 의한 영향을 받지 않기 때문에 매우 혁신적이라고 할 수 있다.

이 외에도 최근에는 공기 증으로 촉각 자극을 전달하는 비접촉식 촉감 디스플레이 기술도 발전하고 있다. 이 기술은 공중의 특정 지점에 초음파를 집중시켜 사람이 느낄 수 있는 크기로 증폭시키는 방법을 사용하는데, 증폭된 초음파의 공기압을 통해 사용자가 진동이나 압력을 느낄 수 있게 한다.

이러한 기술들은 인간을 대신하여 로봇을 조작하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 원격 조작이 필요한 상황에서 로봇에 촉각 피드백 시스템을 탑재함으로써, 원격에서 작업하는 사용자가 마치 직접 작업하는 것처럼 물체를 만지고 조작할 수 있도록 하는 ‘텔레로보틱스’ 기술로 발전할 수 있을 것으로 예측되고 있다. 그리고 이같은 기술을 통해 로봇 조작의 정밀성과 직관성도 크게 향상될 것으로 기대를 모으고 있다.

피부로 듣는 소리, 촉각 음향 기술

소리는 단순히 귀로 듣는 것만이 아니다. 콘서트장에서 심장까지 흔들리게 만드는 베이스의 울림이나 영화에서 폭발 장면의 압도적 느낌은 소리의 깊은 저음이 만들어 내는 특별한 감각이다. 이러한 현상을 이해하기 위해서는 소리가 어떻게 피부를 통해 느껴질 수 있는지를 알아야 한다.

이처럼 소리의 주파수와 진폭, 리듬을 촉각적 신호로 변환하여 피부로 전달하는 기술이 바로 ‘촉각 음향 기술’이다. 이 기술은 소리를 진동으로 변환해 피부에 전달하며, 이를 통해 소리 정보를 피부 감각으로 인지할 수 있게 해준다.

최근 들어서는 촉각 음향 기술이 발전하여 피부에 부착한 센서를 통해 소리, 특히 사람의 목소리와 같은 다양한 소리를 감지하고 전달할 수 있는 수준으로까지 발전하고 있다. 예를 들어, 목이나 얼굴에 붙이는 피부 진동 인식 센서를 통해 소리를 전달하는 방식으로 진화하고 있는 것이다.

또한, 음향과 촉각을 결합한 새로운 치료 기술도 개발되고 있는데, 이 기술은 낭포성 섬유증 환자들을 위한 물리치료에 주로 사용된다. 낭포성 섬유증은 체액이 지나치게 많이 분비되는 유전 질환으로, 호흡기 감염에 취약해지는 특징이 있다. 따라서 이 질환의 치료에는 주기적으로 호흡기 분비물을 배출하기 위해 진동을 주는 방법이 필요하다.

기존에는 음향 주파수(40Hz)를 사용한 치료가 있었지만, 최신 기술은 사용자가 음악을 들으며 그 박자에 맞춘 햅틱 기술로 치료를 받을 수 있도록 하고 있다. 이는 소리의 박자에 맞춰 피부에 진동을 주는 방식으로, 환자들의 삶을 크게 변화시킬 수 있는

<그림 7> 에어리어23과 우저의 협력으로 제작된 시크 비트(SICK BEATS):
낭포성섬유증 환자를 위한 의료기기 조끼(왼쪽)와 사용예(오른쪽)



출처: 한국경제(2021).



출처: 한국경제(2021).

혁신적인 방법으로 주목받고 있다. 이러한 발전은 소리와 촉감을 융합하여 새로운 치료 가능성을 제시하며, 많은 이들에게 희망을 주고 있다.

(6) 생각

생각하는 것만으로도 글을 쓰거나 프로그램을 작동시킬 수 있을까? 얼마 전까지만 해도 이 같은 상상은 허황된 공상으로 여겨졌지만, 지금은 공상이 아니라 실현 가능한 현실이 되고 있다. 바로 뇌파로 컴퓨터를 조작할 수 있는 BCI(Brain-Computer Interface) 기술 덕분이다.

BCI는 앞서 소개했던 여러 가지 BMI 기술들 중 하나다. 뇌와 컴퓨터를 연결해 신호를 주고받는 기술로서 지난 2019년 세계 10대 유망기술로 선정된 바 있으며, 지금도 활발하게 연구가 진행되고 있다. 여러 BMI 기술들 중 BCI가 특히 주목받는 이유는 신체가 불편한 사람들에게 새로운 삶을 선물할 수 있기 때문이다.

뇌파는 뇌 속 신경들이 신호를 주고받을 때 생기는 전기적 흐름이다. BCI는 이러한 뇌파를 감지하여 컴퓨터 명령으로 변환해, 사용자가 외부 장치를 조작할 수 있게 한다. 이 과정에서 중요한 역할을 하는 것이 요즘 한창 화제가 되고 있는 인공지능(AI)이다.

인공지능은 인간의 학습능력과 추론능력을 컴퓨터로 실현하는 기술인 만큼, BCI에 적용되면 뇌 신호를 더 정확하게 해석할 수 있고, 인간과 기기 간의 소통도 원활하게 해줄 수 있다.

뇌의 상태를 진찰하는 기술, 뉴로피드백

뇌전도는 뇌의 활동을 시각적으로 보여주는 기술로서, 뇌의 상태를 파악하는 데 사용된다. 뇌파는 파동의 형태로 나타나며, 주파수에 따라 뇌의 다양한 상태를 반영한다. 이러한 뇌파의 특성을 이용해 실시간으로 뇌 상태를 확인하고 조절하는 기술을 ‘뉴로피드백(neurofeedback)’이라고 한다.

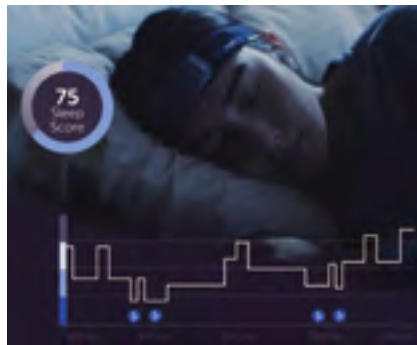
뉴로피드백의 장점은 수술 없이 뇌를 조절할 수 있어 많은 사람들에게 쉽게 적용할 수 있다는 점이다. 이 기술은 주로 주의력결핍 과잉행동장애(ADHD) 환자의 집중력과 충동성 조절을 돕는 데 사용되었으나, 최근에는 건강한 사람들에게도 널리 사용되고 있다.

2024년 상반기에는 ‘Mendi’, ‘Sens.ai’, ‘Muse’ 같은 뉴로피드백 관련 웨어러블 장치들이 최고의 성능을 가진 기기들로 선정되었다. 이 기기들은 사용자가 모바일을 통해 자신의 뇌 상태를 점검하여 집중력 향상과 불안감 감소, 그리고 수면장애 극복 등 일상생활에서 건강한 뇌를 유지하도록 도와준다. 이들 기기는 현재 병원이나 연구기관에서도 사용되고 있으며, 뉴로피드백을 활용한 다양한 연구도 활발히 진행되고 있다.

<그림 8> ‘Sens.ai’ 사용 예(왼쪽) 및 ‘Muse’ 사용 예(오른쪽)



출처: Sens.ai(2024).



출처: Muse(2024).

최근 대한의학회의 국제학술지에 발표된 논문에 따르면, 뉴로피드백은 스트레스 감소에 실제로 효과가 있는 것으로 나타났다. 물론 보완할 점도 많다. 사용자의 주관적 경험에 의존하는 경향이 있고, 정확성이 부족하다는 점 등이 뉴로피드백의 단점으로 지적되고 있다.

BCI가 여는 ‘모두가 소통할 수 있는 세상’

지난 2023년, 미국 스탠퍼드대학의 연구팀은 인공지능을 활용하여 사람의 발성을 해독하는 BCI 기기를 개발하여 학계의 비상한 관심을 모았다. 국제 학술지 Nature에 발표된 이 논문에는 신경장애로 인해 말을 할 수 없는 루게릭병 환자들이 BCI 기술을 통해 의사표현을 할 수 있도록 만든 연구 결과가 수록되었다.

연구팀은 뇌에 미세한 전극을 삽입해, 신경세포에서 발생하는 전기신호를 기록했다. 실험에 참여한 환자들은 컴퓨터 화면에 나타난 단어를 발음하려고 노력했고, 인공지능 프로그램은 이 신호들을 분석해 단어를 추론했다.

그 결과, 환자들은 분당 평균 62개의 단어를 말할 수 있었으며, 이는 기존의 BCI 장치에 비해 3.4배나 빠른 것으로 드러났다. 이는 일반적인 대화 속도인 분당 160개 단어에

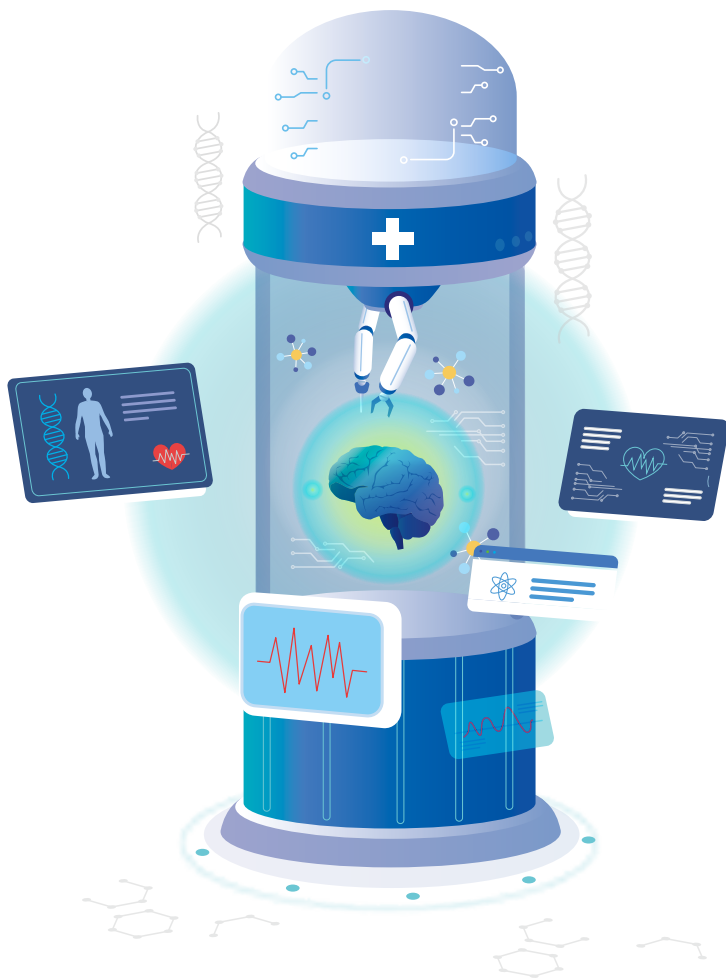
<그림 9> BBC에 소개된 루게릭병 환자의 BCI 훈련과정 사진



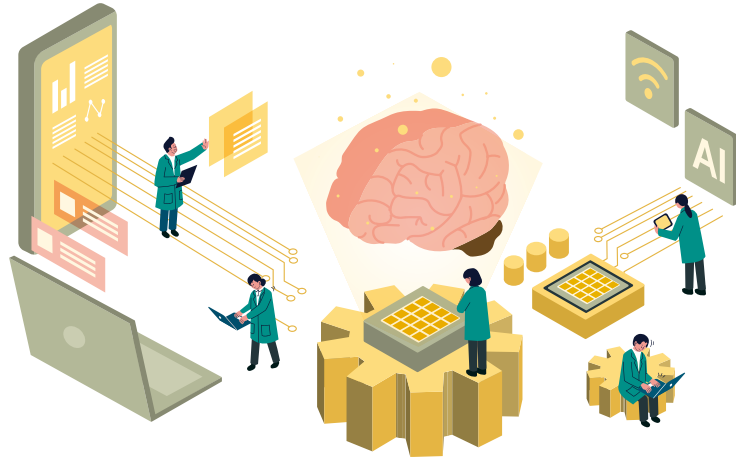
출처: BBC(2023).

점점 더 가까워지고 있음을 보여주는 결과다. 또한, 인식 오류율도 단어 50개 기준으로 9.1%에 불과하여 이전 실험에 비해 약 1/3 정도 줄어들었다.

이는 단순한 기술적 성과를 넘어, 말하기 어려운 신경학적 질환을 앓고 있는 사람들에게 새로운 소통의 가능성을 열어주었다는 점에서 중요한 의미를 가진다는 것이 전문가들의 의견이다. BCI 기술이 '모두가 자유롭게 소통할 수 있는 세상'을 만드는 데 있어 중요한 한 걸음이 될 수 있음을 보여준 사례인 것이다.



II BMI 기술의 미래 전망



1 사회 전반에 미칠 BMI 기술의 미래 전망

미래학자인 ‘레이 커즈와일(Ray Kurzweil)’은 그의 저서 ‘특이점이 온다(The Singularity Is Near)’에서 2045년경이 되면 기술적 특이점이 도래하여 인간과 기계의 경계가 허물어지고 인류 문명이 급격하게 변화할 것이라고 예측한 바 있다.

이러한 특이점의 대표적 사례로 BMI 기술이 꼽히는 것은 어쩌면 당연한 일일지도 모른다. 사람의 뇌에서 발생하는 신호를 기계가 이해할 수 있는 형태로 변환하여, 생각만으로도 기계를 조작할 수 있게 해줌으로써 인간이 가진 한계를 극복할 수 있도록 해주는 기술이 바로 BMI이기 때문이다.

따라서 BMI 기술은 의료 분야에서 가장 많이 사용될 것으로 전망되고 있다. 척수 손상으로 인해 움직일 수 없는 사람들의 뇌에서 발생하는 신호를 포착하여 인공 팔이나 다리를 제어할 수 있도록 도와줄 것이다. 뉴럴링크 같은 회사들이 이미 이러한 기술을 개발하고 있으며, 앞으로 더 많은 발전이 있을 것으로 예상된다.

의료 분야 다음으로는 교육과 엔터테인먼트가 BMI 기술의 영향을 받을 분야로 꼽힌다. 뇌파를 이용해 학생들의 학습 집중도를 측정하고, 이에 맞춰 학습 내용을 조정할 수 있을 것이다. 또한, 엔터테인먼트 분야에서는 생각만으로 게임을 조작하거나, 가상현실과 결합하여 더욱 몰입감 있는 게임 환경을 제공할 수 있을 것으로 보인다.

제조 산업도 혁신적인 변화를 가져올 분야로 예측되는데, 작업자가 피로를 느끼기 전에 이를 감지하여 적절한 휴식을 취할 수 있도록 도와주는 역할을 수행할 수 있다. 또한, 위험한 작업 환경에서도 BMI 기술을 이용해 원격으로 기계를 조작함으로써 작업자의 안전을 보장할 수도 있을 것이다.

이뿐만이 아니다. BMI 기술은 우리의 일상생활 분야에도 많은 영향을 미칠 것으로 판단된다. 예를 들어, 스마트홈 시스템과 결합하여 생각만으로 집안의 가전제품을 제어할 수 있게 될 것이며, BMI 기술을 이용해 생각만으로 메시지를 보내는 등 우리의 삶을 더욱 편리하고 효율적으로 만들어 줄 것으로 보인다.

2 | 감각 별 BMI 기술의 미래 전망

(1) 시각

미래의 시각 기술은 인공지능, 딥러닝, 양자컴퓨터 같은 첨단 기술을 기반으로 급격하게 발전할 것으로 보인다. 현재의 인공지능은 이미지 인식이나 얼굴 인식 등의 분야에서 이미 많은 성과를 거뒀지만, 미래에는 이보다 더 놀라운 기술을 선보일 것이라는 의견이 지배적이다.

예를 들어, 자율주행차는 단순히 물체를 인식하는 것을 넘어서 아이트래킹 기술과 결합하여 날씨와 도로 상태, 그리고 다른 차량의 움직임 등을 예측하는 수준으로까지 발전할 것으로 보인다. 그리고 이를 기반으로 최적의 주행 전략까지도 실시간으로 수립할 수 있을 것으로 전망된다.

또한 미래의 시각 기술은 외부 환경 인식을 넘어 인간의 생체 상태를 실시간으로 파악하는 능력도 갖추게 될 것이다. 얼굴 표정이나 피부 색의 변화, 또는 동공 크기 등을 분석하여 사람의 건강 상태와 감정 상태를 파악하는 기술이 발전할 가능성이 크다.

이러한 기술은 의료 분야를 넘어 마케팅, 교육, 서비스 산업 등에서 다양한 활용이 가능하다. 예를 들어, 고객의 감정 상태를 파악하여 맞춤형 서비스를 제공하는 혁신적인 개인 맞춤형 서비스 기반 기술로 발전할 수 있다.

문제는 이 같은 연구들이 성공하려면 방대한 시각 데이터를 빠르고 정확하게 처리할 수 있어야 한다는 것이다. 이를 위해 학계는 양자컴퓨터의 발전을 해결 방안으로 모색하고 있다. 양자컴퓨터는 복잡한 시각 데이터를 실시간으로 처리하고 중요한 정보를 신속하게 추출할 수 있는 능력을 갖고 있다. 따라서 양자컴퓨터 상용화가 가능해진다면 시각 기술은 현재보다 훨씬 정교하고 강력한 도구로 발전할 수 있을 것으로 예측되고 있다.

이 외에도 시각 기술이 인공지능과 딥러닝, 생체 인식 기술 등과 결합하면, 인간의 경험을 새로운 차원으로 확장시킬 수 있다는 것이 전문가들의 시각이다. 단순히 세상을 보는 방식을 넘어 인간과 세상 간의 상호작용 방식을 근본적으로 재정의하는 수준으로 도약한다는 것이다.

(2) 청각

우리의 뇌는 소리를 인식하는 데 중요한 역할을 한다. 그래서 청력을 잃은 사람들이 소리를 들을 수 있도록 돕는 방법을 연구하고 있는데, 현재는 인공와우라는 소형 기기를 귀에 이식하는 방법이 많이 사용되고 있다.

하지만 높은 비용과 종종 발생하는 부작용으로 인해 이제는 뇌를 직접 자극하여 소리를 전달하는 연구가 진행되고 있다. 이 기술은 뇌의 특정 신경세포를 자극해 소리를 느끼게 하는 방법으로서, 인공와우와는 완전히 다른 원리다.

이 기술은 뇌를 직접 건드리거나 수술하지 않고, 두피나 귀 근처에 작은 전극을 배치해 뇌의 청각 부분을 자극한다. 초기 연구에서는 뇌에 전기 자극을 직류 형태로 주어 언어를 이해하는 능력을 키우려는 시도가 있었다. 직류 전기 자극이란, 방향이 변하지 않는 일정한 전기를 흐르게 하는 자극이다.

이렇게 직류 중심의 전기 자극이 교류 형태로 바뀌기 시작한 것은 2015년 이후다. 교류 형태의 전기 자극이란, 전류의 방향이 주기적으로 변하는 자극으로서, 소리의 특성을 다양하게 전달할 수 있다는 장점이 있다.

우리가 사용하는 말소리에는 1~8Hz 정도의 느린 리듬이 있는데, 이런 리듬을 뇌에 전달하면 소음이 심한 환경에서도 중요한 소리를 더 잘 구분해낼 수 있다고 한다. 교류 전기 자극은 전류의 주기, 강도, 위상을 조절하여 뇌를 자극하는 방식이다.

현재 이 기술은 연구 단계에 머무르고 있는데, 특정 단어나 소리를 정확히 전달하는 과정이 쉽지 않은 것으로 알려졌다. 그러나 수술을 하지 않는 비침습적 방법으로 외부에서 뇌를 자극해 소리를 전달할 수 있다는 장점 때문에 이목이 집중되고 있다.

(3) 후각

정상적 후각을 가진 사람이라면 레몬과 오렌지처럼 비슷한 듯 다른 향을 구별하는 것이 그리 어려운 일은 아니다. 하지만 사람의 뇌가 이 두 가지 향을 어떻게 정확히 구분하는지는 아직까지 완전히 밝혀지지 않았다.

이런 비밀을 풀기 위해 최근 들어 과학자들은 사람이 특정한 향을 맡았을 때 뇌에서 어떤 변화가 일어나는지를 연구하고 있다. 가령 뇌파는 어떻게 변하는지, 전기적 신호는 언제 발생하는지 등을 연구하는 것인데, 이런 연구를 통해 우리는 향기가 뇌에서 어떻게 처리되고 기억되는지 더욱 정확하게 이해할 수 있게 될 것이다.

특히 관련 연구가 더욱 발전한다면, 미래에는 뇌의 활동만으로 어떤 향을 맡았는지 알아낼 수 있을지도 모른다. 뿐만 아니라, 뇌를 자극하여 특정 향을 느끼게 하는 기술도

개발될 수 있을 것이다. 마치 영화에서처럼, 특정 향기를 통해 기억을 되살리거나 감정을 조절할 수 있는 세상이 올지도 모르는 것이다.

향기를 디지털화하려는 시도는 이미 오래전부터 이어져 왔다. 하지만 아직까지 우리는 냄새를 통해 기계와 소통하는 것에 익숙하지 않다. 하지만 뇌가 향기를 인식하는 과정이 명확하게 밝혀진다면, 우리는 더 이상 복잡한 기계 없이도 뇌를 통해 직접 정보를 주고받을 수 있을 것이다. 마치 텔레파시처럼, 생각만으로 다른 사람에게 특정 향기를 전달하거나, 특정 향기를 통해 다른 사람의 생각을 읽을 수 있는 날이 멀지 않았다.

향기는 단순한 감각을 넘어 우리의 삶을 풍요롭게 만들어 주는 중요한 요소이다. 과학의 발전을 통해 우리는 향기의 비밀을 하나씩 풀어나가고 있으며, 머지않아 향기를 통해 우리는 전혀 새로운 방식으로 세상과 소통할 수 있게 될 것이다.

(4) 미각

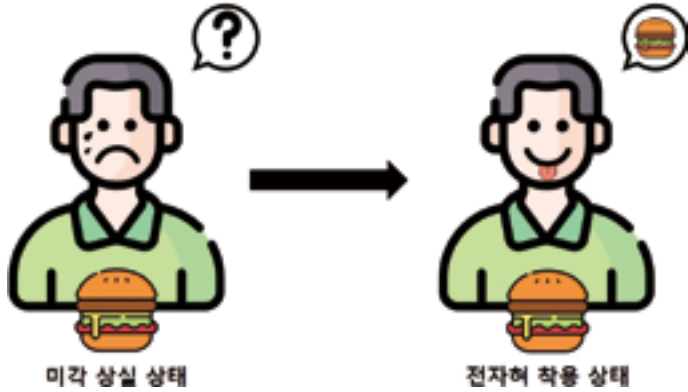
질병이나 노화로 인해 미각을 잃은 사람들은 음식을 먹는 즐거움을 잃고, 삶의 질이 크게 저하될 수 있다. 하지만 이제 곧 맛을 보는 새로운 방법이 등장할지도 모른다. 바로 ‘미각 BMI’라는 기술이다.

미각 BMI는 뇌의 신호를 분석하여 맛을 느끼게 하는 기술이다. 뇌에 직접 맛을 전달하는 셈이다. 현재는 이러한 기술이 아직 상용화되지 않았지만, 인공지능 기술의 발전과 함께 미각 BMI는 점차 현실화될 가능성이 높아지고 있다.

미각 BMI가 상용화된다면, 미각을 잃은 사람들은 다시 한번 음식의 맛을 느낄 수 있게 될 것이다. 더 나아가, 실제로 음식을 맛보지 않고도 그 맛을 가상으로 경험할 수 있으며, 이는 새로운 형태의 식문화와 미각 체험을 가능하게 할 것이다.

미각 BMI의 기술이 이처럼 무궁무진하다 보니 식품 산업에도 큰 변화를 가져올 것이다. 예를 들어, 새로운 맛을 개발하거나, 개인의 취향에 맞는 맞춤형 음식을 만들어 낼 수 있다. 또한, 음식 알레르기가 있는 사람들을 위한 안전한 식품 개발에도 활용될 수 있다. 단순히 맛을 보는 것을 넘어, 우리의 식생활 전반에 큰 영향을 미치게 되는 것이다.

<그림 10> 미래의 미각 BMI 효과 예상



출처: 서울대학교 박정환(2024).

이 외에도 미각 BMI 기술은 건강 관리 분야에서도 혁신적인 변화를 가져올 수 있다. 특정 질병이나 약물 치료로 인해 미각이 손상된 환자들에게 새로운 미각 경험을 제공할 수 있으며, 이는 환자들의 식욕을 자극하고 전반적인 건강 상태를 개선하는 데 기여할 수 있다.

(5) 촉각

우리는 지금까지 영상의 형태로만 홀로그램을 접했지만 멀지 않은 미래에는 홀로그램을 통해 마치 실제 물건을 만지는 듯한 경험을 할 수 있을 것으로 보인다. 홀로그램은 공중에 떠 있는 입체적인 이미지를 말하는데, 여기에 촉각 기술이 더해지면 우리는 디스플레이를 쓰지 않고도 홀로그램을 만지고 느낄 수 있게 된다. 마치 공중에 떠 있는 구름을 만져보는 듯한 경험이 가능해지는 것이다.

이러한 기술은 더 나아가 텔레햅틱(telehaptics)이라는 새로운 분야를 열게 될 것이다. 텔레햅틱은 멀리 떨어져 있는 사람과 촉각을 공유하는 기술이다. 가령, 한 사람이 먼 곳에 있는 물건을 만지면, 다른 사람도 똑같은 촉각을 느낄 수 있는 것이다. 이는 마치 서로 다른 장소에 있으면서도 같은 물건을 함께 만지는 듯한 경험을 가능하게 한다. 텔레햅틱 기술은 가상현실이나 증강현실을 통해 더욱 실감나는 경험을 제공하며, 우리가 서로 소통하는 방식을 완전히 바꿔놓을 것이다.

더 나아가, 촉각 피드백을 뇌에 직접 전달하는 기술이 개발되면, 가상현실 속에서 우리는 더욱 정교하고 생생한 촉각을 느낄 수 있을 것이다. 이는 단순히 감각을 전달하는 것을 넘어, 인공지능이 사람처럼 느끼고 반응하는 것을 가능하게 할 것으로 예상된다. 즉, 우리는 인공지능과 더욱 자연스럽게 소통하고 교감할 수 있는 세상을 맞이하게 될 것이다.

이처럼 촉각 기술과 홀로그램 기술의 결합은 우리의 삶을 근본적으로 변화시킬 것이다. 우리는 더 이상 2차원이나 3차원의 디스플레이에 의존하지 않고, 현실과 가상의 경계를 허물며, 인공지능과 더욱 깊이 연결될 수 있을 것이다. 이는 단순히 기술의 발전을 넘어, 인간과 기술이 공존하는 새로운 시대를 여는 새로운 걸음이 될 것이다.

(6) 생각

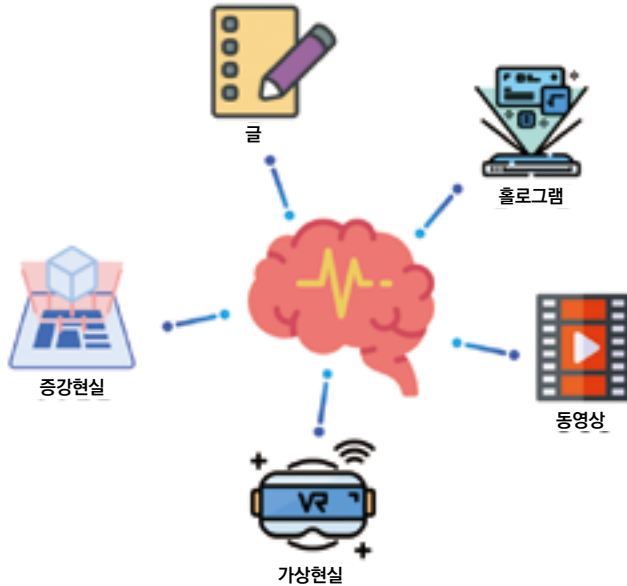
생각만으로 물건을 움직이고, 생각만으로 다른 사람과 소통하는 것이 더 이상 꿈만은 아닌 시대가 다가오고 있다. 마치 공상과학 영화에서나 등장할 법한 이런 현상들을 가능하게 해줄 것 같은 기술은 바로 '생각 BMI'다.

생각 BMI 기술은 뇌에서 나오는 신호를 감지하고 이를 해석하여 기계나 컴퓨터에 명령을 전달하는 시스템을 바탕으로 한다. 최근 MIT 연구팀은 로봇 의족이 뇌의 신호를 받아 마치 실제 다리처럼 자연스럽게 움직이는 기술을 발표했다.

또한, 지난 2023년에는 텍사스대학교 연구팀이 뇌파 변화를 언어로 번역하는 데 성공했다. 이러한 기술적 발전 양상에 비추어 볼 때 생각 BMI 기술은 단순히 신체장애를 극복하는 것뿐만 아니라, 의사소통과 인지 능력을 높이는 데도 커다란 영향을 미칠 것으로 예상되고 있다.

특히 생각 BMI 기술에 관심이 집중되고 있는 이유는 뇌와 기계를 직접 연결해 뇌의 신호를 실시간으로 해석하고 명령을 전달할 수 있어 다양한 질병 치료에 사용될 수 있을 것으로 전망되고 있기 때문이다.

<그림 11> 여러가지 형태로 활용 가능한 미래의 생각 BMI 기술



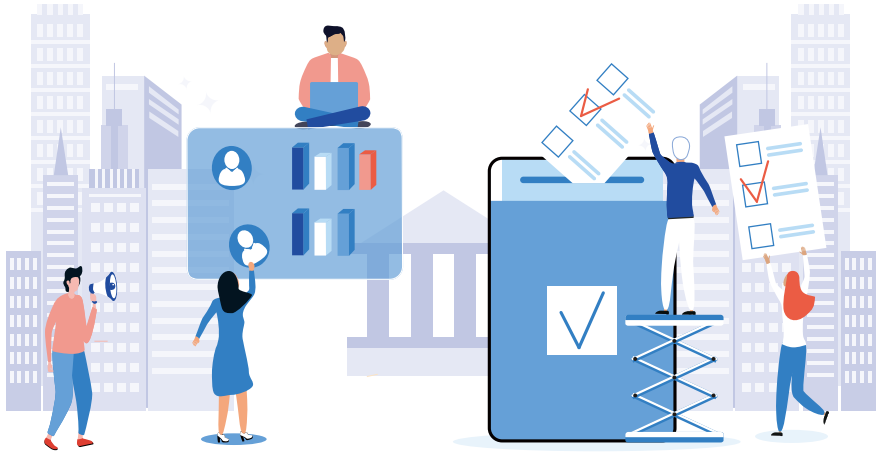
출처: 서울대학교 박정환(2024).

생각 BMI 기술은 알츠하이머 환자의 기억을 돕거나 척수 손상 환자의 운동 기능을 회복하는 데 쓰일 수 있으며, 교육 분야에서도 큰 잠재력이 있다. 학습에 어려움을 겪는 학생들에게 맞춤형 교육 콘텐츠를 제공하거나, 집중력을 요구하는 업무 환경에서 직원들의 성과를 높이는 데 기여할 수 있다.

한발 더 나아가, 생각 BMI 기술은 사용자 맞춤형 인터페이스를 개발해 개인의 필요와 취향에 맞춘 다양한 응용 프로그램을 제공할 수 있다. 이러한 기술은 스마트홈 시스템을 비롯하여 개인 비서 서비스와 가상현실 및 증강현실 등 다양한 산업 분야에서 혁신을 일으킬 수 있다.

생각만으로 집안의 조명이나 온도를 조절하거나, 가상 회의에서 실시간으로 의견을 전달하는 것이 가능해질 것이다. 또한 리모컨 없이도 TV 채널을 바꾸거나, 심지어는 생각만으로 자동차를 운전할 수 있는 등 생각 BMI의 발전은 우리의 생활 방식을 크게 변화시킬 잠재력을 가진 기술로 인정받고 있다.

III BMI 기술의 상용화를 위한 정책 제언



1 윤리적 문제

감각과 관련된 BMI 기술이 발전함에 따라 가장 먼저 우려되는 부분은 사생활 침해 문제다. 이 기술을 통해 개인의 감각 데이터를 실시간으로 수집하고 분석할 수 있다면, 타인이 이를 악용하여 불법 감시나 조작의 도구로 사용할 가능성이 생긴다. 특히 군사적 목적으로 사용될 경우, 특정 사람의 감각 경험을 왜곡하거나 통제할 수 있어 그 위험성은 더욱 심각해진다. 개인의 시각적, 촉각적 경험은 사적인 영역에 속하는 만큼 이를 보호하기 위한 데이터 보호법과 윤리적 규제가 반드시 마련되어야만 한다.

감각과 관련된 BMI 기술의 또 다른 문제는 상업적 목적으로 악용될 가능성이 있다는 점이다. 예를 들어, 미각을 조작하여 특정 음식을 더 맛있게 느끼게 하거나, 전혀 새로운 맛을 만들어낼 수 있다면 이는 식품의 안전성을 위협할 수 있다. 더 나아가, 마약과 결합하여 중독성을 유발하는 ‘디지털 마약’이 등장할 위험도 존재한다. 이러한 악용

가능성을 차단하기 위해서는 신약 개발이나 식음료 산업에서 감각 BMI를 활용하는 모든 과정이 투명하게 공개되고, 관련 규제가 철저히 시행되어야 한다.

이 외에도 BMI 기술은 사용자에게 신체적 또는 정신적인 혼란을 초래할 수 있다. 잘못된 신호가 전달될 경우 사용자는 정상적인 감각을 잃거나 왜곡된 감각을 경험할 수 있으며, 이는 장기적으로 심각한 부작용을 유발할 수 있기 때문이다. 따라서 이를 방지하기 위해 감각과 관련된 BMI 기술에는 높은 수준의 안전성 기준이 요구되며, 신체적 자율성을 침해하지 않도록 윤리적 가이드라인이 수립되어야 한다. 특히 타인이 사용자의 감각을 제어하거나 모니터링할 수 있는 상황을 원천적으로 차단하는 제도적 장치가 필요하다.

특히 생각 BMI 기술의 경우, 뇌 신호를 직접 분석하여 명령을 전달하는 과정을 포함하고 있기 때문에 개인의 사적인 생각이나 감정이 무단으로 수집될 수 있는 위험성을 내포하고 있다. 생각은 가장 내밀한 영역으로서, 그 침해는 단순한 개인정보 유출 이상의 심각한 문제를 야기할 수 있다. 만약 개인의 생각까지 실시간으로 타인이 알 수 있다면 그 피해는 상상조차 할 수 없을 정도로 클 것이다. 따라서 생각 또한 개인의 중요한 재산으로 보호받아야 하며, 이를 위한 법적 장치가 필요하다.

이처럼 감각과 관련된 BMI 기술은 인간의 삶에 있어 막대한 영향을 줄 수 있는 잠재력을 가지고 있는 만큼, 사람 개개인의 감각을 안전하게 보호해 줄 수 있는 윤리적 기준이 필수적으로 수반되어야만 한다. 그렇게 해야만 기술이 주는 혜택을 모두가 안전하게 누릴 수 있을 것이다.

<그림 12> BMI 기술의 상용화를 위한 해킹, 사생활 침해 문제 등 해결 과제



출처: NeuroRelay(2013).



출처: Express(2017).

2 | 제도적 문제

BMI 기술이 상용화되기 위해서는 법적 규제와 제도적 안전장치가 필요하다. 특히 중요한 것은 개인의 감각 정보가 도용되거나 악용되는 것을 막기 위한 제도적 장치의 마련이다. 이를 위해 가장 먼저 해결해야 할 과제는 감각과 관련된 데이터의 소유권과 사용 권한을 명확히 규정하는 것이다.

사람의 뇌에서 발생하는 신호는 매우 민감한 정보이기 때문에, 이 신호의 소유권을 누구에게 인정할 것인지, 어떤 상황에서 사용할 수 있는지에 대한 법적 기준이 필요하다. 예를 들어, 누군가가 개인의 시각 정보를 몰래 수집하고 이를 상업적으로 활용한다면 이는 심각한 개인정보 침해가 될 수 있다. 따라서 이러한 문제를 방지하기 위해 불법적인 데이터 수집 및 악용 행위에 대한 강력한 처벌 규정이 마련되어야 한다.

감각 기반의 BMI 기술은 뇌에 직접적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 안전성 검증이 필수적이다. 상용화되기 전에 사용자가 신체적, 정신적으로 부작용을 겪지 않도록 철저한 임상 시험과 승인 절차를 거쳐야 하며, 각 단계마다 기술의 안전성을 확인할 수 있는 엄격한 기준이 있어야 한다. 이런 기준을 통과한 기술만이 시장에 도입될 수 있다.

또한, BMI 기술이 상용화되기 위해서는 기술의 표준화도 필수적이다. 여러 기업이 저마다 다른 방식으로 기술을 개발하면 사용자들이 이를 선택하고 활용하는 데 어려움이 생길 수 있다. 이를 방지하기 위해 국제 표준화 기구와 협력하여 기술적 표준을 마련하고, 감각 신호 전송 방식이나 장비 간 호환성을 보장하는 제도적 장치가 필요하다.

그리고 앞서서도 언급했지만, 감각 기반의 BMI 기술은 개인정보 보호 문제와도 직결된다. 뇌 신호를 통해 얻은 정보가 악용될 경우, 개인의 사적인 생각이나 감각이 무단으로 수집될 수 있다. 최근 보이스 피싱이나 딥페이크 기술이 문제를 일으키는 것처럼, 감각 정보도 악의적으로 사용될 가능성이 존재한다. 따라서 이를 방지하기 위해 감각 BMI 기술의 모든 과정에서 명확한 법적 가이드라인이 마련되어야 하며, 독립적인 윤리위원회가 개인정보 보호를 철저히 관리해야 한다.

이 외에도 BMI 기술이 국제적으로 확산될 것을 고려하여 국가 간 협력과 국제법 제정도 필요하다. 감각 BMI 기술이 제대로 발전하려면, 개인의 권리 보호와 윤리적 기준을 함께 고려한 제도적 장치가 마련되어야만 진정한 가치를 발휘할 수 있을 것이다.

3 | 인프라 문제

BMI 기술은 감각을 보조하거나 제어할 수 있어, 시각, 미각, 촉각 같은 감각을 개선하는데 매우 유용하다. 하지만 이 기술이 일상에서 제대로 활용되려면 탄탄한 인프라가 필수적이다.

시각 기반의 BMI는 실시간으로 대량의 데이터를 처리해야 하는데, 이를 위해서는 빠르고 안정적인 네트워크가 필요하다. 예를 들어, 6G 같은 차세대 통신망이 중요한 역할을 하게 될 것이다. 하지만 단순히 빠른 인터넷이 필요한 것이 아니라, 대규모 데이터를 처리할 수 있는 데이터 센터와 고성능 장비도 필요하다. 이를 뒷받침하기 위해 정부 차원의 연구개발 지원이 필요하며, 혁신 펀드 등을 통해 연구를 장려하고, 민간 기업과의 협력을 통해 기술 발전을 가속화할 수 있다.

미각 기반의 BMI 기술도 상용화되기 위해서는 인프라 확충이 필요하다. 특히, 의료기관과 연구소가 이 기술을 쉽게 도입할 수 있도록 초기 투자 부담을 덜어주는 정부 지원이 중요한데, 보조금 지원이나 고급 장비 제공 등이 이에 해당한다. 또한, 미각 BMI 기술을 다룰 수 있는 전문 인력이 필요하다. 이를 위해서는 교육 프로그램을 마련해 인재를 양성하고, 이들이 기술의 운영과 유지 관리에 투입되도록 해야 하며, 특히 감각 데이터를 다루는 만큼, 개인정보 보호를 위한 체계도 함께 강화해야 한다.

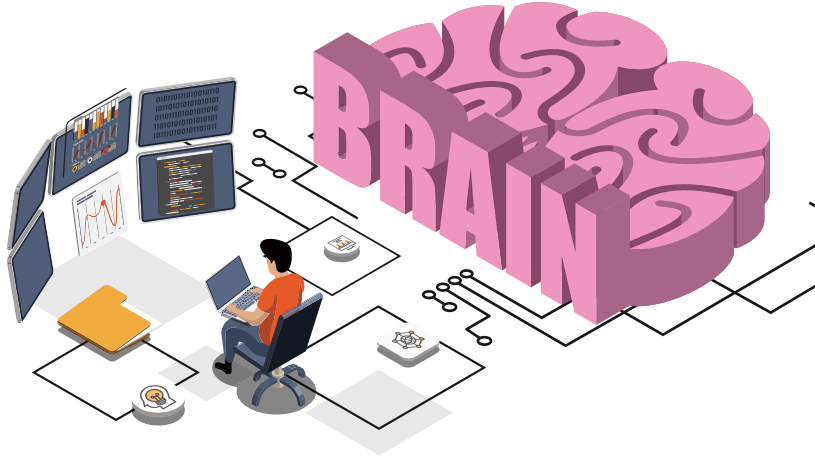
촉각 역시 BMI 기술이 성공적으로 자리 잡기 위해서는 충분한 연구개발 투자가 이루어져야 하는데, 우선적으로 안전성과 효과를 테스트할 수 있는 환경이 구축되어야 한다. 이를 위해 정부는 지원책을 마련하고, 다양한 산업에 맞는 촉각 BMI 솔루션을 개발할 수 있도록 정책적으로 뒷받침해야 한다. 그리고 기술을 다룰 수 있는 전문가 교육도 중요한 부분 중 하나인데, 전문가 양성을 위한 이런 준비가 마련되어야 산업 현장이나 의료기관에서 쉽게 활용할 수 있는 환경도 구축되기 때문이다.

생각을 제어하는 BMI 기술도 역시 마찬가지다. BMI 기술이 일부 사람들만의 것이 아니라 모두가 공평하게 이용할 수 있는 기술이 되도록 해야 한다. 이를 위해 정보 격차를 해소할 방안이 필요한데, 정부는 이를 위해 교육을 제공하고, 대중이 이 기술을 이해하고 안전하게 사용할 수 있도록 해야 한다. 예를 들어 공익 캠페인이나 교육 자료를 통해, 사람들의 생각도 하나의 재산임을 알리고 안전하게 사용하는 방법을 알려야 한다.

결국, BMI 기술이 성공적으로 상용화하려면 기술적 인프라뿐만 아니라, 이를 뒷받침할 사회적, 제도적 인프라도 함께 조성되어야만 한다. 만약 이러한 준비가 잘 갖춰지게 되면, BMI 기술은 우리의 삶을 더욱 편리하게 만들어 줄 혁신적인 도구가 될 것임이 분명하다.



▶ 맺음말



사람의 두뇌를 컴퓨터나 기계에 연결한다는 상상은 더 이상 먼 미래의 이야기가 아닌, 현실에서 우리가 직면하고 있는 가장 흥미로운 도전 중 하나다. 인간과 기계 간의 경계를 허무는 연구가 활발하게 진행되면서, 머지않아 우리의 삶도 혁신적으로 변화할 것으로 기대를 모으고 있다.

인간과 기계 간의 경계가 허물어지고 있다는 것이 단순히 사람이 BMI 기술을 사용하여 기계에 명령을 내린다는 의미는 아니다. 인간의 생각을 기계에 직접 연결하여 새로운 차원의 소통과 제어를 가능하게 만든다는 뜻이다.

예를 들면 팔이나 다리를 사용할 수 없는 사람들도 생각만으로 로봇 팔과 로봇 다리를 움직여 물건을 잡거나 이동할 수 있다. 이러한 모습이 단순한 상상이 아니라 실현 가능한 현실이 되어가고 있기 때문에 BMI가 우리의 삶을 보다 윤택하게 만들고 잠재력을 극대화시킬 수 있는 기술로 전망하고 있는 것이다.

이런 이유로 BMI는 앞으로 의료 분야에서 막대한 파급효과를 미칠 것으로 전망되고 있는데, 특히 신경 손상이나 뇌졸중으로 인한 신체 마비를 극복하는 데 중요한 역할을

할 수 있다. 신경 신호를 기계로 전송하여 새로운 형태의 재활을 제공함으로써, 기존 치료법으로는 회복이 불가능했던 문제까지 해결해 줄 수 있을 것으로 예상하고 있다.

BMI 기술의 또 다른 잠재력은 인간의 능력을 증강하는 데 있다. 예를 들어, 군사나 우주 탐사, 고위험 작업 분야에서 BMI를 활용해 인간의 한계를 뛰어넘는 작업이 가능할 것이다. 또한 공장에서 생각만으로 기계를 제어하거나, 위험한 상황에서 로봇을 활용해 사람의 개입을 최소화할 수도 있다. BMI 기술이 발전함에 따라 인간의 신체적 한계를 뛰어넘는 여러 가능성이 열리게 되는 것이다.

그러나 BMI 기술로 인한 새로운 가능성의 이면에는 부작용도 존재하며, 이에 대한 대비가 필요하다. BMI는 신체와 뇌의 데이터를 다루기 때문에, 개인정보 보호와 윤리적인 문제도 함께 다뤄져야 한다. 두뇌 속 데이터를 기계로 전송하는 과정에서 발생할 수 있는 보안 문제, 그리고 기술 오남용에 대한 사회적 논의가 반드시 필요하다. 또한 인간의 생각과 감정을 직접 다루는 만큼, 프라이버시 침해와 같은 윤리적 문제는 특히 중요하다.

이 외에도 BMI 기술을 모든 사람들이 고루 활용할 수 있도록 디지털 수준의 격차를 해소하고, 기술의 접근성을 보장하는 노력도 병행되어야 한다는 것이 대다수 전문가들의 의견이다.

또한 BMI 기술이 우리의 일상에 스며들기 위해서는 정부와 산업, 그리고 학계가 함께 노력해야 한다. 기술적 한계와 윤리적 도전을 극복하는 동시에, 연구개발에 대한 지속적인 지원과 투자가 필요하다. 이와 더불어 국제적인 협력과 기술 공유를 통해 BMI 기술이 전 세계 사람들에게 보다 안전하고 효과적으로 사용될 수 있도록 해야 한다.

이번 보고서를 통해 BMI 기술이 제시하는 현재와 미래의 방향성을 조망해 보았다. BMI 기술이 인류의 잠재력을 획기적으로 확장시킬 수 있는 강력한 도구인 만큼, 이 도구를 어떻게 사용하느냐에 따라 인류의 미래도 달라질 것이라는 점은 자명한 사실이다. 따라서 우리는 BMI 기술이 상용화될 때까지 인류에게 가져다 줄 긍정적인 측면과 부정적 측면에 대해 끊임없이 고민하고 토론해야만 한다.

BMI 기술이 만들어갈 수십 년 후의 미래를 상상해 본다. 인간과 기계의 경계가 허물어지고, 뇌의 생각만으로 기계를 조작하며, 장애를 극복한 사람들이 자유롭게 일상을 누리는 시대가 열릴 것이다.

우리가 상상하는 미래는 더 이상 공상과학이 아닌 현실이 될 것이며, 인간의 잠재력은 극대화되고, 새로운 차원의 혁신과 가능성이 펼쳐질 것이다. 우리의 생각이 곧 현실이 되는 시대, 그 시대를 맞이할 준비를 함께해 나가기를 기대해 본다.



참고문헌

음향 신호를 촉각 신호로 변환하기 방법 및 이를 이용하는 햅틱 장치, 출원번호 10-2017-0135903(분할), 공개특허 10-2017-0129651.

Australia Department of Health and Aged Care, Roadmap for Hearing Health, 2019.

C. Bermejo and P. Hui(2021). "A survey on haptic technologies for mobile augmented reality", *ACM Comput. Surv.*, Vol.54, No.9, pp. 1~35.

Défossez, A., Caucheteux, C., Rapin, J. et al.(2023). Decoding speech perception from non-invasive brain recordings, *Nat Mach Intell* 5, pp. 1097~1107.

Future market insights, *Electronic Tongue Market Outlook(2022-2032)*.

Gu L.(2020). A biomimetic eye with a hemispherical perovskite nanowire array retina, *Nature*, pp. 278~282.

Imam, M. et al.(2023). The electronic tongue: an advanced taste-sensing multichannel sensory tool with global selectivity for application in the pharmaceutical and food industry, *Pharmaceutical Development and Technology*.

Inga Valiaugaitė(2024). *Best Neurofeedback Devices for Home Use*, Cybernews.

Jung, H. et al.(2023). Taste bud-inspired single-drop multitaste sensing for comprehensive flavor analysis with deep learning algorithms, *ACS Applied Materials & Interfaces*.

Lars Riecke, Alexander T. Sack, Charles E. Schroeder(2015). Endogenous Delta/Theta Sound-Brain Phase Entrainment Accelerates the Buildup of Auditory Streaming, *Current Biology*, Volume 25, Issue 24, pp. 3196~3201.

Lee, T. et al.(2021). Realization of an Artificial Visual Nervous System using an Integrated Optoelectronic Device Array, *Adv Mater*, doi: 10.1002/adma.202105485.

Linda Buck, Richard Axel(1991). A novel multigene family may encode odorant receptors: A molecular basis for odor recognition, *Cell*, Volume 65, Issue 1, pp. 175~187.

M.F. Dorman et al.(2016). "Sound source localization by normal-hearing listeners, hearing-impaired listeners and cochlear implant listeners", *Audiol, Neurotol*, Vol.21 No.3, pp. 127~131.

N.E. Kepp et al.(2022). "Virtual reality pitch ranking in children with cochlear implants, hearing Aids or normal hearing", *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol*, Vol.161 article No.111241.

Pashkovski, S.L., Iurilli, G., Brann, D. et al.(2020). Structure and flexibility in cortical representations of odour space, *Nature* 583, pp. 253~258.

Song, H. et al.(2024). Continuous neural control of a bionic limb restores biomimetic gait after amputation, *Nature Medicine*.

Tang, J. et al.(2023). Semantic reconstruction of continuous language from non-invasive brain recordings, *Nature Neuroscience*, pp. 858~866.

Vlasov, Y. et al.(2002). Electronic tongues and their analytical application, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*.

Wandelt, S.K., Bjånes, D.A., Pejsa, K. et al.(2024). Representation of internal speech by single neurons in human supramarginal gyrus, *Nat Hum Behav* 8, pp. 1136~1149.

Willett, F. R. et al.(2023). A high-performance speech neuroprosthesis, *Nature*.

차세대리포트(최근 3개년)

2021 자율주행, 그 이상의 모빌리티 생각하는 자동차
젊은 과학자의 눈으로 바라보다, 과학기술 2050
학령인구 절벽시대를 마주하다, 대학이 나아갈 길
새로운 팬데믹, 어떻게 준비해야 할까?

2022 우주 개척, 어떻게 해야 할까?
유전체 교정 작물, 식량안보의 대안이 될 수 있을까?
코로나19 엔데믹 전환과 롱코비드 문제 어떻게 대응할 것인가?
책임성 있는 AI를 위한 조건은?

2023 한계 돌파형 차세대 탠덤 태양전지 기술: K-Solar
새로운 의료서비스 혁명: 디지털 치료제
이론 연구와 실험 연구의 양극화 진정한 협력을 이루려면?
인공지능 언어모델의 기술 변천사와 미래 가능성


한국과학기술한림원은,

대한민국 과학기술분야를 대표하는 석학단체로서 1994년 설립되었습니다. 1,000여 명의 과학기술분야 석학들이 한국과학기술한림원의 회원이며, 각 회원의 지식과 역량을 결집하여 과학기술 발전에 기여하고자 노력해오고 있습니다. 그 일환으로 기초과학연구의 진흥기반 조성, 우수한 과학기술인의 발굴 및 활용 그리고 정책자문 관련 사업과 활동을 펼쳐오고 있습니다.

한림석학정책연구는,

우리나라의 중장기적 과학기술정책 및 과학기술분야 주요 현안에 대한 정책자문 사업으로 한국과학기술한림원 회원들이 직접 참여함으로써 과학기술분야 및 관련분야 전문가들의 의견을 담고 있습니다. 한림연구보고서, 차세대리포트 등 다양한 형태로 이루어지고 있으며 국회, 정부 등 정책 수요자와 국민들에게 필요한 정보와 지식을 전달하기 위하여 꾸준히 노력하고 있습니다.

한국과학기술한림원 더 알아보기

 홈페이지 www.kast.or.kr

 블로그 kast.tistory.com

 포스트 post.naver.com/kast1994

 페이스북 www.facebook.com/kastnews





KAST 한국과학기술원
The Korean Academy of Science and Technology

(13630) 경기도 성남시 분당구 돌마로 42

Tel 031-726-7900 Fax 031-726-7909 E-mail kast@kast.or.kr



9 772635 716007

ISSN 2635-716X

26