

인간 신체를 자율적으로 보조하고 보호하는 지능형 소프트 슈트(엑소스킨)

Intelligent Soft Suit That Can Autonomously Augment Strength and Protect the Human Body (Exoskin)

손용기 (Y.K. Son, handcourage@etri.re.kr)

정준영 (J.Y. Jung, joonyoung@etri.re.kr)

진한빛 (H.B. Jin, hanbit.jin@etri.re.kr)

구자범 (J.B. Gu, gjb@etri.re.kr)

김배선 (B.S. Kim, bskim72@etri.re.kr)

이동우 (D.W. Lee, hermes@etri.re.kr)

김혜진 (H.J. Kim, nolawara@etri.re.kr)

신형철 (H.C. Shin, shin@etri.re.kr)

휴먼증강연구실 책임연구원

휴먼증강연구실 연구원

지능형센서연구실 연구원

휴먼증강연구실 선임연구원

휴먼증강연구실 선임연구원

휴먼증강연구실 책임연구원

지능형센서연구실 책임연구원/실장

휴먼증강연구실 책임연구원/실장

ABSTRACT

Innovative developments in wearable and artificial intelligence technologies are accelerating the emergence of a soft suit that can autonomously augment a body's own strength and protect the human body.

In this paper, we define the concept of "Exoskin," a new concept specifically derived from the "Road to an Intelligent Information Society" (Technology Development Map 2035) as predicted by the Electronics and Telecommunications Research Institute. In addition, we analyze the development status of each element of this technology and forecast its future development.

KEYWORDS 휴먼증강, 근력보조/강화, 신체보호 기술, 트랜스휴먼

1. 서론

호모 사피엔스인 현생인류는 의복과 도구를 사용함으로써 주위 환경 등을 극복하여 활동 범위를

넓히면서 비약적으로 생존율을 높일 수 있어 현재와 같은 사회적·문화적 번성을 이룬 것으로 분석되고 있다. 인간은 다른 생명체에 비하여 낮은 신체 및 방어 능력을 가지고 있지만, 이와 같은 단점

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2021.J.360104>

* 본 문서는 2020년도 과학기술정보통신부의 한국전자통신연구원개발지원사업[No.2017-0-00050, 신체기능의 이상이나 저하를 극복하기 위한 휴먼 청각 및 근력 증강 원천기술 개발]과 2020년도 과학기술정보통신부의 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.

©2021 한국전자통신연구원

을 극복하고, 다양한 방법으로 지적·신체적 능력을 증강하고 확장해 왔다.

최근 통계청의 자료에 따르면, 국민 기대수명은 2005년 78.24세에서 꾸준히 증가하며 2018년에는 82.7세에 이르렀으나, 질병 없이 건강한 삶을 나타내는 건강수명은 2012년 65.7세에서 2018년 64.4세로 오히려 지속적으로 감소하는 추세이다[1]. 특히 최근 스트레스 가중, 생활양식 및 기후, 환경 등의 급격한 변화로 신체의 방어 능력과 자생 능력이 줄어들고 있어 아토피, 근감소증, 신종 감염병 등과 같은 새로운 질병으로 고통 받고 있어 건강한 삶이 위협받고 있다. 이와 같은 건강수명의 감소는 근본적인 삶의 질의 저하를 가져올 뿐만 아니라, 의료비 상승으로 경제적인 문제를 유발시키고 있다. 기대수명을 늘리는 데 많은 기여를 한 과학 및 의료 분야에서는 최근 나노, 생명, 지능정보, 인지 과학기술의 융합 발전에 힘입어 건강수명을 늘릴 수 있는 휴먼증강 기술이 주목 받고 있다. 특히, 웨어러블과 인공지능 기술의 혁신적인 발전은 외부 환경의 위험 요인을 스스로 인지하여 신체 기능을 자율적으로 보호, 보조하면서도 지속적으로 일상 생활이 가능한 새로운 개념의 휴먼증강 소프트 슈트의 출현 가능성을 가속화시키고 있다.

본 고에서는 한국전자통신연구원에서 전망한 “지능정보사회로 가는 길(기술발전지도 2035)”에서 구체적으로 도출한 신개념 형상인 “엑소스킨”에 관하여 개념을 정의하고, 각 요소 기술(기능)별로 개발 현황을 분석하고, 발전 방향을 전망해 보고자 한다.

II. 엑소스킨

1. 신개념 정의

“엑소스킨(Exoskin)”은 기존의 웨어러블 기술과는 다르게, 인간 신체의 피부와 같이 자율적이고,

지능적으로 신체를 유지하고, 보호하는 한편, 일상생활에서도 근력을 보조할 수 있는 휴먼증강 소프트 슈트이다. 다시 말하면 신진대사, 혈액순환, 면역체계 작동 등 다양한 생명유지 활동을 능동적이고 지능적으로 보조하고, 일상생활에서도 근력을 보조하여 오랜 기간 타고난 신체를 유지, 보호하여 건강한 삶을 지속할 수 있도록 도와주는 지능형 소프트 슈트이다.

이와 같이 유사한 개념으로는 대표적으로 스마트 의류, 트랜스휴먼 등이 있다. 스마트 의류[2]는 웨어러블 기술 초창기에 섬유분야에서 등장한 개념형상으로, 주로 생체신호를 모니터링하기 위한 센싱 의류, 통기성 제어 의류, 발광 의류 등 직물과 의류에 전자 및 정보통신 기술 등과 같은 타 분야 기술을 접목한 의류 기술이다.

트랜스휴먼은 과학기술을 이용해 사람의 정신적·육체적 성질과 능력을 개선하려는 지적·문화적 운동인 트랜스휴머니즘[3]에서 추구하는 개념형상이다. 트랜스휴머니즘에서는 장애, 고통, 질병, 노화, 죽음과 같은 인간의 불가피한 조건을 과학으로 극복할 수 있는 것으로 규정한다[4]. 즉, 기술 또는 기계와의 결합을 휴머니즘의 진보로 간주하여 극단적으로 신체를 개조하거나 변형하는 것까지 긍정적으로 생각하기 때문에 보편적으로 사회적·윤리적 수용성이 떨어지는 것이 사실이다.

이에 비하여 엑소스킨은 인간의 신체 개조를 최소화하고, 가능한 한 타고난 신체를 유지, 보호하여 오랫동안 쓸 수 있도록 하는 것이 목적이다. 일상생활에서도 불편함 없이 사용해야 하기 때문에 가능한 한 구동부 및 연산부 등이 가볍고, 유연하여 착용성이 높아야 하며, 생체역학적 고려 등이 반드시 있어야 한다.

엑소스킨 형상을 구현하는 데 있어서 핵심 요소 기술은 크게 핵심 응용과 기반 기술로 분류할 수

표 1 엑소스킨의 핵심요소 기술

기술명		설명
핵심 응용 기술	근력보조 (증강)	근육을 물리적으로 지원하거나 활성화시켜 근력을 보조하는 기술
	생체유지	외부타격 방어, 체온유지, 습도/수분유지, 항균기능 등 생명유지에 필요한 활동을 보조하는 기술
	감각전달 (증폭)	피부가 가진 복합 감각 인지 능력을 모사하여 인간한계를 초월하는 증폭된 감각전달 기술
기반 기술	지능화	인간 신체와 기능적으로 일체화되어야 하므로 인간 의도 및 움직임, 신체의 상태에 따라 유기적으로 반응하여 인간의 행동을 방해하지 않고 적절한 시점에 개입하여 인간을 보조하는 지능화된 기술

있다. 표 1과 같이 핵심 응용 기술은 엑소스킨의 기능적 용도를 구현하는 데 필요한 기술을 의미하는데, 크게 근력보조(증강), 신체 보호 및 생명유지, 감각전달(증폭)로 나뉠 수 있다. 기반 기술은 핵심 응용을 인공지능과 같은 기술로 고도화하는 지능화 기술이다.

최근 이동 수단, 기계적 장비 등의 발달로 예전에 비하여 신체운동량이 현저하게 줄어들고 있으며, 특히 노인 인구 비율이 지속적으로 증가함에 따라 비정상적으로 근육이 감소하는 근감소증의 발병 비율이 비약적으로 증대되고 있다. 근감소증은 호르몬 불균형 등 신체기능 및 면역력 저하를 가져오고, 자립생활을 영위하지 못하여 사회와 격리되어 우울증 등을 유발하여 향후 큰 사회적 문제로 예상되고 있다. 이와 같이 신체활동 및 사회활동 증진을 도모하고 건강한 삶을 오랫동안 유지할 수 있도록 일상생활에도 근력보조(증강)에 대한 요구가 증대되고 있다. 따라서 향후 등장할 엑소스킨에서는 일상생활에서도 사용할 수 있으며, 신체의 움직임을 방해하지 않고, 적절한 시기에 적절한 힘으로 사용자의 힘을 지원하는 근력보조(증강) 기술이 적용되어야 한다.

인간의 신체는 기본적으로 다양한 방어체계를

갖고 있어 생명을 유지하나, 연약한 피부를 보호하기 위하여 옷을 입음으로써 다양한 환경에서 삶을 이어갈 수 있었다. 생활양식 및 기후, 환경 등의 급격한 변화로 저하되고 있는 신체 방어 능력 및 자생 능력을 보조하기 위해 신진대사, 혈액순환, 면역체계 작동 등 다양한 생명유지 활동을 능동적이고 적극적으로 보조할 수 있는 수단에 대한 필요성이 증대되고 있다. 면역력과 밀접한 관계가 있는 체온 및 습도를 일정하게 유지하는 기술이 중요하고, 특히 코로나-19 대유행을 기점으로 바이러스 및 세균으로부터 보호할 수 있는 일상생활용 방호 기능에 대한 요구가 높아지고 있다.

따라서 향후 등장할 엑소스킨에는 외부 타격, 기후, 바이러스, 세균 등과 같은 외부 위협요소로부터 능동적이고 지능적으로 신체를 보호하고, 생명을 유지하는 기술이 적용되어야 한다. 예를 들면 낙상 및 교통사고와 같이 신체에 물리적인 충격이 가해질 때, 엑소스킨이 스스로 감지하여 능동적이고, 지능적인 보호 조치를 취해야 한다. 또한 신체 보호 기능뿐만 아니라 체온 및 습도 등을 모니터링 하고, 항상 적정한 수준으로 능동적으로 유지하는 기능이 필요하다.

또한 향후 출현할 엑소스킨은 인간 신체와 기능적으로 일체화되어야 하므로 인간 의도 및 움직임, 신체의 상태에 따라 유기적으로 반응하여 인간의 행동을 방해하지 않고 적절한 시점에 개입하여 인간을 보조하는 지능화된 기술의 적용이 반드시 필요하다. 예를 들면 엑소스킨을 착용하고 있는 인간이 어떤 행동을 하려고 하는데, 엑소스킨이 늦게 반응하거나 오작동하여 인간의 움직임을 오히려 방해한다면 최악의 경우에는 신체의 균형을 무너트려 인간의 생명까지도 위협하는 상황이 생길 수도 있다. 최근 딥러닝과 같은 인공지능 기술의 급격한 발달은 이러한 지능화된 시스템 구현이 어느

정도 가능해졌고, 향후에는 더 지능화될 것으로 예상된다.

엑소스킨의 지능은 인간의 두뇌에서의 메커니즘과 마찬가지로 핵심기능별로 분화된 지능 알고리즘들로 구성되고, 서로 유기적으로 상호작용하여 감지, 추론, 예측된 결과로 근력보조, 생명 유지, 위험상황 회피 기동 등의 기능을 제어할 것이다. 또한 인간의 결정을 보완하는 수준을 넘어 위험상황과 같은 일부 상황에서는 자기가 결정하는 수준이 되어야 하되, 인간의 신체와 밀접하게 붙어 있으므로 신체에 손상을 입힐 수 있기 때문에 반드시 상당한 수준의 안정성 및 보안성을 가져야 한다.

다음 장에서는 엑소스킨의 핵심요소기술별로 연구개발 동향을 살펴보고, 그 발전 방향을 전망해 보고자 하며, 현재 다양한 기술 분야에서 핵심 화두인 지능화와 관련된 기술을 모아 정리하고자 한다.

III. 핵심 기술 동향

1. 근력증강(보조) 기술

엑소스킨에서의 근력증강(보조) 기술은 일상생활에서 불편함 없이 사용할 수 있도록 높은 착용성을 가져야 하며, 사용자의 움직임에 방해하지 않도록 설계되어야 한다.

일반적으로 근력증강(보조) 기술은 표 2와 같이 시스템을 구성하는 소재와 동작방식에 따라 크게 2가지로 구분할 수 있는데, 소프트 슈트형 근력증강 기술이 엑소스킨의 요구 특성을 만족한다[5].

소프트 슈트형 근력증강 기술은 기본 구성 소재가 직물, 와이어 등과 같은 유연하고 부드러운 재질로 되어 있어 기존 의복과 같이 착용감이 높으나, 보조력을 제공하는 구동기와 보조력 전달 구조도 유연해야 하므로 큰 힘을 제공하기 힘든 단점이 있다.

반면, 외골격형 근력증강 기술은 신체의 외부에

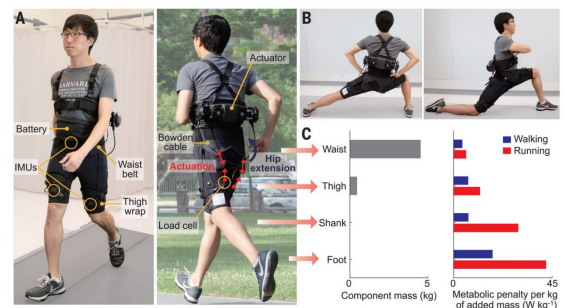
표 2 외골격형 및 슈트형 근력증강 기술 비교

특징	외골격형 근력증강 기술	소프트 슈트형 근력증강 기술
구성 소재	알루미늄, 플라스틱 등	직물, 인공근육, 와이어, 공압 튜브 등
무게 및 부피	무겁고 큼	가볍고 작음
최대 출력	근력의 1~10배	근력의 0~0.1배
관절구조 배치	단순함	복잡함
탈부착 용이성	어려움	간편함
주요 용도	근력 증강	근력보조

출처 이등우 외, "착용형 근력증강 기술 동향," 전자통신동향분석, 제32권 제4호, 2017, pp. 21-30, 기반 재작성

단단한 시스템 구조(골격)를 이용하여 시스템 자체의 무게와 가반하중(可搬荷重)을 지탱할 수 있어 큰 힘을 낼 수 있으나, 시스템 부피와 무게가 커서 일상생활보다는 산업 및 군사 분야와 같은 특수 분야에 유리하다.

소프트 슈트형 근력증강 기술은 연구개발 초기 단계로, 2016년에 DARPA의 지원으로 하버드 대학에서 군인들의 근지구력을 향상시키기 위한 슈트형 근력보조 시스템인 "Soft ExoSuit"를 개발한 이후, 하버드 대학을 중심으로 한 학계에서 다양한 성과들이 보고되고 있다[6-9]. 이 시스템은 그림 1



출처 J. Kim et al., "Reducing the metabolic rate of walking and running with a versatile, portable exosuit." Sci., vol. 365, no. 6454, 2019, pp. 668-672, Reprinted with permission from AAAS.

그림 1 하버드 대학의 소프트 엑소슈트

과 같이 와이어를 통해 전기모터의 동력을 전달하는 케이블 구동방식(Cable-driven)을 활용하여 10% 정도의 신진대사 소비율의 감소를 이루었다.

한국기계연구원은 형상기억합금 스프링과 직물을 통합한 의복형 웨어러블 로봇을 개발하였다[10]. 연구팀은 형상기억합금에 전류를 인가하면 수축하는 성질을 이용하여 직경 0.5mm 이하의 형상기억합금을 스프링 다발로 만들어 20g 수준의 가벼우면서도 근육처럼 수축하며 10kg의 무게를 들어 올릴 수 있는 옷감형 유연 구동기를 개발하였다. 유연 구동기와 배터리, 제어기 등을 모두 포함한 의복형 웨어러블 로봇의 무게는 약 1kg으로 일반 성인이 입는 점퍼 수준이다. 그러나 형상기억합금기반의 유연 구동기가 가진 단점인 느린 이완 속도 등의 문제점은 여전히 남아 있다.

ReWalk사에서는 뇌졸중의 영향으로 인하여 하지 장애가 있는 사람들의 재활을 돕기 위해 보행 중 발목을 보조하도록 설계된 부드러운 로봇 엑소 슈트인 Restore를 개발하였고[10], 2019년 6월 미국 FDA 승인을 받았다. 이 제품은 전체 무게가 약 5kg 이고, 하버드의 소프트 엑소슈트와 유사하게 허리에 착용하는 액추에이션 팩에 있는 전기모터와 연결된 케이블을 이용하여 종아리 및 신발에 동력을 전달하는 구조를 가지고 있다.

반면, 이전에 설명한 근력보조 방식인 외부 동력 원인 구동기를 이용하는 방법과 다르게, 전기로 근육을 자극하고 활성화시켜 근력을 지원하는 기술도 있다. Sigmedics의 Parastep[11]이 대표적인 제품이며, 척수가 손상되어 하지의 운동능력을 완전히 상실한 SCI 환자를 대상으로 근육에 전기를 자극하여 인위적으로 근수축을 발생시켜 일어서고 걷는 동작을 수행할 수 있도록 보조하는 기술이다. 하지만 전기적 자극을 이용한 근력보조 기술의 근본적인 한계인 근피로 발생 문제가 있으며, 이를



출처 신형철 외, "신체 기능의 이상이나 저하를 극복하기 위한 휴먼 청각 및 근력 증강 원천 기술 개발," 한국전자통신연구원 3연차 보고서, 2019. 11.

그림 2 ETRI 근력보조 시스템(Neo muscle-I)

개선하고자 하는 노력은 계속되고 있다.

최근 한국전자통신연구원에서는 노약자의 보행에 있어 부족한 근력을 보조해 주고, 다리 근육의 좌/우 불균형을 개선할 수 있는 그림 2와 같은 "기능적 전기자극 기반의 착용형 보행보조 시스템(Neo muscle-I)"을 개발하였다[12,13]. 이 시스템은 기존의 전기적 자극의 한계를 극복하고자 전기자극이 가해지는 상황에서도 자발 근활성을 분석할 수 있는 기술을 개발하여 착용자의 동작 의도에 실시간 동기화됨과 동시에 효율적으로 전기자극을 적용할 수 있는 원천 기술을 개발하여 적용하였다. 그 결과 근쇠약 노인 대상 임상실험을 진행하여 보행속도 13.15% 증가, 신진대사 소비율 감소(계단 오르기 시 8.28%, 평지 보행 시 4.51%)의 결과를 발표하였다. 또한 케이블 구동방식의 근력보조 기술과 기능적 전기자극 기술을 통합한 복합 근력보조 시스템 개발도 진행 중이다.

앞서 살펴본 소프트 슈트형 근력증강 기술에서 가장 중요한 연구 분야로는 기존의 전기모터나 유압장치를 대체할 수 있는, 가볍고 유연한 동력원을

개발하는 소프트 구동기이다. 부품소재분야에서 유연한 재질로 구성된 인공근육을 개발하려는 연구가 학계를 중심으로 활발히 이루어지고 있으나, 아직 원천연구단계에 머물러 있다.

2. 신체 보호 및 생명 유지

신체 보호 기능은 화재, 타격, 바이러스/세균 등 외부 위협으로부터 신체를 보호하는 것이고, 생명 유지 기능은 체온, 습도/수분 유지 등 생명유지에 필요한 신체의 활동을 보조하는 기술을 의미한다. 이러한 신체 보호 및 생명 유지 기능의 주요한 기술은 표 3에 나타내었다.

웨어러블 센싱 기술 분야에서는 신체의 상태를 모니터링하여 건강 상태 또는 신진대사가 정상 범위 내에 있는지 확인하고 다양한 형태의 피드백을 제공하는 것이 목적이다. 최근에는 센서 기술의 소형화, 유연화 기술이 발전함에 따라 다양한 웨어러블 센서가 등장하고 있으며, 착용자의 생체데이터, 신체역학, 심장박동, 움직임, 수면, 피로 및 스트레스 정도까지 측정하는 것이 가능하다. 부상이 빈번하게 발생하는 상황에 대한 분석 데이터와 착용자의 개인 상태, 행동양식 데이터를 결합하여 부상이 발생할 수 있는 상황을 분석하거나 예측하고 사전에 대응하는 것이 가능해졌다.

웨어러블 센싱 기술 분야의 대표적인 상용 제품

으로는 Hexoskin[14]이 있다. 이 제품은 의류에 내장된 센서를 이용하여 심장, 호흡, 활동 및 수면 데이터 모니터링 기능을 가지고 있다. 특히 심장과 관련하여 ECG와 심박수뿐만 아니라 심박수 변화를 모니터링하여 스트레스나 피곤한 상태 정보를 제공한다.

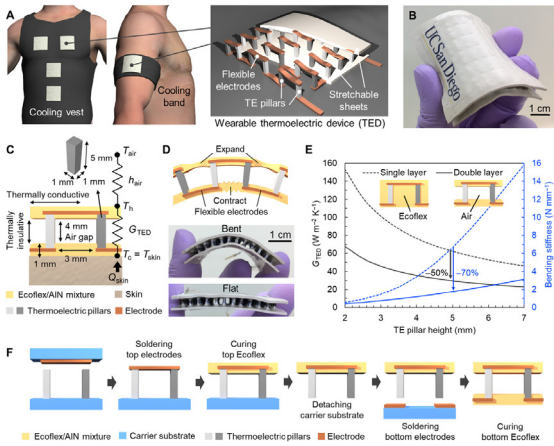
Catapult Sport[15]의 경우 운동 경기 분야에 특화된 움직임 모니터링 시스템이다. Catapult는 운동 선수의 자세, 위치, 행동을 모니터링하고 관리 시스템을 이용하여 행동 능력을 최적화하거나 부상 위험을 해소하기 위한 시스템이다. 트레이닝 또는 경기 중에 각 선수의 움직임과 부하량을 모니터링하여 발생 가능한 부상 위험을 줄이는 목적으로 개발되었다.

능동형 대응 및 보조 기술은 전반적으로 개발된 사례가 많지 않다. 외부 타격으로부터 신체를 보호는 기술이 대부분이며, 바이크, 자전거와 같은 이동수단에서의 개인용 에어백이나 낙상 시 발생하는 부상을 막기 위한 웨어러블 에어백 등이 대표적인 예이다. Helite[16], Tango[17], Wolk[18], hip-hop[19] 등의 제품은 에어백을 이용하여 고관절 부상을 막기 위한 기술을 이용하고 있는데, 센서를 이용하여 낙상을 사전에 감지하고, 충격이 발생하기 직전에 에어백을 부풀려 충격으로 인한 부상을 줄여주는 기술이다. 이들 제품은 착용성 면에서 개선의 여지가 있는 상황이다.

체온 유지를 위한 능동형 발열 기술은 다양한 발열체의 개발로 실제 제품들이 시장에 출시되고 있지만, 능동형 냉열 기술은 아직 원천기술 개발 수준이다. 최근 미국 캘리포니아 주립대 연구팀은 그림 3과 같이 기존 펠티어 소자의 단점인 딱딱한 물성을 극복하고 슈트에 채용할 수 있는 유연하고 탄성이 있는 웨어러블 냉발열 기술을 발표하였다 [20]. 이 기술은 얇은 탄성 시트 사이에 전극과 발

표 3 신체보호 및 생명유지 기능의 핵심 기술

기능	설명
지능적인 웨어러블 인지 기술	심장박동, 심전도 움직임 등의 생체신호를 감지하기 위해 웨어러블 환경에 적합하도록 설계된 센서, 처리 인지 기술
능동적인 대응 및 보조 기술	감지된 신체 및 주변 상황에 따라 신체 보호 및 생명 유지를 위하여 지능적이고, 능동적으로 대응 및 보조 하는 기술



출처 S. Hong et al., "Wearable thermoelectrics for personalized thermoregulation," Sci. Advances, vol. 5, no. 5, 2019, doi: 10.1126/sciadv.aaw0536, CC BY-NC 4.0.

그림 3 캘리포니아 주립대의 웨어러블 냉발열 기술

열체를 배치하여 제조된 것으로, 방열판이 없는 구조에서도 전류의 세기에 따라 온도를 높이거나 낮추는 것이 가능하다.

3. 감각전달(증폭)

인간의 감지 한계를 뛰어넘는 센서들을 몸에 부착 또는 임베딩하여 장애나 사고로 감각을 잃은 사람의 감각을 재생하거나 감각 자체를 증강하고, 이를 원거리에 있는 사용자에게 전달하고 공유하는 기술이 초감각 센서 기반의 감각전달(증폭) 기능이다.

인간의 피부가 갖고 있는 복합감각 인지 능력(즉, 다양한 물리적 변화를 감지하고 인지하는 능력)을 전자적으로 재현하거나 또는 인간의 한계를 뛰어넘는 수준의 증폭된 감각전달을 위한 핵심 기술은 표 4와 같다.

가. 정밀감각 재현을 위한 센서 고집적화

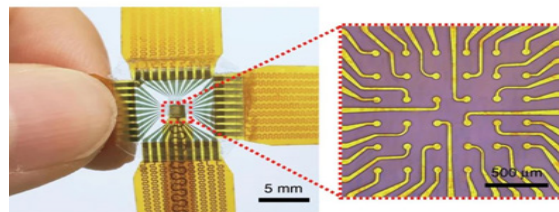
인간이 느끼는 수준의 정밀하고 예민한 감각 수

표 4 감각전달(증폭) 기능의 핵심 기술

핵심기술	설명
고해상도/고집적화	인간이 느끼는 수준의 정밀하고 예민한 감각 수집 및 전달을 위해서는 인간 피부의 감지능력에 가깝거나 이를 뛰어넘는 수준의 센서 성능 개발
멀티모달화	복합 감각 수집을 위한 멀티모달리티
유연/신축화	생체친화/편의를 위한 유연/신축 폼팩터

집 및 전달을 위해서는 인간 피부의 감지능력에 가깝거나 이를 뛰어넘는 수준의 센서 성능이 필요하다. 피부 속 촉각 수용체의 밀도는 가장 예민한 손 끝에서 $100\sim 140\text{cm}^{-2}$ 수준이며, 인간이 구분할 수 있는 공간 분해능은 1mm 정도의 한계를 가진다 [21,22]. 최근 인간피부를 모사한 높은 공간분해능의 압력센서 어레이 개발을 통해 보다 정밀하고 예민한 촉각 위치 구분이 가능해지고 있으며, 압력의 공간분포 패턴이나 동적인 패턴 등을 더욱 매끄럽고 연속적으로 표현하는 기술도 빠르게 개발되고 있다.

포항공대 정운룡 교수팀은 도전성 마이크로 파티클을 정렬하는 기술을 이용해 압력 민감 다이오드 어레이를 만들어 픽셀 간격이 1mm인 10x10 유연 압력센서 어레이를 개발했다[23]. 또한, 미국 매사추세츠 공대와 중국 남방과기대의 공동 연구팀은 마이크로 구조의 이온성 폴리머 소재를 이용해



출처 N. Bai et al., "Graded intrafillable architecture-based iontronic pressure sensor with ultra-broad-range high sensitivity," Nature Commun., vol. 11, Jan, 2020, Article no. 209, CC BY 4.0.

그림 4 고해상도 6x6 마이크로 압력센서 어레이 (픽셀 직경 60μm, 픽셀 간격 150μm)

그림 4와 같이 150 μ m의 고해상도에서 220kPa⁻¹의 높은 민감도를 갖는 마이크로 압력센서 어레이(6x6) 개발에 성공했다[24].

나. 복합 감각 수집을 위한 멀티모달리티

인간은 다양한 종류의 촉각 수용체를 가지고 있어 온도, 압력, 스트레인, 전단력 등 다양한 촉각 자극을 느낄 수 있다. 이러한 인간의 다중/복합 감각 감지능력을 재생하거나 증강하기 위해서는 피부 수용체를 모사한 센서의 멀티모달화가 필요하다.

DGIST와 성균관대 공동 연구팀은 정적인 압력과 동적인 압력을 감지할 수 있는 센서들을 집적해 12가지 재질이 다른 천의 종류를 구분하고 압력의 분포를 감지할 수 있는 복합 감각 센서 개발에 성공했다[25]. 미국 조지아 공대의 연구팀은 그림 5와 같이 온도, 스트레인, 습도, 광, 자기, 압력센서

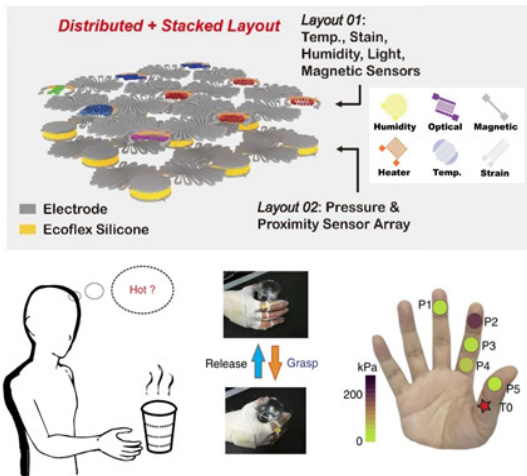
가 집적 가능한 신축성 센서 매트릭스를 개발해 뜨거운 컵을 잡을 때 온도와 압력을 동시에 감지할 수 있는 복합감각 센서를 구현했다[26].

한국전자통신연구원에서는 32x32 능동구동 대면적 신축 복합 감각 센서 어레이 패널 기술을 개발해 정압, 동압 및 스트레인의 복합감각을 동시 감지하고 액추에이터를 통해 이를 재현하는 기술을 개발 중이며, 다양한 복합 센서들이 집적될 수 있는 유연/신축 센서 어레이 매트릭스 플랫폼을 구축했다.

다. 생체친화/편의를 위한 유연/신축 폼팩터

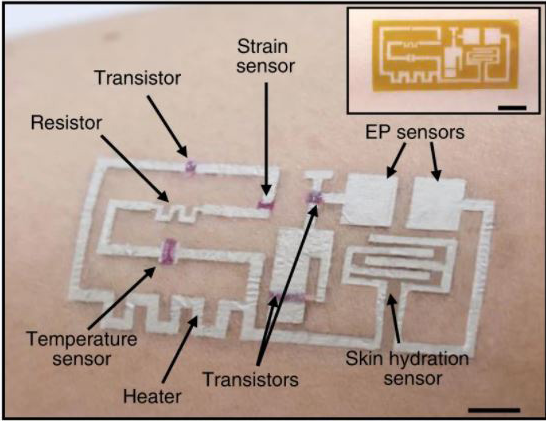
인간 수준 이상의 정밀하고 복합적 감각을 재생 또는 증폭하는 초감각 센서 기술은 유연하고 신축 가능한 형태로 제작되어 피부에 편리하게 부착하거나 피부에 임베딩하는 방식으로 발전하고 있다. 특히, 유연/신축 폼팩터의 부착형 센서 어레이는 피부에 밀착성이 뛰어나 매우 정확하고 정밀한 생체신호 및 촉각 수집이 가능하여 감각 재생 및 증폭, 전달에 핵심적 기능을 할 뿐 아니라, 생체친화 소재를 적용해 장시간 부착해도 피부에 기계적인 부하나 생리학적 스트레스를 주지 않도록 개선되고 있다. 이러한 생체친화형 유연/신축 센서 어레이는 피부 자체에 임베딩되어 감각 수집 및 증폭, 공유, 전달이 자유로운 인공감각 엑소스킨으로 발전해 나갈 전망이다.

이를 위해 유연/신축 전자재료를 이용해 피부 위에 직접 소자를 형성하거나 전사하는 기술이 개발되고 있다. 일본 동경대 연구팀은 마이크로 나노메쉬 기반 압력센서를 개발해 착용감이 전혀 없으며, 통기성이 뛰어난 센서 디바이스를 구현하였고, 물체를 잡는 동작 중에 손의 본래 감각을 방해하지 않고 압력을 측정하는 데 성공했다[27]. 미국 시카고 대학과 휴스턴 대학의 공동 연구팀은 그림



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.

그림 5 온도, 스트레인, 습도, 광, 자기장 개별센서를 집적하여 제작 가능한 멀티모달 센서 매트릭스(상), 복합 센서로 뜨거운 컵을 집을 때 압력과 온도를 측정하는 모습(하)



출처 F. Ershad et al., "Ultra-conformal drawn-on-skin electronics for multifunctional motion artifact-free sensing and point-of-care treatment," Nature Commun., vol. 11, July. 2020, Article no. 3823. CC BY 4.0.

그림 6 생체전기신호, 온도, 스트레인, 피부 수분 센서가 집적된, Drawn-on-skin 유연/신축 센서 집적 시스템

6과 같이 Drawn-on-skin이라는 개념의 피부에 직접 그릴 수 있는 신축 전자소재를 개발해 전자타투와 같이 피부 위에 다양한 센서와 전자소자를 그릴 수 있는 기술을 개발하였다[28].

4. 엑소스킨의 지능

가. 근력보조(증강) 기능의 지능화

로봇 분야는 기존 모델링기반의 움직임 제어의 단점을 극복하기 위해 수년 전부터 인공지능을 접목한 운동제어기법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으나, 웨어러블 근력보조 분야의 지능화 관련 연구활동은 개발 초기단계이다. 주로 단단한 소재로 된 외골격형 근력보조(증강) 기술 위주이고, 소프트 슈트형 근력보조 기술은 발표된 성과가 거의 없다.

일본 나고야 대학에서는 하지 외골격형 근력보조 기기의 움직임(운동)을 제어할 때 생기는 연산 및 통신지연을 극복하고자, 발바닥 힘과 보행 상

태를 기계학습을 이용하여 예측하고 보행보조 제어하는 기술[29]을 발표하였다. 조지아공대에서는 외골격형 근력보조 기기에서 기계학습을 적용하여 EMG로 보행속도 및 보행경사를 추정하고, 계단 및 경사로 등 보행환경을 구분하는 등의 연구들 [30,31]을 보고하였다.

최근 공개된 시뮬레이션과 강화학습을 이용하여 개의 움직임을 모사한 로봇개의 개발 성과[32]를 보면, 웨어러블 근력보조 분야에서도 빠른 진보를 이룰 것으로 예상된다.

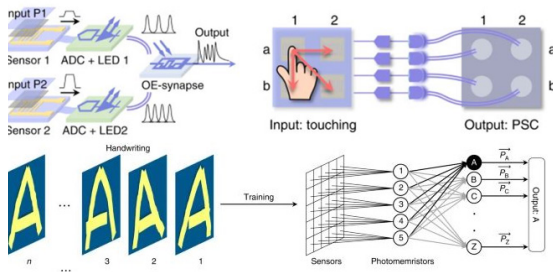
나. 신체보호 및 생명유지 기능의 지능화

신체보호 및 생명유지 기술에서의 지능화는 웨어러블 센싱 기술의 지능화를 의미한다고 말할 수 있다. 즉 생체 신호, 신체 움직임 등 신체에서 얻을 수 있는 모든 개인 데이터로부터 의미를 분석, 추론하기 위해 신경망과 같은 지능 알고리즘에 대한 연구개발이 주를 이루고 있으며, 건강 상태, 위험상황 등의 개인 상황인지 분야라고 할 수 있다. 긴 기간 동안의 개인 데이터를 이용하여 건강 상태 혹은 질병 발생 가능성 등을 예측하는 헬스케어 분야와 낙상, 화재 알람 등과 같은 신체에 가해질 수 있는 위해요소를 신속하게 지능적으로 판단하는 위험상황 인지 분야 등 크게 2가지 분야로 나눌 수 있다.

웨어러블과 인공지능 기술을 이용한 지능형 헬스케어 분야는 국내·외 전 분야에 걸쳐 아주 활발하게 연구개발이 이루어지고 다양한 성과들이 보고되고 있어 본 고에서는 따로 정리하지 않는다.

다. 감각전달(증폭) 기능의 지능화

센서로부터 감지되는 감각신호 패턴을 분류하고 분석하기 위하여 신경모방 알고리즘 또는 딥러닝과 같은 지능화 기법을 도입, 적용하려는 연구가 국내·외적으로 활발하게 진행되고 있다.



출처 H. Tan et al., "Tactile sensory coding and learning with bio-inspired optoelectronic spiking afferent nerves," Nature Commun., vol. 11, Mar, 2020, Article no. 1369, CC BY 4.0.

그림 7 압력센서와 LED, 포토멤리스터를 이용한 광 펄스 기반 신경 모방 센서 시스템

핀란드 알토대학에서는 인간의 촉각 수용체와 신경뉴런이 효율적으로 촉각을 느끼고 정보를 처리하는 시스템을 모방해, 그림 7과 같이 압력센서를 통해 감지한 센서신호를 광 펄스로 변환하고, 이 광 펄스 데이터를 시냅스 역할을 하는 포토멤리스터로 통합하는 새로운 신경 모방 센서 시스템을 개발했다. 뉴럴 코딩을 통해 동시 압력뿐만 아니라, 모스 부호, 점자, 물체의 움직임, 알파벳 필적 등을 식별하는 데 성공했다[33]. 미국 매사추세츠 공대 연구팀은 장갑에 548개의 압력센서를 집적하여 사람이 물체를 잡을 때의 압력 분포 신호 정보를 수집하고, 딥러닝을 통해 26개의 다른 물체를 구별해내는 데 성공했다[34].

IV. 결론

본 고에서는 한국전자통신연구원에서 발굴한 신개념 형상인 "엑소스킨"에 관하여 핵심 기술 동향을 살펴보았다.

웨어러블 및 인공지능 기술을 기반으로 하는 휴먼증강 기술의 발전은 착용성 개선 및 지능화가 가능해져 엑소스킨의 등장 가능성은 높아졌지만, 앞

서 살펴본 바와 같이 아직 넘어야 할 기술적인 장벽들이 많이 있다. 엑소스킨 개념형상이 가시화되기 위해서는 유연 구동기, 보조력 전달 기술, 감각 전달(증폭) 기술과 같이 소재, 부품 분야에서 성능의 혁신적인 개선이 있어야 하며, 사용자의 의도와 주변 상황에 따라 지능적으로 보조할 수 있는 지능 알고리즘이 반드시 개발되어야 한다.

현재의 기술발전 속도를 고려할 때, 멀지 않은 장래에 엑소스킨을 착용한 많은 사람들이 등장할 것으로 기대한다.

용어해설

- 기능적 전기자극** 근육에 전기자극을 가하여 근육수축을 유발함으로써 기능적으로 유용한 동작을 만들어 내는 기술
- 자발근활성 신호** 사용자의 자유의지에서 나오는 근활성 신호
- SCI 환자** 척수에 가해진 외상으로 인해 정상적인 운동, 감각 및 자율신경기능에 이상이 생긴 환자
- 펠티어 소자** 펠티어 효과에 의한 흡열 또는 발열을 이용한 것으로, 전류의 방향에 따라 한쪽은 흡열을 다른 쪽은 발열을 하는 소자

약어 정리

EMG	Electromyography
FES	Functional Electrical Stimulation
SCI	Spinal Cord Injury

참고문헌

- [1] 통계청, "생명표, 국가승인통계 제101035호," 2017.
- [2] Wikipedia, "E-textiles," <https://en.wikipedia.org/wiki/E-textiles>
- [3] Wikipedia, "Transhumanism," <https://en.wikipedia.org/wiki/Transhumanism>
- [4] 박소영, "인공지능 시대 인간의 신체와 문학적 형상화-사이보그, 트랜스휴먼, 포스트휴먼 그리고 '뉴로맨서,'" 제41권 제4호, 2019, pp. 1157-1190.
- [5] 이동우 외, "착용형 근력증강 기술 동향," 전자통신동향분석, 제32권 제4호, 2017, pp. 21-30.
- [6] F.A. Panizzolo et al., "A biologically-inspired multi-joint soft exosuit that can reduce the energy cost of loaded walking," J.

- Neuroeng. Rehabilitation, vol. 13, 2016, pp. 1-14.
- [7] L.N. Awad et al., "A soft robotic exosuit improves walking in patients after stroke," *Sci. Translational Medicine*, vol. 9, no. 400, 2017, doi: 10.1126/scirobotics.aah4416.
- [8] B.T. Quinlivan et al., "Assistance magnitude versus metabolic cost reductions for a tethered multiarticular soft exosuit," *Sci. Robotics*, vol. 2, no. 2, 2017, doi: 10.1126/scirobotics.aah4416
- [9] J. Kim et al., "Reducing the metabolic rate of walking and running with a versatile, portable exosuit." *Sci.*, vol. 365, no. 6454, 2019, pp. 668-672.
- [10] L.N. Awad et al., "The ReWalk ReStore™ soft robotic exosuit: a multi-site clinical trial of the safety, reliability, and feasibility of exosuit-augmented post-stroke gait rehabilitation." *J. Neuroeng. Rehabilitation*, vol. 17, 2020, pp. 1-11.
- [11] <https://www.sigmedics.com/>
- [12] <https://www.hankyung.com/it/article/202007239901Y>
- [13] 신형철 외, "신체 기능의 이상이나 저하를 극복하기 위한 휴먼 척각 및 근력 증강 원천 기술 개발," 한국전자통신연구원 3연차 보고서, 2019. 11.
- [14] <https://www.hexoskin.com/>
- [15] <https://www.catapultsports.com/>
- [16] <https://www.helite.com/>
- [17] <https://www.tangobelt.com/>
- [18] <https://www.wolkairbag.com/>
- [19] <https://www.hip-hope.com/>
- [20] S. Hong et al., "Wearable thermoelectrics for personalized thermoregulation," *Sci. Advances*, vol. 5, no. 5, 2019, doi: 10.1126/sciadv.aaw0536.
- [21] R.S. Johansson and A.B. Vallbo, "Tactile sensibility in the human hand: receptive field and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin area," *J. Physiol*, vol. 281, 1978, pp. 101-123.
- [22] A. Chortos et al., "Pursuing prosthetic electronic skin," *Nature Mater*, vol. 15, 2016, doi: 10.1038/nmat4671.
- [23] I. You et al., "E-skin tactile sensor matrix pixelated by position-registered conductive microparticles creating pressure-sensitive selectors," *Adv. Func. Mater.*, 2018, 28, 1801858.
- [24] N. Bai et al., "Graded intrafilable architecture-based iontronic pressure sensor with ultra-broad-range high sensitivity," *Nature Commun.*, vol. 11, 2020, doi: 10.1038/s41467-019-14054-9.
- [25] S. Chun et al., "Self-Powered Pressure- and Vibration-Sensitive Tactile Sensors for Learning Technique-Based Neural Finger Skin," *Nano Lett.*, vol. 19, no. 5, 2019, pp. 3305-3312.
- [26] Q. Hua et al., "Skin-inspired highly stretchable and conformable matrix networks for multifunctional sensing," *Nature Commun.*, vol. 9, no. 1, 2018, pp. 1-11.
- [27] S. Lee et al., "Nanomesh pressure sensor for monitoring finger manipulation without sensory interference," *Sci.*, vol. 370, no. 6519, pp. 966-970.
- [28] F. Ershad et al., "Ultra-conformal drawn-on-skin electronics for multifunctional motion artifact-free sensing and point-of-care treatment," *Nature Commun.*, vol. 11, July. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-17619-1
- [29] M. Ding et al., "Control of Walking Assist Exoskeleton With Time-delay Based on the Prediction of Plantar Force," *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 138642-138651.
- [30] I. Kang et al., "Electromyography (EMG) signal contributions in speed and slope estimation using robotic exoskeletons," in *Proc. IEEE Int. Conf. Rehabilitation Robot. (Roeonro, Canada)*, June 2019, doi: 10.1109/ICORR.2019.8779433.
- [31] D. Molinaro et al., "Biological Hip Torque Estimation using a Robotic Hip Exoskeleton," in *Proc. IEEE RAS/EMBS Int. Conf. Biomed. Roboti. Biomechatronics (New York, USA)*, 2020, doi: 10.1109/BioRob49111.2020.9224334.
- [32] X.B. Peng et al., "Learning Agile Robotic Locomotion Skills by Imitating Animals," *arXiv preprint*, 2020, arXiv:2004.00784.
- [33] H. Tan et al., "Tactile sensory coding and learning with bio-inspired optoelectronic spiking afferent nerves," *Nature Commun.*, vol. 11, 2020, doi: 10.1038/s41467-020-15105-2
- [34] S. Sundaram et al., "Learning the signatures of the human grasp using a scalable tactile glove," *Nature*, vol. 569, no. 7758, 2019, pp. 698-702.