상시 근골격 모니터링과 재활을 위한 온스킨 센서 디바이스 기술

Imperceptible On-Skin Sensor Devices for Musculoskeletal Monitoring and Rehabilitation

박찬우 (C.W. Park, chanwoo@etri.re.kr) 플렉시블전자소자연구실 책임연구원/실장
구재본 (J.B. Koo, kjb0706@etri.re.kr) 플렉시블전자소자연구실 책임연구원/기술총괄
진한빛 (H. Jin, hanbit.jin@etri.re.kr) 지능형센서연구실 연구원
김윤정 (Y. Kim, kim.yj@etri.re.kr) 지능형센서연구실 연구원
임채현 (C. Lim, chlim@etri.re.kr) 지능형센서연구실 선임연구원
홍찬화 (C.-H. Hong, hch@etri.re.kr) 지능형센서연구실 선임연구원/기술총괄
김혜진 (H.J. Kim, nolawara@etri.re.kr) 지능형센서연구실 책임연구원/실장

ABSTRACT

As the society is superaging, the number of patients with movement disabilities due to musculoskeletal or nervous system illness is rapidly increasing. To improve public health and reduce medical expenses, it is essential to develop rehabilitation systems that allow patients to resume their daily-life activities. However, the existing musculoskeletal illness diagnosis and rehabilitation method is limited in terms of precision and efficiency because it is based on an empirical diagnosis and prescription without regard for individual characteristics. To overcome these limits, it is critical to design a novel concept of routine rehabilitation therapy device that is capable of inducing musculoskeletal balance by the precise analysis of musculoskeletal usage patterns via the motion and the muscle activity tracking of linked muscles. This study introduces the trend of on-skin sensor device technology for routine musculoskeletal monitoring and therapy. For on-skin rehabilitation systems, skin-adhesive and stretchable motion/posture, electromyography, pressure sensors, small-size and low-power wireless sensor interfaces, and user-friendly rehabilitation contents based on new algorithms are combined.

KEYWORDS 근골격 재활, 신축성 근전도 센서, 신축성 동작·자세 센서, 신축성 압력센서

* DOI: https://doi.org/10.22648/ETRI.2022.J.370204
* 이 논문은 2022년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원[No.2022-0-00020, 상시 근골격 모니터링 및 재활을 위한 무자각 온스킨 센서 디바이스 기술]을 받아 수행된 연구임.

본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.
©2022 한국전자통신연구원

Ⅰ. 서론

전 세계적으로 인구의 초고령화가 급격히 진행되면서 우리나라에서도 근골격계 혹은 신경계 질환 등으로 인한 운동장애 환자 및 질환 위험군의 비율이 급격히 증가하고 있으며, 이를 예방, 치료하기 위한 헬스케어 및 재활기기의 개발은 국민 건강 증진 및 의료비 지출 감소를 위해 필수적인 것으로 인식되고 있다. 근골격계 질환이란 근육과 신경, 힘줄, 인대, 관절 등의 조직이 손상되어 나타나는 신체장애로, 무리한 힘의 사용, 반복적인 동작, 부적절한 작업 자세 등으로 인해 발생한다. 건강보험심사평가원에 따르면, 2019년 기준 국민 3명 중 1명이 근골격계 통증과 기능 저하로 병원 진료를 받은 경험이 있고, 근골격계 질환 진료비는 7조 4,599억 원으로 전체 진료비의 10.9%를 차지한다[1]. 특히 컴퓨터, 스마트폰의 사용으로 인한 VDT 증후군 수진자 수는 최근 10년간 지속적으로 증가하고 있으며, 과도한 운동으로 인한 젊은 층의 근골격계 질환도 꾸준히 증가하는 추세이다.

또한, 근골격계 질환은 생산 가능 연령대에서도 가장 흔한 질병으로 대두되고 있는데, 2015년 근로자의 근골격계 질환으로 인한 작업손실일은 3,985만 일, 손실비용은 4조 449억 원에 달하며, 과중한 업무와 시간 부족 등으로 인해 최적의 치료를 제때 받지 못하는 경우가 많다[2].

한편, 노화나 부상 등으로 인한 근골격계 질환 외에 뇌졸중 등 뇌신경계 질환에 의한 발병 빈도도 크게 증가하고 있다. 뇌졸중은 발병 후유증이 상당하여 환자들 대부분이 운동장애를 겪게 되는데, 빠른 회복과 일상 복귀를 위해서는 발병 직후부터 적극적인 재활훈련을 시행하는 것이 가장 중요하지만, 환자 돌봄에 대한 과도한 노동력 소모와 재활훈련을 시행할 전문인력 부족으로 어려움을 겪고 있다[3].

이처럼 근골격계 질환은 대상자의 범위가 매우 넓어 남녀노소를 불문하고 우리나라 국민 누구나 흔히 겪을 수 있는 질병으로 자리매김하고 있으며, 환자 당사자들의 삶의 질을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 환자들의 사회활동 저하와 이로 인한 국가 경쟁력 하락, 이들을 치료하고 돌보는 데 드는 사회·경제적 비용 등으로 인해 국가적 부담은 더욱 커질 것으로 예상된다.

이러한 배경 속에서, 근골격 운동장애 질환을 예방하거나 정확하게 진단·치료하기 위해서는 일상생활 중 개개인의 동작과 해당 근육 활성도를 상시 정밀하게 모니터링하고, 이로부터 개인별 근골격계 상태 분석 및 동작 패턴에 따라 적절한 맞춤형 헬스케어 서비스를 제공하는 것이 필수적이다. 최근 헬스케어 산업의 경향은 질병의 치료 중심에서 예방 중심으로 변화하고 있으며, 환자들은 의료 공급자로부터 더욱 안전하고 효과적인 진료와 개인 맞춤형의 치료를 기대하고 있기 때문이다. 또한, 편마비 환자 재활의 경우 빠른 회복을 위해 반복적이고 지속적인 훈련이 필요하며, 훈련과정에서 정확한 재활 수준 파악과 효율적이고 지속적인 훈련 연계가 필요하다.

하지만, 현재의 근골격계 질환 진단 및 재활치료 과정은 개인별 차이를 고려하지 않고 일정 시간 동안 정해진 동작을 반복하거나, 재활치료사가 주로 시각적으로 관찰하는 자세 정보만을 바탕으로 진행하며, 의사의 경험적 진단과 처방에 의존하므로 정밀성과 효율성이 떨어진다는 한계를 지니고 있다. 또한, 재활치료 병상 수의 부족으로 회복이 덜 된 급성기 환자들이 병원을 옮겨 다니는 재활난민 현상도 사회적 문제로 대두되고 있는데, 병원 입원이나 통원을 통한 기존의 재활훈련 치료 방식으로는 급증하는 수요의 감당과 충분한 재활빈도 만족이 어렵다.

이러한 한계들을 극복하기 위해서는 겉보기 동작

뿐만 아니라 관련 근육들의 근활성을 함께 추적함으로써 근골격 사용패턴을 정확히 분석하여 효율적이고 궁극적인 자세 교정 및 근골격 균형을 유도할 수 있는 새로운 개념의 상시 재활치료 기기 및 콘텐츠의 개발이 필수적이다. 또한, 동작·자세 및 근활성도 정보뿐만 아니라 재활 과정에서 신체 각 부위에 가해지는 압력분포를 실시간으로 정확하게 획득함으로써 정밀한 동작 피드백을 제공해 줄 수 있어야 하며, 이를 위해서는 센서, 구동회로, AI 학습 알고리즘, 콘텐츠 등 ICT 기술들의 융합을 통한 새로운 디지털 헬스케어 서비스의 구현이 반드시 필요하다.

본고에서는 이러한 요구를 충족시킬 방안으로 상시 근골격 모니터링과 재활에 응용이 가능한 온스킨(On-skin) 센서 디바이스 기술에 대한 동향을 소개하고자 한다. 상시 근골격 모니터링을 위해서는 사용자의 동작이나 자세에 가해지는 제약과 이물감을 최소화하여 오랜 기간 사용해도 일상생활에 지장을 주지 않는 온스킨 디바이스 형상이 이상적이며, 이를 위한 핵심기술로는 피부밀착형 고신축성 동작·자세, 근전도, 압력 어레이 센서 기술 및 센서에서 획득되는 작은 신호들을 저전력으로 정확하게 처리하는 초소형 무선 센서 인터페이스 기술, 전송된 신호로부터 의미 있는 근골격 데이터들을 추출하고 적절한 진단 결과 및 재활 프로토콜을 제시하는 알고리즘과 콘텐츠 기술 등을 들 수 있다.

II. 동작·자세 및 근전도 온스킨 센서 디바이스 기술 동향

1. 근골격 동작·자세 모니터링 기술

현재 사용되고 있는 근골격 동작·자세 모니터링 기술 중 가장 대표적인 방식은 신체 각 부위의 움직임을 주위에 설치된 다수의 카메라를 이용하여 추적하는 것이다. 예를 들어, 미국의 VICON사에서는 적외선 카메라로 인체 각 부분에 부착된 마커의 위치를 인식하여 관절의 위치 및 각도를 인식하는 기술을 개발하였는데, 0.1mm 이내의 오차로 마커의 위치를 찾을 수 있다[4]. 또한, XSens사에서는 IMU가 내장된 MVN 모션 캡처 시리즈를 출시하였는데, 시상면 안에서의 각도 추정은 1도 이내의 평균 에러를 가진다[5]. 신체 중 가장 관절구조가 복잡한 곳은 손인데, Manus사에서는 마커가 부착된 장갑을 이용하여 개별 손가락의 움직임을 실시간으로 추적할 수 있는 PRIME X Mocap 및 Optitrack 제품을 출시 중이며, 굽힘 센서와 IMU가 추가로 장착된 손가락 추적 디바이스를 개발하여 Xsens사에 공급하고 있다[6].

한편, 마커를 부착하지 않고 근골격 동작을 추적하는 기술들도 선보이고 있는데, SIMI Motion Capture사에서는 여러 대의 카메라로 수집된 인체의 실루엣에 3차원 인체 모델을 근사하여 관절 위치 및 각도를 분석하는 기술을 발표하였으며[7], 일본 AIST사에서는 카메라로 측정된 피부 표면의 모양 변화를 머신러닝 기법으로 분석하여 근활성도와 관절 각도를 동시에 측정할 수 있는 기술을 제안하기도 하였다[8].

또한, 최근에는 이러한 Vision 기반의 동작·자세 모니터링 기술을 개인용 홈 트레이닝 서비스에 실제로 적용하는 사례도 늘고 있는데, 국내에서 출시된 카카오 VX나 하우핏의 경우, 스마트폰 카메라를 사용하여 동작을 캡처하여 TV와 같은 큰 화면에 미러링한 뒤, 화면에 제시되는 강사와 같은 자세를 유지하도록 유도하고 자세 일치도를 평가하는 방식을 채택하고 있다.

하지만, 이러한 카메라 기반의 동작·자세 모니터링 방식은 반드시 모든 동작이 카메라의 시야에서 이루어져야 하므로 장소와 시간의 제약이 크며, 카

메라로 구분되기 어려운 관절의 내/외회전 등 횡축 운동 각도의 추정이 어렵고, 신체 부위 간 겹침 등으로 카메라의 시야를 벗어난 움직임은 추적이 불가능하다는 단점을 가진다. 또한, 마커를 이용하는 경우, 다수의 마커를 정확한 위치에 일일이 부착하는 데에 시간과 노력이 많이 소요될 뿐만 아니라 마커를 부착한 상태에서 일상생활이 불가능하여 모니터링을 할 때마다 새로 마커를 부착해야 한다는 점에서 상시 근골격 모니터링에 적용하기에는 한계가 있다.

따라서, 이러한 문제점을 극복하기 위해 카메라 없이 신체에 부착된 웨어러블 센서 모듈을 이용하여 동작·자세를 추적하는 다양한 기술이 함께 제안되고 있다. 예를 들어 미국 Berkeley 대학에서는 3축 가속도계와 자이로스코프, 자기계를 이용하여 무릎 관절운동을 모니터링하는 기술을 개발하였는데, 허벅지와 정강이에 별도의 센서를 부착한 뒤 퓨전 알고리즘으로 관절 각도를 계산하였으며, 주요 운동 동작들에 대해 카메라 기반 기존 시스템 대비 97% 이상의 일치율을 보였다[9]. 한편 각 관절마다 스트레인 센서를 부착하여 동작별 관절 움직임을 모니터링하는 기술들도 제안되고 있는데, 서울대학교에서는 신축성 기판 내에 유체채널을 형성하고, 그 내부에 Ionic Liquid와 액상금속을 주입하는 방식으로 손 모션 감지용 글러브를 제작하였으며[10], 일본 AIST사에서는 정렬된 미세구조를 가지는 탄소나노튜브를 이용한 스트레인 센서를 장갑과 스타킹 등에 부착하여 무릎 및 손가락 관절의 동작들을 감지할 수 있음을 보였다[11].

한편, 관절의 동작이나 자세 외에도 해당 관절 운동에서 사용되는 근육 부위별 활성도를 함께 모니터링하는 기술들이 제안되고 있는데, Univ. of Conception에서는 전도성 직물을 사용한 EMG 측정용 건식 전극을 개발하고, 이를 의복 내부에 부착하여 신체 움직임 중 근육 활성도를 측정한 후 블루투스(Bluetooth)로 전송함으로써 상지 훈련에 대한 피드백이 가능한 스마트 의복을 개발하였다[12]. 또한 Athos사에서는 의복에 부착하여 근활성도와 심박수, 칼로리 소모 등을 실시간 모니터링하는 소형 독립형 EMG 센서 모듈과 이를 이용한 스마트 의복으로 측정된 근육 활성량을 바탕으로 개인 맞춤형 운동 조언 및 피드백을 하는 제품을 출시하고 있다[13].

하지만 이처럼 장갑이나 의복에 센서 모듈을 부착하는 경우, 모듈의 강성이나 무게 등으로 인해 동작 자체에 제약이 강해지므로 일상생활에서 상시 착용이 어려우며, 개인별 신체 사이즈 차이나 동작 시 센서의 위치변동 등에 따라 정밀도와 신뢰성에 한계를 가진다는 단점이 있다.

2. 신경근 협응 기반의 근골격계 진단/훈련을 위한 상시 모니터링 기술

근골격 질환자에게 정량적인 진단과 체계적인 재활훈련을 제공하기 위해서는 동작·자세 또는 근육의 근활성도를 실시간으로 수집하는 다양한 센서 기술이 필요하다. 현재의 주된 방식은 수집된 근골격의 동작·자세나 특정 근육의 근활성도 데이터를 개별적으로 활용하는 것이다. 하지만, 겉보기에 동일한 동작을 취하고 있다 하더라도 개인의 근골격 상태에 따라 관련 근육들이 조합되는 방식이 다를 수 있으며, 잘못된 근육 사용이 지속적으로 반복되면 근골격 질환을 유발하거나 재활훈련의 효과를 반감시킬 수 있다. 따라서 최근에는 특정 자세나 동작을 취할 때 관련 근육들이 어떤 조합과 패턴으로 활성화되는지, 즉 개인의 근골격계 상태를 신경근 협응 패턴과 동작 성능이 혼합된 정량적 지표로 통합 분석하는 기술이 큰 관심을 받고 있다. 운동능력

이 떨어지는 환자군들은 같은 동작을 하더라도 근육들을 조합하는 패턴이 일반인과 다르게 나타나므로, 자세에 따른 근활성도 패턴 진단과 실시간 피드백을 기반으로 하는 꾸준한 훈련을 통해 정상적인 근육 사용패턴을 회복시키는 것이다.

운동기반 데이터 표준화 및 신경근 협응 훈련시스템과 관련된 연구는 국내외 여러 기관에서 수행되고 있는데, 서울대학교에서는 정상인과 환자의 동영상을 수집하여 재활운동에 활용하기 위한 센서 모션 데이터 세트를 구축하고, 보행 분석의 의학적 지표화를 통해 정성 데이터에 의존해야 했던 치료/분석/운동 프로그램을 디지털화한 정밀 치료 프로그램을 제공하고 있다[14]. 한편 미국의 Northwestern 대학에서는 어깨관절이 부담하는 부하의 크기에 따라 손의 굽힘근에서 나타나는 비정상적인 신경근 협응 양상을 평가하고, 이를 바로잡기 위해 외부 부하에 대한 보조를 제공하는 방법을 제안하였다[15]. 또한, Zebris사에서는 균형 잡기 위주의 운동기반 근육 협응 훈련시스템을 개발하였는데, 특정한 질병이나 장애를 목적으로 한 것이 아니라, 일반인을 대상으로 척추 안정도를 개선, 관절의 부상 위험 감소 등의 효과가 있음을 확인하였다[16].

이처럼 신경근 협응 방식에 바탕을 둔 근골격계 질환의 진단/재활 및 예방 솔루션을 구현하기 위해서는 특정 장소나 한정된 시간이 아니라, 일상생활 전반에 걸쳐 이루어지는 다양한 자세와 근활성을 상시적으로 모니터링하는 것이 필요하다. 상시 모니터링을 수행하기 위해서는 앞에서 설명한 카메라 추적 혹은 장갑, 의복 부착형 센서 방식과 달리 언제 어디서나 지속적인 데이터 획득이 가능하도록 사용자가 쉽게 사용할 수 있고 일상생활을 불편 없이 수행할 수 있는 무자각 센서 디바이스의 개발이 필수적이다.

무자각 센서 디바이스를 구현하기 위한 핵심기술은 초박형/피부밀착형/신축성을 동시에 제공하는 센서 패치화 기술과 다양한 센서의 신호들을 잡음이나 왜곡 없이 획득하여 외부로 전송할 수 있는 초소형/초경량/저전력 무선 센서 인터페이스 기술을 들 수 있다. 또한, 모니터링을 통해 얻은 일상 동작 패턴을 기반으로 지속적인 자세 교정과 근골격계 균형 솔루션을 제공하기 위해서는 전송받은 신호로부터 임상적으로 의미 있는 정보를 추출하고 동작에 대한 피드백을 실시간으로 제공하는 알고리즘과 콘텐츠가 필요하다.

3. 동작·자세 및 근전도 온스킨 센서 디바이스를 이용한 근골격 재활

최근 한국전자통신연구원에서는 피부에 밀착되는 무선 독립패치형 무자각 동작·자세 및 근전도 센서를 이용하여 근골격계 질환의 진단/재활 및 예방 솔루션과 연동하는 연구를 진행 중이다. 본 연구에서는 그림 1과 그림 2에 나타낸 바와 같이, 주요 관절 및 근육 부위에 동작·자세 및 근전도 센서 무선 패치를 부착하고, 이를 통해 상시적으로 수집되는 생체신호로부터 특정 동작 시 근골격계의 신경근

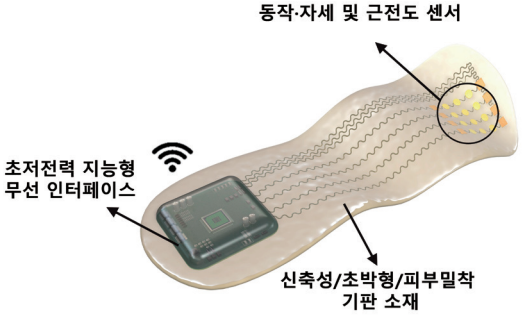


그림 1 무선 독립패치형 무자각 동작·자세 및 근전도 센서 개념도

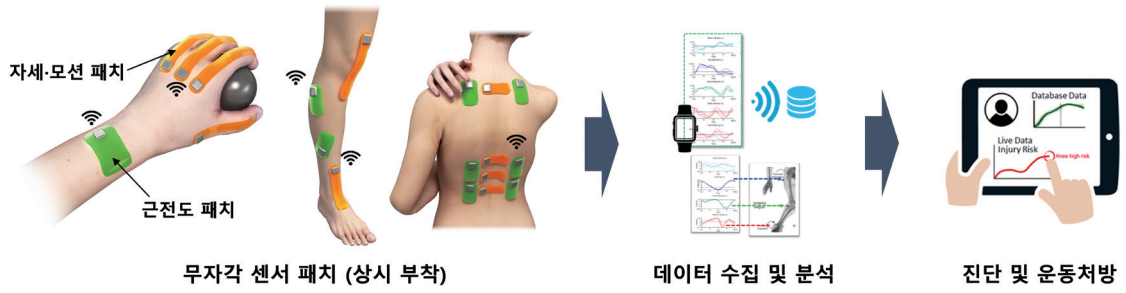


그림 2 무자각 동작·자세 및 근전도 센서를 이용한 근골격계 헬스케어 개념도

협응 방식을 분석하고 대상자의 운동패턴에 따른 근골격계 부상 및 질환 위험도의 정량화, 질환을 개선하기 위한 직관적인 운동방식 제안, 이에 따른 질환 완화 효과검증 등을 목표로 하고 있다. 이를 위해 무자각 센서 패치, 초경량/초저전력 무선 센서 인터페이스, 게임 기반의 훈련 콘텐츠를 개발하게 되며, 임상 테스트를 통해 근골격계 질환 재활 서비스의 시연 및 사용성 평가를 진행할 예정이다.

이러한 온스킨 디바이스 기반 재활시스템이 성공적으로 구현되면, 근골격계 환자의 경우 일상생활 중 관절과 근육 사용패턴의 문제점을 파악하여 올바른 근육 사용패턴을 익힐 수 있는 맞춤형 상시 훈련법을 제시할 수 있고, 뇌신경계 환자들에게는 개인별 동작/근활성 패턴 분석에 기반한 맞춤형 재활 솔루션을 제공할 수 있으며, 질환이 없는 일반인에게는 자세 교정 및 근골격계의 균형을 유도함으로써 근골격계의 건강 상태 지속성을 높여주는 솔루션 제공이 가능하다. 또한, 근골격계 질환 예방과 치료뿐만 아니라 가상현실, 게임, 교육, 홈트레이닝, 스포츠 훈련 등 다양한 분야에 활용이 가능하므로 주력 산업의 기술혁신을 유도하고 비대면 시대의 산업, 경제 및 사회적 변혁을 주도할 새로운 상품 발굴과 신산업 창출을 통해 향후 경제적·사회적으로 큰 파급효과를 가져올 것으로 기대된다.

III. 압력 온스킨 센서 디바이스 기술 동향

1. 기술 개요 및 필요성

인구의 고령화뿐만 아니라 산업재해, 교통사고, 다양한 신경질환 등으로 인하여 상지 편마비와 같은 장애가 있는 사람들이 급속하게 증가하고 있다. 장애는 사회적 활동 제약뿐만 아니라 그로 인한 삶의 질 저하를 유발하여 장애 당사자에게는 큰 고통이 뒤따른다. 또한, 치료 및 재활을 위한 사회·경제적 비용 증가는 사회구성원에게도 큰 부담이 되고 있다. 상지 편마비 환자의 기본적인 일상생활 활동으로의 회복을 위해서는 무엇보다도 반복적·지속적으로 물체를 움켜쥐거나 집어 올리는 파악(Grip) 및 파지(Pinch) 훈련이 필요하다. 이러한 재활훈련은 대뇌 운동 피질 영역의 재조직화에 긍정적인 영향을 줌으로써 신경 가소성(Neural Plasticity)을 중재하여 회복(Recovery)을 촉진하는 원인이 된다고 보고되고 있다[17,18]. 그러므로, 재활훈련과정에서 재활 수준을 정확히 파악하고 효율적인 재활운동 피드백을 통해 치료 효과를 향상시키기 위해서는 정밀한 파지/파악력 측정이 필수적이다.

현재는 상지 편마비 환자의 운동시간이나 활동 정도를 전문의가 이학적으로 추적 평가하며 회복 정도를 파악하는 것이 대부분이며, 환자의 파악/파

지 정도를 보다 정밀하게 측정하기 위해 손의 압력을 측정하는 그립형 기기를 사용하거나 글러브 형태의 압력센서를 착용하는 방법을 적용하고 있다. 그립형 기기의 경우는 전체적인 손의 그립력을 측정하는 모바일 재활치료 플랫폼 제품도 출시되었으나 손가락 조절능력을 정확하게 측정하기에는 여전히 한계가 있으며, 글러브 형태의 경우는 사용자 활동이 제한적이고 측정 오차범위가 넓어 정확한 모니터링이 어려운 단점으로 상용화에 걸림돌이 되고 있다. 이러한 기존 시스템의 한계를 극복하기 위해서는 피부에 밀착되어 일상적인 움직임과 변형이 발생하는 제약조건에서도 신호의 왜곡 없이 정확한 압력분포 모니터링이 가능한 온스킨 압력센서 어레이 기술이 필요하다.

피부에 밀착 가능한 온스킨 압력센서는 작동원리에 따라 크게 저항방식, 정전용량방식, 압전방식으로 나눌 수 있다. 먼저, 저항방식(Resistive Type) 압력센서는 기계적 변형에 의한 전도성 소재의 저항 변화로 압력을 인지하는 방식으로 소자의 구조가 단순하고 신호 변환이 간단하다는 장점이 있지만, 소재의 변형에 의한 저항 변화의 한계가 있으며, 비교적 낮은 자극 범위에서의 감지 특성을 가진다는 한계점이 있다. 정전용량방식(Capacitive Type)은 전극—유전체—전극의 구조로 이루어져 있으며, 소재의 물리적 변형이나 전극과 유전체 간 접촉면적의 변화에 의한 전기용량 변화를 통해 압력의 세기를 인지하는 방식이다. 경도가 높은 소재는 외부 자극 시 형태 변화가 적어 민감도에 한계가 있으며, 반대로 경도와 탄성이 낮은 물질은 소재 회복성이 느리고 안정성이 낮은 단점이 있다. 압전방식(Piezoelectric Type)의 경우 압력 인가 시 전압이 발생하는 원리를 이용하여 전압의 세기에 따라 압력의 세기를 인지하는 방식이다. 외부의 전원 공급 없이 사용 가능하며, 응답특성이 매우 빠르다는 장점이 있지만, 출력신호가 작아 신호의 증폭이 필요하며 느리고 지속적인 압력(정압) 측정에는 적합하지 않다는 단점이 있다. 최근에는 상기 언급한 기존 센서들의 한계점을 극복하는 고성능 피부부착형 압력센서 개발을 위해 다양한 신소재 적용과 센서 구조에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

2. 온스킨 압력센서 국내기술 동향

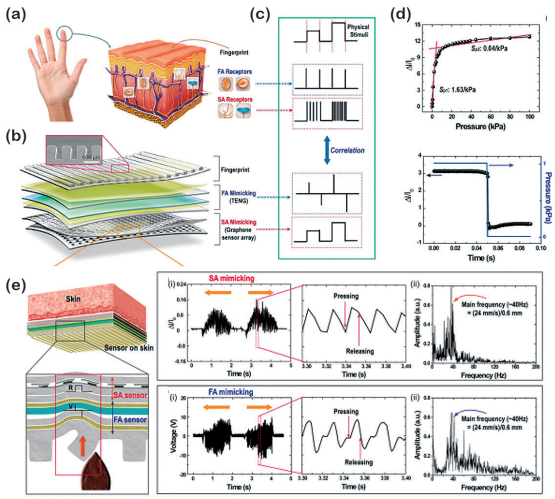
국내에서는 피부 부착이 가능할 뿐만 아니라 인간의 피부 감각기관 자체를 대체하여 감각 증강 분야의 적용성을 확장하는 데 활용될 수 있는 센서 감지 소재, 기능성 유연·인장 소재 및 구조 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

한국과학기술원 기계공학과 연구팀은 생체신호 및 신체 압력 모니터링에 활용이 가능한 액체금속 기반의 웨어러블 유연 압력센서를 개발하였다[19]. 연구팀은 갈린스탄(Galinstan) 액체금속과 다중물질 3D 프린팅 기술을 활용하여 마이크로 범프 구조물을 액체금속 채널에 배치하여 작은 압력에도 신호 변화가 크게 나타날 수 있도록 설계했다. 이러한 구조를 통해 마이크로 범프가 없는 일반 액체금속 기반 압력센서보다 6배 이상의 민감도 향상이 가능했다. 또한, 1만 회 이상의 인장, 굽힘과 같은 물리 변형뿐만 아니라 다양한 환경 요인(온도, 습도)에 대해서도 안정적인 성능을 보였다. 개발된 센서의 연구결과는 웨어러블 헬스케어, 거동이 불편한 환자를 위한 웨어러블 재활기기와 같은 응용 분야로의 활용 가능성을 확인한 것이지만, 20%의 신축률과 단일소자의 성능으로서 보다 높은 신축률 확보와 대면적 센서 어레이화를 위한 추가적인 연구가 필요하다.

한국표준과학연구원과 연세대 연구팀은 이황화몰리브덴(MoS_2)을 이용해 안정적 성능 구현이 가능

한 고민감 초박막 유연 촉각센서를 개발하였다[20]. 연구팀은 이황화몰리브덴 막을 합성한 후 기존의 반도체 공정법을 이용하여 대면적 박막을 설계하였고, 그래핀 전극소재를 이용하여 압력에 민감하게 반응하는 유연 센서를 제작하였다. 유연 압력센서의 두께는 75나노미터(nm) 수준으로 얇아 손가락의 지문 굴곡을 따라 밀착될 정도로 피부 부착성이 높았고, 압력 민감도도 스마트폰을 터치할 때 압력(약 10kPa)의 10분의 1 수준(1.24kPa)까지 감지할 정도로 우수했다. 본 기술은 유연한 대면적 센서 구현이 가능하여 손가락뿐만 아니라 손바닥 등 넓은 표면에도 적용이 가능하여 파지/파악력 모니터링 기반의 웨어러블 재활기기로의 응용이 기대된다.

대구경북과학기술원과 성균관대학교 연구팀은 장애인의 의수 또는 의족에 활용하거나, 정확한 파지/파악력 모니터링이 필요한 상지 마비환자의 재활훈련용 웨어러블 기기에 응용될 수 있는 인체 감각기관 모사형 유연 압력센서를 개발했다[21](그림 3 참조). 본 센서는 기존 센서와 달리 압력과 진동 모두를 감지하거나, 물체 표면 거칠기를 전기신호로 변환시켜 구분하는 등 물리적인 자극을 더 민감하게 감지하는 특징이 있다. 연구팀은 인간의 감각수용체와 손가락의 지문을 모사하여 그 구조와 기능을 센서에 세분화하여 적용하였고, 손가락 지문을 모사한 마이크로 패턴이 있는 상단 패널, 고속 응답 수용체를 모방한 진동 센서가 있는 중간 패널, 저속 응답 수용체를 모방한 압력센서를 구현한 하단 패널로 각각 제작하여 집적하였다. 그러나, 다층으로 센서를 쌓은 구조로 인해 소자 두께가 다소 두껍고 신축률 및 피부밀착 특성이 낮아 손바닥 또는 손가락 등 굴곡이 심한 부위에의 적용성이 떨어지는 단점이 있다.



출처 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, Copyright 2019 American Chemical Society, Reprinted with permission from [21].

그림 3 인간피부를 모사한 유연 압력센서 모식도 및 센서 특성: (a-c) 유연 압력센서의 구조 및 전기적 특성, (d) 센서의 압력 민감도 및 반응시간 특성, (e) 외부압력 및 진동에 대한 센서의 바이모달 감지특성 및 동작 원리

3. 온스킨 압력센서 국외기술 동향

국외에서는 미국과 중국을 중심으로 온스킨 압력센서가 활발히 연구되고 있다. 압력센서 어레이를 피부에 밀착하여 사용할 수 있도록 소자의 신축성을 확보하기 위한 소재 및 구조에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 새로운 메커니즘을 이용한 고민감, 고해상도 압력 감지 기술 또한 개발되고 있다.

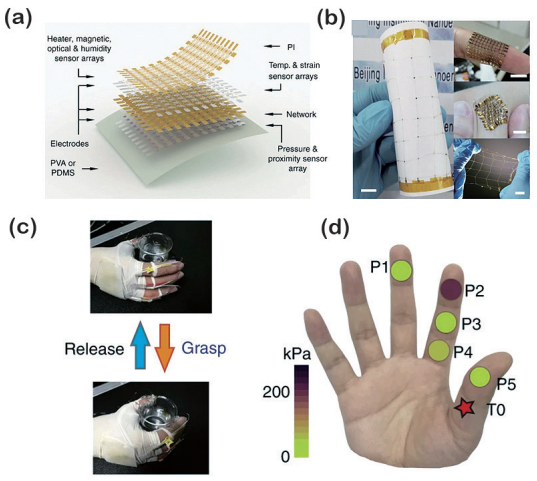
미국 조지아텍 연구팀은 최대 300%까지 늘어나는 고신축 압력센서 어레이를 개발해 개인 맞춤형 지능형 의수에 집적하여 실시간 압력 및 온도 분포를 측정하는 데 성공하였다[22](그림 4 참조). 신축성 압력센서 어레이는 폴리이미드 기판을 구불구불한 평면 스프링 구조로 패터닝함으로써 신축성을 확보하였고, 단일 패턴의 경우 최대 800% 신축 가능한

구조로 개발하였다. 압력 이외에도 온도, 변형, 습도, 빛, 자기장, 거리 센서를 집적하여 다양한 물리량의 감지 기능을 구현하였다. 하지만, 높은 신축율의 구조일수록 횡방향으로 넓어져 고해상도 구현이 어려운 단점이 있어, 저해상도 센서 응용에 활용하거나 해상도 향상을 위한 후속 연구가 필요하다.

미국 MIT와 중국 남방과기대 공동연구팀은 피부 내 이온 전도 시스템을 이용해 압력을 감지하는 이온트로닉 전자피부를 개발하였다[23](그림 5 참조). 이온트로닉 전자피부는 감지전극과 상대전극으로 이루어져 있으며, 감지전극 표면에는 미세 돌기구조가 형성되어 있어 압력에 의한 피부와의 컨택 변화가 일어나고, 상대전극은 피부와 밀착하도록 설계되었다. 압력에 의한 접촉 변화로 두 전극 사이의 정전용량이 변화하게 되고 이를 통해 압력을 감지하는 원리로써, 손가락 끝의 맥박까지 감지할 수 있는 고민감 압력센서의 제작이 가능하다. 연구팀은 이온트로닉 전자피부를 장갑에 집적하여 풍선이나 물컵을 잡을 때 손바닥의 밀리미터 수준의 압력분포를 측정하는 데 성공하였다. 하지만, 피부와 전기적인 접촉이 필요하기 때문에 땀이나 유분의 영향에 취약한 것이 단점으로 꼽힌다.

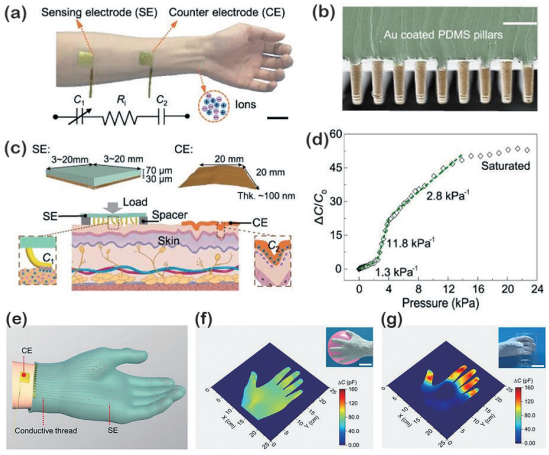
중국 선전대와 남방과기대 공동연구팀은 이온트로닉 전자피부를 개발하여 손가락 끝의 맥박신호를 감지할 수 있는 고민감 압력센서 전자피부를 개발하였다[24]. 이 전자피부는 두 감지전극 사이에 이온성 액체를 포함하는 직물층으로 구성되는 정전용량형 구조로 설계되었으며, 손가락 끝의 볼록한 부분에 밀착되어 손가락을 구부리거나 움직일 때 안정적인 펄스 신호를 얻을 수 있도록 제작되었다. 특히, 손가락 끝 맥박 신호는 매우 약해 감지가 어려우나 전자피부의 높은 압력 민감도로 이를 극복하였다.

추가적으로, 연구팀은 손가락 끝에 부착된 이온



출처 Reprinted with permission from [22], CC-BY 4.0.

그림 4 신축 가능한 온스킨 압력센서 어레이: (a) 신축 압력센서 구조도, (b) 신축 압력센서를 종이나 피부에 부착한 모습, (c,d) 개인 맞춤형 지능형 의수에 압력센서(P1~5)와 온도센서(T0)를 집적하고 물컵을 파지하는 사진



출처 Reprinted with permission from [23], CC-BY 4.0.

그림 5 (a–d) 이온트로닉 전자피부의 압력 감지 원리 및 감지전극의 미세 돌기구조, (e–g) 센서를 장갑에 집적하여 손바닥 압력분포를 측정하는 모습

트로닉 전자피부를 통해 맥박신호를 확인하고 혈관의 노화 및 심혈관 건강 상태를 피드백해 주는 연구결과를 보였다. 하지만 이온성 액체를 포함하기 때

문에 반복 굽힘과 압축 테스트에서 큰 히스테리시스를 보이는 단점도 보였다.

온스킨 압력센서를 활용한 재활에 있어서 센서의 내구성 향상은 필수적이다. 이를 위해 피부에 밀착되어 착용하는 유연 압력센서에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 미국 Tekscan사에서는 유연한 Polyester 기판에 다채널의 FSR 센서를 구성하고 파지력을 고해상도로 측정함으로써 손 재활 피드백에 활용하는 유연 압력센서 어레이 제품이 판매되고 있다[25]. 하지만, 0.203mm 두께의 기판으로 인해 센서 모듈을 손의 곡면에 밀착하여 부착하기가 어려워 일시적인 정밀 압력 측정에만 사용할 수 있다는 단점이 있으며, 유연성 개선을 위한 소재 및 구조 개발이 요구되고 있다.

미국 PPS사는 유연 정전용량 방식의 압력센서를 이용하여 파지/파악력을 실시간으로 모니터링하고 재활 및 작업치료에 활용할 수 있는 손가락 압력센서 'FingerTPS'를 개발하였다[26]. 실제로 영국 의료기관에서는 해당 제품을 손가락 힘 재활에 활용 중이며, 향후 웨어러블 재활기기의 시장 수요가 증가하는 추세를 고려할 때 압력센서의 프리 폼팩터화 및 성능 고도화에 대한 니즈(Needs)도 가속화될 것으로 보인다.

Ⅳ. 결론

세계적으로 고령화를 비롯해 다양한 근골격계 질환 및 신경질환 등으로 인해 장애 환자가 증가하고 있으며, 이러한 질환 및 장애의 발생은 일상생활에서의 활동을 힘들게 하여 삶의 질을 저하시키고 사회적·경제적 비용을 증가시키는 주요 원인이 된다. 운동장애를 예방하거나 정확한 진단·치료를 위해서는 상시적인 근육 활성도 모니터링이 필요하며, 재활치료의 경우에도 재활수준의 정확한 파악과 피드백을 위한 동작 모니터링이 필수적이다. 이를 위해 신체의 움직임과 힘의 정밀한 측정이 가능한 센서가 필요하며, 장시간 사용하더라도 동작의 제약과 이물감을 최소화할 수 있는 온스킨 센서 디바이스의 구현은 재활의 효과를 높일 수 있는 주요 기술이다.

최근 유연 전자소자 기술을 적용한 피부 밀착형 근골격 모니터링 및 신체에 가해지는 압력분포 모니터링 디바이스 개발을 위한 연구가 국내외에서 활발히 이뤄지고 있다. 실시간 측정 데이터를 기반으로 전문의나 인공지능 기반의 패턴 분석을 통해 보다 정밀한 동작 피드백을 제공받을 수 있는 미래형 헬스케어 서비스가 가능해질 것으로 기대된다. 이러한 온스킨 센서 디바이스 기반의 디지털 헬스케어 기술은 국민 건강 및 삶의 질 향상을 위해 시급히, 또한 우선적으로 추진되어야 할 기술이라고 할 수 있을 것이다.

온스킨 센서 디바이스는 사용자의 생체정보를 무자각으로 연속/상시 모니터링할 수 있다는 점에서 재활 및 헬스케어 분야에서의 응용이 더욱 활발할 전망이다. 그러나, 피부의 자유형상에 초밀착할 수 있는 유연/신축 기판 기반의 초박막 온스킨 센서 기술은 신체활동의 동잡음에 취약하여 신호왜곡이 발생할 수 있으므로 이를 최소화하는 센서 구조뿐만 아니라 신호처리 알고리즘 기술이 융합되어야 한다. 즉 유연/신축형 소재 기술부터 센서 구조 설계/공정 기술, 통합 신호처리 회로기술, 데이터 처리 프로그래밍 기술, 응용 콘텐츠 등 ICT 전반에 걸친 기술개발이 융합적으로 이루어져야 하는 것이다. 또한, 온스킨 센서 디바이스의 상용화를 위해서 응용 시나리오별 시스템 검증을 통해 인증 절차 및 사용자 실효성 테스트 등 추가적인 연구도 필요하다.

향후 개인 맞춤형 의료 서비스 시장이 급속히 확대될 것으로 전망되는 가운데, 피부밀착형 온스킨

센서 디바이스 기술은 보다 전문적인 진단 피드백을 기반으로 한 웨어러블 헬스케어 및 홈 재활 서비스로 발전되어 활용될 것으로 보인다. 또한, 신축성 온스킨 디바이스에 사용되는 스트레인 센서 및 압력센서와 같은 요소기술들은 가상현실, 엔터테인먼트, 차세대 UI 등 다양한 분야에서의 독립적인 활용이 가능하므로 타 산업으로의 확장성과 큰 파급효과를 기대할 수 있다.

용어해설

VDT 증후군 장시간 모니터를 보며 키보드를 두드리는 작업을 할 때 생기는 각종 신체적·정신적 장애를 이르는 말로 장시간 동안 컴퓨터, 스마트폰, 모바일 디바이스 등을 보는 사람들에게 많이 나타나는 질환

신경근 협응 특정 동작과 자세를 위해 역할이 다른 둘 이상의 근육들이 어떻게, 얼마나 강하게 수축할 것인가를 상호 조절하는 것

상지 편마비 환자 사지 중에 상체에 있는 한쪽 부위가 마비된 환자

신경가소성 중추신경계의 손상 후 뇌가 재구성 혹은 재배치하는 능력. 주위 환경이나 병변에 맞도록 대뇌피질의 기능과 형태가 변하는 신경계의 적응과정으로 재활치료의 원리가 됨

이온트로닉 기존 일렉트로닉스를 이온전달체로 연결하는 차세대 바이오 기술

이온성 액체 양이온과 음이온이 크기의 비대칭성으로 결정체를 이루지 못하고 액체 상태로 존재하는 물질

약어 정리

AI	Artificial Intelligence
EMG	Electromyography
FSR	Force Sensing Resistor
ICT	Information & Communication Technology
VDT	Visual Display Terminal Syndrome

참고문헌

[1] 건강보험심사평가원, "국민 3명 중 1명 근골격계 질환으로 진료 VDT 증후군 등 현대인의 근골격계 질환 주의," 2020. 10. 12.

[2] 의협신문, "직장인 근골격계 질환으로 경제적 손실만 '4조원'," 2015. 11. 26.

[3] 헬스경향, "늘어나는 '재활난민', 국내 재활치료 현실은?," 2021. 1. 7.

[4] https://www.vicon.com/applications/life-sciences/

[5] https://www.xsens.com/motion-capture

[6] https://www.manus-meta.com/prime-x

[7] http://www.simi.com/en/products/movement-analysis.html

[8] R. Sagawa et al., "Predicting muscle activity and joint angle from skin shap," in Proc. Eur. Conf. Comput. Vis. (EECV), (Munich, Germany), Sept. 2018, pp. 488-502.

[9] G. Bravo-Illanes et al., "IMU sensor fusion algorithm for monitoring knee kinematics in ACL reconstructed patients," in Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Engineering Med. Biol. Soc. (EMBC), (Berlin, Germany), July 2019, pp. 5877-5881.

[10] J.-B. Chossat et al., "Wearable soft artificial skin for hand motion detection with embedded microfluidic strain sensing," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA), (Seattle, WA, USA), May 2015, pp. 2568-2573.

[11] T. Yamada et al., "A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection," Nat. Nanotech., vol. 6, 2011, pp. 296-301.

[12] E.J. Pino et al., "Wearable EMG shirt for upper limb training," in Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Engineering Med. Biol. Soc. (EMBC), (Honolulu, HI, USA), July 2018, pp. 4406-4409.

[13] https://www.liveathos.com/

[14] https://aihub.or.kr/aidata/34109

[15] Y. Lan et al., "The impact of shoulder abduction loading on volitional hand opening and grasping in chronic hemiparetic stroke," Neurorehabil. Neural Repair, vol. 31, no. 6, 2017, pp. 521-529.

[16] https://www.zebris.de/en/sports/coordination-trained-easily

[17] M.G. Bowden et al., "Promoting neuroplasticity and recovery after stroke: Future directions for rehabilitation clinical trials," Curr. Opin. Neurobiol., vol. 26, no. 1, 2013, pp. 37-42.

[18] R.J. Nudo et al., "Neural substrates for the effects of rehabilitative training on motor recovery after ischemic infarct," Science, vol. 272, no. 5269, 1996, pp. 1791-1794.

[19] M. Kim et al., "Highly sensitive and wearable liquid metal-based pressure sensor for health monitoring applications: Integration of a 3D-printed microbump array with the microchannel," Adv. Healthc. Mater., vol. 8, no. 22, 2019, article no. 1900978.

[20] M. Park et al., "MoS_2-based tactile sensor for electronic skin applications," Adv. Mater., vol. 28, no. 13, 2016, pp. 2556-2562.

[21] 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.

[22] Q. Hua et al., "Skin-inspired highly stretchable and conformable matrix networks for multifunctional sensing," Nat. Commun., vol. 9, 2018, article no. 244.

[23] P. Zhu et al., "Skin-electrode iontronic interface for mechanosensing," Nat. Commun., vol. 12, Aug. 2021, article no. 4731.

[24] Q. Lin et al., "Highly sensitive flexible iontronic pressure sensor for fingertip pulse monitoring," Adv. Healthc. Mater., vol. 9, 2020, article no. 2001023.

[25] https://www.tekscan.com

[26] https://pressureprofile.com