

# 웨어러블 진단 및 재활 응용을 위한 신축성 전자소자 기술

## Stretchable Electronic Devices for Wearable Diagnosis and Rehabilitation Applications

박찬우 (C.W. Park, chanwoo@etri.re.kr)      플렉시블전자소자연구실 책임연구원/실장  
 구재본 (J.B. Koo, kjb0706@etri.re.kr)      플렉시블전자소자연구실 책임연구원  
 이정익 (J.I. Lee, jiklee@etri.re.kr)      실감소자원천연구본부 책임연구원/본부장  
 박형순 (H.S. Park, hyungspark@kaist.ac.kr)      KAIST 기계공학과 교수

### ABSTRACT

As the super-aged society approaches rapidly, the number of people suffering from post-stroke and other neurological disorders is significantly increasing, where prompt and intensive rehabilitation is essential for such people to resume their physical activities in normal daily lives. To overcome the inherent limitations of manual physical therapy, various types of exoskeleton robots are being employed. However, the need of the hour is softer, thinner, lighter, and even stretchable systems for precisely monitoring the motion of each joint without restricting the patients' movements in rehabilitation tasks. In this paper, we discuss the technological trends and current status of emerging stretchable rehabilitation systems, in which sensors, interconnects, and signal-processing circuits are monolithically integrated within a single stretchable substrate attachable to the skin. Such skin-like stretchable rehabilitation devices are expected to provide much more convenient, user-friendly, and motivating rehabilitation to patients with neurological impairments.

**KEYWORDS** 웨어러블, 피부말착형, 재활치료 기기, 신축성 센서, 신축성 전자회로

## 1. 서론

### 1. 신체기능 재활 및 진단기술 개요

의료기술의 발달로 인간의 평균수명이 지속적으로 증가하면서, 단순히 물리적인 수명연장에 그

치는 것이 아니라 신체능력이 취약한 고령 인구층의 삶의 질을 유지시키는 것이 중요한 사회적 요구 사항으로 대두되고 있다. 특히, 초고령화 사회에 빠르게 진입하고 있는 우리나라의 경우[1](표 1 참조), 신경계 또는 근골격계 손상 등으로 인해 신체

\* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2019.J.340505>

\* 이 논문은 2019년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원(No.2017-0-00048, Skintronics를 위한 감각 입출력 패널 핵심 기술 개발)을 받아 수행된 연구임.



표 1 우리나라의 고령인구 비중 추이 (단위: %)

연도	유소년 (0~14세)	생산연령 (15~64세)	고령 (65세 이상)
1995	23.0	71.1	5.9
2000	21.0	71.7	7.3
2005	19.1	71.6	9.3
2010	16.2	72.5	11.3
2015	13.9	72.9	13.2
2016	13.6	72.8	13.6
2017	13.3	71.5	14.2

출처 통계청, 2017년 인구주택총조사.

기능이 원활하지 않아 일상적인 동작을 스스로 수행하기 어려운 뇌병변 및 지체 장애인의 수가 꾸준히 증가하고 있다[2](표 2 참조). 그리하여 환자 당사자들의 삶의 질 저하뿐만 아니라 환자들의 사회 복귀 지연으로 인한 국가 경쟁력 저하, 이들을 치료하고 돌보는 데에 소요되는 경제적 비용 등으로 인한 국가적 부담은 앞으로 더욱 커질 것으로 예측되고 있다.

고령자에게 발생하는 뇌병변 및 지체 장애의 원인 중 가장 높은 비중을 차지하는 것은 뇌졸중으로, 뇌혈관이 막히거나 출혈이 일어나면서 뇌신경 세포가 손상되어 발생하는 질환이다. 국민건강보험공단에서 분석한 결과에 따르면, 우리나라의 뇌졸중 환자는 2011년부터 2015년까지 약 52만 명에서 54만 명으로 증가하였고, 1인당 연평균 진료비가 약 700만 원가량 지출되는 것으로 나타났다[2].

표 2 우리나라의 뇌졸중 진료인원 (단위: 명)

구분	남	여	계
2011	266,935	254,865	521,800
2012	271,444	254,799	526,243
2013	274,482	254,007	528,489
2014	276,382	250,730	527,112
2015	284,319	253,962	538,281

출처 국민건강보험공단 보도자료, 2017. 4. 3.

뇌졸중은 발병 직후 사망률이 크게 높지 않지만 후유증이 상당하여 대부분이 신체장애를 겪게 된다. 발병 후 시간이 지남에 따라 증가하는 사망률을 감소시키기 위해서는 발병 직후부터 적극적인 재활 훈련의 시행이 가장 중요하다. 자신의 의지대로 움직일 수 없는 뇌졸중 환자의 재활치료는 신경 가소성에 바탕을 두고 있다. 이는 많은 양의 반복적이고 집중적인 신체 움직임 훈련을 통해 뇌와 신체의 각 부위 간에 새로운 신경을 연결하는 것으로 발병 초기에 지속적이고 집중적으로 이루어져야만 높은 효과를 볼 수 있기 때문이다.

지금까지의 뇌신경계 환자 재활치료는 주로 병원에서 물리치료사에 의해 1:1로 진행되어 왔다. 하지만, 이러한 방식은 치료진척도의 정량화나 정밀한 피드백이 불가능하며, 과도한 노동력 소모와 전문인력 부족으로 인해 효과적인 재활치료를 수행하기 어렵다는 한계를 지니고 있다.

따라서 보다 편리하고 효율적인 재활치료를 진행하기 위해서는 상시 검진이 가능하고, 환자의 운동기능을 정밀하게 측정하여 개개인에게 적합한 맞춤형 재활훈련 프로토콜을 적용하며, 치료의 효과를 정량적으로 데이터화할 수 있는 재활치료 시스템의 구축이 필요하다. 이를 위한 재활치료 기기는 신체의 각 부위에 가해지는 압력과 관절의 각도 및 움직임, 신체 자세 및 근육 경직도 등을 정밀하게 측정하여 외부로 전송하거나, 훈련 중 환자의 움직임을 정확하게 보조해야 하는 등 ICT 융합기술의 응용이 필수적이라 할 수 있다.

## 2. 정밀 재활치료 기기 발전 동향

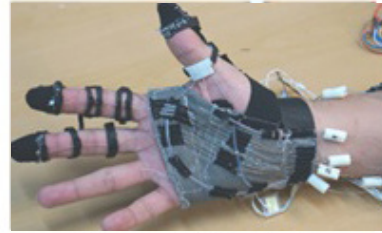
뇌졸중 등으로 저하된 신체기능을 향상시키기 위한 재활치료 기기는 주로 단단한 구조의 외골격 로봇의 형태로 개발되어 왔는데, 운용 방식에 따라

크게 고정형과 착용형으로 나눌 수 있다. 고정형 로봇은 일정 위치에 고정된 상태로 운영되며, 대표적인 제품으로는 Hocoma사(스위스)의 Lokomat<sup>®</sup>, Motorika사(미국)의 ReoAmbulator<sup>™</sup>, REHA Technology사(미국)의 G-EO 등과 같은 하지 재활치료 로봇이나, Hocoma사의 Armeo<sup>®</sup>, Motorika사의 ReoGo<sup>™</sup> 등과 같은 상지 재활치료 로봇을 들 수 있다(표 3 참조). 한편, 착용형 로봇은 외부 전원과의 연결이나 고정기구 없이 독립적으로 장착되므로 환자의 이동이 자유롭다는 특징이 있다. Parker Hannifin사(미국)의 Indego<sup>®</sup>, AlterG사(미국)의 Bionic Leg<sup>™</sup>, Myomo사(미국)의 MyoPro Motion 등이 대표적인 예이다(표 4 참조).

이러한 외골격형 로봇들은 임상적으로 그 효과가 입증되어 일부 병원에서 재활치료에 실제로 활용되고 있다. 하지만 대부분 고가의 중대형 기기로서 한정된 대수만 운용이 가능하여 치료를 받을 수 있는 환자 수와 치료 시간이 제한되고 의료비 부담이 높아진다는 문제점을 지니고 있다. 특히 착용형 로봇의 경우, 재활치료 기기는 일반인이 아닌 환자 중심의 형태와 기능을 가져야 한다는 점을 고려하면 행동이 부자연스럽고 근력이 부족한 환자들을

표 3 외골격 고정형 로봇 재활치료 기기 제품

분류	제품명	기업(국가)
하지재활	Lokomat <sup>®</sup>	Hocoma (스위스)
	ReoAmbulator <sup>™</sup>	Motorika (미국)
	G-EO	REHA Tech. (미국)
상지재활	Armeo <sup>®</sup>	Hocoma (스위스)
	ReoGo <sup>™</sup>	Motorika (미국)



BiomHED II (KAIST)



Rafael 스마트글러브(주)네오팩트)

출처 ITU Pictures, ITU Telecom World 2016 - Innovation Pitch Sessions, 2015, CC BY 2.0, <https://flic.kr/p/ED5QDP>

그림 1 소프트 웨어러블 재활기기의 예

위해 착용 편의성 향상과 경량화가 필수적이다.

최근에는 이러한 외골격형 로봇의 단점을 극복하기 위해 유연하고 가벼운 소재로 이루어진 소프트 웨어러블 재활기기를 구현하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다(그림 1 참조). 미국 Harvard 대학의 Biodesign 연구실에서는 신축성과 밀착력이 우수한 옷감 소재에 각종 센서들을 결합하여 환자 편의성을 높인 하지재활용 Soft Exosuit를 개발하고 있다. 그리고 한국과학기술원(KAIST)의 신경재활공

표 4 외골격 착용형 로봇 재활치료 기기 제품

분류	제품명	기업(국가)
하지재활	Indego <sup>®</sup>	Parker Hannifin (미국)
	Bionic Leg <sup>™</sup>	AlterG (미국)
상지재활	MyoPro Motion	Myomo (미국)

학 연구실에서는 옷감 또는 신축성 고무로 만들어진 장갑에 유연 센서와 와이어들을 장착하여 관절의 자세감지 및 동력전달이 가능한 손 재활용 글러브를 제작하였다. 또한, 국내 기업인 (주)네오팩트에서는 플라스틱과 탄성중합체로 구성된 손 모양의 뼈대에 굽힘, 가속, 각속도, 자기장 센서 및 구동모듈을 장착하여, 손가락, 손목, 아래팔의 움직임 측정하고 결과를 실시간으로 전송할 수 있는 손 재활용 스마트 글러브를 출시, 판매하고 있다.

현재의 소프트 웨어러블 재활기기들은 기존의 외골격형 로봇에 비해 매우 가볍고 착용이 편리하며 비용 부담이 적어, 환자 스스로 손쉽고 장기적인 반복훈련이 가능하다는 장점을 지닌다. 하지만, 이들 기기들은 개별적인 센서와 동력 모듈들이 유연한 골격에 물리적으로 장착된 형태로서 여전히 상당한 두께와 부피를 가지며, 센서의 기능이 거시적인 관절의 구부림이나 힘을 측정하는 수준에 머물러 있다. 하지만, 다양한 자유도를 가지는 관절 부위의 미세한 움직임을 정밀하고 재현성 있게 측정하기 위해서는 반복동작 중에도 피부와 센서부가 완전한 밀착상태를 유지하는 것이 필요하다. 또한 기기 착용이 환자 동작에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 모든 구성요소들이 신축성을 가지며, 초박형으로 일체화된 구조를 가지는 것이 바람직하다. 따라서 앞으로의 재활치료 기기의 기술발전 방향은 외골격 고정형 로봇, 착용형 로봇, 소프트 웨어러블 형태를 거쳐 궁극적으로는 신축성, 초박형, 초경량화의 방향으로 진화할 것으로 예측된다.

## II. 피부밀착 신축성/초박형 재활기기 관련 요소기술 동향

앞서 논의하였듯이, 정밀 재활치료를 위한 피

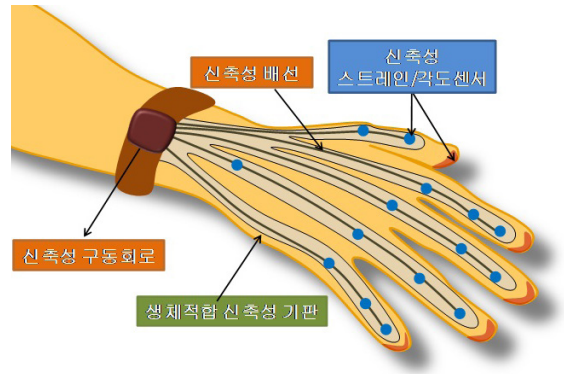


그림 2 피부밀착형 신축성 재활치료 기기 개념도

부밀착 신축성 초박형/초경량 재활기기는 환자의 반복적인 훈련 동작 중에도 관절이나 근육과의 상대적인 위치가 일정하게 유지되어야 하며, 환자가 기기의 착용을 거의 느끼지 못하고 동작할 수 있을 정도로 얇고 가벼워야 한다. 또한 탈부착이 용이하고, 반복적인 소독이나 세척에도 견딜 수 있어야 하며, 신체 각 부위의 움직임 및 자세 데이터 간의 간섭이 없어야 한다. 또한, 자체 전원과 무선 데이터 통신 모듈을 갖추어 외부 장치와의 직접적인 연결 없이도 기능을 수행할 수 있어야 할 것이다. 그림 2는 이러한 요구사항들을 바탕으로 나타난 피부밀착형 신축성 재활기기의 개념도와 이를 구현하기 위한 핵심 요소기술들을 보여준다.

### 1. 신축성 배선 기술

기판이 늘어나더라도 전기 전도특성이 유지되는 신축성 배선은 신축성 전자회로의 가장 핵심적인 요소라 할 수 있다. 현재까지 개발된 대부분의 신축성 전자회로 기술은 기능성 소자들(트랜지스터, 다이오드, 저항, 센서)을 기판 내 변형되지 않는 영역에 위치시키되, 이들 사이를 신축성 배선으로 연결함으로써 신축특성을 구현하는 방식을 사용하고

있기 때문이다[3]. 신축성 배선을 구현하는 대표적인 접근 방법으로는 두 가지가 있다. 그 중 하나는 탄소나노튜브, 그래핀, 금속 나노와이어 등과 같은 전도성 나노소재와 신축성 고분자가 혼합된 신축성 복합 전도소재를 이용하는 것이다[4]. 신축성 복합 전도소재는 사용되는 소재의 종류와 함량에 따라 다양한 특성을 얻을 수 있고 스크린 프린팅이나 잉크젯 등의 방법으로 대면적 기판에도 손쉽게 배선을 형성할 수 있다는 장점을 가진다. 하지만 순수한 금속 박막에 비해 전기전도도가 낮고, 정확한 정렬 및 미세 패터닝이 어려우며, 신축 시 저항값이 변화하므로 정밀한 고집적 전자회로에는 사용이 힘들다.

또 다른 방법은 보통의 전자회로와 마찬가지로 배선을 금속 박막으로 형성하되, 배선 형태를 직선이 아닌 꼬불꼬불한 serpentine 구조로 만드는 것이다[5]. 이 경우, 포토리소그래피와 식각 등 반도체 공정을 거쳐야 하므로 공정 단가가 높고 신축성 복합 전도체에 비해 신축능과 내구성이 떨어진다. 단점을 가진다. 하지만, 기존의 반도체 소자공정과 동일한 방식을 사용하므로 소자와 배선이 일체화된 신축성 박막 회로의 구현이 가능할 뿐만 아니라, 배선이 변형되더라도 저항값이 일정하게 유지된다.

피부밀착 신축성 재활기기의 경우, 관절의 각 부위에 위치하는 센서들이 신축성 배선을 통해 구동회로와 연결되며, 관절의 움직임이나 외력에 의한 센서부의 물리적 변형이 전기적 신호로 변환된다. 이때 센서부와 함께 변형되는 주변 배선들에 의한 신호간섭과 왜곡현상을 방지하려면 기판이 늘어나더라도 배선부의 전기적 특성은 일정하게 유지되는 것이 중요하다. 따라서 피부밀착 신축성 재활기기에는 변형이 일어나도 저항이 일정하게 유지되며, 초박형으로 일체화된 배선 형성이

가능한 serpentine 구조 방식이 보다 적합할 것으로 생각된다.

## 2. 신축성 스트레인/각도 센서 기술

신축성 스트레인 센서는 외부 인장력에 의한 길이 변화율을 전기적으로 측정하기 위한 소자이다. 신체의 각 부위가 구부러지거나 회전할 때도 관절 주변의 피부가 늘어나거나 수축하므로, 신축성 스트레인 센서를 관절 부근에 적절히 배치하면 관절이 구부러진 각도나 각 관절 간의 상대적인 위치 변화 등을 정량적으로 측정할 수 있다. 신축성 스트레인 센서를 구현하는 가장 대표적인 방법은 신축성 배선에서와 마찬가지로 은 나노와이어[6], 탄소나노튜브[7], 그래핀 조각[8] 등과 같은 전도성 나노 구조체 filler와 신축성 소재를 혼합한 복합 소재를 이용하는 것이다. 하지만 낮고 안정적인 저항값이 요구되는 신축성 배선에서와는 달리, 스트레인 센서 응용을 위해서는 적은 변형에서도 저항변화율이 커질 수 있도록 소재의 조성 및 형태, 구조 등이 특화되어야 한다. 이 방식은 신축에 따른 매질 내 나노 구조체의 배열 및 구조체 간 접촉면적 변화를 이용하므로 신축능과 감도가 높다. 하지만 신축이 반복됨에 따라 나노 구조체 간 혹은 나노 구조체와 신축성 매질 간 계면의 물리적 상태가 비가역적으로 변화하므로 반복 신축에 대한 신뢰성과 재현성이 취약하다는 단점을 가지고 있다. 또한 동일한 특성을 가지는 센서를 대량으로 생산하기 위해서는 나노 구조체의 혼합 및 분산 균일도나 도포 공정의 일관성을 잘 유지하여야 한다.

한편, 최근에는 전도성 복합소재 대신 상온에서 액체 상태로 존재하는 갈륨 기반의 액체금속을 이용한 신축성 스트레인 센서에 대한 연구가



활발히 진행되고 있다[9]. 신축성 매질로 둘러싸인 액체금속 채널은 기존의 고체 복합소재와는 달리 신축능이 무한대에 가깝고 반복신축에 따른 신뢰성 저하문제가 없다는 장점을 지닌다. 하지만 전도성 복합소재에 비해 패턴 두께나 선폭을 일정하게 제어하기가 어렵고, 스트레인에 따른 저항 변화율이 작으며, 사용 온도범위가 한정된다는 단점이 있다.

일본 AIST에서는 일정한 방향으로 정렬된 미세 구조를 가지는 탄소나노튜브를 이용하여 밴드형태의 스트레인 센서를 제작하였다. 이는 기판의 신축에 따라 나노튜브 박막이 물리적으로 찢어지거나 벌어지면서 생기는 저항변화를 이용한 것으로 무릎 및 손가락 관절의 간단한 동작들을 감지할 수 있음을 보였다[7]. 한편 미국 하버드 대학에서는 임베디드 3D 프린팅이라는 새로운 기술을 이용하여 전도성 잉크를 신축성 매트릭스 내에 일체형으로 함몰시킨 스트레인 센서를 제작하였다. 이 기술은 하나의 신축성 기판 내에 여러 층 센서들을 포함시키는 것이 가능하다[10]. 또한 도쿄이과대학에서는 갈륨-인듐계 액상금속을 이용하여 50% 이상의 신축율과 안정적인 저항변화율을 갖는 신축성 스트레인 센서를 개발하였다. 이는 손가락의 여러 관절에 걸쳐 부착된 하나의 센서 패턴상에서 변형량의 분포를 측정하여 국부 변형과 다양한 손 동작을 구분할 수 있음을 보였다[9].

현재까지 개발된 신축성 스트레인/각도 센서들의 경우, 신축성 기판 내에 형성되는 센싱부는 피부 밀착형으로 구현이 가능하지만, 센서와 외부 구동보드를 연결하는 배선으로는 신축성 기판과 따로 분리된, 신축성이 없는 일반 전도성 와이어를 사용한 경우가 대부분이다. 하지만, 환자의 착용 편의성을 위해서는 센서뿐만 아니라 연결 배선도 신축성을 가지며 기판 내에 함께 내재되어 있는 일

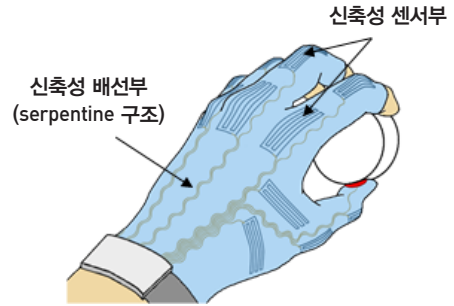


그림 3 신축성 센서-배선 일체형 구조 개념도

체형 구조가 바람직할 것이다. 일체형 구조에서는 관절 움직임에 따라 센서와 연결 배선이 모두 변형을 겪는다. 앞서 언급한 바와 같이 센서 신호의 왜곡이나 노이즈 발생을 최소화하기 위해서는 신축에 따른 저항 변화가 없는 serpentine 구조의 배선을 사용하는 것이 바람직하다(그림 3 참조).

### 3. 신축성 전자회로 기술

기존의 웨어러블 재활치료 기기에서는 센서를 구동하고 신호를 처리하기 위한 구동/신호처리 모듈을 딱딱한 PCB 기판상에 제작하여 장착하는 방식을 사용해왔다. 하지만 피부밀착형 재활치료기를 구현하기 위해서는 구동/신호처리부 또한 신축성 기판상에 센서, 배선 등과 함께 일체형으로 제작하는 기술이 필요하다.

신축성 전자회로 기술은 지난 십 수년간 활발히 연구되어 온 분야이며, 트랜지스터, 센서, 발광소자 등으로 구성된 다양한 용도의 신축성 전자회로들이 개발되어 왔다[11]. 특히 모든 회로의 핵심이 되는 트랜지스터의 경우, 실리콘, 산화물, 유기반도체, 탄소나노튜브, 그래핀 등 다양한 소재를 활용한 박막트랜지스터들이 요구 성능과 목적에 맞게 활용되고 있다. 그러므로 재활치료 기기용 구동/신호처리 회로는 비교적 고성능과 높은 신뢰성

이 함께 요구되므로 실리콘이나 산화물 반도체 기반의 박막트랜지스터가 적합하다.

신축성이 없는 소재의 박막트랜지스터를 피부 밀착형 신축성 전자회로에 사용하기 위해서는 앞서 언급한 바와 같이 국부적으로 변형이 되지 않는 폴리이미드 island 영역에 트랜지스터를 위치 시키되, 이들 사이를 신축성 serpentine 배선으로 연결하는 방식이 주로 사용되고 있다[12]. 미국 일리노이 대학의 Rogers 그룹이나 서울대학교 김대형 교수 그룹에서는 SOI 웨이퍼로부터 떼어낸 얇은 단결정 실리콘 나노박막을 기반으로 하여 기존의 bulk 실리콘 회로와 유사한 수준의 고성능 신축성 회로를 개발해 왔다. 특히, J. Kim은 실리콘 단결정으로 이루어진 스트레인, 압력 센서 외에 온도, 습도 센서 및 히터까지 함께 적층하여 불규칙한 곡면을 가지는 손 모양에 완전히 밀착된 형태를 구현함으로써 로봇의 soft skin이나 의수 등과 같은 피부밀착형 기기의 상용화 가능성을 제시하였다[13]. 단결정 실리콘 나노박막을 이용한 신축성 전자회로 기술은 소자 성능과 동작 신뢰성이 우수한 반면, 공정이 다소 복잡하고 SOI 웨이퍼를 사용하므로 비용이 많이 든다는 단점이 있다.

한편 그림 4는 산화물 반도체 박막트랜지스터를 이용한 신축성 회로의 예를 보여준다. 산화물 반도체 박막트랜지스터는 저온 제작이 가능하고, 채널 이동도가 높으며, 누설 전류가 작고 동작 신뢰성이나 균일도가 높아 플렉시블 센서나 디스플레이 등에 널리 활용되고 있다[14]. 산화물 반도체 박막은 일반적인 스퍼터링(Sputtering) 공정 등에 의해 증착이 가능하므로 단결정 실리콘 나노박막트랜지스터에서와 같은 채널층 전사 단계가 불필요하여 저비용으로 대면적 구현이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 현재 한국전자통신연구원

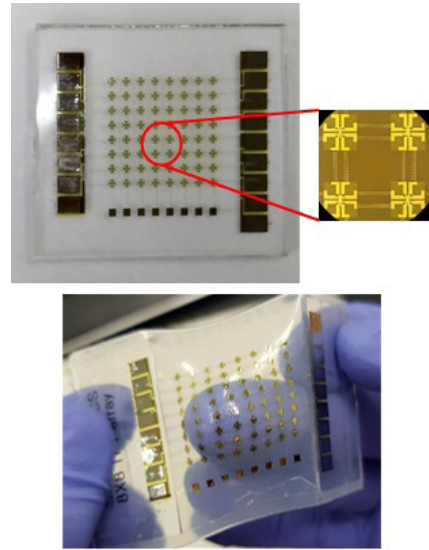


그림 4 신축성 산화물 반도체 TFT 어레이(한국전자통신연구원)

(ETRI)에서는 피부밀착형 재활치료 기기에 활용이 가능한 기술로서 고해상도 감각 입출력 전자피부, 뇌파 감지 및 자극용 전극 어레이 등 다양한 피부밀착/인체삽입형 소자의 구동과 신호처리를 위한 신축성 산화물 박막트랜지스터 회로를 개발 중에 있다.

#### 4. 고접착성 생체적합 기판 소재 기술

신체 동작에 따라 반복적인 변형에 노출되는 피부밀착형 재활치료 기기의 동작 신뢰성을 높이고 안정적인 신호를 얻기 위해서는 신축성 기판과 피부 사이에 강한 접착력이 있어야 하며, 반복적인 탈부착에 따른 접착력 저하가 없고 생체적합성이 우수하여야 한다. 현재 신축성 전자회로의 기판으로 주로 사용되는 소재는 PDMS(Polydimethylsiloxane)라는 실리콘 계열의 소재이다. 이는 피부에 비해 탄성 모듈러스가 크고 신축력이 떨어지며 접착력이 낮아 운동량이 많은 관절 부위에는 적용하기가 어렵다. 따라서 기

존 신축성 기관 소재의 한계를 극복하고 보다 안정적인 피부 접착력을 제공할 수 있는 피부친화성 고강도 접착물질을 개발하려는 노력이 계속되고 있다. 스웨덴 옘살라 대학에서는 PDMS에 PEIE (Polyethylenimine)이라는 고분자를 소량 첨가하여 신축성과 softness, 피부 접착성을 모두 높일 수 있는 방법을 제안하였다. 이들은 기존의 PDMS에 비해 탄성 모듈러스가 수십 배 감소하고 피부와의 접착력 또한 열 배 이상 증가하며, 수 일간 피부에 부착하여도 부작용이 나타나지 않음을 확인하였다[15]. 한편, KAIST에서는 실크 고분자를 이용하여 피부밀착형 전자회로를 위한 고접착력 신축성 생체적합접착제를 개발하였다. 일반적인 실크 소재는 높은 생체적합성에도 불구하고 단단하고 불투명한 특성을 가져 신축성 접착제로의 활용이 불가능하다. 하지만 소량의 칼슘이온으로 강한 점탄성을 유도하면 반복 탈부착이 가능하고 피부 부작용 없이 장기간 부착할 수 있는 접착 특성을 얻을 수 있다[16].

하지만, 피부밀착형 재활치료 기기용 기관 및 보호 소재에 대해서는 피부 접착력과 생체적합성 외에도, 피부의 땀 흡수나 통기성 유지, 반복적인 세척이나 소독에 대한 내구성, 스크래치 등 외부 손상에 대한 저항성, 햇빛이나 고온에의 장시간 노출에 따른 경화 방지 등 다양한 기술적 이슈들이 있으므로, 이를 해결하기 위한 새로운 소재의 개발이 병행되어야 한다.

## 5. VR/AR 기반의 재활 콘텐츠

재활훈련의 효과를 높이기 위해서는 기존에 물리치료사에 의해 이루어졌던 반복적이고 지루한 훈련이 아닌, 환자의 동기부여를 극대화하고 자발적이고 지속적인 참여를 유도할 수 있는 새로운 치



그림 5 가상현실 기반 재활치료 개념도

료방식의 도입이 필요하다. 이를 위해 최근에는 재활치료 기기와 가상현실 기반 인터페이스를 연동함으로써 마치 게임을 하듯이 환자들의 흥미를 유발할 수 있는 재활치료 기법이 운동, 작업, 인지, 신경치료 등 다양한 영역에 적용되고 있다. 예를 들어, 캐나다의 IREX라는 제품은 게임을 즐기고 있는 환자의 동작을 인식하여 환자의 단일 관절에서부터 전체적인 신체 기능까지 검진할 수 있는 쌍방향 가상현실 재활치료 프로그램이다. 이는 환자들은 가상현실에 몰입하여 날아오는 물체를 막거나, 가상현실 안을 탐험하기도 하고, 가상의 교사와 상호 작용을 하면서 자신들이 진단과 치료를 받고 있다는 것조차 잊고 더 적극적으로 반응할 수 있다. 한편, 국내 업체인 (주)네오팩트와 (주)사이버메딕 등에서도 손 재활용 웨어러블 기기와 연동하여 환자의 상태에 맞는 맞춤형 훈련과 흥미 유발, 몰입감 유지를 위한 가상현실 게임 콘텐츠들을 개발하고 있다(그림 5 참조).

가상/증강 현실과 연동된 다양하고 효과적인 재활훈련 콘텐츠 개발을 위해서는 무엇보다 신체의 자세와 동작을 보다 정량적으로 정밀하게 재현할 수 있는 웨어러블 센서 시스템의 개발이 우선되어야 한다. 따라서 피부밀착형 유연/신축성 재활치료 기기의 개발은 향후 다양한 소프트웨어 재활훈



런 콘텐츠 발굴을 가능하게 하고, 이들과 결합하여 상용화 및 관련 분야의 시장 선점 가능성을 더욱 높일 수 있을 것이다.

### III. 결론

고령화로 인해 뇌신경 질환 발병 및 장애 유병률이 급증하고 환자들이 적절한 치료를 받지 못한 채 여러 기관을 전전하는 재활난민 현상이 사회문제화되면서, 보다 많은 환자들에게 집중적이고 효과적인 재활치료를 제공할 수 있는 신개념 재활치료 기기에 대한 요구는 날이 높아지고 있다. 따라서 유연 전자소자 기술을 적용한 피부밀착형 진단 및 재활치료 기기는 저출산, 고령화 시대의 국민 건강 및 삶의 질 향상을 위해 우선적으로 추진되어야 할 대표적 공공기술에 속한다고 할 수 있을 것이다. 하지만, 다품종 소량의 특성을 가지는 고난이도 융합기술로서 민간 주도만으로는 빠른 발전을 기대하기 어려우며, 산-학-연 간의 긴밀한 협력관계를 통해 기초 소재부터 소자 및 공정, 소프트웨어 콘텐츠 등 ICT 전반에 걸친 기술 개발과 이들 간의 융합이 필수적으로 이루어져야만 한다. 또한, 인증절차 등 실제 시장진입까지 많은 시간과 노력이 소요되는 의료기기의 특성을 감안하면, 단기적인 기술 개발 전략뿐만 아니라 관련 법규나 규정 등에 대한 정부차원의 논의와 보완이 필요하다. 한편, 신축성 웨어러블 재활치료 기기에 사용되는 각각의 요소기술들은 개인 헬스 모니터링, 스마트 로봇, 가상/증강현실, 엔터테인먼트, 차세대 UI 등 다양한 분야에 독립적으로 활용되어 타 산업으로의 파급효과가 클 것으로 기대된다.

#### 용어해설

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

**신축성 전자회로 기술** 딱딱한 기판 위에 제작되는 일반적인 전자회로와는 달리, 구부러지거나 길이가 늘어나더라도 기능을 유지하는 새로운 전자회로 기술

**박막트랜지스터** 진공증착 등의 방법으로 형성된 박막을 이용하여 만들어진 트랜지스터. 실리콘 웨이퍼와는 달리 저온공정 및 대면적 구현이 가능하여 디스플레이 등에 주로 쓰임

#### 약어 정리

AR	Augmented Reality
ICT	Information & Communication Technology
PCB	Printed Circuit Board
PDMS	Polydimethylsiloxane
PEIE	Polyethylenimine
SOI	Silicon-On-Insulator
VR	Virtual Reality

#### 참고문헌

- [1] 한겨레, “고령사회’ 진입한 한국...일본보다 7년 빨라,” 2018. 8. 27.
- [2] 국민건강보험공단 보도자료, “뇌졸중 환자의 5명 중 4명은 60세 이상,” 2017. 4. 3.
- [3] S. P. Lacour et al., “Stiff subcircuit islands of diamondlike carbon for stretchable electronics,” *J. Appl. Phys.*, 2006, 014913.
- [4] T. Araki et al., “Printable and Stretchable Conductive Wirings Comprising Silver Flakes and Elastomers,” *IEEE Electron Device Lett.*, 2011, 1424.
- [5] R. Verplancke et al., “Thin-film stretchable electronics technology based on meandering interconnections: fabrication and mechanical performance,” *J. Micromech. Microeng.* 2012, 015002.
- [6] M. Amjadi et al., “Highly Stretchable and Sensitive Strain Sensor Based on Silver Nanowire-Elastomer nanocomposite,” *ACS Nano*, 2014, 5154.
- [7] T. Yamada et al., “A stretchable carbon nanotube strain sensor

- for human-motion detection," *Nature Nanotech.*, 2011, 296.
- [8] Y. R. Jeong et al., "Highly Stretchable and Sensitive Strain Sensors Using Fragmentized Graphene Foam," *Adv. Funct. Mater.*, 2015, 4228.
- [9] R. Matsuzaki et al., "Highly Stretchable, Global, and Distributed Local Strain Sensing Using GaInSn for Wearable Electronics," *Adv. Funct. Mater.*, 2015, 3806.
- [10] J. T. Muth et al., "Embedded 3D Printing of Strain Sensors within Highly Stretchable Elastomers," *Adv. Mater.*, 2014, 6307.
- [11] J. H. Ahn et al., "Stretchable electronics: materials, architectures and integrations," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2012, 103001.
- [12] D.-H. Kim et al., "Ultrathin Silicon Circuits With Strain-Isolation Layers and Mesh Layouts for High-Performance Electronics on Fabric, Vinyl, Leather, and Paper," *Adv. Mater.*, 2009, 3703.
- [13] J. Kim et al., "Stretchable silicon nanoribbon electronics for skin prosthesis," *Nature Commun*, 2014, 5747.
- [14] E. Fortunato et al., "Oxide Semiconductor Thin-Film Transistors: A Review of Recent Advances," *Adv. Mater.*, 2012, 2945.
- [15] S. H. Jeong et al., "PDMS-Based Elastomer Tuned Soft, Stretchable, and Sticky for Epidermal Electronics," *Adv. Mater.*, 2016, 5830.
- [16] J.-W. Seo et al., "Calcium-Modified Silk as a Biocompatible and Strong Adhesive for Epidermal Electronics," *Adv. Mater.*, 2018, 1800802.