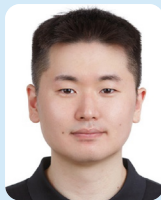


스마트 웨어러블 소재와 기기 연구 및 개발 동향



임수환

- 2022. 건국대학교 화학공학부 학사
- 2022-현재, 건국대학교 재료공학과 석사과정



신지호

- 2023. 건국대학교 화학공학부 학사
- 2023-현재, 건국대학교 재료공학과 석사과정



이위형

- 2005. 포항공과대학교 화학공학과 학사
- 2010. 포항공과대학교 화학공학과 박사
- 2011-2012. 텍사스오스틴대학교 박사후 연구원
- 2012-현재, 건국대학교 화학공학부 교수

1. 서 론

스마트 웨어러블(smart wearable) 소재는 최근 기술의 발전과 함께 주목받는 핵심 부분 중 하나다. 특히, 이러한 소재는 전통적인 의류 소재와는 다르게 전도성 또는 반도체성 유연 소재를 활용하여 전기적, 기계적 또는 광학적 센서 등의 기술을 통합하여 착용자의 활동이나 건강 상태를 모니터링하고 향상시킬 수 있다. 웨어러블 의류용 소재에 이러한 소재를 활용하는 이유는 착용자의 생활을 보다 스마트하게 만들고, 건강 관리를 개인화하며, 다양한 분야에서 혁신적인 서비스를 제공할 수 있기 때문이다. 이에 스마트 웨어러블 소재는 미래지향적인 섬유 소재로 앞으로 전기전자, 기계, 화학공학, 재료공학, 의학 등의 다양한 분야와 접목되어 연구될 수 있는 융복합적인 소재라고 할 수 있다.

스마트 웨어러블 소재의 장점은 다양하다. 이러한 소재는 유연하고 착용감이 좋아서 착용자의 편의성을 높일 뿐만 아니라, 실리콘 등의 전통적인 반도체 기반 전자 소자의 한계를 뛰어넘는 성능을 제공한다. 물론 실리콘 기반 반도체 소자의 이동도, 스위칭 속도 등의 성능을 따라갈 수는 없지만, 실리콘 소자가 지니지 못한 다른 많은 장점을 가지고 있다. 또한, 스마트 센서 기술과 결합하여 착용자의 건강 상태나 환경 변화를 즉각적으로 모니터링할 수 있는 기능을 제공하기도 한다. 이러한 장점들을 통해 스마트 웨어러블 소재는 헬스케어, 스포츠, 엔터테인먼트 분야 등에서의 응용 가능성이 무한하다.

이러한 소재는 주로 건강 모니터링, 환경 감지, 개인 맞춤형 패션 및 편의성 제공 등 다양한 분야에 활용될 수 있다. 건강 모니터링 측면에서는 신체 활동, 심박수, 수면 패턴 등을 실시간으로 모니터링하여 개인 맞춤형 헬스케어가 가능하다. 환경 감지 기술을 통해 화재나 유독 가스와 같은 위험 요소를 감지하여 안전을 보장

하고, 스마트 의류 등을 통해 온도 조절 기능을 갖춘 제품들이 개발되어 사용자의 생활을 더욱 편리하게 영위할 수 있는 기회를 제공한다. 이처럼 스마트 웨어러블 소재는 다양한 분야에서 혁신을 가져오며, 앞으로 더욱 많은 응용 가능성이 기대된다.

본 고에서는 전도성 웨어러블 소재에서부터 시작하여 에너지 하베스팅, 센서 등의 최근 기술에 대해 소개하고 건강 모니터링, 환경 감지, 패션 등의 웨어러블 기기의 용도에 대해 소개하고자 한다.

2. 스마트 웨어러블 소재 및 기술

2.1. 스마트 웨어러블 소재

최근 일상생활에서 유연한 웨어러블 전자소자의 개발이 눈에 띄게 증가하고 있다[13]. 기존의 고성능 전자소자들은 주로 무거운 무기재료, 예를 들어 실리콘으로 제작되었다. 이러한 유연하지 않은 전자소자들의 한계를 넘어서기 위해 의류처럼 착용 가능한 형태의 전자소자가 점차 발전해 가고 있다. 이러한 발전을 위해서는 유연한 전도성/반도체성 소재의 개발 뿐만 아니라 유연한 형태의 소자를 개발하기 위한 공정 또한 중요하다[1].

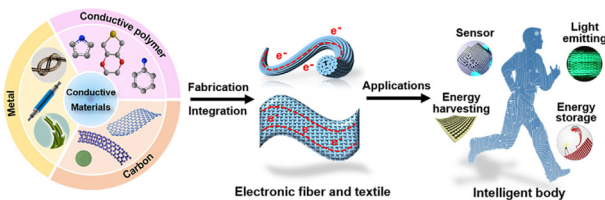


Figure 1. An overview showing the field of electronic fibers/textiles, including the conductive materials, the structures and properties, and their applications in wearable electronics for intelligent body [2].

현재 디스플레이와 다양한 전자 소자에 사용되는 indium tin oxide(ITO) 투명 전극은 반복적인 구부림과 같은 물리적 자극에 약해 이를 대체할 수 있는 유연한 전도성 전극 소재에 대한 수요가 증가하고 있다. 높은 전도성과 투명성을 겸비한 소재 중에서는 은 나노와이어(AgNWs)가 활발히 연구되고 있다. ITO에 비해 비교적 간단한 롤투롤(roll-to-roll) 공정으로 제작될 수 있는 AgNWs는 비용 절감은 물론, 더 높은 전도성을 제공한다[3]. AgNWs로 제작된 투명전극 활용을 위해서는 고분자 기판 위에 제조된 AgNWs간 물리적 접촉을 촉진하기 위

한 연구가 필요하다. Kim et al.은 열처리를 통해 나노와이어를 정렬하여 고분자 기판에 밀착시키고 표면 거칠기를 줄여 AgNWs의 품질을 크게 향상시켰다[4]. 또한 Yu et al.은 은(Ag)과 황(S)의 강한 결합을 이용하여 nanofibrillated cellulose(NFC-HS)기판 위에 AgNWs/NFC-HS 투명전극을 제작하였고, 이 필름은 500회 이상의 굽힘(bending) 사이클에도 전하는 내구성을 보여주었다.

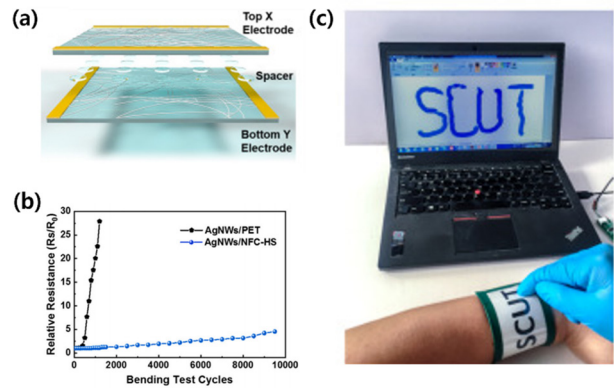


Figure 2. (a) Schematic illustration of the structure of f-TSP device using AgNWs/NFC-HS as its top and bottom TCEs. (b) A plot of relative resistance vs. bending test cycles of AgNWs/PET and AgNWs/NFC-HS. (c) After more than 500 bending cycles, the TSP still has high touch sensitivity and reliability at bent [5].

전도성 금속 잉크젯 프린팅은 재료의 낭비를 줄이면서 원하는 부위에만 전도성 코팅을 적용할 수 있는 기술로 전도성 섬유 코팅에 주로 사용되고 있다. 특히 은 나노입자(Ag nanoparticles, AgNPs)는 이미 많은 연구가 진행되어 온 소재이다. Karim et al.은 잉크젯 프린팅을 활용해 graphene-Ag 복합 전도성 잉크를 직물에 코팅하고, 소량의 Ag를 사용함으로써 비용을 절감하고 고성능의 e-textile을 제작하였다[6].

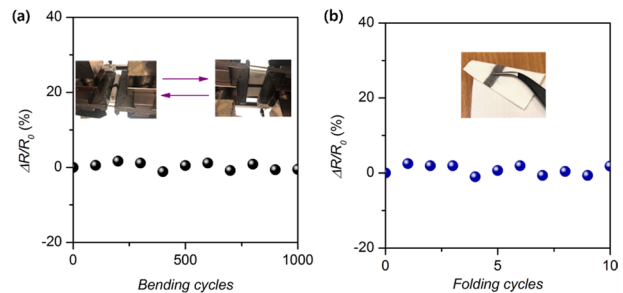


Figure 3. Change in electrical resistance of printed graphene-silver composite for wearable electronic-textile: (a) under bending for 1000 times; (b) under folding-releasing for 10 times [6].

Carbon nanotube(CNT)는 전기 전도성이 높은 탄소 동소체로, 가벼우면서도 높은 강도와 유연성을 요구하는 웨어러블 소재로 적합하다. 또한 전도성 고분자와의 복합체로 제작될 경우, 장기적인 내구성과 더욱 유연한 소재를 개발할 수 있다. 최근 Shin et al.은 poly(vinyl alcohol)(PVA)을 매트릭스로 사용하고 AgNB(Ag nanobelt)/MWCNT(Multi-walled carbon nanotube)를 필러로 활용하여 PVA/AgNB/MWCNT 고전도성 섬유를 제작, 1356 S/cm의 전기 전도성을 달성하였다[7].

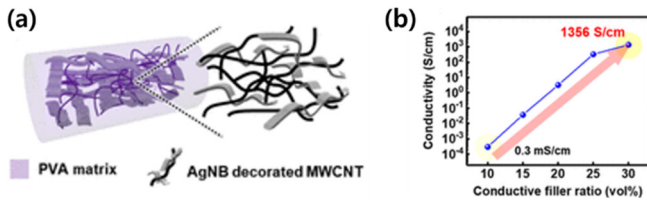


Figure 4. (a) Schematic of conductive fibers with PVA matrix and AgNB/MWCNT. (b) Relationship between electrical conductivity of as-spun fibers and conductive filler fraction [7].

전통적인 전도성 고분자로 알려진 polypyrrole(PPy), polyaniline(PANI), poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonic acid)(PEDOT:PSS) 등은 다양한 분야에서 사용되고 있다. PEDOT:PSS는 CaCl₂ 수용액을 사용하여 수미터 길이의 전도성 섬유를 얻을 수 있으며, 슈퍼캐패시터의 전극으로도 활용될 수 있다[8]. 그러나 낮은 기계적 성질로 인해 전도성 고분자만을 이용한 섬유 제작이 어렵다. 따라서 CNT와 같은 탄소 기반 섬유와 함께 복합체로 주로 사용된다[9]. Shuai et al.은 이온 전도성 고분자를 활용하여 하이드로겔(hydrogel) 섬유로 제작하여 우수한 인장강도 및 신축성, 자기 치유 성질(self-healing)을 가지는 스마트 소재를 개발하였다. 연구진은 acrylamide(AAm)와 N-acryloyl glycylglycinamide(NAGA)의 함량을 조절하여 물리적으로 가교된 poly(NAGA-co-AAm) (PNA) 하이드로겔 전구체를 개발하여 spinning을 통해 전도성 하이드로겔 섬유를 제조하였다[10].

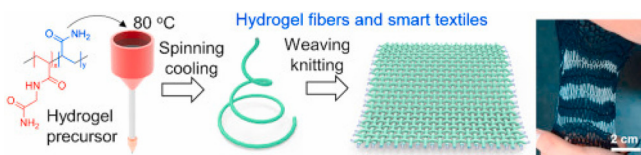


Figure 5. Schematic illustration of making hydrogel fibers and smart textiles [10].

2.2. 에너지 하베스팅 기술

에너지 하베스팅 기술은 주변 환경에서 열, 진동, 빛 등의 에너지를 채취하여 전기 에너지로 변환하는 혁신적인 기술이다. 현재 웨어러블 기술에 사용되는 배터리는 크기가 크고 별도의 공간을 필요로 하며 사용 시간에 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 에너지 하베스팅에 대한 연구는 필수적이다. 웨어러블 기기에 사용될 수 있는 에너지 생성 방법은 웨어러블 기기 착용자의 모션으로 인한 일상 생활에서 발생할 수 있는 에너지를 활용하는 것이다. 이를 위해 직물에 코팅된 연료감응형 태양전지(dye-sensitized solar cells, DSSCs)나 섬유 마찰전기를 활용한 나노 발전기(triboelectric nanogenerator, TENG) 기술에 대한 연구가 진행되고 있다.

연료 감응형 태양전지는 유기 염료 분자를 활용해 빛을 흡수하고, 염료의 전자가 여기상태로 전환되어 TiO₂로 이동함으로써 전기를 생산한다. DSSCs는 제작이 간단하며 유연한 기판 위에 제작 가능하고 다양한 색상으로 제작될 수 있는 장점을 가진다. 특히 Liu et al.의 연구에서는 유리섬유 직물 위에 폴리이미드(polyimide, PI) 층을 스크린 프린팅하여 표면의 거칠기를 줄이고 TiO₂ 층의 두께를 감소시켜 저항을 줄임으로써, 전지 효율을 4.04%까지 향상시켰다. 이는 유연하고 경량인 직물 기반 태양전지 중에서는 비교적 높은 효율을 나타낸다[11].

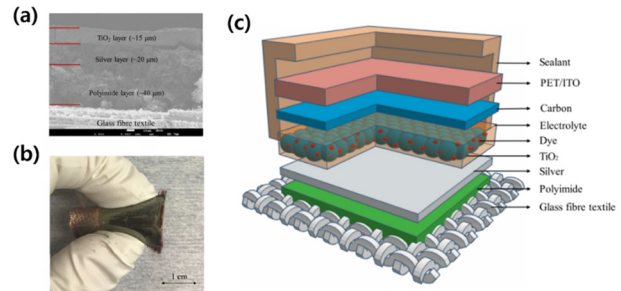


Figure 6. (a) FESEM image of DSSC fabricated on liquid polyimide-coated glass fiber textile. (b) Photograph of glass textile device with the PET/ITO top electrode. (c) Schematic showing the DSSCs using PET/ITO electrode as a top electrode [11].

TENG은 마찰전기 효과와 전기기계적 변환을 결합하여 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 혁신적인 기술이다. 이 기술은 두 가지 서로 다른 재료가 접촉하고 분리될 때 발생하는 전하 이동을 활용한다. 이 과정에서 한 재료는 전자를 잃어 양전하를 띠게 되고 다른 한 재료는 전자를 얻어 음전하를 띠게 되어, 이로 인해 생성된 전위차를 이용해 전기를 생산하게 된다. TENG의 가장 큰 장점은 인간의 움직임, 바람과 같

은 다양한 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환할 수 있다는 것이다. Xiong et al.의 연구에서는 PET 직물 위에 흑린(black phosphorus, BP)을 코팅하여 피부 접촉 시 발생하는 마찰 에너지를 이용한 TENG을 제작하였다. 이 TENG은 접히거나 비틀리거나 늘어나는 등의 물리적 변형을 겪어도, 심지어 72시간 동안 세탁 후에도 전류 변화가 없었다. 이러한 결과는 미세한 비자발적 마찰에서도 전기를 수확할 수 있는 장기적인 내구성을 가진 직물 기반 TENG을 개발했다는 것을 의미한다[12].

이러한 연구는 웨어러블 기술, 특히 지속 가능한 에너지 지원이 필요한 분야에서 큰 가능성을 보여준다. TENG 기술을 이용하면 사용자의 일상적인 움직임만으로도 충분한 에너지를 생산하여 웨어러블 기기를 지속적으로 작동시킬 수 있게 된다. 이는 배터리 교체 빈도를 줄이고 웨어러블 기술의 사용성과 편의성을 크게 향상시킬 수 있는 길을 열어준다.

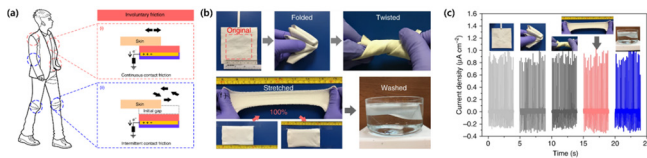


Figure 7. (a) Schematic showing possible involuntary friction of textile based TENG on different regions of human body. (b) Photographs showing textile triboelectric nanogenerator (textile-TENG) with excellent endurance under the deformations of fold, twist, and stretch, and washing. (c) Current density profiles of textile-TENG after various types of deformations and washing [12].

2.3. 스마트 웨어러블 센서

스마트 웨어러블 기기에 사용되는 센서 기술은 사람의 일상 생활과 밀접하게 연결되어 있으며, 사용자의 건강 상태나 환경 변화를 실시간으로 모니터링하는 데 필수적인 역할을 한다. 이러한 센서들은 착용감이 좋고 사용자의 움직임에 따라 유연하게 반응할 수 있어야 하기 때문에, 직물이나 섬유 형태로 제작되는 것이 중요하다[13]. 이는 센서를 일상복이나 액세서리 등에 쉽게 통합시켜 착용자가 불편함 없이 사용할 수 있도록 한다. 웨어러블 센서는 기계적 변형이나 외부 자극에 반응하여 그 구조나 전도성이 변화하며, 이러한 변화는 저항이나 정전용량의 변화로 측정된다. 이를 통해 다양한 생리적 신호, 예를 들어 심장 박동, 혈압 등을 모니터링할 수 있는 유연한 형태의 strain/stress 센서를 제작할 수 있다[14]. 또한 온도나 습도 변화에 따른 전기 저항성의 변화를 감지하는 센서를 통

해 환경 변화를 감지하는 것도 가능하다. Lee et al.의 연구에서 개발된 나노 메쉬형 압력센서는 손가락의 압력을 감지할 수 있는 뛰어난 예이다[15]. 이 센서는 착용자의 손가락이 느끼는 감각을 방해하지 않으면서도 미세한 압력 변화를 정확하게 감지할 수 있다. 이러한 센서는 향상된 터치 감각, 미세한 질감 인지, 심지어 가상 현실(VR)이나 증강 현실(AR) 환경에서의 상호작용 향상에 기여할 수 있다.

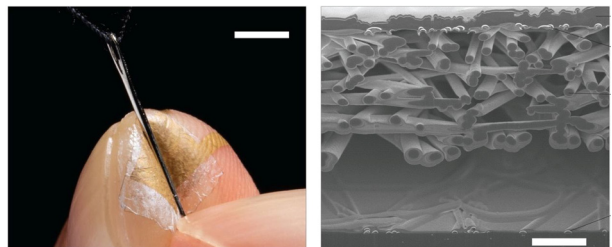


Figure 8. Structure of the nanomesh pressure sensor [15].

웨어러블 센서 기술의 발전은 일상생활, 스포츠, 헬스케어 등 다양한 분야에서 응용 가능성을 열어주고 있다. 사용자의 생리적 상태를 지속적으로 모니터링하여 건강 관리에 도움을 주거나 개인의 환경과 상호작용하는 스마트 홈 시스템을 구현하는 등의 혁신적인 솔루션을 제공할 수 있다. 이처럼 유연한 웨어러블 센서 기술은 앞으로도 지속적으로 발전해 나갈 것이며, 우리의 일상 생활과 건강 관리 방식에 큰 변화를 가져올 것으로 기대된다.

3. 스마트 웨어러블 기기의 응용

3.1. 건강 모니터링

현대 사회에서 건강 모니터링의 중요성이 점점 더 커지고 있는 가운데, 스마트 웨어러블 기기는 이러한 니즈를 충족시키는 중요한 도구로 부상하고 있다. 이러한 기기들은 사용자의 생활 방식에 자연스럽게 통합되며, 지속적인 건강 모니터링을 가능하게 함으로써 조기 진단 및 건강 관리에 크게 기여할 수 있다. 압전 효과(piezoelectric effect)는 기계적 압력이나 스트레스를 전기 신호로 변환하는 현상을 말한다. 이 현상을 활용한 센서는 신체의 여러 활동, 예를 들어 심박수, 혈압, 근육 활동 등을 모니터링할 때 매우 유용하다. 이러한 센서는 스트레스나 압력이 가해질 때 발생하는 미세한 전기 신호를 감지하여, 이를 통해 신체의 다양한 생리적 상태를 정확하게 모

니터링할 수 있다. 정전기(electrostatic) 센서는 신체의 전기적 활동을 감지하는 데 사용된다. 이는 심전도(ECG) 모니터링에 특히 유용하며, 수면 중의 움직임이나 심장의 전기적 활동을 포착하여 심장 건강 상태를 지속적으로 모니터링할 수 있다. 이러한 기술은 심장 질환을 조기에 발견하고 관리하는 데 큰 도움이 된다.

웨어러블 스마트 헬스 모니터링 시스템(WHMS)은 이러한 센서 기술을 통합하여 사용자가 일상 생활 속에서도 쉽게 자신의 건강 상태를 체크하고 관리할 수 있도록 한다. 예를 들어, 스마트 워치, 피트니스 밴드, 스마트 의류 등은 사용자의 신체 활동, 심박수, 수면 패턴 등을 모니터링하며, 이를 통해 개인 맞춤형 건강 관리 조건을 제공할 수 있다. 이러한 기술의 발전은 건강 관리 분야에 혁명을 가져오고 있으며, 개인의 건강을 향상시키고 의료 비용을 줄이는 것에 크게 기여할 것으로 생각된다. 특히 웨어러블 기기를 통한 지속적인 건강 모니터링은 만성 질환을 가진 환자들의 자가 관리를 강화하고, 조기에 건강 문제를 발견하여 적절한 조치 및 치료를 취할 수 있는 기회를 제공할 수 있다[16,17].

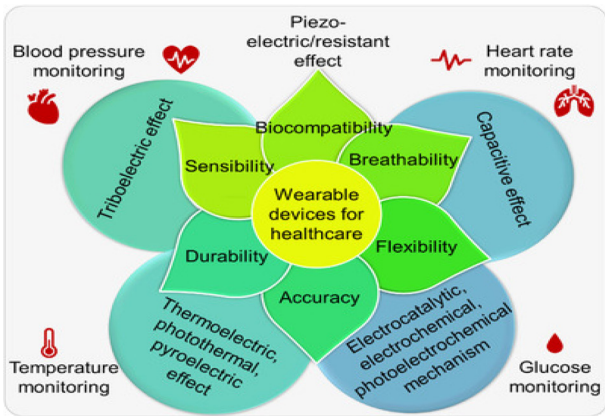


Figure 9. Basic property requirements and mechanisms of flexible wearable monitoring devices for healthcare [18].

압전 효과뿐만 아니라 스마트 웨어러블 소재로 근육활동을 정밀하게 측정하여 건강 상태를 평가하는 방법으로는 바이오 임피던스(bioimpedance) 측정도 있다. 바이오 임피던스는 전기신호를 근육, 세포막 등의 생체조직에 통과시키고 그에 따른 전기적 특성을 측정하여 근육의 상태를 평가하는 방법이다 [19]. 이를 통하여 근육 손상의 심각도와 회복까지 필요한 시간을 측정할 수 있으며 생체 조직의 전기적 특성을 분석함

으로써, 근육의 상태, 체지방률, 체내 수분 함량 등을 비침습적으로 평가할 수 있다. 현재 의료용 패치에 바이오 임피던스 센서를 내장시키거나 스마트 워치, 스마트 의류에 바이오 임피던스 기술을 적용시키는 연구 등 스마트 웨어러블 소재에 바이오 임피던스 기술을 도입하고자 하는 연구가 활발히 진행 중이다[20].

기업들을 중심으로 개발중인 건강 모니터링이 가능한 웨어러블 기술들을 살펴보면, 미국의 의류 브랜드 Ralph Lauren은 캐나다의 OM signal과 협력하여 셔츠에 특수 섬유 소재를 도입하여 운동 강도, 심박수, 호흡수 등을 실시간으로 기록하여 휴대폰 앱으로 전송하는 스마트 의류를 개발하여 출시하였다. 또한 멜버른의 바이오테크 기업 DorsaVi는 작업을 하는 노동자 또는 운동 능력 추적이 필요한 운동선수를 위하여 근육의 움직임 정보를 수집 및 분석하는 동작 센서인 ViSafe의 도입을 통하여 실시간으로 상해 위험을 사전에 예방하거나 맞춤형 재활운동 프로그램까지 사용자에게 제공할 수 있게 되었고, 전 세계 여러 병원에서도 사용되고 있어 그 효용성이 입증되었다[21,22].

이러한 웨어러블 기술들은 건강 모니터링뿐만 아니라, 개인 맞춤형 건강 관리 및 예방, 재활 프로그램의 제공에 있어서도 중요한 역할을 하고 있다. 바이오 임피던스 측정과 같은 고도의 기술을 웨어러블 소재와 결합함으로써, 개인의 건강 상태를 보다 정밀하게 모니터링이 가능하고, 필요한 경우 적절한 조치 및 치료를 할 수 있는 가능성을 제공한다. 이는 의료 서비스의 품질을 높이고 개인의 건강 관리를 더욱 효과적으로 만드는 데 기여하고 있다.

3.2. 환경 감지

스마트 웨어러블 소재를 활용한 화재 및 유독가스 감지 기술은 고위험 환경에서 근무하는 인력의 안전을 크게 향상시킬 수 있는 혁신적인 접근이다. 이러한 기술은 특히 소방관과 같은 특수환경 종사자들이 극단적인 환경에서 안전하게 작업할 수 있도록 보장한다. 한 예로 MXene 소재를 활용한 최근 연구는 그 뛰어난 열전 특성을 이용하여 화재 현장에서의 극단적인 온도 변화를 실시간으로 감지하고 경보를 울려 소방관에게 즉각적인 위험 신호를 보낼 수 있도록 한다. 이는 소방복 자체가 제공할 수 있는 물리적 보호를 넘어서 환경적 위험을 사전에 인지하고 대응할 수 있는 능력을 소방관에게 제공한다. MXene 기반의 전자섬유는 고온 환경에서의 안전성을 크게 향상시키며, 소방관이 더 안전하게 임무를 수행할 수 있게 도와준다[23].

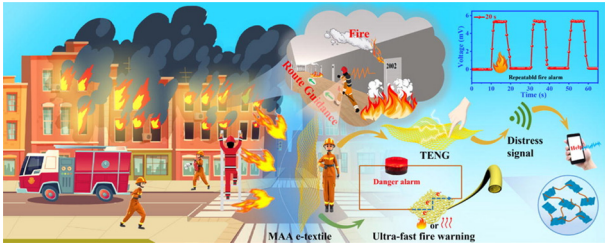


Figure 10. Early fire alarm device utilizing MXene [23].

다른 한 예로, 스마트 웨어러블 소재를 활용하여 NH₃, NO₂ 등 유독가스에 대한 감지기술도 연구되고 있다. 각기 다른 반응 메커니즘을 가진 폴리아닐린을 전자 섬유로 활용하면 에탄올, 이소프로판올 및 아세톤을 포함한 다른 가스에 비해 NH₃에 대한 선택도가 높음을 확인할 수 있었다[24]. 한편 NO₂ 분자를 쉽게 흡착시키는 활성 부위를 제공하는 rGO(reduced graphene oxide)을 코팅한 스마트 의류는 NO₂에 대한 선택도가 다른 가스에 비해 높다는 사실을 확인하였다[25]. 이는 산업 현장, 화학 실험실, 또는 유독가스 누출의 위험이 있는 다양한 환경에서 근무하는 사람들의 안전을 크게 개선할 수 있는 기술이다.

스마트 웨어러블 소재를 통한 환경 감지 기술의 개발은 안전 기준을 한 단계 끌어올리는 동시에, 신속한 대응을 통해 재해의 위험을 줄이고 생명을 구하는 데 크게 기여할 수 있다. 또한 이러한 기술의 발전은 근로자들이 보다 안전한 환경에서 작업을 수행할 수 있도록 보장함으로써, 작업의 질을 향상시킬 수 있고, 나아가 생산성을 높일 수 있는 잠재력을 가진다. 이와 같은 연구와 개발은 인간의 안전을 최우선으로 하는 모든 산업 분야에서 매우 중요한 역할을 할 것이다.

3.3. 개인 맞춤 및 편의성

개인 맞춤형 패션과 편의성을 제공하는 스마트 웨어러블 소재의 연구는 사용자의 일상생활에 혁신적인 변화를 가져오게 할 잠재력을 지니고 있다. 이러한 연구는 기술적 진보와 사용자 경험의 개선을 통해 개인의 삶의 질을 높이는 데 기여한다. 탄소 섬유를 활용한 스마트 웨어러블 의류는 온도 조절 기능을 통해 사용자가 원하는 온도를 설정할 수 있게 해준다. 이는 스마트폰 앱을 통한 간편한 조작으로 외부 환경에 관계없이 항상 쾌적한 체온을 유지할 수 있도록 돕는다. 예를 들어 Embr Labs의 Embr Wave 제품의 경우 사용자의 상황이나 주위 환경의 변화에 맞추어 체온에 영향을 준다. 이러한 온도 변화는 사용자의 뇌에 영향을 미치고 스트레스의 감소 또는 수면의 질

향상 등의 효과를 주어 개인의 건강과 안락함을 증진시킬 수 있다[26].

스마트 안경에 대한 연구도 활발히 진행 중이다. 실제로 2017년에 Google Glass가 출시된 이후로 스마트 안경을 주제로 다룬 논문이 급속도로 증가하였다. 스마트 안경은 농업, 헬스케어, 교육 시스템, 의료 시스템 등 다양한 분야에서 활용될 수 있다. 먼저 농업 분야에서는 스마트 안경이 동물의 데이터 및 가축 환경에 대한 정보를 제공함으로써 가축 사육 작업의 효율을 증가시킬 수 있다. 이는 가축관리에 있어서 편리함을 제공하며 가축생산량을 증가시킬 수 있다[27]. 농업뿐만 아니라 스마트 안경은 교육 분야에서 큰 이점을 가지고 있는데, 의료 작업이나 고위험군 실험 등과 같이 실제로 수행하기에 복잡하고 어려운 작업들을 증강현실(AR)을 통해 미리 반복적으로 연습할 수 있게 되어 연습생들은 스마트 안경을 통해 실전 경험과 같은 기술을 습득 할 수 있게 되었다[28].

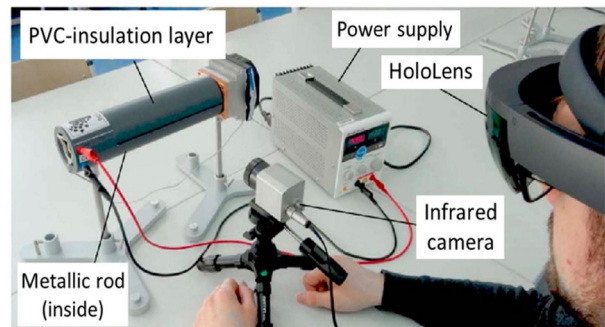


Figure 11. Experimental setup (rod with PVC insulation) and user wearing a Holo Lens [29].

상황에 따라서 색깔이 변하는 스마트 의류 연구도 활발히 진행 중이다. 특히 Armani는 과한 UV 노출로 인해 발생할 수 있는 피부암을 예방하기 위하여 하루 권장량 이상의 햇빛으로부터 노출되면 오렌지 색에서 어두운 색으로 변하는 패치를 개발하였으며, 이는 스마트 워치처럼 충전할 필요가 없고 사용하기 매우 간편하다는 장점을 가지고 있다[30]. 이렇게 UV 뿐만 아니라 빛, 온도, 습도, 화학반응 등의 변화에 반응하여 사용자가 변화된 환경을 인지할 수 있도록 도움을 주는 스마트 웨어러블 소재 및 기기 연구가 진행 중이며, 이는 실용적이면서도 착용자에게 흥미로운 시각적 효과를 제공한다.

이처럼 스마트 웨어러블 소재에 대한 연구는 사용자의 건강, 편의성, 그리고 개인화된 패션을 제공하는 방향으로 발전하고 있다. 이러한 기술의 발전은 개인의 일상 생활뿐만 아니라

라 교육, 건강 관리, 산업 등 다양한 분야에 혁신을 가져오며, 앞으로 더욱 다양한 응용 가능성을 탐색할 것으로 기대된다.

4. 결 론

최근 스마트 웨어러블 기술은 전도성 소재와 에너지 하베스팅, 그리고 스마트 센서 기술의 발전으로 인해 급속히 발전하고 있다. 유연하고 착용감이 좋은 소재로 제작된 웨어러블 전자 소자는 실리콘 등의 기존 전자소자의 한계를 뛰어넘고 있다. 또한 에너지 하베스팅 기술을 통해 착용자의 움직임이나 일상 활동에서 얻는 에너지를 전기 에너지로 변환하여 웨어러블 기기를 지속적으로 작동시킬 수 있는 기술도 개발 중에 있다. 스마트 센서 기술은 착용자의 건강 상태나 환경 변화를 실시간으로 모니터링할 수 있는 유연한 형태의 센서가 개발되고 있으며, 이를 통해 헬스케어, 스포츠, 엔터테인먼트 분야 등에서의 응용 가능성이 무한하다. 이러한 기술들의 발전은 우리의 일상 생활과 건강 관리 방식에 혁신적인 변화를 가져올 것으로 기대된다.

스마트 웨어러블 기기는 건강 모니터링, 환경 감지, 그리고 개인 맞춤 및 편의성 제공 등 다양한 분야에서 혁신적인 기술로 부상하고 있다. 건강 모니터링 측면에서는 압전 효과와 바이오 임피던스를 활용하여 사용자의 신체 활동과 건강 상태를 정밀하게 모니터링할 수 있으며, 이를 통하여 개인맞춤형 헬스케어를 실현할 수 있다. 환경 감지 기술은 화재나 유독가스 와 같은 위험 요소를 감지하여 안전을 보장하고, 개인 맞춤형 패션과 편의성 제공 측면에서는 스마트 의류나 스마트 안경과 같은 제품들이 개발되어 사용자의 생활을 더욱 편리하게 만들어주고 있다. 이러한 스마트 웨어러블 기기의 발전은 다양한 분야에서 혁신을 가져오며, 앞으로 더욱 많은 응용 가능성이 기대된다.

참고문헌

1. K. Chatterjee, et al., "Electrically conductive coatings for fiber-based e-textiles", *Fibers*, Vol. 7, pp. 51, 2019.
2. Y. Zhang, et al., "Electronic fibers and textiles: Recent progress and perspective", *IScience*, Vol. 24, 2021.
3. S. Hou, et al., "Recent advances in silver nanowires electrodes for flexible organic/perovskite light-emitting diodes", *Frontiers in Chemistry*, Vol. 10, p. 864186, 2022.
4. C.-L. Kim, et al., "Mechanism of heat-induced fusion of silver nanowires", *Scientific reports*, Vol. 10, p. 9271, 2020.
5. H. Yu, et al., "Flexible, transparent and tough silver nanowire/nanocellulose electrodes for flexible touch screen panels", *Carbohydrate Polymers*, Vol. 273, p. 118539, 2021.
6. N. Karim, et al., "All inkjet-printed graphene-silver composite ink on textiles for highly conductive wearable electronics applications", *Scientific reports*, Vol. 9, p. 8035, 2019.
7. Y.-E. Shin, et al., "Electronic textiles based on highly conducting poly (vinyl alcohol)/carbon nanotube/silver nanobelt hybrid fibers", *ACS Applied Materials Interfaces*, Vol. 13, pp. 31051, 2021.
8. D. Yuan, et al., "Twisted yarns for fiber-shaped supercapacitors based on wet-spun PEDOT:PSS fibers from aqueous coagulation", Vol. 4, pp. 11616, 2016.
9. X. Chen, et al., "Electrochromic fiber-shaped supercapacitors", *Advanced Materials*, Vol. 26, pp. 8126, 2014.
10. L. Shuai, et al., "Stretchable, self-healing, conductive hydrogel fibers for strain sensing and triboelectric energy-harvesting smart textiles", *Nano Energy*, Vol. 78, p. 105389, 2020.
11. J. Liu, et al., "Processing of printed dye sensitized solar cells on woven textiles", *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 9, pp. 1020, 2019.
12. J. Xiong, et al., "Skin-touch-actuated textile-based triboelectric nanogenerator with black phosphorus for durable biomechanical energy harvesting", *Nature communications*, Vol. 9, p. 4280, 2018.
13. S.-Y. Cho, et al., "Continuous meter-scale synthesis of weavable tunicate cellulose/carbon nanotube fibers for high-performance wearable sensors", Vol. 13, pp. 9332, 2019.
14. J. Lee, et al., "Recent advances in 1D stretchable electrodes and devices for textile and wearable electronics: materials, fabrications, and applications", *Advanced Materials*, Vol. 32, p. 1902532, 2020.
15. S. Lee, et al., "Nanomesh pressure sensor for monitor-

- ing finger manipulation without sensory interference”, *Science*, Vol. 370, pp. 966, 2020.
16. S. Qian, et al., “Piezoelectric fibers for flexible and wearable electronics”, *Frontiers of Optoelectronics*, Vol. 16, p.3, 2023.
 17. A. V. Shelgikar, et al., “Sleep tracking, wearable technology, and opportunities for research and clinical care”, *Chest*, Vol. 150, pp. 732, 2016.
 18. B. Dai, et al., “Flexible wearable devices for intelligent health monitoring”, *View*, Vol. 3, p. 20220027, 2022.
 19. L. Nescolarde, et al., “Localized bioimpedance to assess muscle injury”, *Physiological measurement*, Vol. 34, p. 237, 2013.
 20. S. Abasi, et al., “Bioelectrical Impedance Spectroscopy for Monitoring Mammalian Cells and Tissues under Different Frequency Domains: A Review”, *ACS Measurement Science Au*, Vol. 2, pp. 495, 2022.
 21. J. Bashir, et al., “Inventive Investment Using Bigdata: Tools, Applicability and Challenges Associated”, *Computational Management, Modeling and Optimization in Science and Technologies*, Vol. 18, pp. 599, 2021.
 22. Z. A. Kiehl, et al., “A System for Assessing Cervical Readiness Using Analytics and Non-Invasive Evaluation (Crane)”, *20th International Symposium on Aviation Psychology*, Vol. 2019, p. 265.
 23. H. He, et al., “A wearable self-powered fire warning e-textile enabled by aramid nanofibers/MXene/silver nanowires aerogel fiber for fire protection used in fire-fighting clothing”, *Place Published*, Vol. 460, p. 141661, 2023.
 24. X. Tang, et al., “A Low-Cost Polyaniline@ Textile-Based Multifunctional Sensor for Simultaneously Detecting Tactile and Olfactory Stimuli”, *Macromolecular Materials*, Vol. 303, p. 1800340, 2018.
 25. S. W. Lee, et al., “Bio-Inspired Electronic Textile Yarn-Based NO₂ Sensor Using Amyloid - Graphene Composite”, *ACS sensors*, Vol. 6, pp. 777, 2020.
 26. M. Kurosu, “Human-Computer Interaction, Interaction Contexts: 19th International Conference, HCI International 2017, Vancouver, BC, Canada, July 9-14, 2017, Proceedings, Part II”, *19th International Conference, HCI International*, Vol. 102722017.
 27. M. Caria, et al., “Performance and usability of smart-glasses for augmented reality in precision livestock farming operations”, *Applied Sciences*, Vol. 10, p. 2318, 2020.
 28. L. Berkemeier, et al., “Acceptance by design: towards an acceptable smart glasses-based information system based on the example of cycling training”, *Proceedings of the Multikonferenz Wirtschaftsinformatik*, Vol. 2018.
 29. D. Kim, et al., “Applications of smart glasses in applied sciences: A systematic review”, *Applied Sciences*, Vol. 11, p. 4956, 2021.
 30. M. E. Lee, et al., “Flexible UV exposure sensor based on UV responsive polymer”, *ACS Sensors*, Vol. 1, pp. 1251, 2016.