

생체적합형 초고감도 웨어러블 센서 설계 및 제작

윤영삼
육군사관학교 전자공학과

Design and Fabrication of Biocompatible Ultra-Sensitive Wearable Sensor

Youngsam Yoon
Department of Electrical Engineering, Korea Military Academy

요약 최근 스포츠, 의학, 국방 등 웨어러블 시스템과 같이 피부에 부착되어 신체 움직임 및 상태를 모니터링 하는 기술들이 큰 관심을 받아오고 있다. 또한, 웨어러블 디바이스를 통한 신체감지기술이 신체 빅데이터와 클라우드를 통하여 분석되고 사물인터넷과 연결하여 신체에 특이점이 발견 시 즉각적으로 대응할 수 있는 체계 구현에 관한 연구와 활발히 진행되고 있다. 하지만 높은 신뢰도와 민감도를 갖고 피부에 부작용 없이 유연하게 제작할 수 있는 기술에 대해서는 아직 추가적인 연구가 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 간단한 초소형 정밀기계(MEMS) 공정을 통하여 쉽게 제작 되면서도 높은 민감도와 변형률을 갖는 센서를 제안하였으며 이러한 센서를 NFC 모듈과 통합하고 생체적합형 폴리머로 패키징한 웨어러블 센서를 설계 및 제작하였다. 또한 제작된 센서는 인체의 피부에 부착되어 착용자의 활동 정도를 심박 수 측정을 진행하였다. 이와 같은 센서는 다양한 상황, 환경에서도 사용될 수 있을 것으로 기대되며 나아가 군사적인 면에서도 전투원의 생체신호가 전장에서 착용된 웨어러블 센서에 의해 모니터링되어 전투원의 현재 상황 등을 효과적으로 모니터링 할 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract Recently, there has been significant interest in technologies, such as wearable systems attached to the skin, to monitor body movements and states in sports, medicine, defense, and other fields. Moreover, several studies have examined implementing systems to acquire body big data and connect it to the Internet of Things (IoT) and enable immediate responses upon detecting anomalies in the body. On the other hand, additional research is still needed on technologies that can be produced through simple microelectromechanical systems (MEMS) processes while maintaining high reliability, sensitivity, and flexibility without adverse effects on the skin. This study developed a sensor that is easily produced through a simple MEMS process while maintaining high sensitivity and deformability. This sensor has been integrated with an NFC module and packaged with biocompatible polymers to design and manufacture a wearable sensor. Such a sensor can be used in various situations and environments, and it is anticipated that in military applications, the biological signals of combatants can be monitored by these wearable sensors on the battlefield, enabling effective combat operations.

Keywords : MEMS, Wearable Sensor, Biocompatible, Sensitivity, Military

본 논문은 육군사관학교 미래전략기술연구소의 연구활동비 지원을 받아 수행되었음.(24-AI-연구소-04)

*Corresponding Author : Youngsam Yoon(Korea Military Academy)

email: yyoona4@gmail.com

Received April 19, 2024

Revised May 21, 2024

Accepted July 5, 2024

Published July 31, 2024

1. 서론

웨어러블 센서는 인간 동작 모니터링, 인공 지능 로봇 및 인간-기계 상호 작용 응용 분야에서 빠르게 발전하는 중이다[1-3]. 대부분의 웨어러블 센서는 전자 장치에는 특히 인간 동작 모니터링을 위한 금속 기반 스트레인 센서와 화학 센서의 전해 분석을 위한 다기능 화학 센서가 집적화 되어 있으며, 심박수[4], 혈압[5], 동작[6]과 같은 인간 신호를 측정하기 위한 수많은 웨어러블 스트레인 센서가 보고되었다. 기존의 웨어러블 스트레인 센서는 은 또는 금 나노와이어(AgNW 또는 AuNW)[7], 탄소나노튜브(CNT)[8], 그래핀[9], 흑연[10]과 같은 전기 활성 물질을 이용하여 개발 되었으며, 금속 기반의 게이지 팩터(Gauge Factor)를 넘어서기 위한 연구가 진행되고 있다. 이를 달성하기 위한 웨어러블 스트레인 센서는 넓은 감지 범위와 함께 높은 신축성($> 50\%$)과 감도($GF > 100$)가 요구된다. 이러한 웨어러블 센서의 경우 센서의 구조적 안정성 및 높은 감도를 유지하기 위해서 큰 신장은 구조적 완전성과 전기적 활성 영역의 상당한 변화를 요구된다. 결과적으로 최근 몇 년간의 여러 연구에서는 압저항 구조를 사용하여 매우 민감한 변형률 센서를 만들 수 있음을 보여주었다[11,12]. 본 논문에서는 무선 기반 웨어러블 센서를 제작하고, 미세한 변화에도 측정 가능한 고감도 스트레인 센서가 집적화된 웨어러블 센서를 제작하였다. 제작된 센서는 인간의 활성도를 모니터링하기 위해 경동맥 근처에 부착하여 맥박의 정도를 무선으로 측정하였다.

2. 관련 연구

2.1 웨어러블 센서

MIT 미디어랩에서는 웨어러블 센서를 “신체에 부착하여 컴퓨팅 행위를 할 수 있는 모든 전자 기기로 지칭하며, 일부 컴퓨팅 기능을 수행할 수 있는 애플리케이션까지 포함”이라고 정의하며 일반적으로 우리가 생각하는 웨어러블 센서는 인체 정보를 감지할 수 있는 센서를 소형화하고 집적화해서 이를 인체에 삽입 또는 부착할 수 있는 소자를 말한다.

현재 상용화된 웨어러블 소자는 인체 움직임을 감지하는 가속도 센서, GPS센서, 고도, 기압센서가 집적화되어 있고 신체 정보를 모니터링 할 수 있는 심박센서 등이 내장되어 있다. 이러한 센서는 보편적으로 건강관리를 위

해 개발되어 사용자의 위치 및 운동량을 집적화된 센서를 이용하여 수집·분석하고, 가공된 데이터를 사용자에게 제공하여 정확한 판단을 할 수 있도록 유도한다. 이러한 웨어러블 센서는 멤스 및 나노 공정기술의 발달에 따라 사용자가 이동 또는 활동 중에도 자유롭게 사용할 수 있도록 신체나 의류, 액세서리에 착용할 수 있도록 소형화되어 개발되고 있다. 웨어러블 센서는 구동을 위한 배터리 기술, 발열 제어, 통신 기술 등이 복합적으로 융합되어 발전되었고, 앞으로는 인공지능 기반의 웨어러블 센서가 개발될 예정으로 더 많은 정보제공 및 가치를 제공하기 위한 연구가 진행되고 있다. 또한, 딥러닝을 통한 의료 영상정보 분석, 당뇨 등 약 복용 관리, 건강관리 등이 저전력·고집적화 반도체 기술을 응용한 웨어러블 디바이스와 연동하여 생성된 데이터의 신뢰성을 바탕으로 사용자들에게 더욱 편리하고 정확한 치료가 가능하게 하고 있다.

2.2 웨어러블 센서 발전과정

웨어러블 센서 개발 초기에는 시계와 신발에 계산기 또는 카메라를 단순 부착하는 수준의 연구에서 시작되어, 1980년대부터 입출력 장치와 컴퓨팅 기능이 도입되어 주로 군사용이나 학술연구용으로 개발되었다. 이후 2000년대 들어서 반도체 공정제어 기술의 발전으로 센서류와 반도체 소자 등의 소형화가 가능해졌으며, 2010년대에는 스마트폰 기반의 광대역 통신 기술의 접목으로 일상생활에서 사용 가능한 수준으로 발전이 진행되었다. 이로써 웨어러블 센서는 GPS, 마이크로폰, 가속도 센서, 자이로 센서 등과 같은 센서 데이터를 스마트폰에 전송함으로써 다량의 전력 소모를 요구하는 고성능 모바일 프로세서 및 메모리반도체 탑재를 최소화할 수 있었으며, 이에 따른 데이터 처리 등의 한계를 극복할 수 있게 되었다. 최근에는 휴먼케어를 위한 심전도 측정, 혈중 산소포화도 분석과 같이 전문성이 요구되는 스마트 바이오 센서 탑재가 완료되었으며, 움직임에 따른 광학식 심전도 센서 성능을 향상하기 위해 생체에 적합하고 유연성 소재를 활용한 기판이 적용되어 더욱 정밀한 생체 정보 분석이 가능한 웨어러블 시스템이 개발되고 있다[13]. 또한, 배터리 기술의 발전에 힘입어 저전력·지능화된 네트워크 통신 모듈을 탑재하여 광역 네트워크 접속이 가능해졌으며, 확장성이 점차 증가하여 다양한 목적을 가지는 기기들이 제작되고 있다. 기존에는 키보드 중심의 입력장치를 이용하여 간단한 명령어 및 출력 데이터 확인 방법을 이용하였으나, 디스플레이 기술의 발전을 통해

스크린 터치 방식의 입출력 방식이 도입되어 보다 효과적인 인터페이스를 제공하고 있다. 최근에는 마이크로폰을 이용한 음성 인식 기능이 터치를 통한 직접 정보입력 방식을 대체하고 있으며, 사용자 중심의 인공지능기능을 추가해 스마트한 웨어러블 센서의 신호 입·출력 기능이 가능해졌으며 빅데이터의 발전과 더불어 다양한 분야에 활용될 것으로 전망되고 있다. 최근 미래 예측보고서에는 저출산·고령화, 정서·심리적 불안감 증대 등의 사회적 변화와 인공지능, 생체신호 등 기술 간의 융합으로 인간의 신체·두뇌·감성 능력을 향상시키기 위한 휴먼증강에 대한 관심이 고조되고 있다[14]. 특히 두뇌 능력 향상을 위해 인지능력을 향상시키려는 연구가 활발히 진행되고 있으며 Brain Computer Interface, Neuromorphic chip 기술 등의 발전이 이루어지고 있다. BCI는 UCLA 자퀴스 비달 교수에 의해 처음 사용되면서, 뇌의 컴퓨터 신호로 사람과 컴퓨터가 서로 정보를 전달할 수 있다는 개념이 등장하였고, 침습적 또는 비침습적 기술과 웨어러블 디바이스의 발전에 따라 인지능력의 향상을 도모하고 있다. 인간의 뇌를 모방한 뉴로모픽 칩은 인간의 인지형성과정의 핵심 특징인 뉴런과 시냅스의 특성을 구현하여 데이터 저장 및 연산 과정의 통합과 병렬연산을 응용하여 전력 소모를 줄이고 대규모 정보처리가 가능하게 하였으며 향후 AI기술 발전의 핵심 하드웨어 기술이다 [15]. 중국 칭화대 루핑시 박사 연구팀이 개발한 뉴로모픽 칩 텐진은 손톱 크기의 칩에 약 4만개의 뉴런과 1천만개의 시냅스 구조의 칩을 설계하여 자율자전거에 탑재 스스로 균형을 잡을 뿐만 아니라 실시간 물체 감시를 통해 장애물을 피해 스스로 조종이 가능하게 하였다. 글로벌 시장조사기관인 리서치앤마켓에 따르면 뉴로모픽 칩과 같은 인공지능형 반도체 시장규모는 2027년 104억 달러 수준으로 폭발적으로 성장할 것으로 예상하며 이러한 뉴로모픽 칩이 웨어러블 디바이스에 사용된다면 실시간으로 획득한 무수한 생체신호 데이터들을 인공지능에 의해 신속하고 효과적으로 분석·처리하여 보다 사용자 중심의 맞춤형 대응이 가능하리라 생각되어진다.

2.3 웨어러블 센서 기술 형태별 발전단계

초기 웨어러블 센서는 액세서리 형태(Portable)의 센서에 다양한 기능을 부과하여 손목시계나 목걸이 형태의 센서에서 현재는 의류 일체형(Attachable) 센서의 개발 및 더 나아가 신체부착 또는 생체이식형(Implantable) 센서로 진화하고 있다. 이러한 기술적 변화의 중심에는 착용자의 편의성이 핵심이 되고 있으며, 다기능 센서의

소형화 및 집적화 기술과 소재의 다양화에 따른 공정기술의 발전에 맞추어 급격한 발전속도를 보이고 있다. 액세서리형 센서의 경우 배터리를 기반으로 하여 소형 디스플레이 장치와 센서를 집적화하여 사용자의 정보수집 및 분석을 통해 유용한 정보전달을 수행한다. 이러한 액세서리형 센서는 크기, 무게, 배터리 지속시간의 이슈가 존재하며, 작동에 따른 발열 및 착용자의 편의성 및 접근성에 집중되어 제품이 개발되었다. 의류 일체형 센서는 전도성을 가지는 섬유를 기반으로 하여 기존의 액세서리형 웨어러블 센서가 측정할 수 없는 방법으로 사용자의 정보를 수집하고 각종 센서가 의류에 집적화되어 있어 착용에 따른 불편함 해소 및 액세서리형 웨어러블 센서의 크기적 한계를 뛰어넘을 수 있다. 그러나, 의류형 센서는 굽힘 및 접힘, 오염과 같은 환경에서의 센서 내구성 및 양산기술 문제의 이슈가 남아 있다. 그럼에도 불구하고 넓은 확장성에 따른 장점으로 인해 선진 연구기관에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 마지막으로, 웨어러블 센서의 궁극적인 목표는 생체 적합성을 가지는 폴리머 기반의 회로보드와 패키징 기술을 기반으로 하는 피부 또는 체내 삽입형 웨어러블 센서 개발이다. 이러한 센서는 피부 표면에서 신속성 및 유연성을 가지며, 인체 적합성을 가지는 재료를 사용하기 때문에 착용자의 불편함을 최소화하고, 외부로의 노출을 최소화되므로 센서 손상의 위험이 적은 장점이 있다. 또한, 인체에 센서를 삽입함으로써 분실위험이 없고, 지속적인 인체 정보를 수집할 수 있어 질병 진단, 약물 투여량 조절 등의 높은 기술을 요구하는 정밀의료 및 인체 식별 정보를 효과적으로 제공할 수 있는 장점을 내포하고 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 소재기술, 센서에 효과적으로 전력을 전달할 수 있는 무선 전력전송기술 및 저전력화 등의 기술개발이 요구된다. 특히 인체 이식형 웨어러블 센서는 유연성이 기초가 되어야 하며, 이는 센서 구동의 안정성 및 기판의 신뢰성에 큰 영향을 미친다. 또한, 기판 재료는 인체에 직접 부착이 되기 때문에 생체 적합성을 만족해야 하며, 이를 대체할 수 있는 소재로는 PDMS, Parlylene 등의 재료를 이용한 센서들이 연구단계에서의 가능성을 보여주었다. 이러한 폴리머 소재의 기판은 고전적인 멤스 공정이 가능하고 표면에 금속화 공정 및 미세 패턴 제작이 가능해 웨어러블 소자의 기판 소재로 많이 사용된다. 최근에는 생체 적합한 폴리머 소재에 그래핀 및 탄소 나노튜브 등을 이용하여 사용자의 움직임 효과적으로 모니터링 할 수 있는 고감도 소재를 이용한 연구가 진행되고 있다.

2.4 웨어러블 센서 응용사례

웨어러블 센서의 무한한 응용 가능성 및 효과적인 생체 관리 시스템의 장점으로 인하여 선진국 중심의 연구기관들은 효과적인 시스템을 연구하고 단계적 실용화를 진행하고 있다. 특히, 두각을 나타내는 분야는 정밀의료 분야 및 군사적 응용이라고 볼 수 있다. ST engineering에서 제시한 ARIELE 시스템은 다양한 웨어러블 센서를 이용하여 효과적인 작전 및 전투원 개개인의 편의성과 상호 통신 연결성을 제공할 수 있다고 밝혔다. 특히 스마트 의류형 착용 센서 등을 이용한 생체 정보 모니터링과 헬멧과 고글에 집적화된 디스플레이 장치를 통해 측정된 다양한 정보를 제공할 수 있는 기술들을 제시하였다. 특히, 머리 부위는 동적인 움직임이 많지 않고 부착성이 뛰어나므로 신체에 최소한의 피로도를 전제로 전투원의 헬멧에 일체형으로 만들어진 뇌파 계측 및 뇌 산소포화도 측정시스템을 응용하여 전투원의 신체 상태를 효과적으로 모니터링 할 수 있다. 일찍이 美 공군에서는 웨어러블 센서를 이용하여 주변 사물 인식 및 착용자의 상태를 위한 효과적인 시스템 개발을 지속해서 개발해 왔다. 전투기 내 수많은 계기판 및 제어 요소들이 고도화됨에 따라, 조종사가 많은 정보를 실시간에 효과적으로 확인하고 제어할 방법을 고안했다. 최근 디스플레이 기술 발전 및 시스템 반도체의 고집적화를 통해 헬멧에 디스플레이 장치를 집적화하고, 전투기 내부 상황 및 광학 카메라 등을 융합하여 모든 상황을 헬멧에 장착된 디스플레이 화면에 출력한다. 또한, 조종사의 전투복에는 다양한 센서가 탑재되어 조종사의 건강상태를 지속적으로 모니터링하고 관제소와의 교신을 통해 조종사의 상태를 점검할 수 있다. 이러한 시스템은 가장 발달된 웨어러블 센서로 한정된 공간에서 사용되며 전력 공급이 자유로워 다양한 센서 및 기능을 탑재할 수 있는 장점을 가진다.

미국 조지아 공대와 센사텍스가 공동 개발한 스마트 셔츠는 셔츠 내부에 광섬유 및 전기 전도성을 부여하여 심장박동 및 온도 측정 등이 가능한 웨어러블 센서를 개발하고 이를 군인의 인체 정보수집에 적용하였다. 스마트 셔츠는 전도성 섬유와 통기성이 뛰어난 나일론 직물로 생리적 신호를 획득 및 통신 기능이 부여되어 착용자의 생체 정보를 송신할 수 있다. 또한, 내부에 집적화된 센서가 격자 형태로 구성되어 착용자의 총탄 상처 위치를 정확하게 파악할 수 있고, 총탄 위치에 따른 응급처치 및 구조 활동을 보다 신속하고 정확하게 할 수 있으며, 이후 발생하는 생체 징후를 보다 신속하게 파악할 수 있

는 장점을 가진다. 즉 셔츠 자체에 개인정보, 헬스케어 정보, 통신 기능 및 위치 정보가 내재하여 다수의 사상자가 발생하고 의료 물자가 제한되는 전장 상황에서 전투원에게 착용 시 실시간 생체 모니터링을 통하여 치료 및 후송의 우선순위를 정할 수 있으며 생존성을 높일 수 있다. 피부에 부착하는 웨어러블 센서의 가장 큰 장점은 저 전력 구동 및 착용자에게 더욱 자유로운 활동성을 보장할 수 있는 장점이 있다. 이러한 특징은 직접적인 혈압 측정 및 땀과 같은 분비물을 이용하여 생체 분석을 직접적으로 가능하게 한다. 최근 메사추세츠 공과대학교 미국 NASA에서는 피부 표면에 부착하고 땀의 염분도를 분석하여 착용자의 탈수 정도를 무선으로 측정할 수 있는 시스템을 개발하였다. 이 기술을 이용한다면 병사들의 훈련 기간 또는 장기간의 작전 중인 병사 개개인의 전해질을 분석하고 결과를 이용한 효과적인 작전 수행 또는 의료적 처치가 가능한 장점을 가진다. 이러한 웨어러블 센서는 기존의 센서들과 다르게 저동력으로 구현되므로 대량생산을 통해 생산 단가로 낮추어 제작할 수 있는 장점을 가진다. 이러한 패치형 센서는 웨어러블 센서의 문제점으로 두드러지는 전원공급 문제를 스마트폰의 무선 충전과 같은 유도 커플링 기술을 통하여 전원을 공급할 수 있도록 공진형 코일을 내장하고 있어 별도의 전원공급 없이 사용 가능하며, 1mm 이하의 두께를 가져 일상 생활에 무리 없이 심전도 센서 및 다양한 센서에 활용할 수 있다.

3. 웨어러블 센서 설계 및 제작

3.1 웨어러블 센서 설계

본 논문에서 사용된 웨어러블 센서는 외부 안테나와 센서의 인덕터 코일간의 유도 인덕턴스를 통해 구동되며, 유도 커플링을 기반으로 하며 별도의 전원 공급장치 없이 구동되는 것이 특징이다. 인덕터에 연결된 커패시턴스의 변화를 통해 무선으로 감지할 수 있다. 이는 외부 인덕터 코일과 센서의 내부 인덕터 코일의 정렬을 통해 전자기 유도 전류가 발생되며, 이를 통해 센서에 부착된 NFC 칩의 구동 전류로 사용된다. 이러한 방법은 L-C (Inductor-Capacitor) 기반의 공진형 센서와 비교하여 인식거리 향상 및 다양한 센서의 확장이 가능한 장점이 있다. 본 논문에서 사용한 NFC 칩은 Melexis사의 MLX90129 모델을 사용하였으며, 안정적인 보안성 및

ADC(Analog to Digital Converter), Resistance 기반 센서 모니터링 센서 등을 탑재하고 있다. 이전의 Capacitor 기반의 센서의 경우 낮은 감도 및 계측 장비의 복잡성 등의 단점을 가지고 있지만, 본 논문에서 사용된 NFC 기반의 센서는 저항 변화량을 직접적으로 측정할 수 있고, 칩 제조사 또는 Custom으로 제작된 스마트폰 어플리케이션을 통해 간단하게 값을 측정할 수 있는 장점을 가진다.

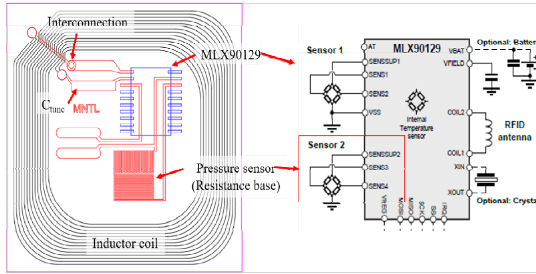


Fig. 1. Configuration of NFC-Based Wireless Sensor

웨어러블 센서는 Fig. 1에서 보듯이 전력 송수신 및 신호전달을 위한 인덕터 코일형 안테나, 생체신호 측정을 위한 V-groove형 고감도 크랙 센서, 신호처리 및 전력관리 등을 위한 NFC칩으로 구성되며, 발생한 신호를 효과적으로 분석 및 신호 전송을 위한 소프트웨어로 구성된다. 특히 전력 전송을 위한 인덕터 코일을 이용하여 데이터 전송 및 수신할 수 있으며 별도의 안테나가 요구되지 않아, 센서 내부에 다양한 기능을 가지는 회로 집적화가 가능하다. 센서는 가로 30mm, 세로 30mm의 크기를 가지며 내부에 집적화된 인덕터 코일을 이용하여 센서를 구동하고 이 L-C 공진형 센서는 스마트폰과 같은 외부리더기를 통하여 센서에서 발생한 결과를 리더 단말기에 전송하는 역할을 한다. 이는 착용자의 피부에서 분비되는 땀의 전해질 농도 분석을 통해 착용자의 운동량을 정량화 할 수 있으며 개선된 프로그램을 이용하여 군집 데이터 등을 최적화 할 수 있어 전투원의 움직임 분석 및 이상 유무를 효과적으로 분석할 수 있을 것으로 사료된다. 이는 각종 야전 훈련 및 장기간 작전에 걸친 병사 생체 모니터링이 가능하므로, 급작스러운 신체 변화에 따른 능동적인 대처가 가능할 것으로 기대된다

3.2 생체적합형 스마트 웨어러블 센서제작

3.2.1 고감도 크랙센서 센서 제작

웨어러블 센서 중요한 부분은 작은 움직임에도 반응할 수 있는 센서 기술이 요구된다. 이를 만족시키기 위해서

본 연구에서는 생체모방공학 기술을 이용한 고감도 V-groove형 크랙센서를 이용하여 웨어러블 센서에 적용하였다. 개발된 크랙센서는 기존의 금속기반의 스트레인 센서보다 높은 감도(Gauge factor : 65)를 가지며, 미세한 움직임에도 높은 감도로 모니터링 할 수 있다. Fig. 2(a)는 센서의 기본 특성평가를 위해 제작된 크랙 센서이며, Fig. 2(b)-(c)는 크랙 센서의 전자현미경 결과를 나타내었다. Fig. 2(b)와 같이 V-groove 패턴과 Fig. 2(c)의 Crack 부분을 확인할 수 있으며, 변위 발생에 따른 저항 변화를 모니터링 할 수 있다. 센서의 핵심 부분인 crack은 V-groove의 면을 따라서 형성되며, 이는 Crack의 방향성과 개수를 정확하게 조절할 수 있는 장점이 있다. 이는 종래의 Crack 센서와 비교 하였을 경우 V-groove의 개수와 비례하게 Crack이 구성되며, 이를 통해 센서의 초기 저항값 및 변위에 따른 저항 변화량 등 정량적인 평가가 가능한 장점을 가진다.

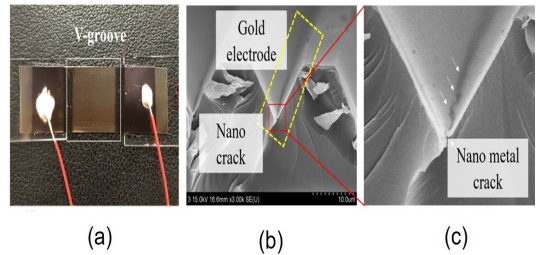


Fig. 2. Wearable sensor images. (a) Photograph of the V-groove sensor, (b) SEM image of sensor. (c) Cross sectional image of the sensor

3.2.2 웨어러블 센서 패키지

생체적합형 스마트 웨어러블 센서는 SU-8 폴리머를 사용하여 맵스공정으로 제작되어 유연성과 인체에 적합한 특성을 가진다. 웨어러블 센서 제작은 Fig. 3(a)와 같이 SU-8 폴리머를 이용하여 20 μ m의 두께를 가지는 웨어러블 센서 기판을 제작하였다. 이후 인덕터 코일과 NFC센서의 상호 연결을 위해 E-beam evaporator장비를 이용하여 Ti/Au 증착 후에 GXR601-46CP 감광제를 이용하여 포토리소그래피를 이용 패턴 후 제작을 완료하였다. Fig. 3(b)와 같이 커빅터 레이어를 절연하기 위해 SU-8 3010 감광제를 이용하여 10 μ m 두께를 가지도록 패턴을 제작하였고, Fig. 3(c)와 같이 센서의 인덕터 코일을 제작하기 위해 Sputter 장비를 이용하여 Cr/Cu 증착 및 AZ4620 감광제를 이용하여 인덕터 패턴을 제작 및 전해도금을 진행하였다. 다음은 Fig. 3(d)

와 같이 SU-8 3010 레이어를 코팅하여 센서를 보호하고, 이후 크랙센서 및 NFC칩 연결을 위해 Au 레이어를 Sputter를 이용하여 증착하고 GXR601-46CP를 이용하여 패턴을 제작 완료 하였다(Fig. 3(e)). 이후 Buffered HF를 이용하여 센서를 분리하고, Conductive epoxy를 이용하여 NFC 칩 연결을 진행하였다(Fig. 3(f)).

최종 완성된 센서는 Fig. 4에 나타내었으며, NFC 모듈을 탑재한 SU-8 기반의 웨어러블 센서 제작을 완료하였다. 제작된 센서는 높은 유연성을 가지며 제작된 SU-8의 기판 두께는 100 μ m 두께를 가지며, 유연성 테스트 이후에도 코일 및 전기적 배선의 단선 등의 문제는 발견되지 않았으며 굽힘 등에 따른 안정적인 응용 가능성을 확인하였다.

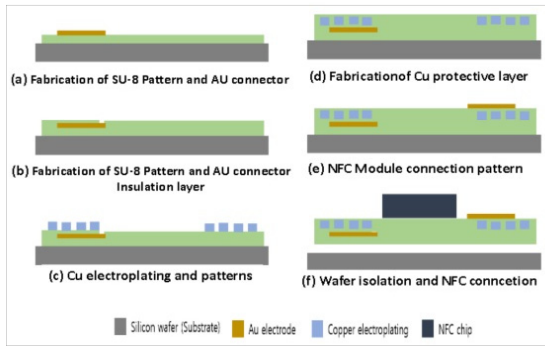


Fig. 3. Schematic diagram of Wearable Sensor Manufacturing Process

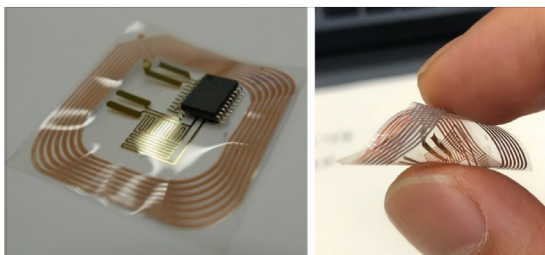


Fig. 4. Completed Biocompatible Smart Wearable Sensor

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 제작된 크랙 센서의 기본 특성 평가를 진행한 결과를 보여 준다. 센서의 초기 저항은 약 98 Ω 을 가지며, 굽힘 변위량 1mm에서 185 Ω , 변화를 보인다. 센서의 초기 응답 시간은 약 99ms로 확인되었으며, 미세

한 변위에도 빠르게 응답할 수 있는 성능을 가진다. 이러한 반응 속도 및 높은 감도는 웨어러블 센서 착용자의 혈관 주변에서의 맥동 감지 등과 같은 미세한 변화를 감지할 수 있다.

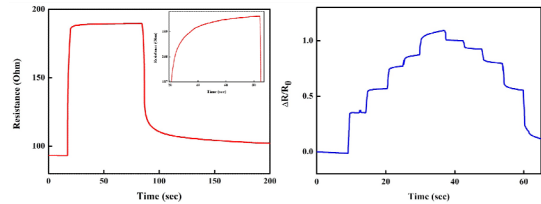


Fig. 5. Smart wearable sensor test results

기본적인 평가가 완료된 크랙센서는 앞서 제작된 NFC 기반의 웨어러블 센서와 반도체 공정을 통해 쉽게 집적화할 수 있으며, 본 연구에서 사용된 NFC 칩의 경우 센서에서 발생하는 저항 변화 값을 신호 변환 없이 직접 읽을 수 있는 Melexis사의 MLX90129 제품을 이용하였다. 적용된 센서는 13.5MHz 대역에서 약 3V의 전압을 칩 구동 및 센서 구동을 위한 직류 변환기가 내장되어 있으며, 크랙센서가 집적화된 웨어러블 센서는 Fig. 6과 같이 경동맥 근처의 피부 표면에 부착하고, 이에 따른 신호를 측정하였다. 출력된 센서 신호는 경동맥의 맥압에 따라 저항 변화 값으로 확인할 수 있으며, 미소 변위에도 효과적인 측정이 가능함을 기초 테스트를 통해 확인하였다. 개발된 웨어러블 센서는 착용자의 급격한 움직임 등에 따른 활성도를 측정할 수 있으며, 이를 이용하여 착용자의 현재 신체 상태 및 이상 여부 등을 효과적으로 모니터링 할 수 있을 것으로 사료된다.

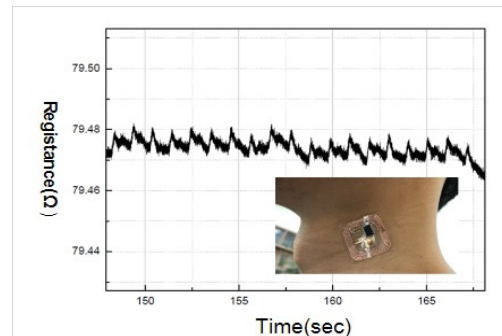


Fig. 6. Biocompatible Wearable Sensor Evaluation with Direct Skin Attachment

5. 결론

빅데이터, 인공지능, 사물인터넷 등으로 대표되는 4차 산업혁명의 시대를 맞이하여, 최근 의료용 사물인터넷 기술의 도약적 발전은 원격 의료를 위한 기술개발을 획기적으로 진행 시키고 있다. 이러한 기술은 인체 부착 가능한 웨어러블 센서가 핵심을 이루며, 체내 pH, 안압, 운동량 등을 측정할 수 있게 하고 있다. 특히 생체 적합성을 가지는 SU-8, PDMS, Parylene 같은 폴리머 재료를 사용하여 신체와의 부착율을 줄이고, 유연성을 늘려 굽힘 및 접힘이 많은 인체에 부착할 수 있게 한 연구들이 국내·외에서 활발히 진행되고 있으며 통신보안이 우수한 NFC 통신 모듈을 이용하여 실시간 생체신호 모니터링을 가능하게 하고 있다. 이러한 생체신호는 실시간으로 무선통신 기술을 응용하여 데이터 클라우드 시스템에 제공되고, 인공지능에 의한 분산처리속도의 급속한 향상에 따라 이상징후가 발견되었을 시 알람을 통하여 효과적인 대응이 이루어질 것으로 기대된다.

특히, 군사적인 측면에서 군사혁신의 방향은 무기체계의 자율화·지능화와 더불어 인간 플랫폼을 향상하려는 휴먼증강의 노력이 병행될 것으로 보이고, 이에 따른 전투원의 신체적·인지적·정서적 상태를 모니터링하는 것은 중요한 요소로 두드러질 것이다. 또한, COVID-19와 같은 팬데믹에 따라 비대면 원격치료를 따른 치료 모델의 혁신이 진행되고 있는 시점에서 웨어러블 센서를 통한 생체 모니터링은 건강한 라이프 스타일 및 활력을 찾기 등 예방적인 부분에서 발전하여 병 등을 조기에 감지·진단·개입 및 치료할 수 있다는 점에서 헬스케어의 시·공간적인 영역의 확장을 가져왔다고 생각 되어진다.

본 논문에서는 높은 감도와 쉬운 제작공정을 가진 웨어러블 센서를 제안하였고, 이를 생체 적합형 폴리머로 센서와 NFC모듈을 통합하여 측정함으로써 웨어러블 센서로의 운용 가능성을 확인하였다. 개발된 웨어러블센서는 유연성이 높으므로 미세진동에도 반응하고 굽힘이 많은 관절 등에도 효과적으로 이용 가능할 것으로 사료되며, 실시간 무선 측정방식을 이용하여 착용자의 인체 활성도를 실시간으로 모니터링 할 수 있다. 향후 연구에서는 센서의 민감도 향상과 저항 측정방식의 다중 센서를 집적화하여 인체 활성도 및 체액 분석을 위한 2중 센서 집적화를 목표로 한다. 개발된 센서는 AR·VR 훈련장에서의 실제 전투원을 대상으로 실험을 하여 군사분야에 효과적으로 도입 가능한지 여부를 확인 할 것이다

감사의 글

본 논문은 육군사관학교 미래전략기술연구소의 연구활동비 지원을 받아 수행되었음.(24-AI-연구소-04)

References

- [1] H. Lim, H. S. Kim, R. Qazi, Y. Kwon, J. Jeong, W. Yeo, "Advanced Soft Materials, Sensor Integrations, and Applications of Wearable Flexible Hybrid Electronics in Healthcare, Energy, and Environment", *Adv. Mater.*, Vol.32, No.15, pp.1901924, Apr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201901924>
- [2] Y. Zhou, C. Wan, Y. Yang, H. Yang, S. Wang, Z. Dai, K. Ji, H. Jiang, X. Chen, Y. Long, "Highly Stretchable, Elastic, and Ionic Conductive Hydrogel for Artificial Soft Electronics", *Adv. Funct. Mater.*, vol.29, no.1, pp.1806220, Jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201806220>
- [3] M. Zhong, L. Zhang, X. Liu, Y. Zhou, M. Zhang, Y. Wang, L. Yang, D. Wei, "Wide linear range and highly sensitive flexible pressure sensor based on multistage sensing process for health monitoring and human-machine interfaces", *Chem. Eng. J.*, vol.412, pp.128649, May 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128649>
- [4] K. Y. Shin, J. S. Lee, J. Jang, "Highly sensitive, wearable and wireless pressure sensor using free-standing ZnO nanoneedle/PVDF hybrid thin film for heart rate monitoring", *Nano Energy*, vol.22, pp.95-104, Apr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.02.012>
- [5] Y. H. Kwak, W. Kim, K. B. Park, K. Kim, S. Seo, "Flexible heartbeat sensor for wearable device", *Biosens. Bioelectron.*, vol.94, pp.250-255, Aug. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.03.016>
- [6] J. Tolvanen, J. Hannu, H. Jantunen, "Stretchable and Washable Strain Sensor Based on Cracking Structure for Human Motion Monitoring", *Sci Rep*, vol.8, no.1, pp. 13241, Sep. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31628-7>
- [7] J. Lee, S. Kim, J. Lee, D. Yang, B. C. Park, S. Ryu, I. Park, "A stretchable strain sensor based on a metal nanoparticle thin film for human motion detection", *Nanoscale*, vol.6, no.20, pp.11932-11939, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1039/C4NR03295K>
- [8] M. Go, X. Qi, P. Matteini, B. Hwang, S. Lim, "High resolution screen-printing of carbon black/carbon nanotube composite for stretchable and wearable strain sensor with controllable sensitivity", *Sens. Actuator A-Phys.*, vol.332, pp.113098, Dec. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113098>

- [9] S.-H. Ha, S.-H. Ha, M.-B. Jeon, J. H. Cho, J.-M. Kim, "Highly sensitive and selective multidimensional resistive strain sensors based on a stiffness-variant stretchable substrate", *Nanoscale*, vol.10, no.11, pp. 5105-5113, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1039/C7NR08118A>
- [10] Z. Tang, S. Jia, F. Wang, C. Bian, Y. Chen, Y. Wang, B. Li, "Highly Stretchable Core-Sheath Fibers via Wet-Spinning for Wearable Strain Sensors", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol.10, no.7, pp.6624-6635, Feb. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b18677>
- [11] M. Amjadi, K. U. Kyung, I. Park, M. Sitti, "Stretchable, Skin-Mountable, and Wearable Strain Sensors and Their Potential Applications: A Review", *Adv. Funct. Mater.*, Vol.26, No.11 pp.1678-1698, Mar. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201504755>
- [12] M. D. Ho, Y. Ling, L. W. Yap, Y. Wang, D. Dong, Y. Zhao, "Percolating Network of Ultrathin Gold Nanowires and Silver Nanowires toward 'Invisible' Wearable Sensors for Detecting Emotional Expression and Apexcardiogram," *Adv. Funct. Mater.*, vol.27, no.25, pp.1700845, Jul. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201700845>
- [13] S. Patel, H. Park, P. Bonato, L. Chan, M. Rodgers, "A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation", *J. NeuroEng. Rehabil.*, Vol.6, pp.1-14, Apr. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1186/1743-0003-9-21>
- [14] KISTEP, "Digital Human Enhancement Future Promising Technologies and Service", *KISTEP Future Forecast Brief 2020-2024*, 2021.
- [15] Y. H. Yoo, "Neuromorphic Technology and Research Trends", *KIEE Magazine*, Vol.68, pp.14-17. Aug. 2019.

윤 영 삼(Youngsam Yoon)

[정회원]



- 2006년 : 미국 뉴욕주립대 전자공학 학과 (석사)
- 2013년 : 미국 텍사스주립대 전자공학과 (박사)
- 2022년 ~ 현재 : 육군사관학교 전자공학과 교수
- 2024년 ~ 현재 : 육사 AI연구센터 기술개발연구실장

<관심분야>

국방과학기술 동향, 반도체, 센서, 바이오, AI, 유·무인 복합, 소요제안 및 기획, 디지털플랫폼