

비침습 웨어러블 유기전기화학 트랜지스터기반 바이오센서의 보안 위협요소

손선영¹, 정찬영², 구지현³, 서병석⁴, 고광만⁴

¹상지대학교 전기전자공학과 교수

²상지대학교 반도체공학과 석사과정

³상지대학교 소프트웨어학과 교수

⁴상지대학교 컴퓨터공학과 교수

sysohn@sangji.ac.kr, kyh970502@naver.com, biostat9@sangji.ac.kr, seobs@sangji.ac.kr, kkman@sangji.ac.kr

Security threats in noninvasive wearable organic electrochemical transistor-based biosensors

Sunyoung Sohn¹, Chanyeong Jung², Jee-Hyun Koo³, Byung-Suk Seo⁴, Kwang-Man Ko⁴

¹Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Sangji University

²Dept. of Semiconductor Engineering, Sangji University

³Dept. of Software, Sangji University

⁴Dept. of Computer Science & Engineering, Sangji University

요 약

본 연구는 Na^+ , K^+ , 포도당과 같은 생체 지표의 연속 모니터링에 최적화된 확장 게이트 유기 전 화학 트랜지스터(OECT) 아키텍처를 활용한 비침습적 웨어러블 바이오센서의 특징들을 분석하였 다. 전자소자 설계 외에도 실시간 생체신호 수집 및 전송에 내재된 주요 보안 위협이 되는 요소들 을 진단함으로써 하드웨어 보안 모듈(HSM), 보안 부팅 프로토콜, 블록체인 기반 데이터 무결성 관 리를 포함한 다층 보안 접근 방식을 제안하고자 한다.

1. 서론

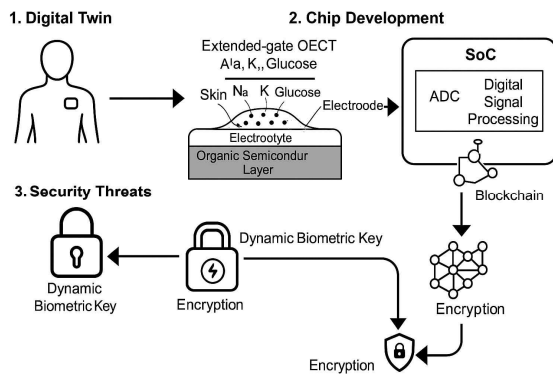
디지털트윈(digital twin) 기술을 활용하여 의료기기 의 연구·개발, 설계, 임상 과정을 디지털 공간에서 활 용하기 위해서는 환자의 생체 데이터를 실시간으로 수집하는 것이 중요하다.[1] 이를 구현하기 위해서는 웨어러블 기기나 바이오센서에 적용할 수 있는 저전 력, 고정밀의 반도체 칩의 개발이 요구되며, 반도체 칩은 심박수, 혈압, 혈당 등 다양한 생체 신호를 측정 하여 데이터를 제공해야한다.[2] 또한 실제 의료기기 에 적용하기 위해서는 실시간 데이터 수집에 따른 개 인정보 보안과 복잡한 데이터 처리와 통신 기능이 포 함된 SoC(System on Chip) 설계가 필요하다.[3]

2. 웨어러블 바이오센서용 칩 개발

웨어러블 의료기기용 유기전기화학 트랜지스터 (organic electrochemical transistor, OECT)는 생체내(in-

vivo) 실험없이 피부표면에 비침습(noninvasive) 방식으 로 생체신호를 정밀하게 측정할 수 있는 고감도 플랫 폼을 제공하므로, 웨어러블 바이오센서 응용에 적합 하다.[4,5] 본 연구에서는 기존 상부 게이트(top-gate) 구조의 OECT 와 비교해 Extended-gate 구조를 적용함 으로써 트랜지스터 본체와 측정부를 분리함으로써 게 이트 노출에 의한 감염 위험 감소와 내구성 향상이 가능한 비침습 측정, 전류 증폭 특성이 뛰어나 저농 도 생체물질도 감지 가능한 민감도, 웨어러블 기기에 적합한 소형화 가능 구조와 mW 단위의 저전력 소비, 그리고 디지털트윈 구현을 위한 생체 데이터(예: Na^+ , K^+ , glucose 등)의 실시간 센싱을 통한 데이터 수집을 진행하고자 한다. 웨어러블 OECT 는 SoC 기반 모듈 과의 집적 가능성이 높으며, 신호 전처리 및 AI 칩 연산 기반의 지능형 센싱 플랫폼 개발에 활용할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서 디자인된 Extended gate 구조는 다양한 바이오센서 모듈로 확장함으로써

SoC 에 직접 연동하여 디지털 신호 처리를 가능하게 함으로써 센서와 프로세서로 통합할 수 있다. 센서 데이터의 시간 변화, 패턴 분석을 위한 AI 연산 SoC 연동 가능해 정밀 진단에 적용할 수 있다. 또한 OECDT 의 아날로그 출력 신호를 SoC 내부 ADC 로 연동하여 정확한 디지털 처리 가능하다. 추가적으로는 여러 개의 extended gate 센서(예: 전해질, 효소, DNA 등)를 1 개의 SoC 로 통합 처리하여 다중 진단 가능한 다채널 진단 모듈로도 확장가능성이 있다. 본 연구는 향후 의료용 심박 및 전해질 센서로 적용될 경우 Extended gate OECDT 를 피부 근처에 위치시키고, Na^+/K^+ 농도 변화 센싱 + SoC 에서 패턴 분석이 가능하다. 또한 glucose 센서로 활용시 효소 기반 extended gate 로 혈당을 측정후 SoC 에서 AI 모델을 통해 이상 탐지 및 정보로 적용할 수 있다.



(그림 1) 웨어러블 OECDT 기반 생체신호 데이터 수집 및 SoC 설계가 포함된 보안 구축에 대한 모식도.

3. 보안 위협요소 및 예방

웨어러블 전자소자 기반의 바이오센서는 비침습의 패치타입으로 신체 바이오정보에 대한 데이터를 실시간 수집시 센서 데이터 위변조 위협이 발생할 수 있으므로 센서 하드웨어 신뢰성 검증 및 암호화 전처리가 필요하다. 또한 SoC 에 무선통신이 탑재되어 도청 및 내부 메모리 해킹가능성으로 인해 저전력의 보안성이 높은 통신 프로토콜(BLE, NB-IoT 기반 암호화)과 하드웨어 보안모듈 및 보안 부트를 구성해야 한다. 특히 개인정보를 저장하고 전송하는 과정에서 이력이 추적 가능하므로 블록체인 기반의 로그 기록 시스템이 필수적이다. 웨어러블 OECDT 센서 기반 생체신호 인증기술은 심전도(ECG), 생체 데이터 등 감지된 생체신호 패턴 자체를 암호화 키로 활용하기위해 dynamic biometric key 생성 및 '전류 변화 패턴'기반 일회성 인증 시스템을 도입해야 한다. 또한 OECDT 센서와 연동된 SoCs 에 암호키 관리를 위한 하드웨어 보안 모듈(hardware security module, HSM) 을 포함시켜

센서-연산-전송의 전체 구간의 보안 확보가 필요하며 SoC 내 secure enclave 영역에 OECDT 신호 처리와 edge AI 로 로컬에서 판단 후 암호화 데이터만 전송하는 방식을 적용할 수 있다. 추가로 개인정보에서 수집한 생체 정보 이력을 블록 체인에 해시값으로 등록하고 데이터 조작 방식을 통해 센서나 SoC 가 해킹 되었을 가능성이 있는 비정상 데이터 패턴을 실시간 감지 및 향후 이상 신호 발생시 자가 차단(secure shutdown) 기능과 의료 AI 학습 데이터 셋을 구축해야 한다.

4. 결론

본 연구는 비침습형 웨어러블 OECDT 바이오센서 기술을 기반으로 디지털트윈 헬스케어 시스템 구현에 필요한 하드웨어 및 보안 기술 요소를 분석하였다. 웨어러블 OECDT 는 생체 신호 측정의 민감도, 소형화, 저전력 동작에 유리하며, SoC 와 통합시 센싱부터 암호화까지 하나의 패브릭 내에서 구현 가능하다. 센서 데이터의 실시간 보호를 위해 물리적 보안, 생체 기반 인증, 블록체인 기반 로그 시스템 등 복합 보안 체계의 도입이 필수적이다. 추후에 실제 응용시 AIoT 연계를 통해 OECDT 와 SoC 패치형 센서를 적용해 생체 신호를 수집, 클라우드로 전송하여 디지털트윈 의료 DB 업데이트가 가능하다. 결론적으로 웨어러블 OECDT 센서는 고감도, 안정성, 저전력 요구에 부합하며, 의료용 SoC 기반 지능형 바이오센싱 플랫폼 구축의 핵심 소자 기술로 자리잡을 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

본 논문은 과학기술정보통신부 재원의 정보통신산업진흥원(H1201-24-1001, 2024 디지털트윈 융합의료 혁신 선도사업) 및 강원특별자치도 '반도체연구개발 지원사업(2024-153 호-001)' 에 의해 수행되었음.

참고문헌

- [1] Zachary J., Manob Jyoti S. 'Digital Twins for Healthcare Using Wearables' Bioengineering, 11, 606, 2024.
- [2] Jayoung K., Alan S. C., Berta Esteban-Fernández de Á., Joseph W. 'Wearable biosensors for healthcare monitoring' Nature Biotechnology' 37, 389, 2019.
- [3] Francisco de M., Horácio C. N., Hugo Plácido da S. 'System on Chip (SoC) for Invisible Electrocardiography (ECG) Biometrics' Sensors, 22, 348, 2022.
- [4] Jonathan R., Sahika I., Alberto S., Róisín M. O., Magnus B., George G. M. 'Organic electrochemical transistors' Nature Review Materials, 3, 17086(1)-(14), 2018.
- [5] Zhiyuan T., Zeyu Z., Feng Y. 'Organic electrochemical transistor in wearable bioelectronics: Profiles, applications, and integration' Wearable Electronics, 1, 1-25, 2024.