

생분해성 보호 필름을 활용한 장기간 사용가능 연속혈당 센서 개발

유태상°, 예준우°, 한솔비°, 장경인°*

대구경북과학기술원 로봇 및 기계전자공학과°

Development of Long-Term Continuous Glucose Sensor Using Biodegradable Protective Film

Tae Sang Yu°, Junwoo Yea°, Solbi Han°, Kyung-In Jang°*

Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST)°

yts3185@dgist.ac.kr, *kijang@dgist.ac.kr

요 약

21 세기 들어 서구화된 식습관과 다양한 환경적 요인으로 인해 대사질환의 발병률이 증가하고 있다. 본 연구에서는 대표적인 대사질환인 당뇨를 지속적으로 관리할 수 있도록 설계된 최소 침습형 혈당 모니터링 시스템을 제시한다.

I. 서 론

21 세기 들어 농축산업의 발전, 식습관 변화, 그리고 생산활동의 변화로 인해 인류는 과거보다 더욱 풍족한 삶을 누리고 있으며, 이로 인해 다양한 환경적 변화에 직면하고 있다. 특히, 기존에는 중장년층에서 주로 발병하던 대사질환(당뇨, 고혈압, 고지혈증 등)이 점차 젊은 연령층에서도 나타나고 있으며, 세계보건기구(WHO) 및 당뇨병 학회의 조사에 따르면 전 세계 당뇨병 환자 수가 급격히 증가하고 있는 추세를 보이고 있다. 이러한 변화 속에서 의료 기술의 발전과 함께 당뇨 관리에 대한 인식과 치료 지침 또한 지속적으로 개편되고 있다.

기존의 당뇨 관리 방식 중 가장 일반적으로 사용되던 방법은 채혈을 통한 혈당 측정이었다. 이 방식은 오랜 기간 사용되면서 안정성이 검증되었으나, 반복적인 채혈로 인한 환자의 지속적인 통증과 불편함이 존재하며, 특정 시점의 혈당 수치만을 측정할 수 있다는 한계를 가진다. 또한, 최근 당뇨 관리에서 중요한 지표로 여겨지는 TIR(Time in Range, 목표 혈당 범위 내 체류 시간)을 확인하기 어려운 단점이 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 지속적인 혈당 모니터링이 가능한 시스템을 개발하였다.

II. 본론

본 논문에서는 혈당 모니터링을 위한 통합 시스템을 개발하고 그 성능을 검증하였다. 해당 시스템은 최소 침습형 유연 탐침, 안정적인 부착을 위한 물리적 부착 필름, 블루투스 기반 무선통신 회로, 시스템 구동을 위한 통합 소프트웨어, 그리고 동물 모델을 이용한 전임상 실험 데이터로 구성된다.

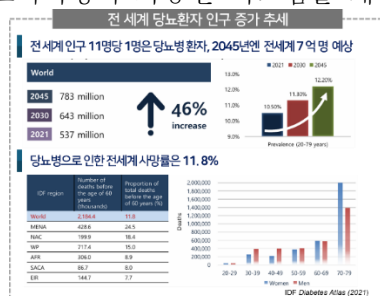
1. 유연 탐침 및 물리적 부착 필름 개발

본 연구에서 개발된 유연 탐침은 피부에 최소 침습적으로 삽입되어 혈당을 실시간으로 모니터링할 수 있도록 설계되었다. 해당 센서는 효소 기반 전기화학 센서로, 백금을 주요 전극으로 사용하며 **3 전극 시스템(작동 전극, 기준 전극, 상대 전극)**으로 구성된다. 작동 전극에는 효소 고정화를 진행하였으며, 기준 전극은 Ag/AgCl 코팅, 상대 전극은 백금 나노구조체를 적용하여 전기화학적 신호의 안정성을 확보하였다. 이러한 구조를 통해 **나노 단위의 전류를 시간대전류법(Chronoamperometry)**을 이용해 실시간으로 연속 측정할 수 있었다.

또한, 물리적 부착 필름은 기존 실리콘 고무 기반 패치 대비 우수한 접착력을 제공하며, 화학적 접촉제를 사용할 때 발생할 수 있는 피부 알레르기 반응을 최소화할 수 있도록 설계되었다. 본 연구에서는 PDMS 기반 실리콘 전구체의 경화 과정에서 Triton X 계면활성제를 활용하여 물리적 부착 필름을 제작하였으며, 이를 통해 피부 부착력과 생체적합성을 동시에 확보하였다.

2. 백금 나노구조체를 활용한 다층구조 센서 개발

본 연구에서는 백금 나노구조체를 적용한 다층 구조 전극을 개발하여 혈당 센서의 감도 및 선택적 반응성을 향상시켰다. 전극 제작 과정에서, 금(Au)



이 증착된 유연 기관 위에 전기화학적 방법을 이용하여 백금(Pt) 나노구조체를 증착하였다. 기존의 2D 형태 백금 전극과 달리, 본 연구에서 개발된 전극은 3D 덴드라이트(dendritic) 구조를 형성하여 높은 표면적을 확보하였다. 이를 통해 센서의 민감도를 증가시키고, 더 많은 효소를 고정화할 수 있는 환경을 조성하였다.

이러한 백금 나노구조체 전극에는 다층 코팅을 적용하여 효소의 안정적인 고정화, 선택적 반응성 및 선형성(linearity) 개선을 목표로 개발이 진행되었다. 백금 나노구조체의 형상은 그림 3에서 확인할 수 있으며, 3D 덴드라이트 구조가 명확하게 형성된 것을 관찰할 수 있다.

전극의 효소 고정화 과정에서는 **키토산(chitosan), 실리카 입자(silica particles), 포도당 산화효소(glucose oxidase, GOx)**를 혼합한 유·무기 하이브리드 재료를 코팅하여 반응성을 향상시켰다. 이후, 나피온(Nafion)과 반투과성 폴리우레탄(permeable polyurethane) 코팅층을 추가적으로 적용하여 효소 고정층을 보호하고 선택적 반응성과 측정 범위에서의 선형성을 확보하였다.

개발된 센서는 20 mM (360 mg/dL)의 혈당 농도 범위에서 안정적인 측정 성능을 보였으며, 이를 통해 고감도, 고선형성을 갖춘 지속형 혈당 모니터링 센서로서의 가능성을 확인할 수 있었다.



3. 무선회로 및 통합 시스템 구성

본 연구에서 제시된 연속혈당 모니터링 시스템은 블루투스 기반 무선통신 회로와 LMP 91000 전기화학 회로가 통합되어 구성되어 있다. 이 시스템은 센서에서 얻은 전기화학적 분석 데이터를 실시간으로 스마트 장치와 데이터 통신할 수 있도록 하여, 혈당 수치 모니터링을 보다 효율적으로 구현할 수 있다. LMP 91000은 고정밀 전기화학 분석을 위한 전자 회로로, 센서와의 상호작용을 통해 정확한 데이터를 생성하고 이를 실시간으로 처리할 수 있는 기반을 제공한다.

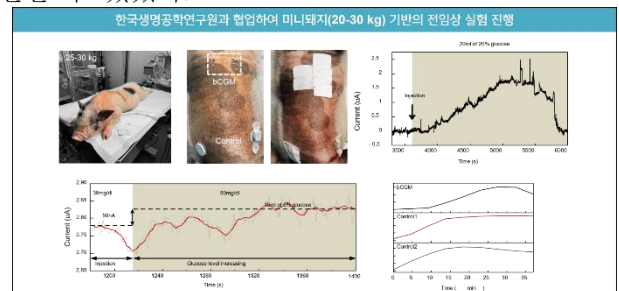
또한, 시스템의 안정적 구동을 위해 회로 보호 및 안정성을 고려한 보호용 커버를 설계하였다. 이 커버는 회로의 물리적 손상을 방지하고, 다양한 외부 환경에 의해 발생할 수 있는 오류를 최소화하는 역할을 한다. 통합된 무선통신 회로와 보호 커버 설계를 통해 시스템의 내구성 및 신뢰성을 높였으며, 사용자에게 보다 안정적이고 지속 가능한 혈당 모니

터링 환경을 제공할 수 있다.

4. 동물 대상 전임상 실험

개발된 연속 혈당 모니터링 시스템은 미니돼지를 대상으로 한 동물 전임상 시험을 통해 성능을 검증하였다. 실험에서는 동물 개체의 피부에 혈당 센서를 삽입하고, 이를 통해 실시간으로 혈당을 모니터링하였다. 혈당 변화를 정확히 추적하기 위해, 정맥을 통한 고농도 포도당 주입으로 혈당 변화를 유도하고, 그에 따른 반응을 측정하였다.

이 과정에서 대조군으로는 채혈식 혈당기(BGM)와 시중에서 판매 중인 상용 CGM 제품을 사용하여 비교 분석을 진행하였다. 실험 결과, 개발한 CGM 시스템은 상용화된 기존 제품들과 유사한 혈당 반응 추세를 보였으며, 이는 개발된 시스템이 정확한 혈당 모니터링을 제공할 수 있음을 시사한다. 이러한 전임상 시험을 통해 시스템의 효능과 신뢰성을 확인할 수 있었다.



III. 결론

본 논문에서는 백금 나노구조체를 활용한 효소 기반 연속혈당 모니터링 시스템을 제시하고 있다. 백금 나노구조체를 적용하여 기존 2D 구조의 센서보다 반응성을 향상시켰으며, 다층구조 설계를 통해 포도당에 대한 선택적 반응성과 선형성을 개선하였다. 또한, 무선통신 회로, 시스템 보호 커버, 그리고 이를 제어하는 소프트웨어까지 포함된 통합 시스템 개발을 진행하였다. 최종적으로, 개발된 통합 시스템을 사용한 동물 대상 전임상 실험에서 기존 상용화된 제품과 유사한 혈당 반응 추세를 확인하였고, 이를 통해 통합 시스템 개발을 성공적으로 마무리하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부에서 지원하는 DGIST 일반사업에 의해 수행되었습니다 (24-SENS2-02).