

전기화학센서 계측을 위한 소형 리드아웃 회로 설계

신화윤*, 안소현*, 김민지*, 엄지용**

Design of a Small-Size Readout Circuit for Electrochemical Sensor Instrumentation

Hwayun Shin*, Sohyeon Ahn*, Minji Kim*, and Ji-Yong Um**

요약

본 연구는 benchtop 타입 전기화학센서 계측 기기를 소형화된 리드아웃 회로로 대체하고, 향후에는 목적에 맞게 customize된 회로를 개발하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 송신단(DAC 기반 양극성 전압 구동), 수신단(TIA 및 ADC 기반 전류 수신 및 디지털 변환), FPGA 기반 컨트롤러로 구성된 PCB 회로를 설계하였다. 회로는 FPGA에서 생성된 ramp 또는 DC 파형을 DAC으로 출력하고 센서의 미세 전류를 TIA·ADC를 통해 정밀하게 디지털화한다. 제어는 UART 기반 PC 인터페이스로 수행되며 Python 소프트웨어를 통해 파형 설정 및 데이터 수신에 가능하다. 시스템은 4-layer PCB와 Spartan-7 FPGA(CMOD S7)를 기반으로 구성되었으며 $\pm 1.65V$ 전압과 $\pm 100\mu A$ 전류 범위에서 선형성과 안정성이 확인되었다. 또한, Proof-of-concept로 전기화학센서를 연결해 산화·환원 반응을 측정하였고 기본적인 임피던스 측정도 수행하였다. 향후 benchtop 장비에서 지원하지 않는 기능(장시간에 따른 임피던스 측정)을 FPGA 기반 로직으로 구현해 맞춤형 계측 플랫폼으로 확장할 예정이다.

Abstract

This study aims to replace the benchtop type electrochemical sensor measuring device with a miniaturized readout circuit and develop a circuit customized for the purpose in the future. To this end, a PCB circuit consisting of a transmitting end (DAC-based bipolar voltage drive), a receiving end (TIA and ADC-based current reception and digital conversion), and an FPGA-based controller was designed. The circuit outputs the ramp or DC waveform generated by the FPGA to the DAC and precisely digitizes the microcurrent of the sensor through the TIA and ADC. Control is performed with a UART-based PC interface and waveform setting and data reception are possible through Python software. The system was configured based on 4-layer PCB and Spartan-7 FPGA (CMOD S7), and linearity and stability were confirmed in the range of $\pm 1.65V$ voltage and $\pm 100\mu A$ current. In addition, oxidation and reduction reactions were measured by connecting an electrochemical sensor with a proof-of-concept, and basic impedance measurements were also performed. In the future, functions not supported by benchtop equipment (impedance measurement over long time) will be implemented with FPGA-based logic and expanded to a customized measurement platform.

Keywords

Electrochemical Sensor, Read-out Circuit, Sensor Interface, Field Programmable Gate Array (FPGA), UART Interface

* 국립금오공과대학교 바이오메디컬공학과, Email : tlsgkdb4605@kumoh.ac.kr

** 국립금오공과대학교 바이오메디컬공학과, 메디컬IT융합공학과 교수, Email : jyum@kumoh.ac.kr, 교신저자

※ This work was supported in part by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation (NRF) of Korea funded by the Ministry of Science and ICT (RS-2023-00244635), the Information Technology Research Center (ITRC) support program funded by the Ministry of Science and ICT (IITP-2025-RS-2024-00438288), and Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government (MOTIE, P0017011).

I. 서 론

최근 바이오센서 기술은 질병 조기 진단과 건강 모니터링에 중요한 역할을 하며 특히 전기화학센서는 저비용, 소형화, 높은 민감도 등의 장점으로 널리 사용되고 있다. 이 중 도파민(dopamine)과 같은 생체분자의 정량 측정은 신경계 질환의 조기 진단에 필수적이다.

그러나 기존에는 고가의 상용 장비가 주로 사용되어 휴대용 의료기기 개발에 한계가 있었다 [1]. 따라서 본 연구는 소형화 및 고해상도 측정이 가능한 전기화학센서 전용 리드아웃 회로를 개발하여 목적에 맞게 customize 된 회로를 개발하는 것을 목표로 한다.

II. 전기화학센서 계측 전용 PCB 기반 회로

2.1 제안하는 회로 시스템

본 연구에서 제안하는 리드아웃 회로는 전기화학 바이오센서로부터 발생하는 산화/환원 전류를 고해상도로 측정하기 위해 설계되었으며, 디지털 제어부(FPGA)와 아날로그 계측부(DAC, TIA, ADC)로 구성된다. 전체 시스템은 손바닥 크기의 4층 PCB에 집적되어, 휴대형 계측 장치로서의 활용 가능성을 고려하였다.

회로는 크게 송신부와 수신부로 나뉘며, FPGA 내부에는 VIVADO로 설계된 Ramp FSM과 DC FSM 두 종류의 파형 생성 상태머신이 구현되어 있다.

2.2 전압 구동 회로

송신부는 16비트 해상도의 DAC8411을 기반으로 하며, SPI 인터페이스를 통해 FPGA로부터 제어 신호를 수신한다. 기본적으로 DAC는 0~3.3V의 단극성 전압을 출력하지만, 센서 구동을 위해 $\pm 1.65V$ 의 양극성(bipolar) 전압 파형이 필요하다 [2]. 이를 위해 OPAMP 기반 반전 증폭 및 level shifting 회로를 설계하여, 평균 전압 0V 중심의 삼각파와 ramp를 안정적으로 생성하였다. 또한 전류 및 임피던스를 측정하기 위한 정전압 DC도 안정적으로 생성하였다.

2.3 전류 수신 및 아날로그-디지털 변환

센서에서 출력되는 미세 전류($\pm 100 \mu A$)는 TIA(Transimpedance Amplifier) 구조를 통해 전압으로 변환된다 [3]. 설정된 피드백 저항을 기준으로 약 $\pm 1.6V$ 의 전압 범위를 형성하며 이후, ADC Driver를 통해 단일 종단 신호를 차동 신호로 변환하여 12비트 해상도의 ADC로 입력된다. ADC는 SPI 기반 상용 칩을 사용하며 생체 신호 계측에 적합한 샘플링 속도와 정확도를 고려하여 설계하였다.

2.4 FPGA 기반의 회로 제어

디지털 제어는 Xilinx Spartan-7 기반의 CMOD S7 보드에서 수행되며 내부에는 파형 생성 FSM, SPI 제어 로직, UART 통신 모듈이 구현되어 있다. FPGA 내부에는 삼각파를 생성하는 Ramp FSM과 정전압 생성을 위한 DC FSM이 포함되어 있으며 ramp_enable, dc_enable, dc_input 등의 제어 신호를

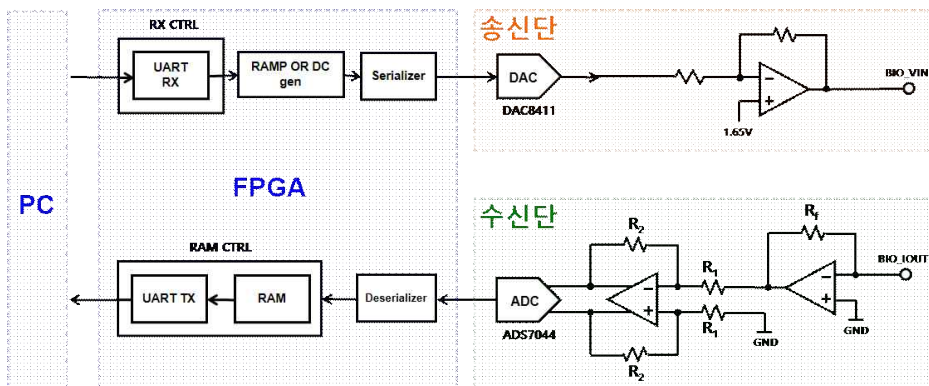


그림 1. 전기화학센서 계측 전용 리드아웃 회로 다이어그램

Fig. 1. Readout circuit diagram dedicated to electrochemical sensor measurement

통해 원하는 파형을 선택하고 동작시킬 수 있다.

PC와 FPGA 간의 통신은 UART 인터페이스(115200 bps, 8-N-1 설정)를 통해 이루어진다. 사용자는 Python 기반 소프트웨어를 이용해 ramp 파형과 DC 전압을 생성하기 위한 set_min, set_max, dc_input 등 다양한 제어 명령을 전송하며, 이는 실시간으로 FPGA 내부 FSM 제어 및 DAC 설정에 반영된다. 측정된 ADC 결과는 12비트 단위로 UART를 통해 다시 PC로 송신되며 수신된 데이터는 Python 환경에서 필터링(Moving Average, EWMA), 시각화, 저장 등의 후처리를 거쳐 분석된다.

III 구현 결과

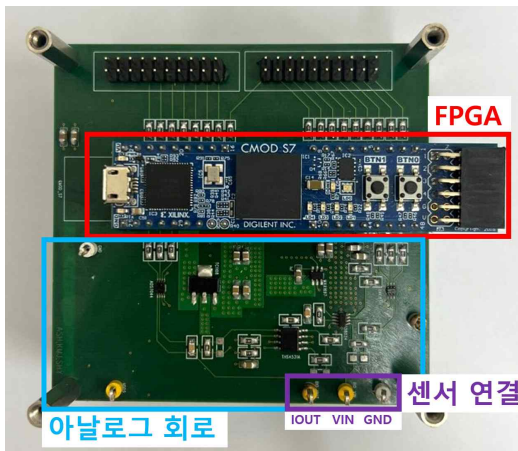


그림 2. 전기화학센서 전용 반도체 리드아웃 회로 PCB

Fig. 2. Readout PCB for electrochemical sensors

회로는 PADS를 이용하여 4-layer PCB로 설계되었으며 각 층은 아날로그 회로(TOP), GND(Inner 2), ±전원(Inner 3), 디지털 신호 및 3.3V(Bottom)로 구성된다. 전원은 5V 입력을 기반으로 LDO로 3.3V, 스위칭 레귤레이터로 -3.3V를 생성하여 공급한다. 모든 전원 라인에는 탄탈 및 세라믹 커패시터를 병렬로 배치하여 고주파 잡음을 억제하고 안정적인 아날로그·디지털 전원 공급을 유지하였다.

전원 핀에는 Decoupling Capacitor를 근접 배치하여 고속 신호의 안정성과 노이즈를 억제하였으며 아날로그 및 디지털 부품의 간섭을 줄이기 위해 레이아웃 최적화를 수행하였다.

표 1. 구성부품 및 사양

Table 1. Configuration parts and specification

항목	구성부품 / 사양
DAC	16비트, DAC8411
ADC	12비트, ADS7044
FPGA	Xilinx Spartan-7 (CMOD S7)
출력 파형	± 1.65V ramp
전류입력범위	-100 μ A ~ +100 μ A
회로 크기	4-layer PCB, 손바닥 크기

외부 저항(10k Ω)을 통해 -100 μ A ~ +100 μ A 범위의 입력전류를 인가하고 회로 출력으로부터 ADC 디지털 코드 응답을 측정하였다. 전류는 ramp 파형 또는 DC 전압 형태로 변환되었으며 TIA 및 차동 드라이버를 거친 후 ADC에 입력되었다. 결과적으로, 디지털 출력은 0~4095 범위에서 출력되었으며 0~4095 범위 내에 DC 입력 시 전류 ADC 응답은 그림 3과 같다. 이는 시스템 전체의 아날로그 프론트엔드가 정상적으로 동작함을 보여준다. 그림 4는 Python 환경에서 그림 3 데이터를 필터링한 후 필터(Moving Average)의 성능 평가를 나타낸 히스토그램 및 가우시안(Gaussian) 분포이다.

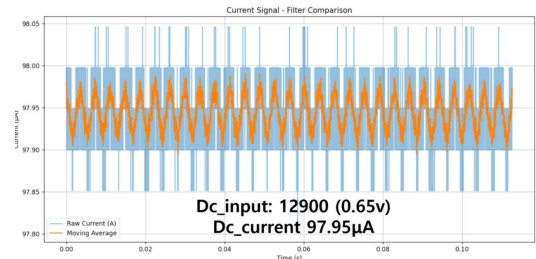


그림 3. 입력전류 대비 DC 전류 ADC 응답 평가

Fig. 3. Evaluation of ADC response to DC input current

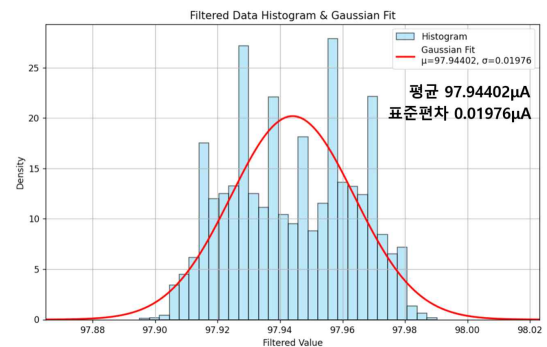


그림 4. ADC 응답 Moving Average Filter 히스토그램

Fig. 4. Histogram of filtered ADC response

특정 바이오마커에 대한 반응성을 지니는 효소가 표면 처리된 3전극 기반의 전기화학센서를 이용하여, 본 연구에서 구현된 리드아웃 회로의 임피던스 측정 기능을 추가로 평가하였다. 측정 셋업은 그림 5와 같으며, 시료로 사용된 전해질은 potassium ferricyanide이며, 0.5mM 농도 조건에서 측정을 수행하였다. 산화-환원 반응을 측정하기 위해, 구현된 회로를 이용하여 ramp 파형을 전기화학센서에 인가한 후, 전류를 획득하고 디지털 코드로 변환하였다. 산화-환원 반응 실험에서 센서에 인가된 전압 파형은 그림 6과 같으며, 측정된 전류 파형은 그림 7과 같다. 해당 실험을 통해, 기본적인 산화-환원 반응 기능을 확인하였으며, 센서의 가역적 반응에 따른 반복적인 특성 커브가 관측되었다.

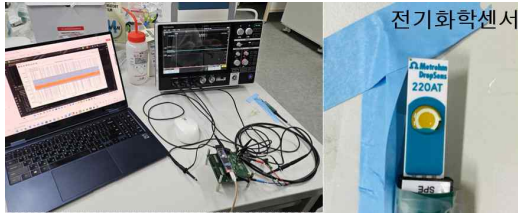


그림 5. 측정 환경 및 전기화학센서
Fig. 5. Measurement setup and biosensor



그림 6. 센서 구동 전압
Fig. 6. Sensor drive voltage

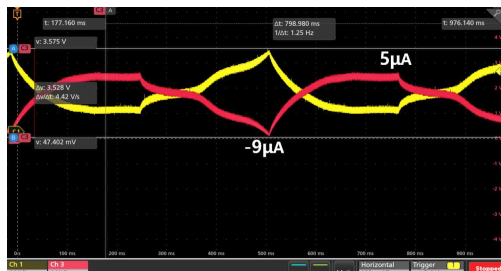


그림 7. 바이오센서로 측정한 산화 환원 반응
Fig. 7. Redox reaction detected by biosensors

IV 결론

본 연구에서는 기존 benchtop 전기화학센서 계측 기기의 한계점을 대체한 휴대형 및 맞춤형 계측 시스템을 위한 소형 리드아웃 회로를 설계 및 구현하였다. 제안된 시스템은 DAC 기반의 양극성 전압 송신부, TIA-ADC 기반의 전류 수신부, 그리고 Spartan-7 FPGA 기반의 디지털 제어부로 구성되어 있으며 전체 회로는 4-layer PCB에 집적되었다.

$\pm 1.65V$ 의 전압 구동과 $\pm 100\mu A$ 의 전류 측정 범위 내에서 높은 선형성과 안정성을 보였으며, FPGA를 통한 ramp 또는 DC 파형 생성을 UART 기반 PC와 연동하여 실시간 제어 및 데이터 수집이 가능함을 검증하였다. 또한, 상용 전기화학센서와의 연결로 산화·환원 반응 측정 및 기본적인 임피던스 분석 기능을 수행함으로써 시스템의 실효성과 응용 가능성을 확인하였다.

다만, 현재 시스템은 장시간에 따른 임피던스 측정 기능이 구현되어 있지 않아 시간 축에서의 연속적인 임피던스 분석에는 한계가 있다.

향후, FPGA 기반 로직을 확장하여 benchtop 장비에서 제공하지 않는 장시간 임피던스 측정 및 기타 맞춤형 계측 기능을 구현함으로써, 정밀 바이오센서 계측을 위한 독립형 플랫폼으로 구현할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] S. Parsnejad, Y. Gtat, T.-Y. Lin, X. Liu, P. B. Lillehoj, and A. J. Mason, "Self-ranging thumb-sized multichannel electrochemical instrument for global wearable point-of-care sensing," Proc. IEEE Biomed. Circuits Syst. Conf. (BioCAS), pp. 57–60, 2018.
- [2] C. Ferreira, F. Barry, M. Todorović, P. Sugrue, S. R. Teixeira, and P. Galvin, "PULSE: A fast portable unit for lab-on-site electrochemistry," Sensors, vol. 25, no. 3, p. 762, Jan. 2025.
- [3] H. Li, X. Liu, L. Li, X. Mu, R. Genov, and A. J. Mason, "CMOS electrochemical instrumentation for biosensor microsystems: A review," Sensors, vol. 17, no. 1, p. 74, Dec. 2016.