

2025 IEEE CICC Review

한국과학기술원 바이오및뇌공학과 박사과정 석동열

Session 26 Advanced Biopotential Interfaces

이번 2025 IEEE CICC의 Session 26, Advanced Biopotential Interfaces에서는 총 7편의 논문이 선정되어 발표되었다. 이 세션에서는 바이오폠펌셜(Biopotential)을 수집하는 계측(instrumentation 또는 recording) 회로와 유발하기 위한 자극기(stimulator)를 주로 다룬다. 전력 효율 증대, 입력 범위 증대, 공통모드 제거 성능향상, 노이즈 감소 등 계측회로 및 자극기가 갖추어야 할 기본적인 성능 지표를 개선하기 위한 연구 논문과 바이오폠펌셜 인터페이스의 활용 범위를 넓히고자 하는 응용 연구에 관한 리뷰가 소개되었다.

#26-2 본 논문은 조지아텍(Georgia Tech) 및 에머리대학(Emory University)의 연구진이 발표한 논문으로, 32채널의 뉴럴 레코딩을 위한 고해상도 시간-다중화 방식(time-division multiplexing) 방식의 아날로그 프론트엔드(AFE)를 제안한다. 제안된 회로는 85.4dB의 SNDR 성능을 갖추었으며, 자극 아티팩트(stimulation artifact) 발생 시에도 변환 손실 없이 신경 신호를 지속적으로 획득할 수 있는 변환 중 아티팩트 복구(within-conversion artifact recovery) 기능을 탑재한 것이 특징이다. 일반적으로 고밀도 뉴럴 인터페이스 시스템은 전극 수를 늘리는 과정에서 회로 면적과 전력 소모가 급증하게 된다. 이를 해결하기 위한 시간-다중화 기반 구조는 여러 채널을 하나의 변환기와 공유함으로써 효율적인 집적이 가능하지만, 자극 아티팩트(stimulation artifact)로 인한 신호 왜곡이나 샘플 손실 문제가 존재해왔다. 특히 전기 자극이 잦은 페루프 자극 시스템에서는 이 문제로 인해 실시간 신호 획득이 어렵다.

본 연구에서는 이를 극복하기 위해, IDSM(incremental delta-sigma modulation) 기반의 변환 구조를 사용하면서, 변환 주기 내 아티팩트를 실시간 감지하고 무효화된 반쪽 샘플링 구간을 자동으로 회피하여 반대쪽 구간으로 전환하는 회복(recovery) 구조를 회로 내에 통합하였다. 이 구조는 8.8 μ s 이내의 짧은 지연 시간으로 아티팩트를 검출하고 처리할 수 있으며, 이를 통해 변환 누락 없이 연속적인 신호 획득이 가능해졌다. 또한, coarse SAR + fine DSM의 듀얼 루프를 활용한 incremental zoom ADC 구조를 사용하여 전력과 면적 효율을 동시에 확보하였다. 특히, DAC의 비선형성으로 인한 SNDR 감소를 보완하기 위해 데이터 가중 평균(DWA) 기반의 디지털 보정 기법을 4+4bit 세그먼트 DAC에 적용

하였고, 이를 통해 DAC 비선형 누적 오차에 대한 보정을 실시간으로 수행하였다.

회로의 전류 입력단은 차퍼-인버터(chopped inverter) 기반의 Gm-CCO 구조를 사용하여 플리커 잡음(flicker noise)을 억제하고, 100MΩ 이상의 입력 임피던스를 확보하였으며, Gm-CCO의 오프셋 보정 및 디지털 데시메이션(decimation) 필터도 온칩으로 구현되었다. 결과적으로, 제안된 회로는 아티팩트가 수시로 발생하는 페루프 환경에서도 높은 SNDR와 연속적 신호 획득 성능을 보장하면서, 프로세스 스케일링에 유리한 디지털 친화적 구조를 유지한다. 본 회로는 대규모 전극 어레이 시스템에 적합하며, 고밀도 신경 레코더 시스템의 전력 및 신호 충실도 문제를 동시에 해결하는 방향으로 설계되었다. 구체적인 측정 결과로는 85.4dB SNDR, sub-9μs 회복지연, 채널 당 0.92μW 전력 소모, 그리고 고전압 아티팩트 존재 하에서도 지속적인 신호 획득 성공 사례를 제시하였다. 본 회로는 65nm CMOS 공정으로 구현되었으며, 0.055mm²의 면적 위에 구현되었다.

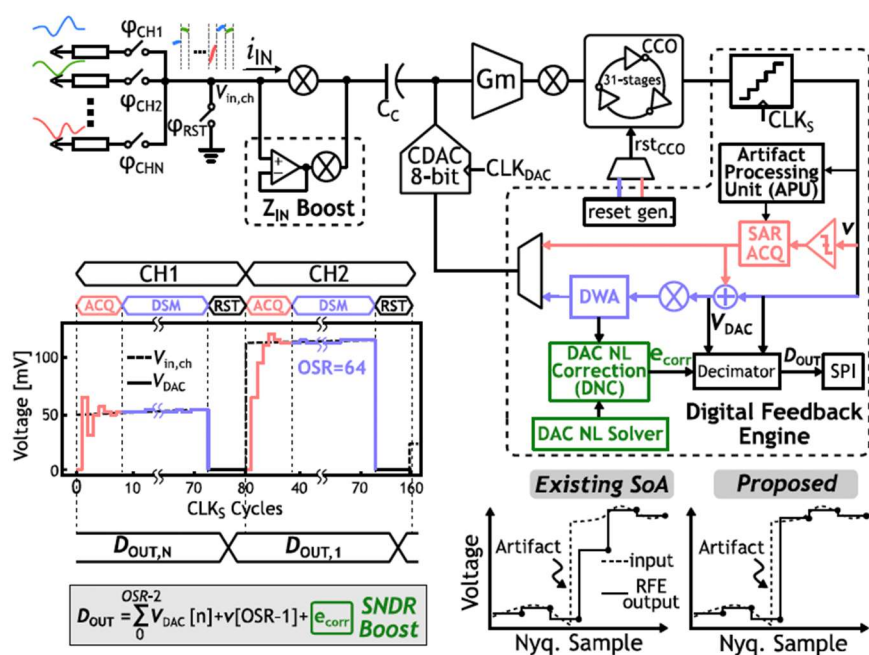


Fig. 1. Time-multiplexed IDSM-based neural recording front-end architecture (top), achieving rapid artifact recovery (bottom-right) and boosted output SNDR (bottom-left).

[그림 1] Mandal 등은 32채널 TDM 기반의 뉴럴 레코딩 프론트엔드에서 변환 중 아티팩트 복구가 가능한 구조를 제안하였다. 제안된 아키텍처는 SAR 기반 추정 과정과 DSM 기반 세부적인 값 추적 과정을 통합하여 높은 SNDR을 확보하면서도, 자극에 의해 발생한 아티팩트를 변환 주기 내에서 검출하고 회피할 수 있도록 한다. 이를 통해 자극 중에도 오랜 복구 지연 없이 신경 신호 획득이 가능하며, 고집적 및 저전력 아키텍처를 동시에 달성할 수 있다.

#26-3 본 논문은 중국 동제대(Tongji University)의 연구진이 발표한 논문으로, 전류 제어

방식(current-controlled)의 무선 신경 자극기를 8mm³ 패키지 내에 완전 통합하여 구현하고, 71.7%의 피크 효율 및 전류 범위 전체에서 13.5% 이내의 효율 변동률을 달성한 고효율 구조를 제안하였다. 기존의 무선 이식형 신경 자극기(W-IPNS)들은 이식성은 우수하지만, 넓은 전류 범위에서 전압 조절이 어려워서 출력 손실(power loss)이 크고, 이에 따른 조직 과열(tissue heating) 문제가 제기되어 왔다. 특히 전류 제어형 자극기(current-controlled stimulator, CCS) 구조는 자극 정밀도 측면에서 유리하지만, 다양한 전류 수준에 적절히 대응하지 못해 비효율적이었다.

연구진은 이를 해결하기 위해 다중 전하펌프(charge pump, CP) 어레이 기반의 동적 전압 조절 시스템(Dynamic Voltage Scaling)을 설계하였다. 자극 전류의 크기에 따라 CP 유닛이 자동으로 선택되어 공급 전압을 조절하고, 전류원 전압이 기준치보다 높아질 경우 CP 동작을 중단하는 페루프 제어 구조를 통해 과도한 전압 공급을 방지하였다. 또한, 자극 펄스는 양극성(biphasic) 이중위상으로 구성되며, 100kbps 속도의 초음파 통신을 통해 16비트 명령어 기반으로 유연하게 설정할 수 있도록 하였다. 회로는 65nm CMOS 공정으로 제작되었으며, 0.44mm² 면적에 구현되었다. 최대 6V 자극 전압, 100 μ A ~ 1.2mA 자극 전류 범위, 45단계 전류 설정을 지원한다. 회로 전체는 단일 칩 내에 완전 집적되어 8mm³ 크기의 패키지로 구현되었다. 측정 결과, 자극 전류 범위 전반에 걸쳐 최대 71.7% 효율, 13.5% 이내의 효율 변동률, 우수한 전력-면적 균형, 낮은 발열 특성을 확인하였으며, 심부 자극 등 다양한 신경 자극 응용에서의 확장성을 보여주었다.

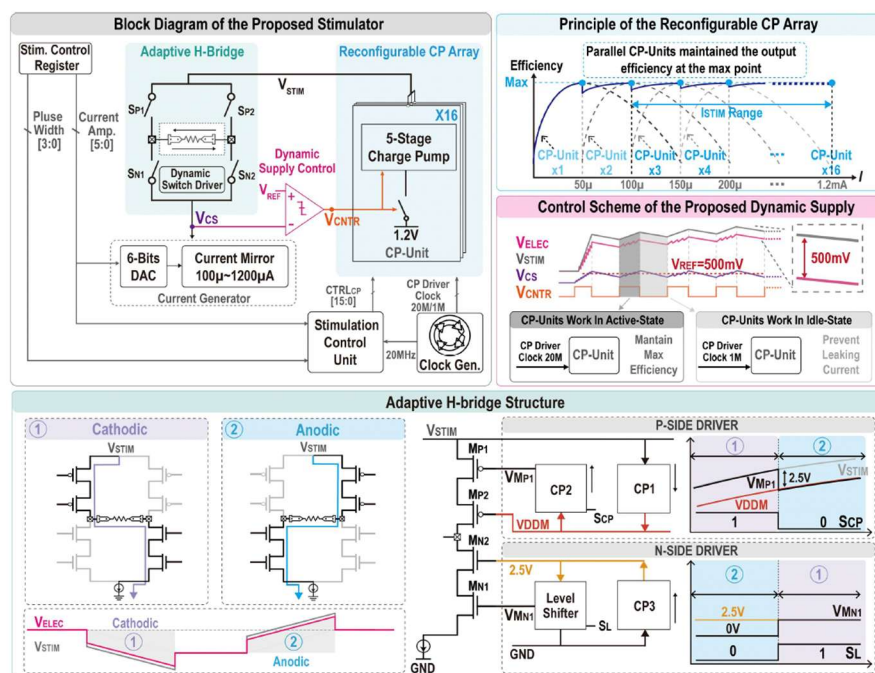


Fig. 3. Block diagram, circuit implementation, and working principle of the proposed reconfigurable charge-pump-based near-adiabatic stimulator.

[그림 2] 제안된 전류 제어형 신경 자극기의 아키텍처 및 동적 공급 전압 조절 구조. 시스템은 재구성 가능한 charge pump(CP) 어레이와 펄스 전압 제어 회로를 통합하여, 요구 자극 전류 (ISTIM)에 따라 자극 전압(VSTIM)을 실시간으로 조절한다. 16개의 CP 유닛은 전류원 전압을 감지하여 선택적으로 활성화되며, 이를 통해 전력 손실을 최소화하고 에너지 효율을 극대화한다. 양극성 자극은 초음파 기반 무선 통신으로 수신된 16비트 명령어에 따라 제어된다.

저자정보



석동열 박사과정 대학원생

- 소속 : 한국과학기술원
- 연구분야 : 바이오메디컬 응용 회로설계(센서 및 신호처리)
- 이메일 : sukd10@kaist.ac.kr

2025 IEEE CICC Review

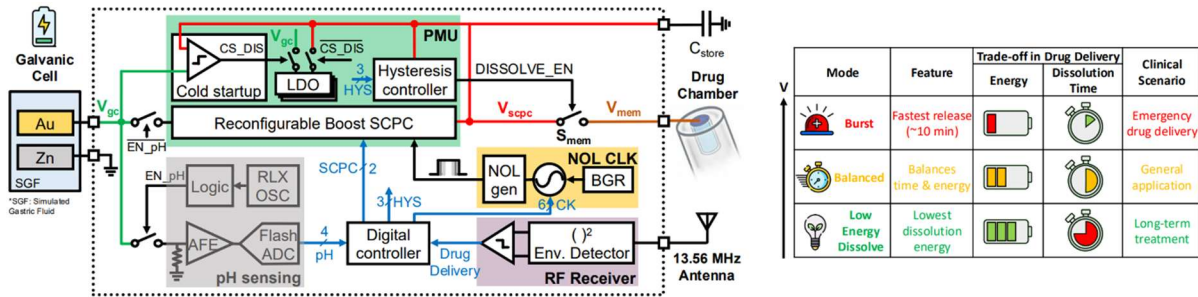
DGIST 전기전자컴퓨터공학과 박사과정 위정윤

Session 36 Communication Computing and Sensing Techniques in Biomedical Systems

2025 IEEE CICC의 Session 36에서는 웨어러블 및 이식형 바이오 시스템을 위한 생체 신호 측정, 온칩 신호 처리, 무선 통신 기술을 다룬다. 초저잡음 센서, 공통모드 간섭 억제, RR 간격 분석 등 정밀 측정을 위한 회로 기술이 소개되었다. 전체적으로 의료용 저전력 통합 회로 설계의 실용성과 확장 가능성을 보여준 세션이다.

#36-1 RPG-HBC: Reconfigurable Passive Galvanic Human Body Communication for Bioelectronic Implants under Varying Channel Conditions

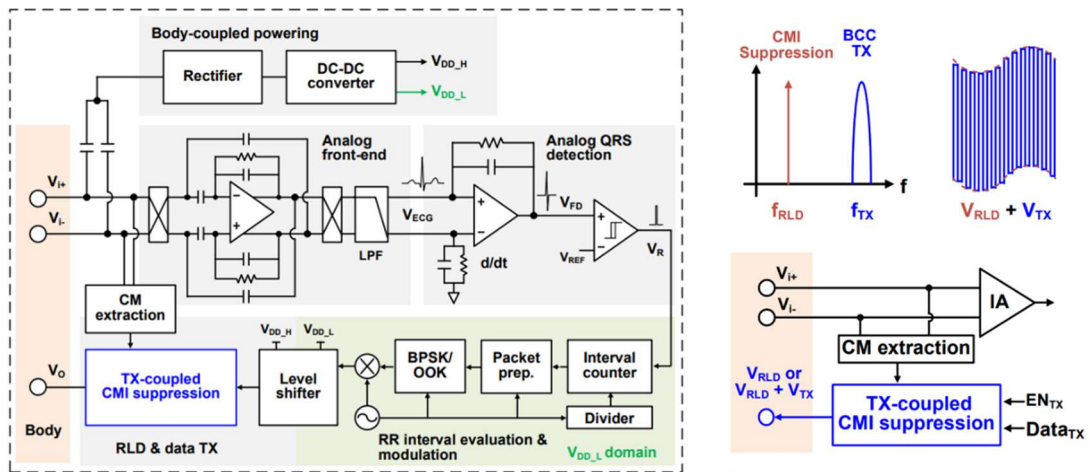
본 논문에서는 시간에 따라 변하는 인체 내 채널 환경에서도 안정적인 무선 통신을 구현하기 위해, 재구성 가능한 수동형 갈바닉 인체 통신 구조인 RPG-HBC를 제안했다. 생체 삽입형 디바이스는 조직 전도도나 전극 접촉 품질이 달라짐에 따라 채널 임피던스가 변동되므로, 안정적인 통신을 유지하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문은 기본 모드, 인덕티브 로드 모드, 인덕티브 그라운드 모드의 reconfigurable 한 세 가지 동작 모드를 제안했다. 기본 모드는 조직의 전도도가 높고 채널이 주로 저항 성분일 때 적합하며, 단순한 회로 구성으로 에너지 효율이 높다. 인덕티브 로드 모드는 조직의 전도도가 낮고 커패시턴스 성분이 지배적인 경우에 효과적이며, 인덕터를 직렬로 삽입하여 반사 임피던스를 증가시키고 수신 신호를 증폭한다. 인덕티브 그라운드 모드는 전극 접촉이 불안정하거나 외부 압력이 약해지는 상황에서 유리하며, 인덕터를 저임피던스 경로로 활용해 반사 손실을 줄이고 신호 세기를 센싱한다. 제안된 구조는 반사된 신호를 직류로 변환하는 6단계 정류기, 아날로그 신호를 디지털로 변환하는 VCO 기반 변환기, 커패시터 뱅크를 제어하는 적응형 제어기, 그리고 세 가지 모드 전환을 위한 스위치들로 구성되어 있다. 커패시터 뱅크의 등가 커패시터는 외부 인덕터와 함께 인덕턴스를 조절하는 역할을 하며, 제어기는 coarse-to-fine 탐색 방식을 통해 수신 신호의 세기를 기준으로 최적의 설정을 찾아낸다. 이러한 이중 단계의 탐색 방식은 복잡한 보정 회로 없이도 실시간으로 환경 변화에 적응할 수 있게 하며, 회로의 전력 소모를 최소화하면서도 안정적인 통신 성능을 유지할 수 있도록 하여 결과적으로 RPG-HBC는 인체 조직 내에서 발생할 수 있는 다양한 채널 조건 변화에 능동적으로 대응할 수 있다는 장점을 가진다.



[그림 4] 제안된 시스템 및 안정적인 통신을 위한 세 가지 모드

#36-2 A Wireless Biopotential Sensing Node with Simultaneous Body-Channel Communication by TX-Coupled 21 VPP Common-Mode Interference Suppression

본 논문에서는 웨어러블 생체 신호 측정 시스템에서 저주파 생체 신호를 연속적으로 측정하고 이를 body-coupled 통신을 통해 외부로 전송하는 통합형 시스템을 제안했다. 일반적인 웨어러블 시스템을 사용하여 생체 신호 측정과 무선 송신을 동시에 수행할 때, 통신회로와 생체 신호 측정회로 간 간섭이 발생하게 된다. BCC 송신기의 고주파 신호가 인체를 통해 RLD (Right-Leg-Driving) 회로의 공통모드 제거 경로로 누설되면서 송신 신호의 출력이 제한되고 파형이 왜곡되는 문제가 나타난다. 이로 인해 실제 출력 스윙이 감쇄되어 통신 신뢰도가 떨어지게 된다. 이를 해결하기 위해 기존에는 BCC 신호를 회로 접지로 유도하거나 RLD 회로를 제거하고 인체와 회로 사이의 기생 커패시턴스를 활용하는 방식을 사용했으나, 전력 소모가 크거나 공통모드 제거 성능이 저하되는 한계가 있었다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 TX-coupled CMI 억제 기법을 제안했다. 이 구조에서는 RLD 출력과 BCC 송신 신호를 시간 영역에서 결합하여 두 회로가 동일한 전극을 공유하면서도 서로 간섭 없이 독립적으로 동작할 수 있게 한다. 두 신호는 다른 주파수 성분을 갖기 때문에 주파수 성분을 그대로 보존할 수 있다. 더불어 또한 RLD의 후단 증폭기와 송신 드라이버 회로를 통합하여 하드웨어 면적을 줄였고 송신이 꺼진 상태에서는 저전류로 동작하도록 설계하여 전력 소모를 최소화했다. 본 논문은 생체 신호 측정 회로와 BCC 송신 회로 간의 경로 충돌 문제를 근본적으로 해결하면서도 높은 출력과 안정적인 간섭 억제 성능 저전력 특성을 동시에 만족하는 회로 구조를 제시했다는 점에서 장점을 가진다.



[그림 5] 제안된 시스템 및 TX-Coupled CM Interference 억제 기술



위정윤 박사과정 대학원생

- 소속 : DGIST 전기전자컴퓨터공학과
- 연구분야 : Analog ICs for biomedical application
- 이메일 : wiejung@dgist.ac.kr
- 홈페이지 : <http://ins.dgist.ac.kr>

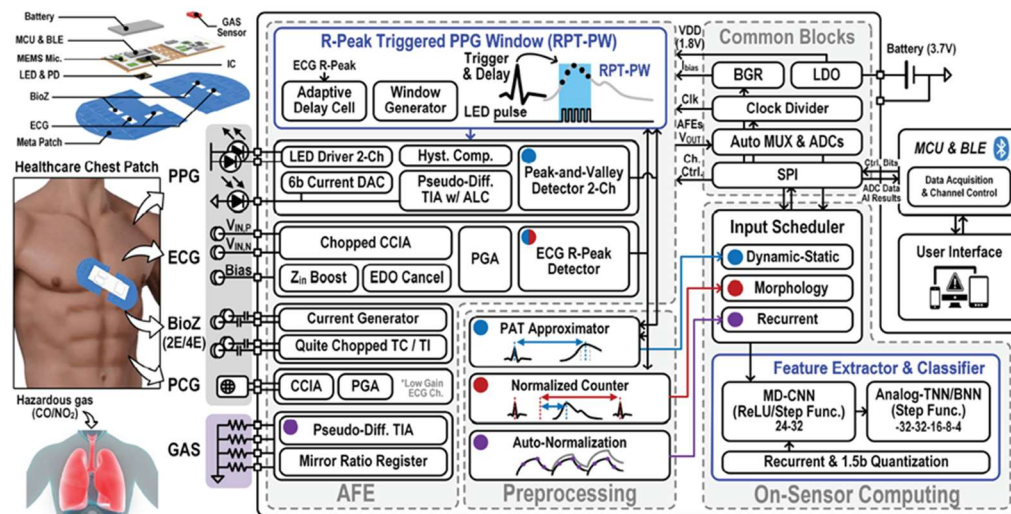
2025 IEEE CICC Review

KAIST 전기및전자공학부 박사과정 윤기찬

Session 36 Communication Computing and Sensing Techniques in Biomedical Systems

이번 2025 IEEE CICC의 Session 30은 Communication Computing and Sensing Techniques in Biomedical Systems라는 주제로 총 7편의 논문이 발표되었다. 그 중, biomedical 분야의 다양한 센서 인터페이스를 활용해 통합 시스템을 구현한 36-5, 36-6, 36-7 논문을 리뷰해보고자 한다.

#36-5 본 논문은 UNIST에서 발표한 연구로, 다양한 생체 신호를 저전력으로 측정하고 실시간으로 분석하기 위한 chest patch 인터페이스 IC를 제안하였다. 제안하는 시스템은 PPG, ECG, BioZ, PCG 및 유해 가스를 측정할 수 있으며, 각 센서 인터페이스 회로에 최적화된 on-sensor computing 회로들을 포함하고 있다.



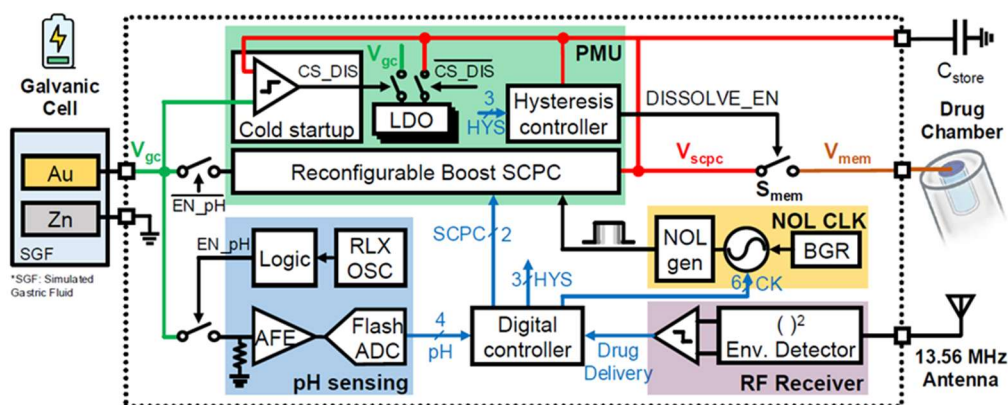
[그림 1] 제안하는 chest patch 인터페이스 IC

PPG 측정 회로는 LED 동작시에 많은 전력을 소모하게 되고, 이를 보완하기 위하여 ECG의 R-peak에 LED의 구동 타이밍을 동기화하는 ECG R-peak triggered PPG windowing (RPT-PW) 방식을 제안하여, 기존 방식에서 지속적인 재동기화의 필요성을 제거하였다. 또한, multi-domain CNN (MD-CNN)과 analog tenary/binary NN (a-TNN/BNN)으로 이루어진 on-sensor computing 회로를 사용하여 pulse arrival time(PAT) 기반의 혈압 추정, 심장

부정맥 감지 및 유해 가스 감지 등 low latency로 다양한 작업을 정확하게 수행할 수 있다. 마지막으로, dynamic-static, morphology-based, recurrent 모드를 지원하여, 사용자의 설정에 따라 유연하게 조절할 수 있는 구조를 가진다.

제작된 ASIC은 실제 착용 가능한 chest patch 형태로 제작되었으며, RPT-PW widening 알고리즘을 통해 약 cardiac cycle 대비 10%만의 윈도우 크기를 사용하며, 결과적은 LED duty cycle은 0.078%로 줄어들어 전력 절감이 가능했다. 또한, 다양한 classification작업에서 모두 sensitivity와 specificity를 90% 이상 달성하였다.

#36-6 본 논문은 Massachusetts Institute of Technology에서 발표한 연구로, 배터리 없이 동작하는 ingestible drug delivery chip을 제안하였다. 배터리 없이 동작하기 위해, galvanic cell (GC)을 활용하는 electrochemical energy harvesting 구조를 사용하여 위산 등의 gastrointestinal (GI) fluid로부터 직접 에너지를 얻는다. 또한, pH 변화에 따라 전력 효율이 달라지기 때문에, pH를 측정하고, 그에 따라 maximum power point tracking (MPPT) 하는 알고리즘 기반 기법을 활용하여 energy harvesting의 효율을 극대화하였다.

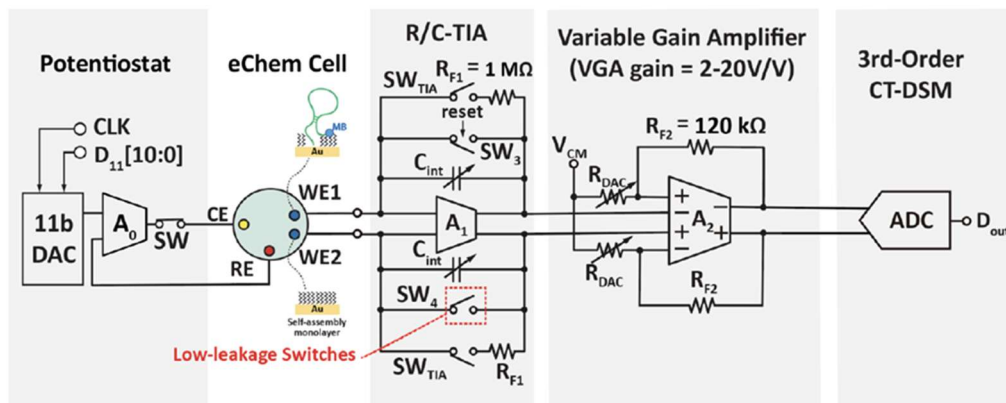


[그림 2] 제안하는 ingestible drug delivery IC

또한, 약물 방출은 전기화학적으로 용해되는 금속 membrane을 통해 이루어지며, pH에 따라 용해 전압이 달라지기 때문에 burst, balanced, low-energy의 세 가지 모드를 통해 최적화된 전압 및 clock 주파수를 설정하며, 방출 타이밍은 external RF신호 (13.56MHz ASK)를 통해 제어되었다.

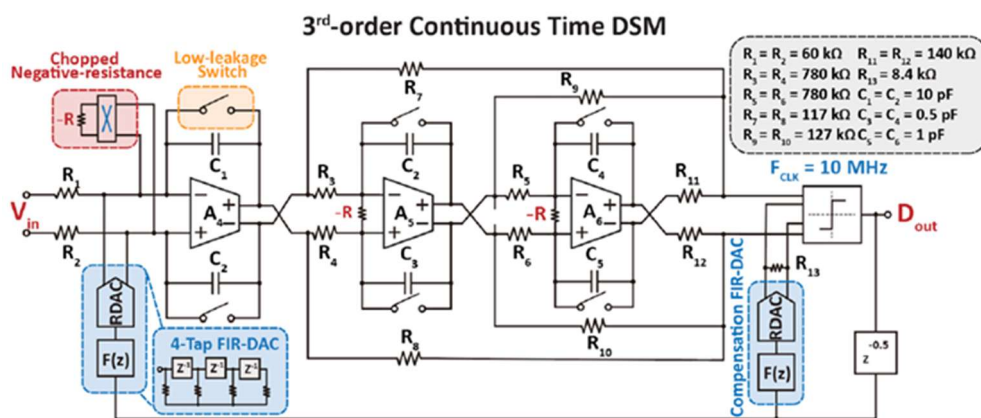
제작된 ASIC은 6mm²의 면적을 가졌으며, 전체 capsule size는 직경이 11mm였으며 29mm의 높이를 가졌다. 돼지 위장을 활용한 ex-vivo실험과 pH를 1과 3으로 조절된 simulated gastric fluid (GSF) 실험 환경을 통해 제작된 칩은 테스트되었으며, pH에 따른 MPPT 설정 및 약물 방출 속도 조절이 잘 됨을 확인하였다. Low-energy 모드에서는 burst 모드에 비해 8~90%가량의 전력을 아낄 수 있었으며, 10μW의 cold-start 전력만으로 동작이 가능하였다.

#36-7 본 논문은 University of California에서 발표한 연구로, bioreactor 내부에서 antibody의 농도를 실시간 및 continuous하게 측정할 수 있는 aptamer 기반 electrochemical 센서 및 readout IC를 제안하였다. 또한, structure-switching aptamer 기반의 biosensor를 활용하여 trastuzumab antibody를 선택적으로 검출할 수 있었다. 그리고, [1]에서 제시된 square-wave voltammetry (SWVC) 기법을 configurable R/C-TIA를 사용하여 구현함으로써 noise-level은 비슷하게 유지되지만 signal을 100배 이상 키울 수 있어 14nM의 검출 한계를 달성하였다.



[그림 3] 제안하는 potentiostat IC

Electrochemical 전류는 TIA에 의해 증폭된 후, 고해상도 CT DSM으로 디지털화된다. ADC는 [2]의 구조를 활용하여 3차 noise-shaping이 구현되어 있으며, chopped negative resistance회로를 이용해 integrator 유한한 GBW에 의한 효과를 보정하고, FIR-DAC을 통해 chopping에 의한 noise-aliasing 제거 및 ripple을 제거한다. 결과적으로 91.2dB의 SNR 및 89dB의 SNDR을 20kHz의 대역폭으로 달성하였다.



[그림 4] Potentiostat IC에 사용된 고해상도 CT DSM

전체 current readout IC는 2.3mW를 소모하며 $0.7\text{pA}_{\text{rms}}$ (@2kHz)의 낮은 noise 성능을 도달하고, dynamic range는 83.4dB를 달성하였다. 또한, 검출된 데이터는 2.45GHz ISM 대역의 wireless 통신을 통해 80Mbps의 대역폭으로 외부로 전달되었으며, wireless data의 SNR은 21dB를 보여주었다. Trastuzumab aptamer를 이용한 측정에서는 14.6배 향상된 signal 크기를 보여주었고, aptamer의 농도 응답은 최대 300nM까지 선형이며, 14nM의 낮은 검출 한계를 기록하였다.

참고문헌

- [1] Y.-T. Hsiao *et al.*, "A CMOS/Microfluidics Point-of-Care SoC employing Square-Wave Voltcoulometry for Biosensing with Aptamers and CRISPR-Cas12a Enzymes," in *Proc. IEEE Symp. VLSI Circuits*, Jun. 2023, pp. 1–2.
- [2] M. Jang, C. Lee and Y. Chae, "A 134- μW 99.4-dB SNDR Audio Continuous-Time Delta-Sigma Modulator With Chopped Negative-R and Tri-Level FIR-DAC," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 56, no. 6, pp. 1761-1771, June 2021.

저자정보



윤기찬 박사과정 대학원생

- 소속 : KAIST
- 연구분야 : Mixed-signal IC & Sensor interface IC
- 이메일 : ygc980215@kaist.ac.kr
- 홈페이지 : <https://impact.kaist.ac.kr>