

# 용존산소 측정을 위한 무선통신 기반 휴대형 포텐쇼스탯 개발

## Development of a Portable Potentiostat with Wireless Communications for Measuring Dissolved Oxygen

이 현 석\* · 한 지 훈\* · 박 정 호\*  
(Hyun-Seok Lee · Ji-Hoon Han · Jungho Pak)

**Abstract** - In this paper, we describe a portable potentiostat which is capable of cyclic voltammetry(CV) and amperometry for electrochemical dissolved oxygen sensor. In addition, this portable potentiostat can also transmit the measured data wirelessly to android devices such as smart phone, tablet, etc. through Bluetooth. The potentiostat system consists of three parts: a voltage generator circuit which is controlled by Arduino nano and 12-bit DAC(digital to analog converter) to generate necessary electric potential for operating the electrochemical sensor, an oxidation/reduction current measurement circuit, and a Bluetooth module to transmit data wirelessly to an android device. Once measurements are carried out with the android application, the measured data is transmitted to the android device via Bluetooth and displayed using the android app. in real time. In this paper, we report the measured reduction current with a fabricated dissolved oxygen sensor in both saturated-oxygen state and zero-oxygen states. The results of the developed portable potentiostat system are in good agreement with those of the commercial portable potentiostat ( $\mu$ stat200, Dropsens inc.). The measured peak reduction currents using the developed potentiostat and the commercial  $\mu$ stat200 potentiostat were  $-0.755 \mu\text{A}$  and  $-0.724 \mu\text{A}$ , respectively. The reduction currents measured at zero-oxygen state were  $-0.005 \mu\text{A}$  and  $-0.004 \mu\text{A}$ . The discrepancy between those two systems seems very small, which implies successful development of a portable and wireless potentiostat.

**Key Words** : Portable potentiostat, Wireless communication, Bluetooth, Android application, Electrochemical sensor, Dissolved oxygen sensor

### 1. 서 론

의료기술과 의료기기의 발전에 따라 삶의 질 향상으로 수명 연장, 노령화 사회가 가속화되면서 고혈압, 당뇨병, 심부전 등의 만성 질병들에 대한 실시간 모니터링 헬스케어(realtime monitoring health-care) 시스템의 요구가 증대되고 있다[1-3]. 만성 질병들의 헬스케어로는 초기 감지 및 예방에 대한 관련 정보를 실시간으로 의사-환자 간 주고받거나 지속적으로 환자에 대한 모니터링이 중요한 이슈중 하나이며, 이로 인해 무선 센서 네트워크(wireless sensor network, WSN), 사물 인터넷(internet of things, IoT), 스마트 홈(smart home), 홈 오토메이션(home automation)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다 [4-8]. 이러한 무선통신 기반 모니터링 시스템에서 만성질환을 감지할 수 있는 센서의 역할은 매우 중요하며 다양한 방식의 센서 중, 전기화학기반 센서는 DNA 분석, 포도당 측정, pH 변화,

세포대사 모니터링 등 다양한 바이오센서 분야에서 가장 많이 사용되는 센서이다[9,10]. 특히 세포 대사 모니터링 분야에서 세포의 산소 소모량의 측정은 세포의 대사 정보와 밀접한 연관을 가지면서 변화한다고 알려져 있으므로, 세포 내의 용존산소 농도 및 농도의 변화를 정확히 측정할 수 있는 센서를 필요로 한다 [11,12].

전기화학 방식의 센서의 작동에는 일반적으로 포텐쇼스탯(potentiostat) 장비를 사용하며 기본 개념도는 그림 1과 같다. 센서와 연결될 작업 전극(working electrode), 기준 전극(reference electrode), 상대 전극(counter electrode)과 신호 발생기, 포텐쇼스탯 회로로 구성되며 작업 전극과 기준 전극 사이

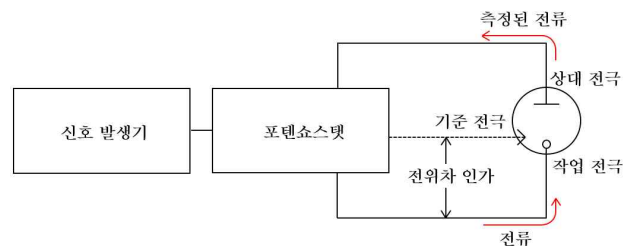


그림 1 포텐쇼스탯의 기본 개념도

Fig. 1 A basic block diagram of a potentiostat

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Korea University, Korea.  
E-mail: pak@korea.ac.kr

\* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Korea University, Korea.

Received : July 20, 2018; Accepted : September 30, 2018

에 입력하는 전위 파형에 따라 다양한 전기화학 분석이 가능하다 [13,14].

상용으로 출시되어 있는 포텐쇼스탯 장비들은 노트북 컴퓨터, 혹은 데스크탑 컴퓨터와 연결하여 데이터를 전송 받아 측정 결과를 검토할 수 있는데, 이러한 측정 장비는 표 1과 같이 비싼 가격과 대체적으로 부피가 크다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하여 약 10 만원 정도의 제작 단가와 2.7×3.4×6.7 cm<sup>3</sup> 크기를 갖는 휴대형 포텐쇼스탯 개발을 위한 연구를 진행하였고, 무선 센서 네트워크, 사물 인터넷, 홈 오토메이션에서 요구되는 무선 통신 기능을 탑재하여 휴대형 포텐쇼스탯으로 측정된 데이터를 정보처리와 디스플레이가 가능한 장비로 무선으로 전송하여 원하는 형태의 그래프와 통계를 나타내는 것을 연구의 목표로 설정하였다.

**표 1** 상용화된 포텐쇼스탯과 개발된 포텐쇼스탯 비교  
**Table 1** Comparison of commercial potentiostats and the developed potentiostat

제품명	CS310 (CorrTest)	I.F. 1000E (Gamry)	Developed Potentiostat
PC 연결	필수	필수	X
가격 (만원)	1210	1130	11
크기 (cm <sup>3</sup> )	14×24×4	24×27×6	2.7×3.4×6.7

개발한 무선통신 기반 휴대형 포텐쇼스탯의 데이터 통신은 블루투스(Bluetooth)를 이용하도록 설계하였고, 적용분야는 용액 내 용존산소의 농도를 측정할 수 있는 전기화학 방식 용존산소 측정 센서로 선정하여 이와 결합한 시스템을 구현하였다. 본 논문에서는 제작한 휴대형 포텐쇼스탯의 전반적인 구성 및 회로도도 전기화학 분석법에 따른 입력 전위 구현, 무선통신을 위한 블루투스 회로 및 안드로이드 앱 제작에 대해 서술하였으며, 제작된 휴대형 포텐쇼스탯으로 순환전압전류법(cyclic voltammetry) 및 전류법(amperometry)을 이용하여 용존산소 센서를 측정된 결과를 블루투스 통신을 통해 모바일에서 확인 수 있음을 보여주고 이를 상용 포텐쇼스탯의 측정 결과와 비교 분석하였다.

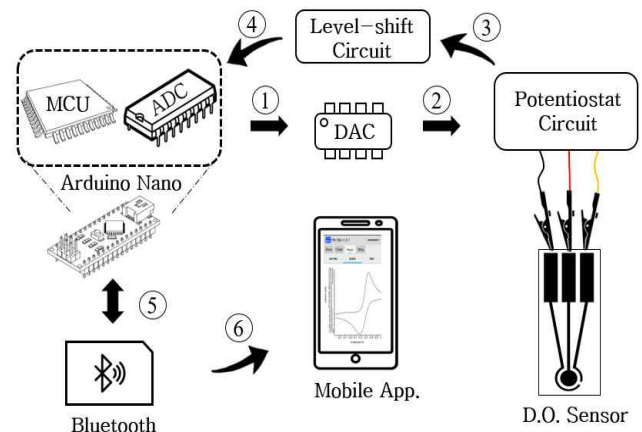
## 2. 본 론

### 2.1 휴대형 포텐쇼스탯의 시스템 구성

본 연구에서는 전기화학 분석법 중 전류법과 순환전압전류법 [13]을 사용할 수 있는 휴대형 포텐쇼스탯 시스템을 개발하고자 하였다. 그림 2와 같이 블루투스 통신을 이용하여 무선으로 안드로이드 앱(Android application)에서 시스템을 제어할 수 있도록 안드로이드 스튜디오(Android Studio)를 통해 프로그램 코드를 만들고, MCU(micro controller unit)와 DAC(digital to analog converter)를 제어하기 위해 아트멜 스튜디오(Atmel Studio, Atmel社)를 사용하여 프로그램 코드를 구현하였다.

MCU는 독립적인 칩으로 인쇄기판회로에 구현하려면 까다롭기 때문에, 보드에 내장된 방식을 사용하였고 휴대성을 높이기 위해 비교적 작은 크기(43×18×5.1 mm<sup>3</sup>)의 아두이노 나노(Arduino nano, Arduino社)보드를 채택하였다.

개발된 휴대형 포텐쇼스탯의 시스템의 작동은 그림 2에 표기된 순서와 같이 진행된다. ① MCU를 통해 DAC로부터 원하는 입력 전위 파형을 구현하여 ② 포텐쇼스탯 회로의 입력 단자에 신호를 보내면, ③ 연결된 센서의 3 전극을 통해 전기화학적 반응이 일어난다. ④ 이 때 반응에 의해 생성된 전류가 측정되고, 이 아날로그 신호는 ADC(Analog to Digital Converter) 칩에 의해 디지털 신호로 변환되어 아두이노 나노로 전달된 후 ⑤ 디지털 신호는 블루투스 회로를 통해 ⑥ 안드로이드 기반의 휴대용 전화기로 데이터가 전달되고, 이 전달된 데이터를 안드로이드 앱으로 처리하여 우리가 보기 원하는 형태로 변환된 그래프나 통계를 화면에 띄우면 실시간으로 측정 결과를 확인할 수 있다.



**그림 2** 제안한 휴대형 포텐쇼스탯의 시스템 동작 개념도  
**Fig. 2** Conceptual system operation diagram of the proposed portable potentiostat

### 2.2 포텐쇼스탯 기본 회로

그림 1처럼 포텐쇼스탯은 전기화학기판 센서의 작업 전극과 기준 전극 사이에 전위차를 인가하여, 산화 또는 환원 전류를 측정함으로써 측정 대상의 존재 유무와 농도를 측정할 수 있게 한다. 따라서 본 논문에서 제시된 시스템도 작업 전극과 기준 전극 사이에 원하는 입력 전위차  $V_{in}$ 를 인가하기 위한 전압 발생 회로가 필요한데 이를 위한 기본 회로는 그림 3과 같다[15].

그림 3에 보이는 회로는 연산 증폭기(operational amplifier) 3개(OP1, OP2, OP3)로 구성되며 각각 센서의 기준 전극, 상대 전극, 작업 전극과 연결된다. 모든 증폭기의 오프셋을 무시한다면, OP3의 음성 피드백(negative feedback)에 의해 작업 전극에서 가상 접지(virtual ground)가 형성되므로 작업 전극과 기준 전극 사이의 전위차  $V_{cell}$ 은 식 (1)과 같이 된다.

$$V_{cell} = -V_{RE} \tag{1}$$

$V_{RE}$ 는 기준 전극의 전압이다. OP1는 기준 전극으로 전류가 흐르는 것을 막기 위한 버퍼(buffer)로 사용되었다. OP2의 경우, 양성 입력 단자에 연결된 접지에 의해 음성 입력 단자에 가상 접지가 형성되며, 저항  $R_1$ 을 통해 흐르는 전류  $I_1$ 은 OP2의 입력 단자로 흐르지 않으므로 저항  $R_2$ 을 통해 흐르는  $I_2$ 와 같다. 따라서, 키르히호프의 전류 법칙(Kirchhoff's current laws, KCL)에 의해  $I_1 = I_2$ 이며, 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$I_1 = I_2, \quad \frac{V_{in}}{R_1} = \frac{-V_{RE}}{R_2} \quad (2)$$

$R_1 = R_2$ 이라면 식 (1)과 (2)에 의해  $V_{in} = V_{cell}$  결과를 갖게 되며, 이를 통해 작업 전극과 기준 전극 사이에 원하는 전위차를 인가할 수 있다.

이와 같은 원리를 이용하여, 작업 전극과 기준 전극 사이에 전위차가 발생하면 작업 전극 표면에서 분석 물질의 산화/환원 반응이 일어나 작업 전극에서 상대 전극으로 전류가 흐르고, 이 전류는 트랜스임피던스 증폭기(transimpedance amplifier) OP3의  $R_f$  값과 곱해진 값이 출력 전압  $V_{out}$ 으로 변환된다. 이 값은 아두이노 나노에 내장되어있는 10-bit ADC에서 5 V 전압을 기준 전압으로 하여, 0~5 V 사이의 값을 1024 개로 나누어 MCU에 저장된다.

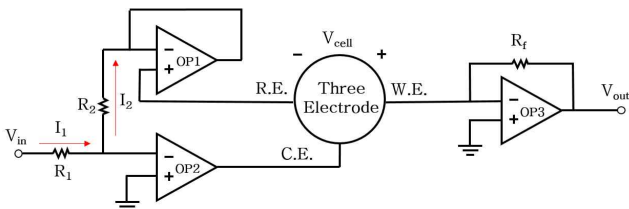


그림 3 포텐쇼스택의 기본 회로도  
Fig. 3 A basic circuit diagram of the potentiostat

### 2.3 DAC를 이용한 입력 전위 구현

휴대형 포텐쇼스택의 회로에 입력할 전위 파형은 Microchip社의 MCP4822 '12-bit dual voltage output Digital to Analog Converter' 칩을 사용하여 구현하였다. 데이터 시트(Data sheet)에 따르면, MCP4822 칩은 2개의 출력 단자를 갖으며 내부의 기준 전압(Reference voltage)을 2.048 V, 4.096 V를 선택적으로 설정이 가능하며 전자의 경우에는 0.5 mV 간격으로 0~2.048 V의 출력 전압, 후자의 경우에는 1 mV의 간격으로 0~4.096 V의 출력 전압을 얻을 수 있다[16]. 제작한 포텐쇼스택에서는 2개의 출력 단자 중 하나는 입력 전위 파형, 다른 하나는 전압 레벨 시프트(Voltage level shift)를 위해 사용하였다.

그림 4(a)와 같이 순환전압전류법을 위한 삼각 파형은 지연시간을 짧게 주고 입력 전위 값을 시간에 따라 증가시키거나 감소시켜 구현하였다. 이 삼각 파형은 2 V로 고정된 DAC 출력 단자로부터, 연산 증폭기로 구현된 뱀센기(전압 레벨 시프트)를 통해 음

의 신호로 표현이 가능해진다. 전류법의 경우, 그림 4(b)와 같이 시간에 따라 일정한 전위차를 형성하면 쉽게 구현할 수 있다.

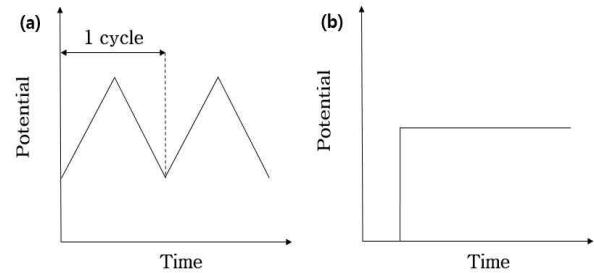


그림 4 두 가지 전기화학 분석법 위한 입력 전위 파형. (a) 순환 전압전류법, (b) 전류법

Fig. 4 Input potential waveforms for electrochemical measuring methods. (a) Cyclic voltammetry, (b) Amperometry

### 2.4 무선통신 기반 휴대형 포텐쇼스택 시스템 구현

MCU 및 ADC가 내장된 아두이노 나노와 DAC, 포텐쇼스택 회로, 블루투스 모듈을 이용하여 통합한 휴대형 포텐쇼스택의 실제 사진은 그림 5와 같다. 크기의 소형화를 위해 인쇄회로기판에 구현하였고(2.7×3.4×6.7 cm<sup>3</sup>), 아두이노 나노와 블루투스 모듈은 납땀이 된 소켓에 탈부착 할 수 있도록 제작하였다. 이 시스템은 5 V 전원을 인가할 수 있는 어떠한 배터리라면 동작이 가능하도록 하였다.

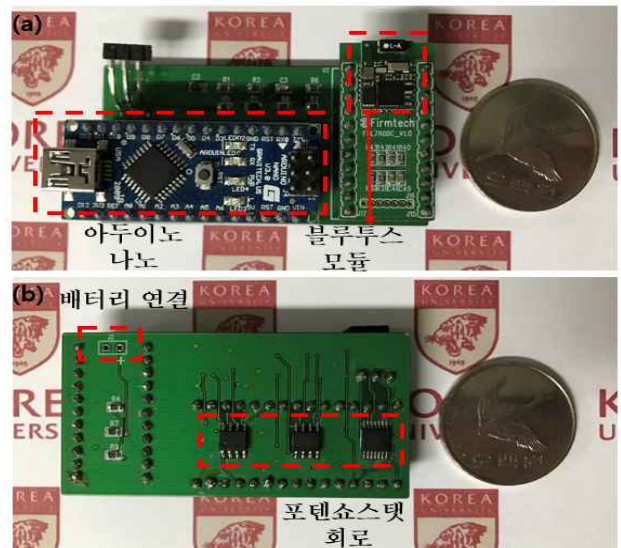


그림 5 완성된 무선통신 기반 휴대형 포텐쇼스택 PCB 기판 사진. (a) 앞면, (b) 뒷면

Fig. 5 Photograph of the completed portable potentiostat PCB with Bluetooth module. (a) Front, (b) Back

### 2.5 무선통신 및 제어를 위한 안드로이드 앱 제작

최근 사물인터넷, 홈 오토메이션, 스마트 홈과 같은 무선통신 기술 기술들 가운데 세계 무선통신 시스템(Global System for Mobile Communications, GSM), 와이파이(WI-FI), 지그비(ZIGBEE), 그리고 블루투스 방식이 많이 사용되고 있다. 그 중, 블루투스는 값싼 가격과 범세계적으로 2.4GHz의 주파수를 사용한다는 장점 때문에 대부분의 모바일 기기 및 안드로이드 장치에 탑재되어 있다[6,17]. 이와 같은 편리성 때문에 본 연구에서는 개발된 무선통신 기반 휴대형 포텐쇼스탯과 모바일에서 통신할 수 있는 블루투스 방식을 이용한 안드로이드 앱을 제작하였다. 휴대형 포텐쇼스탯을 제어할 안드로이드 앱에 사용된 블루투스 모듈은 펌 테크사의 FBL780BC이며 안드로이드 앱은 펌테크사에서 제공하는 모듈용 앱 기반으로 제작하였으며, 측정하고자 하는 센서를 포텐쇼스탯에 연결하고 앱의 초기화면에서 분석법을 선택한 후, 원하는 조건을 설정하여 시작 버튼을 누르면 측정 데이터를 전송 받아 안드로이드 앱 화면에 실시간으로 출력이 가능하게 하였다.

그림 6(a)와 같이 개발된 안드로이드 앱의 설정(Setting)란에서 원하는 분석법 선택과 변수 입력이 가능하도록 하였으며, 이 정보는 MCU를 통해 포텐쇼스탯 시스템으로 전달된다. 측정이 시작되면 그림 6(b)처럼 그래프(Graph)란에서 측정 데이터 기반으로 출력 그래프가 그려지며, 측정이 완료되면 텍스트 파일로 저장되어 단말기에서도 바로 확인이 가능하게 하였다. 그림 6(b)는 작업 전극, 상대 전극, 기준 전극 순으로 금(Au), 백금(Pt), 은/염화은(Ag/AgCl)을 연결하고, 전해질로  $K_3Fe(CN)_6$  10mM과  $KNO_3$  1M을 섞은 용액으로 제작된 장치의 순환전압전류법으로 측정된 결과이다.

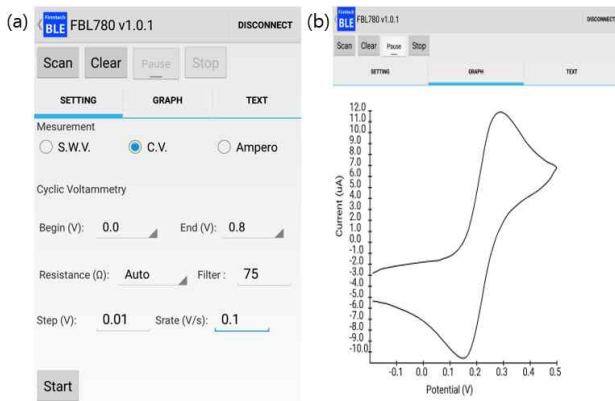


그림 6 안드로이드 앱 화면 예. (a) 설정 탭, (b) 그래프 탭  
 Fig. 6 Android app. interface example. (a) Setting tab, (b) Graph tab

### 2.6 용존산소 센서 제작 및 휴대형 포텐쇼스탯을 이용한 측정 결과

측정에 사용된 용존산소 센서의 공정 방법 및 순서는 다음과

같다. 유리 기판 위에 크롬 500 Å, 금 2000 Å 두께로 증착하고, 사진식각공정(photolithography) 및 습식식각을 이용해 3 전극(작업 전극, 기준 전극, 상대 전극)을 형성한 후, 리프트-오프 공정을 이용해 기준 전극으로 제작하기 위한 은(Ag)을 1500 Å 두께로 형성하였다. 이 후, 3 전극 패드 부분과 3 전극 부분을 제외한 영역을 SU-8 음성 감광막(negative photoresist)으로 보호층(passivation layer)을 형성하였다. 측정 용액 주입을 위한 PDMS(polydimethylsiloxane) 저장소(well)를 제작하여 전극층과 접합시키기 위해 65 W만큼의 파워로 35 초 동안  $O_2$  플라즈마 처리 후 접합시켰다. 제작된 용존산소 센서의 모습은 그림 7과 같다.

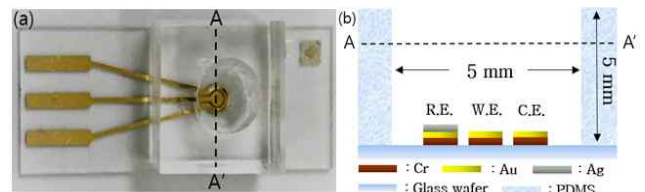


그림 7 제작된 용존산소 센서. (a) 상부 사진, (b) A-A' 단면도  
 Fig. 7 Fabricated dissolved oxygen sensor. (a) Top photo, (b) A-A' cross-section diagram

일반적으로 전기화학 방식의 용존산소 센서는 작업 전극과 기준 전극 사이에 -0.7 V의 전위차가 인가될 때, 용존산소의 환원 반응이 일어난다고 알려져 있으며[11,12], 이를 개발한 무선통신 기반 휴대형 포텐쇼스탯에서도 동일한 결과를 나타내는지 확인하기 위해 순환전압전류법을 이용하였다. 제작한 휴대형 포텐쇼스탯으로 산소포화 및 무산소 상태 일 때, -1~0V 범위의 전압을

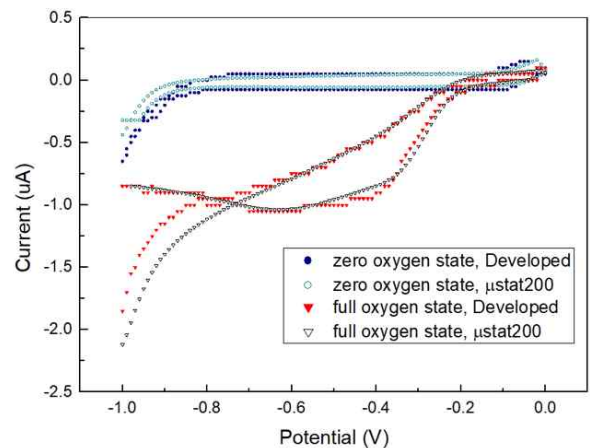


그림 8 개발된 용존산소 센서와 상용 센서(Dropsens社의 µstat200)를 이용한 산소포화 및 무산소 상태의 순환전압전류법 측정 결과 그래프

Fig. 8 Cyclic voltammetry output graphs using both developed dissolved oxygen sensor and µstat200 at saturated oxygen state and zero oxygen state

100 mV/s 속도로 한 주기 동안 측정된 결과, 산소포화 상태의 용존산소 환원 전류 발생 전위 지점이  $-0.7\text{ V}$ 인 것을 그림 8을 통해 확인하였으며, 무 산소 상태에서는  $-0.7\text{ V}$ 에서 용존산소 환원 전류가 발생하지 않는 것 또한 확인하였다. 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 Dropsens社의  $\mu\text{stat200}$ 으로 동일한 측정을 진행한 결과, 차이가 거의 없음을 확인하였다.

용존산소 측정은 제작한 휴대형 포텐쇼스탯의 전류법 모드를 통해 진행하였다. 측정실험 방법은 산소포화 상태로 만들기 위해 PDMS 저장소에  $0.1\text{ M KCl}$  용액을  $50\text{ }\mu\text{L}$ 만큼 주입하고 전류법 측정을 시작하였으며, 30초 후 무산소 상태로 만들기 위해  $0.5\text{ M Na}_2\text{SO}_3$  용액을  $30\text{ }\mu\text{L}$  만큼 주입하였다. 총 측정 시간은 60 초, 측정 데이터 간격은 0.5초, 작업 전극과 기준 전극 간의 입력 전위차는 그림 8의 데이터를 참고하여  $-0.7\text{ V}$ 만큼 인가하였다. 측정이 시작되면 그림 9와 같이 실시간으로 데이터를 안드로이드 앱에서 그래프 형식으로 나타낼 수 있으며 안드로이드 단말기에 자동으로 저장되는 측정 데이터(raw data)를 추출하여 PC 기반 데이터 분석 소프트웨어를 사용해 더 정밀한 결과를 볼 수 있다.

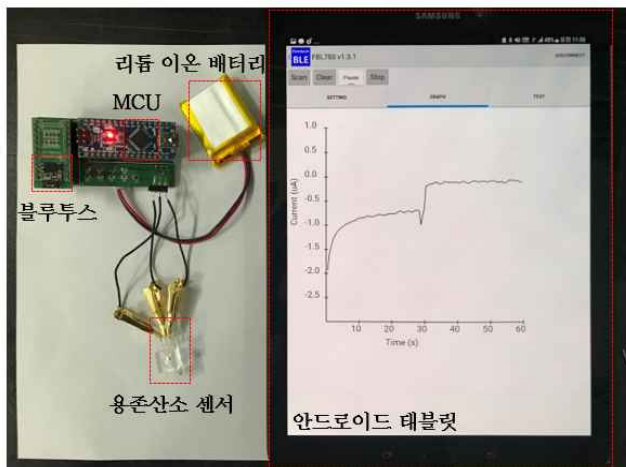


그림 9 제작한 휴대형 포텐쇼스탯의 전류법을 이용한 용존산소 측정 모습

Fig. 9 Actual dissolved oxygen measurement result by using the fabricated portable potentiostat with amperometry

표 2 상용 포텐쇼스탯과 개발된 휴대형 포텐쇼스탯의 용존산소 최대 환원 전류 측정 결과 비교

Table 2 Comparison of the dissolved oxygen peak reduction currents of the commercial potentiostat and the developed portable potentiostat

측정 장비		Developed Potentiostat	$\mu\text{stat200}$ (Dropsens社)
용존산소 환원 전류	산소 포화 상태	$-0.755\text{ }\mu\text{A}$	$-0.724\text{ }\mu\text{A}$
	무 산소 상태	$-0.005\text{ }\mu\text{A}$	$-0.004\text{ }\mu\text{A}$

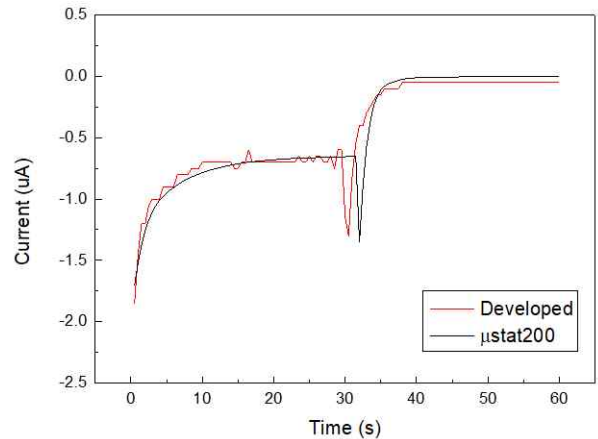


그림 10 상용 포텐쇼스탯  $\mu\text{stat200}$ 과 개발된 휴대형 포텐쇼스탯의 전류법 측정 결과 비교

Fig. 10 Comparison of the amperometry results of the commercial potentiostat,  $\mu\text{stat200}$ , and the developed portable potentiostat

이 후, 휴대형 장치의 신뢰성을 높이기 위해서 동일한 실험 조건과 방법으로  $\mu\text{stat200}$ (Dropsens 社) 포텐쇼스탯 이용하여 측정된 결과를 데이터 분석 소프트웨어를 사용하여 비교하였고, 그림 10과 같이 시각적으로 유사한 형태의 그래프를 얻은 것을 확인할 수 있다. 표 2와 같이 휴대형 포텐쇼스탯과  $\mu\text{stat200}$  순으로, 산소포화 상태인 경우 측정된 전류는  $-0.755\text{ }\mu\text{A}$ ,  $-0.724\text{ }\mu\text{A}$ 였고 무산소 상태에서는  $-0.005\text{ }\mu\text{A}$ ,  $-0.004\text{ }\mu\text{A}$ 이 각각의 센서로부터 측정되었다.

### 3. 결 론

본 연구를 통해 Atmega328P MCU와 ADC가 포함된 아두이노 나노 및 DAC 칩을 이용해 포텐쇼스탯의 입력 전위 파형을 구현하여, 블루투스를 기반으로 무선통신이 가능한 안드로이드 앱을 통해 무선으로 제어할 수 있는 휴대형 포텐쇼스탯을 개발하였고 이를 이용해 전기화학적으로 용존산소 센서를 측정할 수 있는 시스템을 제안하였다.

특히, 무선으로 휴대형 포텐쇼스탯을 제어할 수 있는 안드로이드용 앱은 포텐쇼스탯에서 측정하고자 하는 분석법을 사용자가 선택하고, 변수 값을 설정하여 측정을 진행하면 입력 전위 파형에 따른 측정 전류 결과가 안드로이드 단말기를 통해 실시간으로 그래프를 그려 표현 할 수 있도록 하였으며, 측정 데이터는 단말기에 텍스트 파일로 저장되어 PC를 통해서도 분석할 수 있게 사용자의 편의성을 고려하여 개발하였다.

또한, 제작한 무선통신 기반 휴대형 포텐쇼스탯의 신뢰성을 높이기 위하여 Dropsens 社의  $\mu\text{stat200}$  포텐쇼스탯 상용 제품과 측정된 데이터를 비교한 결과, 유사한 그래프가 그려지는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 무선통신 기반 휴대형 포텐쇼스탯은 PC와 연결해서 작동해야하는 상용 장치들과 달리 전원 소스로 간단하게 리튬 이온 배터리를 장착하고, 많은 사람들이 갖고 있는 스마트폰 혹은 태블릿 기기를 통해 제어할 수 있다는 점에서 용존 산소 센서 뿐만 아니라 전기화학과 바이오센서 분야의 다양한 센서 분석에도 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 센서산업고도화를 위한 첨단센서육성사업[10054488, 1000개 이하 세포샘플의 다변수(pH, 용존산소, 열량) 동시분석이 가능한 대사량 측정시스템 개발]과 미래창조과학부재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 사업[2017R1A2B4009088, 레이저 유도 그래핀 전극을 이용한 인체 땀 분석용 IoT 기반 웨어러블 멀티센서 개발 연구] 일환으로 수행된 연구임.

### References

- [1] L. Catarinucci, L. Mainetti and L. Tarricone, "An IoT-Aware Architecture for Smart Healthcare Systems", *IEEE Internet Things J.*, vol. 2, no. 6, pp. 515-526, 2015.
- [2] J. C. Chou, J. T. Chen, Y. H. Liao, C. H. Lai, R. T. Chen, Y. L. Tsai, C. Y. Lin, J. S. Chen, M. S. Huang and H. T. Chou, "Wireless sensing system for flexible arrayed potentiometric sensor based on XBee Module", *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 14, pp. 5588-5595, 2016.
- [3] Y. Fan, L. Juntao, Y. Wang, J. Luo, H. Xu, S. Xu and X. Cai, "A wireless point-of-care testing system for the detection of neuron-specific enolase with microfluidic paper-based analytical devices", *Biosens. Bioelectron.*, vol. 95, no. April, pp. 60-66, 2017.
- [4] D. Zhang, X. Wang, and X. Song, "New Medical Image Fusion Approach with Coding Based on SCD in Wireless Sensor Network", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 10, no. 6, pp. 2384-2392, 2015.
- [5] M. D. Steinberg, P. Kassal, I. Kereković, and I. M. Steinberg, "A wireless potentiostat for mobile chemical sensing and biosensing", *Talanta*, vol. 143, pp. 178-183, 2015.
- [6] R.A. Ramlee, M.A. Othman, M.H. Leong, M.M. Ismail and S.S.S. Ranjit., "Bluetooth Remote Home Automation System Using Android Application", *Int. J. Engineering Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 149-153, 2013.
- [7] G. H. Kang, J. W. Ko, J. H. Kim, J. W. Lee and K. S. Kim, "Implementation of patient Information System Using Near-Field Tag Communication Technology", *The Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conf.*, pp. 1382-1383, 2017.
- [8] T. J. Yun, H. S. Kim, S. M. Kang, S. W. Yang and J. H. Kim, "Electric field energy harvesting from high voltage transmission lines for wireless sensor network", *The Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conf.*, pp. 545-546, 2017
- [9] M. D. Steinberg, P. Kassal, and I. M. Steinberg, "System Architectures in Wearable Electrochemical Sensors", *Electroanalysis*, vol. 28, no. 6, pp. 1149-1169, 2016.
- [10] P. Kuberský, A. Hamáček, M. Kroupa, J. Štulík, and V. Zwiefelhofer, "Potentiostat solution for electrochemical amperometric gas sensor", *Proc. Int. Spring Semin. Electron. Technol.*, pp. 388-393, 2012.
- [11] J. Park, H. Nam, S. Y. Ahn, Y. K. Pak, and J. J. Pak, "A reservoir-type oxygen sensor with 2x3 array for measuring cellular respiration levels", *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 176, pp. 913-920, 2013.
- [12] J. Park, Y. K. Pak, and J. J. Pak, "A microfabricated reservoir-type oxygen sensor for measuring the real-time cellular oxygen consumption rate at various conditions", *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 147, no. 1, pp. 263-269, 2010.
- [13] A. Chaubey and B. D. Malhotra, "Mediated biosensors", *Biosens. Bioelectron.*, vol. 17, no. 6-7, pp. 441-456, 2002.
- [14] A. J. Bard, L. R. Faulkner, N. York, C. @bullet, W. Brisbane, and S. E. Toronto, *ELECTROCHEMICAL METHODS Fundamentals and Applications*, 1944.
- [15] S. M. Martin, F. H. Gebara, T. D. Strong, and R. B. Brown, "A fully differential potentiostat," *IEEE Sens. J.*, vol. 9, no. 2, pp. 135-142, 2009.
- [16] Microchip, "MCP4802 / 4812 / 4822 8/10/12-Bit Dual Voltage Output DAC w/ Internal VREF and SPI", datasheet, 2015
- [17] J. Potts and S. Sukittanon, "Exploiting bluetooth on android mobile devices for home security application", *Conf. Proc. - IEEE SOUTHEASTCON*, pp. 0-3, 2012.

## 저 자 소 개



### 이 현 석 (Hyun-Seok Lee)

2016년 홍익대학교 전자전기공학부 졸업.  
2016~현재 고려대학교 전기전자공학과 석사  
과정 재학.

E-mail : lhs9125@korea.ac.kr



### 한 지 훈 (Ji-Hoon Han)

2013년 고려대학교 전기전자전파공학과 석  
사 졸업. 2013~현재 고려대학교 전기전자공  
학과 박사 과정 재학.

E-mail : dafory@gmail.com



### 박 정 호 (Jungho Pak)

1985년 미국 Purdue 대 전기공학과 졸업(학  
사), 1988년 동 대학원.전기공학과 졸업(석  
사), 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공  
학박사), 1992년~1995년 미국 Intel사 책임  
연구원, 1995년~현재 고려대 전기전자공학부  
교수.

Tel : 02-3290-3238

E-mail : pak@korea.ac.kr