

미생물연료전지와 에너지 하베스팅에 기반한 에너지 자립형 무선 센서 시스템

여정진¹ · 박소진¹ · 임종훈¹ · 양윤석^{1,2}

¹전북대학교 바이오메디컬공학부, ²전북대학교 고령친화복지기기연구센터

An Energy Self-Sustainable Wireless Sensor System Based on a Microbial Fuel Cell (MFC) and Energy Harvester (EH)

Jeongjin Yeo¹, Sojin Park¹, Jonghun Lim¹ and Yoonseok Yang^{1,2}

¹Division of Biomedical Engineering, Chonbuk National University

²Research Center of Healthcare & Welfare Instrument of the Aged, Chonbuk National University

(Manuscript received 1 October 2018 ; revised 15 October 2018 ; accepted 16 October 2018)

Abstract: Microbial fuel cell (MFC) technology has been attractive since it can not only treat organic waste in an eco-friendly way by digesting it but also generate electricity by the unique metabolic process of microbes. However, it hasn't been employed in practical use until now because it is hard to integrate a small electricity up to an adequate amount of electric power and difficult to keep its bio-electric activity consistent. In this study, we combined an energy harvester with MFC (MFC-EH) to make the power-integration convenient and developed an energy self-sustainable wireless sensor system driven by a stable electric power produced by MFC-EH. Additionally, we build the low power application measuring data to be cast by the web in real-time so that it can be quickly and easily accessed through the internet. The proposed system could contribute to improvement of waste treatment and up-cycling technologies in near future.

Key words : Microbial fuel cell, Energy harvesting, Energy self-sustainable system, Wireless sensor

1. 서 론

미생물연료전지(Microbial Fuel Cell, MFC)는 혐기성 소화를 통해 오폐수, 가축분뇨와 같은 유기물들을 처리하는 미생물인 전자방출균(exoelectrogen)을 활용하여 오염 물질을 처리함과 동시에 그들의 대사활동으로부터 유래하는 전자의 흐름을 통해 기전력을 발생시킨다. 따라서 미생물연료전지는 친환경적인 오염 물질 처리 기술일 뿐 아니라 동시

에 전력을 얻을 수 있는 에너지 기술이기도 하다. 최근 환경오염 문제를 해결하기 위한 다양한 기술적 접근들이 이루어지고 있는 상황에서 미생물연료전지 기술은 오염 물질 처리와 동시에 전기에너지를 얻을 수 있는 장점으로 많은 관심을 얻고 있다[1].

미생물연료전지는 실제로 1V 이하의 낮은 출력 전압을 나타내므로 일반적으로는 작은 크기의 단일 전지들을 직렬 혹은 병렬로 다수 연결한 시스템으로 구성된다. 작은 크기로 구현된 미생물연료전지는 내부 미생물군의 생체전기화학적 상호작용과 유기성 기질의 물질 전달 및 전자 이동이 향상되어 상대적으로 큰 크기로 제작된 구조에 비해 높은 전력 출력 성능을 나타낸다[2]. 그러나 다수의 전지를 운용하는 과정에서는 기질 주입량의 차이와 같은 여러 요인들로 인해 각 전지들의 전압, 전류를 정교하게 컨트롤하거나 지속적으로 유지하기 어려우며, 따라서 각 전지의 전력 출력 특성을 동일하게 일치시키기가 매우 어렵다[3,4]. 더욱 중요

Corresponding Author : Yoonseok Yang
HCI Lab. 342 1st Engineering Building, Chonbuk National University, 567 Baekje-Daero, Deokjin-Gu, Jeonju, Republic of Korea
TEL: +82-63-270-4068, +10-4090-8408
E-mail: ysyang@jbnu.ac.kr

This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No : PJ011751022018)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

한 것은, 미생물연료전지들이 전기적으로 직렬 연결된 시스템에서 각 전지들의 생물전기화학적 특성이 일치 되지 않을 경우 전지 간의 전류 출력량 차이가 소위 전압역전현상 (voltage reversal)이라 불리는 성능 저하 현상을 유발한다는 것이다[5]. 전압역전현상이 유발된 전지는 직렬로 연결된 다른 전지들의 특성에 악영향을 미쳐 전체 시스템의 출력 성능을 저하시키는 요인이 된다. 최악의 경우 전압역전현상이 유발된 전지는 전지 자체의 생물전기화학적 특성을 하락시켜 이를 회복하기 위한 시간이 소요될 뿐 아니라 여러 조치가 요구된다[6,7]. 따라서 이러한 전압역전현상을 규명하고 극복하기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔으나 명백한 해결 방안은 아직까지 제시되지 못하고 있는 상황이다.

한편, 미생물의 생체전기화학적 활성도는 주변 환경에 의해 큰 영향을 받으므로 미생물연료전지의 성능은 온도나 습도 등의 요소에 의해 변화할 수 있다. 따라서 미생물연료전지의 상용 어플리케이션 적용을 위해서는 갑작스런 출력 성능 변화를 방지하기 위해 지속적으로 환경 변화를 모니터링해야 할 필요가 있다.

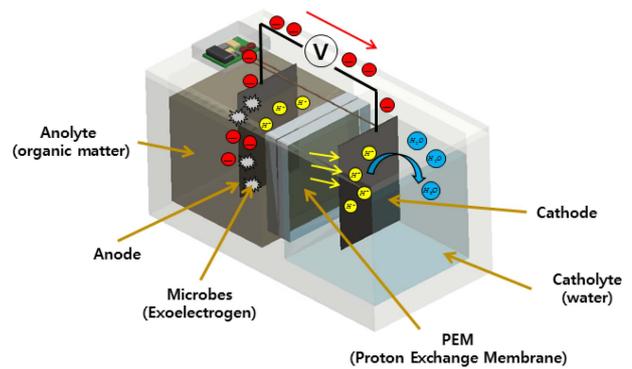
본 연구는 미생물연료전지에 에너지 하베스팅 회로 (Energy Harvester, EH)를 결합함으로써 작은 크기의 미생물연료전지 출력을 효과적으로 병합하고 전지의 성능을 안정화할 수 있는 실용적 방법을 제안한다. 또한, 미생물연료전지의 출력을 활용하여 전지의 성능을 효율적인 관리할 수 있도록 주변 환경을 지속적으로 모니터링하고 무선으로 데이터를 전송할 수 있는 에너지 자립형 IoT 센서 노드를 개발하고 시스템의 활용 가능성을 확인하고자 연구를 수행했다.

II. 연구 방법 및 재료

1. 에너지 하베스팅 회로를 결합한 미생물 연료 전지 시스템 구현

그림 1은 미생물이 유기 물질로부터 전기에너지를 생산해 내는 기전을 나타낸 미생물연료전지 모식도와 제작된 프로토타입을 나타낸다. 프로토타입 미생물연료전지의 전체 부피는 280 cm³(10 × 7 × 4 cm)로 제작되었다. 음극 전극은 28 cm²(7 × 4 cm)면적의 탄소 섬유(WOS1002, CeTech, Taiwan)를 사용하였으며, 양극 전극은 같은 면적의 0.5 mg/cm², 20 wt% 로 백금 촉매가 담지된 탄소 섬유(EC2019, Fuel Cell Earth, USA)를 사용하였다.

단일 미생물연료전지는 이론적으로 1.2 V 수준의 최대 개방전압을 가지고 있지만 실제적으로는 그림 2와 같이 연결되는 부하 조건에 따라 1 V 이하의 출력 전압(폐로전압)을 나타내며, 같은 실험 조건에서라도 다수의 미생물연료전지 출력 전압을 정확히 일치되지 않는 것이 일반적이다. 따라서 상이한 출력 전압 특성을 갖는 미생물연료전지의 전력을



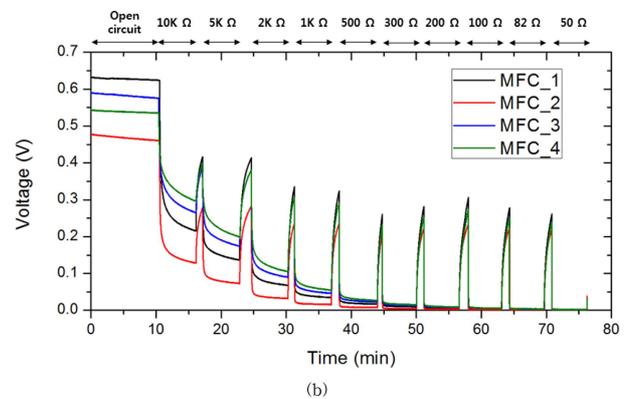
(a)



(b)

그림 1. 미생물연료전지 구성. (a) 작동 개요, (b) 프로토타입 미생물 연료전지.

Fig. 1. MFC setup. (a) Working principle, (b) Fabricated prototype.



(b)

그림 2. 미생물연료전지의 출력 특성.

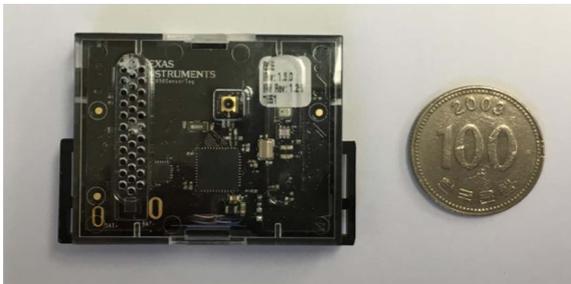
Fig. 2. Output characteristics of the MFC.

활용하기 위해서는 전압을 활용 가능한 수준으로 승압함과 동시에 정격화하여 제공할 수 있는 에너지 하베스팅 회로 기술을 적용하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 저전압, 저전류로 동작하는 부스트 컨버터(boost converter) 와 승압된 전압을 규격화하여 출력할 수 있는 전압조정기(voltage regulator)를 포함하는 에너지 하베스팅 IC(BQ25504, Texas Instruments, USA)를 활용해 회로를 구성했다. 에너지 하베스팅 회로를 결합한 미생물연료전지 시스템(MFC-

EH)은 전지의 낮은 출력 전압을 3.8 V의 정전압 출력으로 제공할 수 있다.

2. MFC-EH와 IoT 센서 노드 결합

미생물연료전지의 출력을 이용하여 전지가 운용되는 환경을 자가 모니터링하기 위해 그림 3에 보이는 것과 같은 저전력의 소비전력을 지닌 IoT 센서 노드(CC2650 SensorTag, Texas Instruments, USA)를 활용했다. 그림 4는 MFC-EH와 IoT 센서 노드를 결합한 전체 시스템을 간략하게 보여준다. 센서 노드는 MFC-EH로부터 전력을 공급 받아 온도와 습도를 측정하고 이들 데이터를 저전력 근거리 통신 프로토콜인 Bluetooth Low Energy(BLE)를 통해 전송할 수 있다. 센



210 그림 3. BLE 통신 프로토콜이 내장된 저전력 IoT 센서 노드.
Fig. 3. Low power IoT sensor node with BLE.

서 노드에서의 여러 센서 작동과 데이터 전송 과정에서 발생하는 소비전력 변화량을 파악하였으며, 결과는 그림 5와 같이 나타났다. 센서 노드는 3 V 입력 전압을 공급 받아 작동하였으며 데이터 통신이 연결되지 않은 대기 상태에서 4.62 mW, 통신 연결 상태에서 5.51 mW의 전력을 소비하는 것으로 나타났다. 그 후 센서 구동에 따라 20 mW 수준의 추가적인 소비전력 증가가 있었으나 여러 조건들에서 그 차이는 크게 나타나지 않았다.

실험 결과로부터 센서 노드의 소비 전력은 대부분 무선 데이터 통신 과정에서 소비되는 것으로 나타났으며, 이때 소비되는 전력량을 감소시키는 것이 시스템의 전력 안정성을 향상시킬 수 있는 방안이 될 것으로 파악되었다. 따라서, 본 연구에서는 센서 노드의 평균 전력 소비량을 수 mW 수준으로 유지하기 위해 센서 노드 내부에서 센서 측정과 데이터 송신을 컨트롤하는 RTOS(Real Time Operating System) 기반의 임베디드 펌웨어를 수정하여 센서 노드의 전력 소비를 최소화할 수 있도록 개발했다.

III. 연구 결과 및 고찰

1. MFC-EH를 이용한 다중 전지 전력 중합

MFC-EH의 전력 중합 성능과 자가 전력 수급 IoT 시스템의 작동 성능, 그리고 무선 센서 데이터의 웹 기반 모니

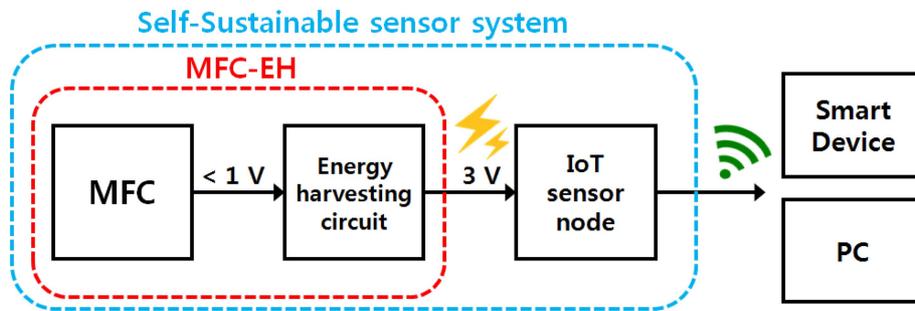


그림 4. 전체 시스템과 서비스 모식도.
Fig. 4. Overall system and service.

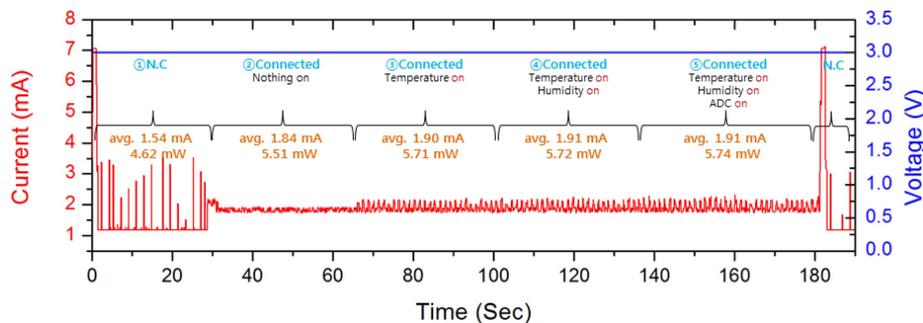
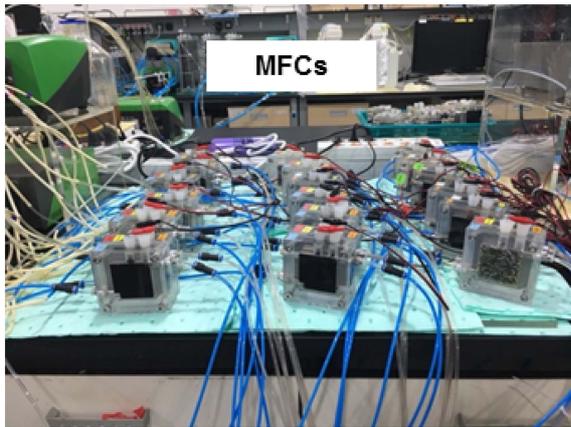
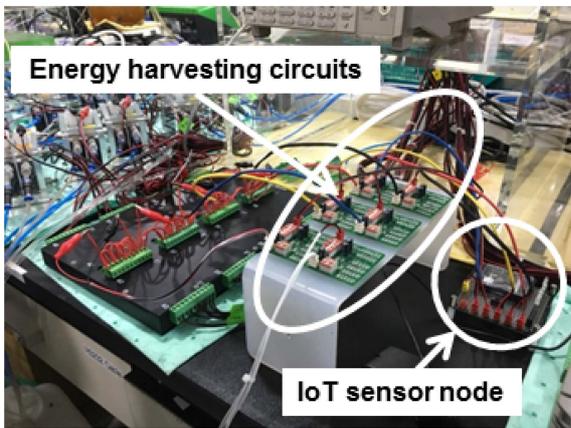


그림 5. IoT 센서 노드의 전력 소비 특성.
Fig. 5. Power consumption characteristics of the IoT sensor node.



(a)



(b)

그림 6. 개발된 MFC-EH와 IoT 서비스의 성능 평가를 위한 실험 구성. (a) 미생물연료전지, (b) 에너지 하베스팅 회로와 IoT 센서 노드.
 Fig. 6. Experimental setup for performance evaluation of the developed MFC-EH and IoT service. (a) MFC's, (b) Energy harvesting circuits and IoT sensor node.

터링에 대한 평가를 위해, 가축 분뇨를 기질로 이용하여 구동되는 실제 미생물연료전지에 개발된 시스템을 적용했다. 본 연구에서 활용된 미생물연료전지는 개별 전지의 출력이 1 mW 이하로, 앞선 실험을 통해 파악된 5 mW 수준의 센서 노드 소비 전력을 지원하기 위해서는 다수의 전지 출력을 중합하는 것이 요구되었다. 따라서 그림 6(a)과 같이 총 16개의 전지를 4개씩 병렬 연결해 출력이 결합된 4개의 채널을 구성했다. 그 다음, 그림 6(b)와 같이 각 채널의 출력을 각각의 에너지 하베스팅 회로에 연결하여 전력을 변환하고 균일화된 출력을 중합하여 센서 노드에 공급하기 위한 구성을 구현했다. 이때, 에너지 하베스팅 회로에 연결되기 전 측정된 각 단위 전지들의 전압 데이터는 그림 2와 같이 1 V 미만에서 각각 다른 수치 값을 나타낼 뿐 아니라 시간에 따라 연속적으로 변화했으나 에너지 하베스팅 회로에 병렬로 연결된 다수의 전지로부터 중합된 전압은 성공적으로

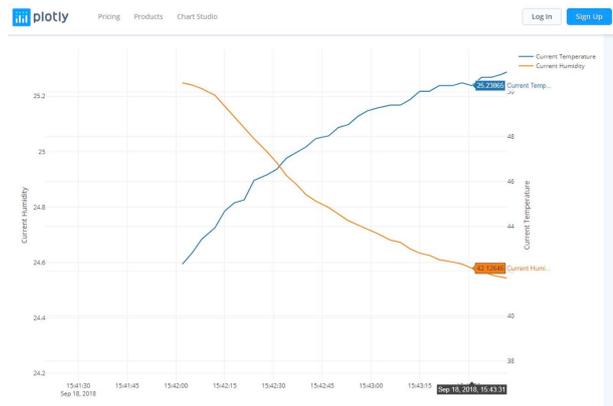


그림 7. MFC-EH를 이용한 센서 데이터 모니터링.
 Fig. 7. Sensor data monitoring using MFC-EH.

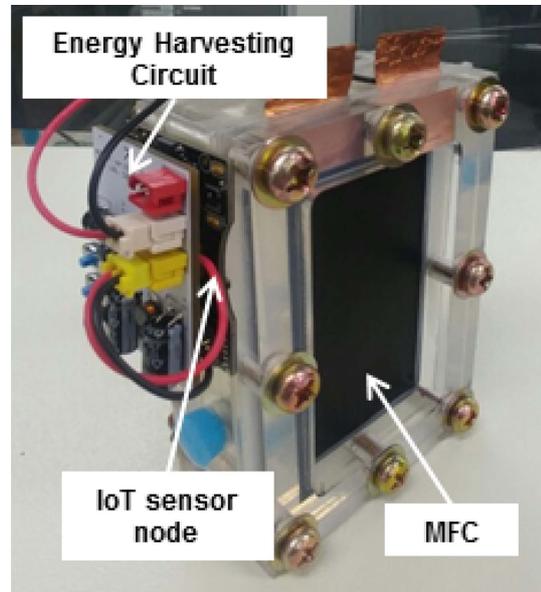


그림 8. 센서 노드 일체형 MFC-EH 시스템.
 Fig. 8. IoT sensor node integrated single MFC-EH system.

3.8 V로 균일하게 승압되었으며 전압역전현상 또한 발생하지 않았다. 사용된 단일 미생물연료전지들의 평균 전력 출력 성능은 3.8 V, 0.2 mA 수준이었으며, 16개 전지의 전력을 중합한 총 전력은 12 mW 수준으로 나타났다. 이러한 전력은 약 5-6 mW 수준의 소비전력을 지닌 센서 노드를 실시간으로 구동하기에 충분한 수치임을 확인할 수 있다.

2. IoT 센서 데이터 수집, 전송과 원격 모니터링

MFC-EH에 의해 동작하는 IoT 센서 노드로부터 측정된 데이터는 외부에서 원격으로 지속적으로 모니터링할 수 있도록 하기 위해 소형의 임베디드 PC인 Raspberry Pi를 통해 무선으로 수집된 후 웹 서비스로 전송된다. 웹 서비스는 변화하는 외부 환경 정보를 쉽게 확인할 수 있도록 시각화

된 정보로 데이터를 사용자에게 제공한다. 무선 데이터 수집은 open source library인 Bluepy를 이용해 구현했으며, 또한 open source tool인 Python과 Plotly를 이용해 측정된 데이터를 저장하고 웹 기반으로 데이터를 시각화하는 응용 프로그램을 개발했다. 측정된 온도와 습도 데이터의 실시간 변화는 시각화된 형태로 제공하여 사용자가 쉽게 이해할 수 있도록 표현하였으며, 웹 사이트를 통한 접속은 미리 설치된 응용 소프트웨어 없이도 사용자가 시공간의 구애 없이 미생물연료전지 주변 정보를 모니터링 할 수 있도록 구현되었다. 또한, 측정된 데이터는 연속적으로 변화하는 미생물연료전지의 성능을 사용자가 지속적으로 관찰하고 분석할 수 있도록 저장되어 제공될 수 있다.

최종적으로, 에너지 하베스팅 회로를 통해 실용 가능한 전력으로 변환된 미생물연료전지 출력을 센서 노드에 공급하고 구동 가능 여부를 확인했다. 배터리 없이도 미생물연료전지의 출력만으로 센서 노드를 작동시켜 주변 환경 데이터를 측정하고 무선으로 정보를 전송할 수 있었으며, 그림 7에 보이는 것과 같이 인터넷을 통해 원격으로 데이터를 모니터링 할 수 있음을 확인했다.

IV. 결 론

212

본 연구에서는 미생물연료전지를 실용화하기 위한 방안으로 출력 변화와 전압역전현상 등으로 인한 성능 저하를 극복함과 동시에 안정적인 출력을 제공할 수 있는 에너지 하베스팅 회로를 결합한 미생물연료전지 시스템을 개발했다. 기초 실험을 통해 전력원으로서의 MFC-EH의 실용성을 파악했으며, MFC-EH와 저전력 IoT 센서 노드를 이용해 버려진 에너지를 활용할 수 있는 전력 자립형 모니터링 서비스를 개발했다. 이를 통해, 야외 또는 무선 환경에서의 전력 수급 문제를 해결하고 향상된 편의성과 안정적인 성능을 사용자에게 제공할 수 있는 프로토타입 MFC-EH 센서 시스템 기술의 실현 가능성을 입증하였다.

전력 자립형 MFC-EH 센서 시스템을 이용해 측정되고 축적된 데이터들은 향후 머신 러닝 기술 등을 활용한 새로운 데이터 어플리케이션으로 확장될 수 있을 것이며, 이러한 기술을 활용하면 모니터링을 통해 미생물연료전지의 출력 변화에 대한 예측이 가능해져 갑작스러운 성능 저하 현상들을 사전에 파악하고 방지할 수 있을 것으로 생각된다. 뿐만 아니라, 주변 환경에 대한 지속적인 데이터 수집과 이를 통해

얻어지는 정보들은 미생물연료전지관리에 대한 영역 뿐 아니라 환경, 기상, 농업과 같은 다양하고 폭넓은 분야에 확대 적용 될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 미생물연료전지의 출력 성능이 보다 개선된다면 그림 8과 같이 센서 노드가 MFC-EH에 직접 결합되어 일체화 된 단일 시스템으로 구현할 수 있을 것이며, 이러한 형태의 구현은 다양한 조건과 상황에서 폭넓은 기술 활용성을 제공할 수 있을 것이다.

본 연구에서 개발된 MFC-EH 시스템은 자연 친화적 오염 물질 처리 과정으로부터 지속가능한 에너지를 얻을 수 있을 뿐 아니라 이를 활용한 유용한 어플리케이션 서비스를 제공하는 것이 가능하다. 따라서 본 연구를 통해 얻어진 결과들은 향후 미생물연료전지의 활용성을 확장하는 것 뿐 아니라 친환경 오염물질 처리 기술과 업사이클링(up-cycling) 기술을 발전시키는데도 큰 기여를 할 수 있을 것이다. 더 나아가 유기성 폐기물이 존재하는 환경 뿐 아니라 생체 유기 물질을 활용할 수 있는 생체 내의 환경에서 전원 공급, 비용 문제를 겪고 있는 여러 무선 기술에 대한 전력 기술로 응용 될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] J.J. Yeo and Y.S. Yang, "Energy Harvesting from Bio-Organic Substance Using Microbial Fuel Cell and Power Conditioning System," *J. Biomed. Eng. Res.*, vol. 38, pp. 242-247, 2017.
- [2] H. Ren, H.S. Lee, and J. Chae, "Miniaturizing microbial fuel cells for potential portable power sources," *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 13, no. 3, pp. 353-381, 2012.
- [3] P. Aelterman, K. Rabsey, H.T. Pham, and N. Boon, "Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells," *Environmental science & technology*, vol. 40, no. 10, pp. 3388-3394, 2006.
- [4] D. Kim, J. An, B. Kim, J.K. Jang, B.H. Kim, and I.S. Chang, "Scaling-Up Microbial Fuel Cells: Configuration and Potential Drop Phenomenon at Series Connection of Unit Cells in Shared Anolyte," *ChemSusChem*, vol. 5, no. 6, pp. 1086-1091, 2012.
- [5] S.E. Oh and B.E. Logan, "Voltage reversal during microbial fuel cell stack operation," *Journal of Power Sources*, vol. 167, no. 1, pp. 11-17, 2007.
- [6] Y. Kim, M.C. Hatzell, A.J. Hutchinson, and B.E. Logan, "Capturing power at higher voltages from arrays of microbial fuel cells without voltage reversal," *Energy & Environmental Science*, vol. 4, no. 11, pp. 4662-4667, 2011.
- [7] J. An, J. Sim, and H.S. Lee, "Control of voltage reversal in serially stacked microbial fuel cells through manipulating current significance of critical current density," *Journal of Power Sources*, vol. 283, pp. 19-23, 2015.