

미생물 연료 전지와 전력 조절 시스템을 이용한 생체 유기 물질로부터의 전력 생산

여정진¹ · 양운석^{1,2}

¹전북대학교 바이오메디컬공학부, ²전북대학교 고령친화복지기기연구센터

Energy Harvesting from Bio-Organic Substance Using Microbial Fuel Cell and Power Conditioning System

Jeongjin Yeo¹ 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 29 September 2017 ; revised 18 October 2017 ; accepted 18 October 2017)

Abstract: This study presents a bio-chemical energy harvesting system which can generate electric power from bio-organic substance contained in vermicompost. It produced electricity by inoculating microbial fuel cell(MFC) with earthworm-composted food waste. The generated electricity was converted into usable voltage level for mobile electronics through power conditioning circuits. The implemented prototype showed 200 μW of maximum output electric power, which successfully supplied a beacon device which continuously transmitted data to nearby smartphone without a battery. The proposed system can help develop portable or bio-mimetic energy supply for sustainable use with further improvement.

Key words: Energy harvesting, Microbial Fuel Cell, Earthworm vermicompost, Power conditioning circuit, Beacon

242

1. 서 론

모바일, IoT 시대의 도래와 함께 수많은 전자기기 시스템들이 소형화, 무선화 개발되고 있으며, 각 전자기기들은 인체, 자동차, 기계 장비, 건축물 등과 같은 여러 플랫폼에 휴대, 착용, 삽입, 설치, 부착되어 활용되고 있다. 이러한 무선 전자기기들은 반도체 기술의 발전과 함께 날로 소형화, 고기능화 발전을 이루고 있으며, 그 활용 영역을 확대해 나가고 있다. 그러나 무선 전자기기 시스템들은 배터리에 의존

한 전력 공급 기술의 한계로 인해 그 사용성과 활용성에 제한을 받고 있다. 소형화된 전자기기들을 위한 소형의 배터리 사용과 이에 따른 한정된 전력 용량은 지속적인 충전과 번거로운 교체 작업을 요구함으로써 많은 경제적 비용과 유지 보수의 어려움을 초래하고 있다.

최근에는 이러한 문제들을 해결하기 위해 무선 전자기기 시스템들이 적용되는 플랫폼과 그 주변에서 발생하는 다양한 형태의 에너지를 전기에너지로 변환하여 활용하기 위한 에너지 하베스팅(energy harvesting) 기술의 적용이 시도되고 있다[1-3]. 주로 주변에서 발생하는 진동, 열과 같은 물리적 에너지들을 변환하여 전력을 얻는 방식이 적용되고 있는데[4-7], 이러한 에너지 하베스팅 기술은 모바일 환경에서의 저전력 무선 전자기기 시스템을 위한 지속가능 전력 공급 기술로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그러나 주로 물리적 에너지 수확에 초점을 맞추고 있는 현재의 에너지 하베스팅 기술들은 환경이나 조건에 따라 발생하는 에너지양을 예측하기 어렵고, 또한 에너지의 발생이 불

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@jbn.u.ac.kr
This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development(Project No: PJ011751022017)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

연속적일 수 있다는 단점을 지니고 있다. 따라서 기존의 화학 배터리 충전 문제를 해결함과 동시에 물리적 에너지 하베스팅 기술을 적용하기 어려운 환경에서 보다 안정적으로 활용할 수 있는 에너지원에 대한 탐색이 필요하다. 특히, 자연 환경과 같은 조건, 인체와 같은 생체 플랫폼에서 비주기적, 불연속적으로 발생하는 물리 에너지의 활용이 제한되는 점을 고려하여, 이러한 환경에서 화학적, 생물학적 에너지를 적극 활용하여 전기에너지를 얻을 수 있는 기술의 개발이 요구된다.

미생물 연료 전지(Microbial Fuel Cell, MFC)는 미생물의 대사 활동을 통해 오염 물질내의 유기물을 분해함과 동시에 전기에너지를 얻을 수 있는 장점을 지닌 시스템으로, 그동안 주로 친환경 기술에 초점을 맞추어 연구가 진행되어 왔다[8-10]. 그러나 환경적 측면에서의 적용 뿐만이 아니라, 미생물 연료 전지 기술은 일상생활에서의 소규모 전력 시스템으로 활용될 수 있는 많은 장점과 잠재력을 지니고 있다. 미생물 연료 전지 기술을 유기물을 분해하고 처리하여 오염물질을 줄이는 환경 처리 기술의 관점에서 벗어나 전력 생산 측면에 초점을 맞추면, 생물·화학적 에너지 하베스팅 시스템으로 활용될 수 있다.

본 연구에서는 생물체가 섭취하는 음식, 먹이에 함유되어 있는 유기 물질로부터 유래하는 다량의 에너지를 전기에너지로 변환하여 활용하는 것을 목표로 하여, 미생물 연료 전지 기술을 적용한 생물·화학적 에너지 하베스팅 시스템을 개발하였다. 먼저, 지렁이에게 음식물 쓰레기를 먹이로 급여하여 얻은 분변액을 미생물 연료 전지에 기질로 주입하고 이때 생성되는 전력의 양과 특성을 평가하였다. 또한, 생산된 전력을 전자장치 구동에 적합한 형태의 전력으로 변환하기 위한 전력 조절 회로를 개발하고 성능을 평가하였다. 마지막으로 지렁이 분변액으로부터 얻은 전력을 활용한 저전력 무선 통신 모듈의 구동 가능성을 확인하였다.

II. 연구 방법 및 재료

1. 지렁이 분변액

지렁이는 토양 속에서 생활하며 일반적으로 낙엽, 썩은 나무뿌리, 동물의 사체 등에 포함된 유기물을 섭취하며 살아간다. 최근에는 일상생활에서 발생하는 음식물 쓰레기를 처리하고자, 음식물 쓰레기를 지렁이에게 먹이로 급여하여 분해하는 기술 및 시설이 증가하고 있다. 지렁이의 대사 활동을 통해 음식물 쓰레기는 지렁이 분변이 되고 이후 양질의 비료로 활용되는데, 여전히 다량의 유기 물질을 함유하고 있다. 따라서 지렁이의 분변은 유기 에너지를 전기에너지로 변환하여 이용하기 위한 생물·화학적 에너지 하베스팅 시스템 개발에 있어 매우 적절한 실험 물질로 평가된다. 특히,

지렁이의 소화관 내에는 *Geobacter sulfurreducens*를 포함한 다양한 종류의 전자방출균(exoelectrogen)들이 서식하고 있으며, 분변에는 이들 미생물군의 먹이인 풍부한 유기물이 다량 잔존해 있다[11]. 따라서 액화된 형태의 지렁이 분변은 전자방출균을 접종하여 배양할 필요 없이 미생물 연료전지의 음극액으로 손쉽게 활용할 수 있으며, 사전 연구와 기존 기술을 통해 이를 확인한 바 있다[12,13]. 본 연구에서 사용한 지렁이 분변액은 지렁이에게 채소, 과일껍질, 커피찌꺼기를 주성분으로 하는 음식물 쓰레기를 급여하고, 지렁이가 이를 분해하는 과정에서 발생한 액상 물질을 수거하여 얻어졌다.

2. 미생물 연료 전지

미생물 연료 전지는 미생물의 대사 과정에서 유기 물질을 분해함과 동시에 발생하는 미량의 전기 에너지를 전극을 통해 추출하는 시스템이다. 그림 1은 본 연구에서 사용된 배치 모드(batch mode) 방식 미생물 연료 전지의 구성과 전기 발생 기전을 간략히 나타낸 모식도이다. 수소이온 교환막(Proton Exchange Membrane, PEM)을 사이에 두고 나누어진 양극 전지 공간에 한쪽은 음극 전극, 다른 한쪽은 양극 전극을 배치한다. 음극 전극 쪽에 유기성 물질을 기질로 주입하면 그 안에 존재하는 특정 미생물(exoelectrogen)이 유기물을 먹이로 삼아 대사하는 과정에서 수소이온과 전자를 발생시킨다. 이때 수소이온은 수소이온교환막을 넘어 양극 측으로 이동해 산소와 결합하여 물 분자를 생성하고, 전자는 기전력에 의해 음극 전극으로부터 양극 전극으로 이동하는데, 이 과정에서 미량의 전기에너지를 얻을 수 있다[14].

제작한 미생물 연료 전지의 음극에 지렁이의 분변액을 기질로 주입하여 미생물을 배양하였다. 미생물 연료 전지의 전체 부피는 $2156 \text{ cm}^3(14 \times 14 \times 11 \text{ cm})$, 음극실은 $484 \text{ cm}^3(11 \times 11 \times 4 \text{ cm})$, 양극실은 $484 \text{ mm}^3(11 \times 11 \times 4 \text{ cm})$ 로

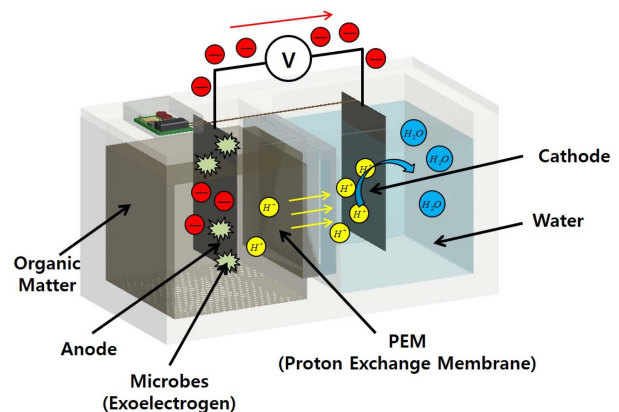


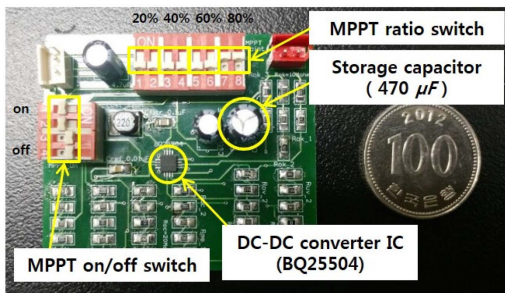
그림 1. 배치모드 방식의 미생물 연료 전지 모식도.
Fig. 1. Diagram of batch-mode microbial fuel cell.

구성하였다. 본 연구에서는 기계적 강도가 우수한 폴리카보네이트(Poly Carbonate, PC)를 이용해 케이스를 제작했다. 음극 전극으로는 탄소 섬유(W0S1002, CeTech, Taiwan)를 사용하였으며, 면적은 $121\text{ cm}^2(11 \times 11\text{ cm})$, 양극 전극은 0.5 mg/cm^2 , 20 wt%로 백금 촉매가 담지된 탄소 섬유(EC2019, Fuel Cell Earth, USA)를 사용하였으며, 면적은 $121\text{ cm}^2(11 \times 11\text{ cm})$ 로 제작하였다. 제작한 미생물 연료 전지에 지렁이 분변액을 음극실에 400 ml 주입하였으며, 양극실에는 물을 400 ml 주입하여 운전하였다. 음극실과 양극실 사이는 수소이온 교환막(Nafion Membrane 212, Dupont, USA)을 이용하여 분리하였으며, 사용된 수소이온 교환막의 접촉 면적은 $121\text{ cm}^2(11 \times 11\text{ cm})$ 이었다.

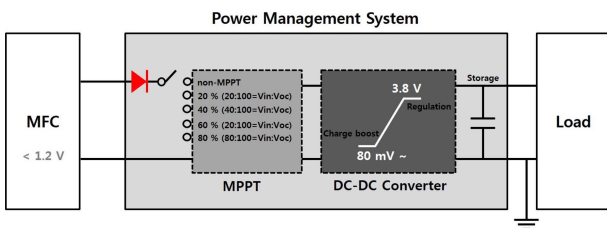
3. 전력 조절 회로

그림 2(a)의 전력 조절 회로(power conditioning circuit)는 Boost 방식의 DC-DC 변환 및 레귤레이션 기능을 지닌 상용 IC인 BQ25504(Texas Instruments, USA)를 이용하여 제작하였다. 회로는 그림 2(b)에서 보이는 것과 같이, 미생물 연료 전지로부터 최초 330 mV 이상의 전압이 인가되면 동작하기 시작하며, 이후 80 mV 수준의 입력 전압을 인가 받아 출력 승압이 가능하다. 본 연구에서 개발한 전력 조절 회로는 1 V 이하인 미생물 연료 전지의 출력 전압을 승압하여 전자 기기에 공급 가능한 수준인 3.8 V로 변환하고, 3.8 V로 변환된 전력을 470 μF 용량의 커패시터에 저장하여 부하에 전력을 공급하도록 설계되었다. 또한 전력 조절 회로는 회로의 입력저항을 전압비(최대전력생산전압/개발

244



(a)



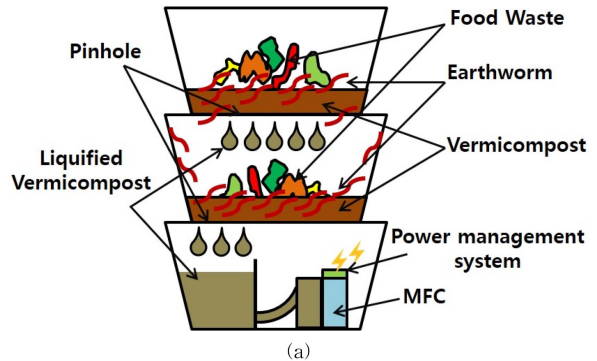
(b)

그림 2. 전력 조절 회로. (a) 제작된 회로, (b) 회로 동작 개요.
Fig. 2. Power management system. (a) developed circuit, (b) schematic diagram of the circuit.

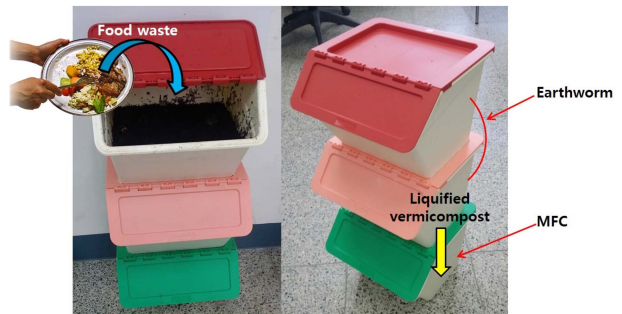
전압) 설정을 통해 조절하는 수동 방식의 MPPT(Maximum Power Point Tracking, MPPT) 기능을 갖추고 있으며, 스위치 조작을 통해 회로의 내부 저항을 변경하여 사전에 파악된 미생물 연료 전지의 최대 전력점을 추종함으로써 전력 생산을 극대화하는 것이 가능하도록 개발하였다.

4. 지렁이 분변액을 기질로 활용하는 미생물 연료 전지 시스템

지렁이 분변액을 기질로 활용하는 미생물 연료전지 시스템은 그림 3(a)와 같이 3개 층의 공간으로 구성된다. 상층과 중간층에는 지렁이들이 살고 있으며, 하층에는 분변액 저장 공간과 미생물 연료 전지가 포함되어 있다. 지렁이는 음식을 섭취하며 활동하는 공간과 휴식 및 배설을 하는 공간을 구분하여 생활하는 것으로 알려져 있는데, 상층과 중간층에 각각 음식물 쓰레기를 급여하는 주기의 차이를 두어 지렁이가 각 공간을 구분하여 활동할 수 있도록 설계하였다. 각 층의 사이에는 작은 구멍들이 있어 공기가 순환될 뿐 아니라, 지렁이의 층간 이동과 분변토로부터 액화된 분변액이 하층으로 전달되는 통로가 된다. 하층으로 전달된 분변액은 미생물 연료 전지의 음극으로 공급되도록 구성하였으며, 미생물 연료 전지로부터 생산된 전력은 전력 조절 회로를 거쳐 저장된다.



(a)



(b)

그림 3. 지렁이 분변액을 기질로 활용하는 미생물 연료 전지 시스템.
(a) 시스템 모식도 (b) 제작된 시스템.
Fig. 3. Microbial fuel cell system based on the vermicomposted substrate. (a) diagram of the system (b) developed system.

III. 연구 결과 및 고찰

1. 미생물 연료 전지로부터의 전력 추출 최대화

지렁이 분변액을 기질로 활용한 미생물 연료 전지의 전력 추출을 최대화하기 위해 그림 4(a)와 같은 구성으로 사전 실험을 진행하였다. 개방 회로 상태에서 10 K Ω , 5 K Ω , 2 K Ω , 1 K Ω , 500 Ω , 300 Ω , 200 Ω , 120 Ω , 82 Ω , 50 Ω , 20 Ω , 12 Ω 의 순서로 저항의 크기를 변화시켜가며 지속적으로 출력을 측정하였다. 이때 부하 저항 변화에 따른 미생물 연료 전지의 출력 전압은 데이터 수집 장치(DAQ6009, National Instruments, USA)와 데이터 수집 소프트웨어(LabVIEW-2009, National Instruments, USA)를 이용하여 1 K Hz의 샘플링 주파수로 획득하였다. 측정된 전압과 연결된 부하 저항값을 이용하여 출력 전력을 계산하고 그림 4(b)에 나타냈다. 미생물 연료 전지는 약 0.7 V의 개방전압(open circuit voltage)을 나타냈으며, 최대 전력은 82 Ω 의 부하 저항에서 전압 0.3 V, 전류 3.7 mA로 1.1 mW의 전력이 전달되었다. 저전력 전자기기, 센서 등의 실시간 전력 공급이 가능한 수준의 전력량임을 확인하였다.

2. 전력 조절 회로를 이용한 미생물 연료 전지 출력 승압

그림 5(a)는 전력 조절 회로의 작동과 성능을 측정하기 위

한 실험 구성을 나타낸다. 미생물 연료 전지와 회로 사이에 전류 측정을 위한 2 Ω 의 부하 저항을 연결하였으며, 전력 조절 회로의 출력 전력을 측정하기 위해 40 K Ω 의 부하 저항을 연결하였다. 이때 각 노드의 전압은 데이터 수집 장치(DAQ6009, National Instruments, USA)와 데이터 수집 소프트웨어(LabVIEW2009, National Instruments, USA)를 이용하여 1 K Hz의 샘플링 주파수로 측정 기록되었다. 그림 5(b)는 실험 결과를 나타낸다. ①은 미생물 연료 전지와 회로가 연결되지 않은 상태, ②은 회로의 중단부에 부하 저항이 연결되지 않은 상태에서의 전력 저장 소자인 커패시터(470 μF)의 전압을 표시하고 있다. ②에서 약 82초 동안 평균 716 μW 의 전력으로 59 mJ의 에너지가 미생물 연료 전지로부터 공급되었다. ③은 회로의 중단부에 40 K Ω 의 부하 저항이 연결된 상태이며, 이때 40 K Ω 의 부하 저항은 3.8 V의 전압이 인가되었을 때 약 100 μA 의 전류를 소비하는 전자기기의 부하저항을 고려하여 설정하였다. 이 구간에서는 약 138초 동안 평균 725 μW 의 전력으로 100 mJ의 에너지가 미생물 연료 전지로부터 공급되었으며, 이때 부하 저항의 소비전력은 213 μW , 소비 에너지는 약 29 mJ 이었다. 이로부터 승압 및 파워 컨디셔닝을 위한 회로 내부의 소

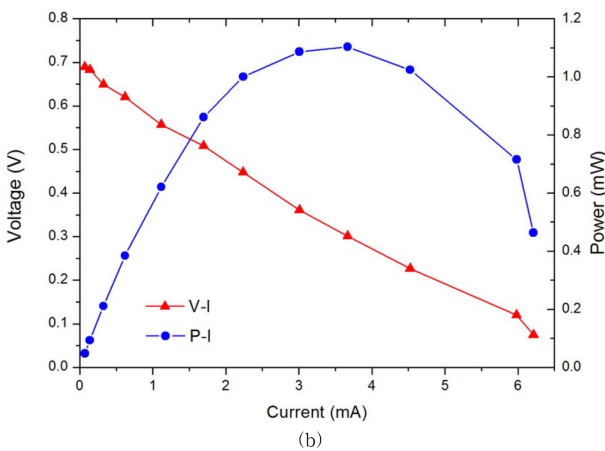
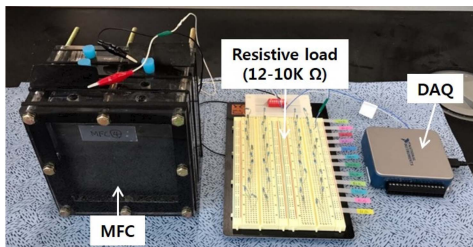


그림 4. 미생물 연료 전지의 출력 특성. (a) 실험 구성, (b) 출력 특성.
Fig. 4. Output characteristics of the microbial fuel cell. (a) experimental setup, (b) output characteristics.

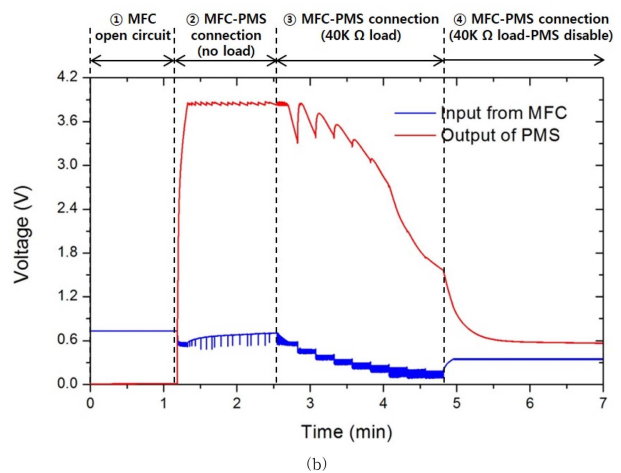
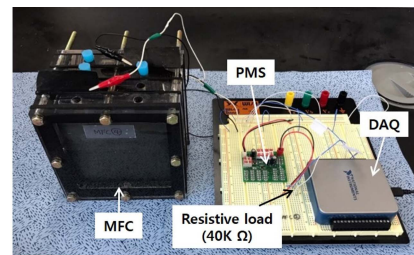


그림 5. 미생물 연료 전지 및 전력 조절 회로의 출력 특성. (a) 실험 구성, (b) 실험 결과.

Fig. 5. Output characteristics of the microbial fuel cell and power management system. (a) experimental setup, (b) result.

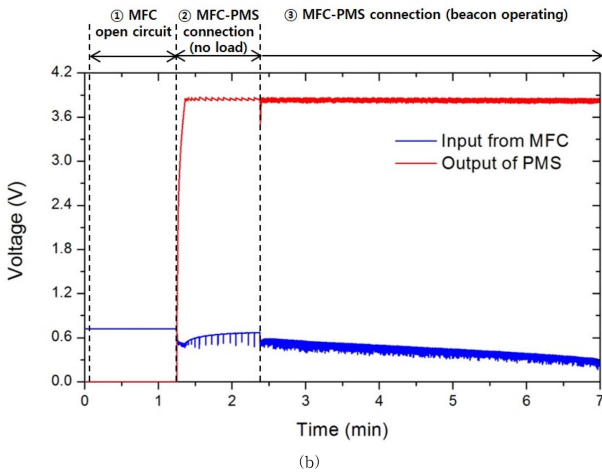
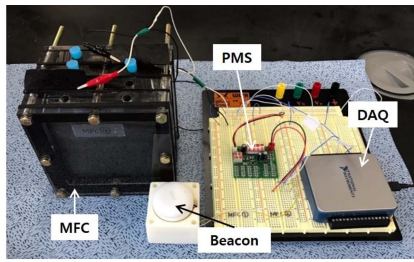


그림 6. 비콘이 연결된 상태에서의 미생물 연료 전지 및 전력 조절 회로의 출력 특성. (a) 실험 구성, (b) 실험 결과.
 Fig. 6. Output characteristics of the microbial fuel cell and power management system in beacon connection. (a) experimental setup, (b) result.

비 전력은 약 $512 \mu W$, 소비 에너지는 약 $71 mJ$ 임을 확인할 수 있다. ④는 회로의 중단부에 $40 K\Omega$ 의 부하 저항이 연결된 상태인데, 회로의 자체소모 전력과 $40 K\Omega$ 부하 저항의 소비 전류를 감당하지 못하여, 미생물 연료 전지로부터의 전력 전달이 감소하고, 회로 내부의 부스트 회로가 동작하지 않아 $3.8 V$ 의 출력 전압을 공급하지 못하는 상황에 해당한다. 이 구간에서 약 132초 동안 평균 $440 \mu W$ 의 전력으로 $58 mJ$ 의 에너지가 미생물 연료 전지로부터 공급되었으며, 부하 저항의 소비전력은 $11 \mu W$, 소비 에너지는 약 $1 mJ$ 이었고, 이로부터 승압 및 전력 컨디셔닝을 위한 회로 내부의 소비 전력은 약 $429 \mu W$, 소비 에너지는 약 $57 mJ$ 임을 확인할 수 있었다.

3. 미생물 연료 전지의 출력을 이용한 비콘(beacon) 구동

그림 6(a)은 미생물 연료 전지를 이용하여 대표적인 IoT 장치인 비콘을 구동하기 위한 연결과, 각 단계에서의 전력을 측정하기 위한 실험 구성을 보여주고 있다. 모든 전압은 데이터 수집 장치(DAQ6009, National Instruments, USA)와 데이터 수집 소프트웨어(LabVIEW2009, National Instruments, USA)를 이용하여 1 K Hz의 샘플링 주파수로

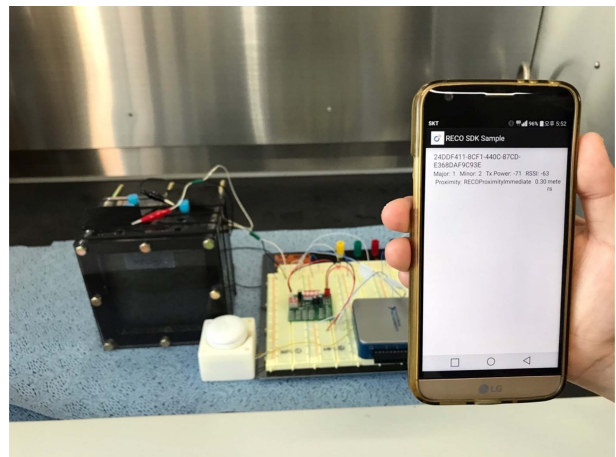


그림 7. 지렁이 분변액으로부터 생산된 전력을 이용한 무선 데이터 전송.
 Fig. 7. Wireless data transmission using electric power obtained from earthworm vermicompost.

측정 기록되었다. 그림 6(b)에 실험 결과를 정리하였다. ①은 미생물 연료 전지와 회로가 연결되기 이전의 상태를 나타내며, ②는 미생물 연료전지에 회로를 연결하고, 회로의 출력이 비콘에 아직 연결되지 않은 상태에서 저장 소자인 커패시터($470 \mu F$)의 전압을 보여주고 있다. 약 68초 동안 평균 $761 \mu W$ 의 전력으로 $52 mJ$ 의 에너지가 미생물 연료 전지로부터 공급되었다. ③은 회로의 중단부에 비콘이 연결된 상태에서 약 281 초 동안 평균 $675 \mu W$ 의 전력으로 $190 mJ$ 의 에너지가 미생물 연료 전지로부터 공급되었으며, 비콘의 평균 소비전력은 $100 \mu W$, 에너지는 약 $28 mJ$ 임을 보여준다. 이 기간 동안 승압 및 전력 컨디셔닝 회로 내부의 소모 전력은 약 $575 \mu W$, 에너지는 약 $162 mJ$ 임을 확인하였다. 비콘이 연결된 이후에도 미생물 연료 전지 출력의 급격한 감소 없이 지속적으로 회로의 소비 전력과 비콘의 소비 전력을 공급할 수 있음을 확인하였다. 그림 7과 같이 비콘과 휴대폰 사이의 데이터(거리정보)는 $0.1 Hz$ 로 지속적으로 송수신 되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 생물체가 섭취하는 음식 혹은 대사산물 등에 포함된 유기물을 전기에너지로 변환할 수 있는 생물·화학적 에너지 하베스팅 구현을 위해 미생물 연료 전지 기술의 오염 물질 처리 측면이 아닌 전력 생산 측면에 초점을 맞추었다.

이를 위한 대표적인 사례로, 지렁이 분변에 포함된 유기성 물질을 전기에너지로 변환하는 시스템을 개발하고 이로부터 얻어진 전기 에너지의 활용 가능성을 확인하였다. 지렁이에게 음식물 쓰레기를 먹이로 공급하여 얻은 분변액을

다시 미생물 연료 전지에 기질로 주입하여 전력 생산 가능 여부 및 전력 생산량을 확인하였다. 또한, 지렁이 분변액으로부터 생산된 전력을 개발된 전력 조절 회로를 통해 전자 장치 구동에 적합한 형태로 변환하고 이를 저전력 무선 통신 모듈에 공급하여 데이터 송수신의 지속적인 작동을 확인하였다. 회로가 연결된 상태의 미생물 연료 전지는 지렁이 분변액으로부터 약 400-800 μW 수준의 전력을 생산함을 확인할 수 있었다. 전력 조절 회로를 거쳐 최종적으로 디지털 시스템에서 활용할 수 있는 전력은 100-200 μW 정도이지만, 실험을 통해 확인한 바와 같이 저전력 무선 통신 모듈 및 센서 등의 구동을 위한 전력으로는 충분함을 알 수 있다. 시스템의 규모와 효율 개선 등을 통해 전력 생산량이 증가된다면 다양한 전자 시스템에 활용 가능할 것으로 생각된다.

본 연구에서 제안된 생물·화학적 에너지 하베스팅 기술은 다양한 생체 대사 물질 및 생체 유래 물질을 활용할 수 있도록 응용이 가능하며, 향후 휴대형, 인체 착용형, 혹은 삽입형 환경에서 지속가능한 전력을 생성하는 역할도 가능할 것으로 기대된다. 뿐만 아니라, 유기물을 분해하여 전력을 생산해내는 기술은 생명체와 같이 음식물 섭취를 통해 활동 에너지를 얻는 생물-기계 로봇 시스템의 실현 방안도 제시할 수 있을 것으로 생각된다.

Reference

- [1] Paradiso JA and Starner T, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," *IEEE Pervasive computing*, vol. 4, no. 1, pp. 18-27, 2005.
- [2] Harb A, "Energy harvesting: State-of-the-art," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2641-2654, 2011.
- [3] Vullers RJ, Van Schaijk R, Visser HJ, Penders J and Van Hoof C, "Energy harvesting for autonomous wireless sensor networks," *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 29-38, 2010.
- [4] Halim MA, Cho H, Salauddin M and Park JY, "A miniaturized electromagnetic vibration energy harvester using flux-guided magnet stacks for human-body-induced motion," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 249, pp. 23-31, 2016.
- [5] Morais R, Santos NM, Frias PM, Ferreira JA, Ramos AM and Reis MC, "Double permanent magnet vibration power generator for smart hip prosthesis," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 172, no. 1, pp. 259-268, 2011.
- [6] Bai P, Zhu G, Lin ZH, Jing Q, Chen J, Zhang G and Wang ZL, "Integrated multilayered triboelectric nanogenerator for harvesting biomechanical energy from human motions," *ACS nano*, vol. 7, no. 4, pp. 3713-3719, 2013.
- [7] Su J, Vullers RJ, Goedbloed M, van Andel Y, Leonov V and Wang Z, "Thermoelectric energy harvester fabricated by Stepper," *Microelectronic Engineering*, vol. 87, no. 5, pp. 1242-1244, 2010.
- [8] Wang H, Park JD and Ren Z, "Practical Energy Harvesting for Microbial Fuel Cells: A Review," *Environmental science & technology*, vol. 49, no. 6, pp. 3267-3277, 2015.
- [9] Pant D, Van Bogaert G, Diels L and Vanbroekhoven K, "A review of the substrates used in microbial fuel cells(MFCs) for sustainable energy production," *Bioresour. technology*, vol. 101, no. 6, pp. 1533-1543, 2010.
- [10] Sevda S, Dominguez-Benetton X, Vanbroekhoven K, De Wever H, Sreerishnan TR and Pant D, "High strength wastewater treatment accompanied by power generation using air cathode microbial fuel cell," *Applied energy*, vol. 105, pp. 194-206, 2013.
- [11] Thakuria D, Schmidt O, Finan D, Egan D and Doohan FM, "Gut wall bacteria of earthworms: a natural selection process," *The ISME journal*, vol. 4, no. 3, pp. 357-366, 2010.
- [12] S.Y Yoon, J.J. Yeo and Y.S. Yang, "Energy harvesting from food waste by inoculation of vermicomposted organic matter into Microbial Fuel Cell(MFC)," in *Proc. of 2015 IEEE SENSORS*, pp. 1-4, Busan, South Korea, November 2015.
- [13] Arpita N, Vikash K, Moumita K and Patit PK, "MFC with vermicompost soil: power generation with additional importance of waste management," *RSC Advances*, vol. 5, pp. 41300-41306, 2015.
- [14] Logan BE, Hamelers B, Rozendal R, Schroder U, Keller J, Freguia S, Peter A, Willy V and Korneel R, "Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology," *Environmental science & technology*, vol. 40, no. 17, pp. 5181-5192, 2006.