

## 사용자 환경 모니터링을 위한 소형 자가발전 무선 데이터 송수신 시스템 개발

장순민<sup>‡</sup> · 조수민<sup>‡</sup> · 정윤수 · 김재형 · 김현수 · 장다연 · 리윤상 · 이동한 · 리문우<sup>\*†</sup> · 최동휘<sup>†</sup>

경희대학교 기계공학과  
17104 경기도 용인시 덕영대로 1732  
\*한국기술교육대학교 기계공학부  
31253 충남 청안시 동남구 충절로 1600  
(2021년 12월 6일 접수, 2021년 12월 24일 수정본 접수, 2021년 12월 29일 채택)

## Fabrication of Portable Self-Powered Wireless Data Transmitting and Receiving System for User Environment Monitoring

Sunmin Jang<sup>‡</sup>, Sumin Cho<sup>‡</sup>, Yoonsu Jung, Jaehyoung Kim, Hyeonsu Kim, Dayeon Jang, Yoonsang Ra, Donghan Lee, Moonwoo La<sup>\*†</sup> and Dongwhi Choi<sup>†</sup>

Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deogyong-daero, Yongin, Gyeonggi, 17104, Korea  
\*School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology & Education, 1600 Chungjeol-ro, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 31253, Korea

(Received 6 December 2021; Received in revised from 24 December 2021; Accepted 29 December 2021)

### 요 약

최근 반도체와 같은 정보통신 기술의 발전과 함께 사물인터넷(IoT) 기술 발전이 급격히 이루어지면서 센서와 무선 통신 기능을 내장하여 주변 사물 및 환경 조건을 감지 및 분석하여 대응하는 원격 환경 모니터링 기술이 주목받고 있다. 하지만, 기 개발된 원격 환경 모니터링 시스템은 모두 별도의 전원 공급 장치를 필요로 하기 때문에 시·공간적 기기 사용의 제한을 야기하여, 사용자의 불편함을 유발할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 생체 역학적 에너지의 역학적 특성이 고려된 기구학적 설계 기반 전자기 발전 소자(Electromagnetic generator, EMG)를 개발함으로써 이의 에너지 자립형 원격 환경 모니터링 구동을 위한 전원 공급 장치로써 활용한다. 낮은 진동 주기 및 큰 진폭 변화의 역학적 특성을 지닌 생체 역학적 에너지를 효과적으로 이용하기 위해 자석의 기구학적 배치를 통한 깨지기 쉬운 힘의 평형을 유도하는 Levitation-EMG (L-EMG)를 설계했다. 이를 통해, L-EMG는 외부 진동에 민감하게 반응하여 자석과 코일 간의 효과적인 상대 움직임을 야기하여 고품질 전기 에너지 공급을 가능하게 했다. 뿐만 아니라, 실제 환경 감지 센서와 무선 통신 모듈의 필요 전력을 최소화하기 위한 마이크로 컨트롤러(Micro control unit, MCU)를 구성하였으며, 내장 기능 중 저전력모드(Sleep mode)를 접목하여 소비전력의 최소화 및 이의 구동시간 증가를 달성했다. 최종적으로 사용자의 편의성을 극대화하기 위해 휴대용 어플리케이션을 구축하여 손쉽게 주변 환경 모니터링을 가능하게 했다. 따라서, 이번 연구는 생체역학적 에너지를 이용한 에너지 자립형 원격 환경 모니터링 구축 가능성을 검증할 뿐만 아니라, 더 나아가 별도의 외부 전원 없이 주변 환경 모니터링이 가능한 설계 방안을 제시할 수 있다.

**Abstract** – With the rapid advance of the semiconductor and Information and communication technologies, remote environment monitoring technology, which can detect and analyze surrounding environmental conditions with various types of sensors and wireless communication technologies, is also drawing attention. However, since the conventional remote environmental monitoring systems require external power supplies, it causes time and space limitations on comfortable usage. In this study, we proposed the concept of the self-powered remote environmental monitoring system by supplying the power with the levitation-electromagnetic generator (L-EMG), which is rationally designed to effectively harvest biomechanical energy in consideration of the mechanical characteristics of biomechanical energy. In

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: dongwhi.choi@khu.ac.kr, mla@koreatech.ac.kr

<sup>‡</sup>이 논문은 포항공과대학교 강인석 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

<sup>‡</sup>S. J. and S. C. contributed equally to this work.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

this regard, the proposed L-EMG is designed to effectively respond to the external vibration with the movable center magnet considering the mechanical characteristics of the biomechanical energy, such as relatively low-frequency and high amplitude of vibration. Hence the L-EMG based on the fragile force equilibrium can generate high-quality electrical energy to supply power. Additionally, the environmental detective sensor and wireless transmission module are composed of the micro control unit (MCU) to minimize the required power for electronic device operation by applying the sleep mode, resulting in the extension of operation time. Finally, in order to maximize user convenience, a mobile phone application was built to enable easy monitoring of the surrounding environment. Thus, the proposed concept not only verifies the possibility of establishing the self-powered remote environmental monitoring system using biomechanical energy but further suggests a design guideline.

**Key words:** Energy harvesting, Remote environmental monitoring, Self-powered system, Electromagnetic generator, Biomechanical energy

## 1. 서 론

반도체 기술 및 정보 통신 기술(Information and Communications Technology, ICT)의 급격한 발전 덕분에 사물인터넷(Internet of Things)과 같이 집적화 된 고성능 정보 통신 기술의 발전 속도가 기하급수적으로 증가되고 있다[1]. 이를 기반으로 삶의 질에 대한 요구가 높아지면서 주변 환경의 미세먼지, 온·습도와 같은 환경 조건을 감지하고 분석하여 이에 실시간으로 대응할 수 있는 환경 모니터링 시스템 기술 개발이 더욱 주목받고 있다. 최근, 기 개발된 환경 모니터링 시스템을 원격으로 연결하기 위한 기술 개발의 필요성이 강조되면서, 환경 조건의 데이터 단절을 방지하기 위해 다양한 전력 공급 기술 개발을 통한 지속 가능한 시스템 구동 가능성이 요구된다[2,3]. 원격 환경 모니터링 시스템의 구동 시간을 늘리기 위해, 배터리 용량을 극대화하는 연구들이 많이 이루어지고 있지만, 간헐적인 충전 및 충전에 걸리는 시간 등 근본적인 시/공간적 한계점이 존재한다[4]. 이를 극복하기 위한 다른 방법으로 최근 에너지 하베스팅 기술(Energy harvesting technologies) 기반 소형 발전기를 통한 전원 공급 연구가 활발히 진행되고 있다. 에너지 하베스팅이란 주변 환경에 다양한 형태로 존재하는 에너지를 우리가 사용할 수 있는 전기 에너지로 변환하는 기술이며, 최근 마찰 대전, 열전, 그리고 압전 발전 등의 연구가 매우 활발히 이루어지고 있다. 다양한 작동 원리를 기반으로, 적용처의 역학적 에너지 특성을 고려한 기구학적 설계 연구가 발전 중이며 그 중, 대표적으로는 높은 전력 출력 특성을 장점으로 지니는 전자기 유도 발전 원리 기반 전자기 발전기(Electromagnetic generator, EMG) 연구가 있다[5-10]. 전자기 발전기는 1800년대 패러데이가 발견한 자석과 코일의 상대적인 운동에 따라 발생하는 전자기 유도 현상을 이용하여 전기를 생산하며, 이의 높은 전기 생산량 덕분에 상용화가 많이 진행되고 있다. 하지만, 기존의 전자기 발전기는 대부분 3상 교류 발전 형태로 설계 및 개발되어 있어, 입력 에너지원의 역학적 특성에 최적화된 기구학적 설계가 원활하게 이루어지고 있지 않다[11,12]. 따라서 실제 환경 내에서 저전력 센서 및 무선 통신 모듈의 지속적인 전원 공급을 위해 입력 에너지원의 역학적 특성이 고려된 시스템 설계를 통한 효과적인 에너지 하베스팅 역량이 필수적으로 요구된다. 따라서 본 연구에서는 입력 에너지원의 역학적 특성을 고려한 소형 전자기 발전 소자를 개발하고, 이를 통해 별도의 외부 전원 없이 주변 환경 조건을 감지하여 관련 데이터를 무선 통신 모듈을 통해 원격 모니터링하는 것을 최종 목표로 한다. 위 목표를 달성하기 위해 세 가지 전략을 구축했다. 첫 번째로, 입력 에너지원으로 널리 활용되는 다양한 역학적 특성을 지닌 생체역학적 에너지를 효과적으로 이용하기 위한 소형 전자기 발전 소자의 기구학적 설계이다.

생체역학적 에너지의 수직 방향 진동을 효과적으로 수확하기 위해 고정형 자석과 부유형 자석을 위치시킨다. 이를 통해 깨지기 쉬운 힘의 평형을 유도하여 외부 진동에 민감하게 반응하는 자석 부유형 전자기 발전 소자(Levitation-EMG, L-EMG)를 최적화한다. 더 나아가, 자석과 코일 간의 상대적인 운동을 원활하게 하기 위해 다양한 기계요소를 적용한다. 두 번째로, 원격 환경 모니터링 시스템의 구동 시간을 극대화하기 위해 저전력 마이크로 제어 장치(Micro control unit, MCU)를 구성한다. 이는 저전력 센서 모듈과 데이터를 무선으로 통신할 수 있는 Bluetooth 모듈이 추가되어 생산된 전력을 효율적으로 사용할 수 있도록 한다. 마지막으로 사용자 친화적 인터페이스 구축을 통해, Bluetooth 모듈을 통해 수신한 데이터를 시각화하여 언제 어디서든 주변 환경 조건의 데이터를 손쉽게 확인할 수 있는 에너지 자립형 원격 환경 모니터링 플랫폼을 제안한다.

## 2. 실 험

### 2-1. 전자기 발전 소자 실험 장치 및 재료

Fig. 1은 본 연구에서 L-EMG의 개략도 및 작동 원리를 보여준다. 소자의 case는 3D printer를 이용하여 열가소성 수지 적층 제조 방식으로 제작되었다. 원통 형태의 case 외부에는 전자기 유도현상의 발생을 위하여 구리 코일이 감겨 있으며, 내부에는 생체역학적 움직임에 의해 자유롭게 움직일 수 있는 자석(Center Magnet, CM)이 위치한다. 그리고 CM을 공중에 부유시키기 위한 case의 아랫부분에 고정된 자석(Base Magnet, BM)이 위치한다. CM의 움직임에 따라 코일과 자석 사이에 상대적인 움직임이 생기고, 코일을 지나는 자기력 선속이 시간에 따라 변화하게 된다. 이에 따라 전자기 유도 전류가 유도되며, 이의 세기와 방향은 Lenz의 법칙에 의해 자기력 선속의 변화를 방해하는 방향으로 결정되게 된다. 이렇게 L-EMG에 의하여 생

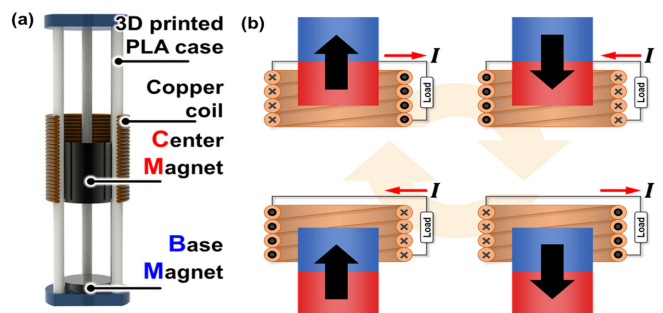


Fig. 1. (a) Composition of the L-EMG and (b) the operational mechanism of the EMG.

산되는 에너지는 고전압 프로브가 장착된 오실로스코프를 이용하여 측정되었으며, EMG가 가지는 높은 전류의 특성상, 전류는 보다 정확한 측정을 위하여, 추가적인 전류 프로브를 이용하여 측정하였다.

### 2-2. 전자기 발전 소자 실험 방법

생체역학적 에너지의 하베스팅에 대한 L-EMG의 성능 평가에 따른 최적화를 위하여, L-EMG를 구성하는 다양한 parameter들에 대한 출력 변화를 비교 분석하였다. 그 중에서도, case 내부의 BM의 유무에 따른 실험적인 성능평가 전에 COMSOL 소프트웨어를 이용하여 출력에 대한 해석을 진행하였다. 그리고 BM의 유무, L-EMG에 가해지는 파형(Sine, Pulse, Square), case 바깥에 감기는 코일의 선경(0.2 mm, 0.3 mm) 및 감은 수(1000번, 1500번, 2000번, 2500번, 3000번), 그리고 case의 크기(80 mm, 120 mm)에 따른 전압 출력을 통하여 성능평가가 이루어졌으며, 최적화가 완료된 L-EMG의 전압, 전류 출력의 평가 및 전력의 계산을 진행하였다. 성능평가는 생체 역학적 움직임(Frequency 1~5 Hz)의 효과적 수확을 위해, 가진기를 이용하여 유사한 움직임을 구현하여 진행하였다[13,14]. L-EMG의 최적화 진행 후, 하베스팅 된 에너지를 배터리에 저장하는 실험 또한 진행하였다.

### 2-3. 사용자 주변 환경 모니터링 시스템 구축

사용자 주변 환경 모니터링 시스템의 센서 모듈은 MCU 모듈과 무선 통신 모듈로 구성하였으며, 사용자 주변 온 습도 계측을 위한 DHT-11 센서와 미세먼지 농도 계측을 위한 PM2008 센서를 이용하여 MCU 모듈을 구성하였다. 또한 효과적인 전원 관리를 위한 승압 부스터 모듈과 저전력 모드를 구성하여, 제작한 L-EMG에서 하베스팅 되는 에너지를 이용하여 MCU 모듈을 효과적으로 구동할 수 있도록 하였다. 저전력 Bluetooth (BLE) 모듈을 MCU 모듈에 적용하여, 각 센서 모듈에서 얻은 데이터를 Bluetooth 통신을 이용하여 무선으로 송신할 수 있도록 하였다. 그리고 무선으로 수신한 데이터의 시각화를 위한 핸드폰 어플리케이션을 MIT App Inventor를 이용하여 제작하고 주변 환경에서의 실험 진행을 통하여 사용자 주변 환경 모니터링 시스템의 구동 가능성을 평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. N-EMG와 L-EMG의 비교

L-EMG의 우수성을 검증하기 위하여 기존에 사용되던 자석의 수직 운동에 따른 에너지 하베스팅이 가능한 non levitation-EMG (N-EMG)와, 이번 연구에서 제안되는 L-EMG의 출력에 대한 실험이 이루어졌다. Fig. 2(a)는 N-EMG와 L-EMG의 구조를 나타낸 개략도이다. L-EMG는 N-EMG와는 다르게, case의 아랫면에 BM이 위치하고 있으며, BM의 윗부분은 CM의 아랫부분과 같은 극이 되도록 배치하여 CM이 척력에 의하여 공중에 부유할 수 있도록 설계되었다. 생체역학적 에너지는 선형적이며, 비교적 큰 진폭을 가지지만 낮은 진동수와 가속도를 가지기 때문에, 효과적인 에너지 하베스팅을 위하여 CM의 수직방향 움직임이 원활해야 한다. CM이 공중에 부유하는 구조 덕분에, 정지 관성이 감소하여 힘의 평형상태가 깨지기 쉬워지고, 이에 따라 낮은 진동수와 가속도를 가지는 외부 진동에도 시스템이 원활하게 반응이 가능하여, 입력된 생체 역학적 에너지의 효과적인 변환을 기대할 수 있었다. Fig. 2b와 2c는 이러한 두 구조를 가지는 EMG를 COMSOL 소프트웨어를 이용하여 해석을 진행한

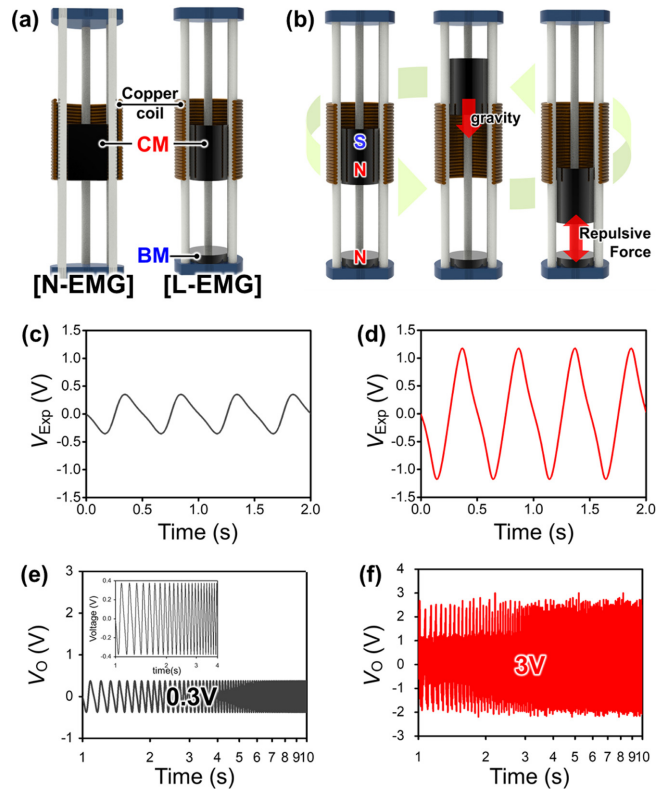


Fig. 2. (a) Comparison of the N-EMG and L-EMG and (b) the operational mechanism of the L-EMG. The output expectation ( $V_{Exp}$ ) from the (c) N-EMG and (d) L-EMG with the COMSOL. The real voltage output ( $V_0$ ) from the (e) N-EMG and (f) L-EMG.

결과이다. 자기장의 변화에 따라 유도되는 전압은 Ampere의 법칙에 따라 이론상 다음과 같이 유도되며, 이때 자기장의 변화로 인해서 유도되는 전압은 코일에서 변수를 고려한 J에 따라 결정된다.

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$B = \nabla \times A \quad (2)$$

$$J = \sigma E \quad (3)$$

$$B = \text{Total magnetic density [T]}, H = \text{Free current density [A} \cdot \text{m}^{-1}\text{]},$$

$$J = \text{Total current density [A} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}$$

$$e_{coil} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d(BA)}{dt} \quad (4)$$

$$J_e = \frac{NI_{coil}}{A} e_{coil} \quad (5)$$

$\Phi = \text{Magnetic flux [Wb]}$ ,  $N = \text{Number of turns}$ ,  $A = \text{Cross section area of coil}$ ,  $I_{coil} = \text{Current flow on coil}$ ,  $e_{coil} = \text{Induced voltage on coil}$

이러한 법칙에 기반하여 0.2 mm의 선경을 가지는 코일을 3000번 감은 EMG의 1 Hz 하의 출력 해석 결과, N-EMG에서는 0.35V, L-EMG에서는 1.5 V의 4배이상 큰 출력전압이 L-EMG에서 발생하는 것을 알 수 있었으며, 이에 따라 CM과 BM 간의 척력을 이용한 L-EMG의 설계가 이론상 유효함을 확인할 수 있었다. Fig. 2d와 2e는 이러한 이론 기반 해석을 기반으로, 3D printing 기술을 이용하여 출력된 두 시스템에서 출력되는 전압을 측정하여 비교한 실험 결과이다. 실험은 0.2 mm의 선경을 가지는 코일을 1000번 감은 EMG를 4Hz의

진동 내에서 진행하였으며, 그 결과 N-EMG에서는 0.3 V, L-EMG에서는 3 V의 출력 전압이 발생하여, CM과 BM 간의 척력을 이용하여 시스템을 설계하였을 때, 10배가량 큰 출력 전압이 발생 가능함을 실제 확인하였다. 출력 전압은 실제 시스템에 적용하였을 때 훨씬 커졌는데, 이는 실제 시스템의 경우 CM의 수직 운동에 따라 case 상단부와 충돌이 일어나게 되어 CM이 아래쪽 방향으로 순간 가속되기 때문이다. 유도 기전압의 크기는 maxwell의 법칙에 따라 식 (4)와 같이 표현되는데, 이에 의하면, 순간 가속된 CM이 시간에 따른 자속 변화량을 증가시키게 되고, 따라서 실제 유도 기전압이 이론 값에 기반한 해석 결과에 비하여 높게 출력되는 현상이 관찰됨을 알 수 있다.

3-2. L-EMG의 최적화

개발된 L-EMG에 대하여 생체 역학적 움직임의 조건 하에서 각 parameter에 대한 출력 비교 실험이 이루어졌다. Fig. 3a는 L-EMG의 출력에 영향을 줄 수 있는 parameter들을 나타낸 개략도이다. 식 (4)에서 알 수 있듯이, 코일을 감은 수와 코일 단면적에 의하여 유도 기전압의 크기가 달라지는 것을 알 수 있으며, 이에 따라 코일의 선경(d), 그리고 코일을 감은 수(N)에 대한 연구를 진행하였다. 또한, CM과 코일의 상대적 움직임에 따라 에너지가 하베스팅 되기 때문에, 수직 운동의 파형과 자석이 움직일 수 있는 변위에 대한 연구 또한 진행하였다. N=1000과 d=0.2 mm의 조건 하에서 수직 운동의 파형에 따른 다양한 생체 역학적 움직임 주파수에서의 출력 결과를 Fig. 3b에서 확인할 수 있다. 최대 변위에 도달할 때까지 연속적인 가속도의 변화를 수반하는 sine 형태의 파형 하에서는, 순간적인 가속도의 증대에 따라 진동하는 square와 pulse 형태의 파형 하에서 보다 낮은 출력이 나오는 것을 확인할 수 있었다. 생체 역학적 움직임의 형태는, 연속적인 가속도의 변화를 수반하는 sine 형태의 파형 보다는 급격한 가속도 변화를 수반하는 square와 pulse 형태의 파형과 유사하기 때문에, 이후 비교를 위한 실험은 pulse 파 하에서 진행하였다. 그리고 공통적으로, 3 Hz 부근의 주파수에서 출력이 낮아지는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 3 Hz 부근에서 시스템의 진동과 CM의 진동이

감쇠하게 되어 상대적인 움직임이 감소하여 출력 값이 감소하게 됨을 알 수 있다. N=500과 pulse 파형의 조건 하에서 d에 따른 다양한 생체 역학적 움직임 주파수에서의 출력 결과를 Fig. 3c에서 확인할 수 있다. d가 커질수록 식 (4)에서의 A 또한 커지게 되고, 이론적으로는 d가 커짐에 따라 유도 기전압 또한 커질 것으로 예상되었으나, 실험적으로 확인했을 때, 오히려 d가 0.2 mm로 작을 때 가장 큰 출력 값을 얻을 수 있었다. 이는 d가 커졌을 때 case 내부 방향으로 더 큰 힘이 작용하게 되어, 3D 프린팅 방식으로 제작한 case에 변형이 일어나 CM의 수직방향 운동이 방해되기 때문이다. 따라서, 이후 실험들은 안정적으로 제작 가능한 0.2 mm의 d 하의 조건에서 진행되었다. d=0.2 mm와 pulse 파형의 조건 하에서 N에 따른 다양한 생체 역학적 움직임 주파수에서의 출력 결과를 Fig. 3d에서 확인할 수 있다. 1000에서 3000까지, 500번씩 증가시키며 N에 대한 비교 실험을 진행하였으며, 식 (4)에서와 같이, N의 증가에 따라 유도 기전력의 크기도 커짐을 확인하였다. 따라서, 이후 실험들은 N=3000 하의 조건에서 진행되었다. d=0.2 mm, N=3000, pulse 파형 하에서의 CM과 코일의 상대적 운동 변위에 따른 다양한 생체 역학적 움직임 주파수에서의 출력 결과를 Fig. 3e에서 확인할 수 있다. 120 mm의 H 하에서 80 mm의 H 보다 높은 출력을 얻을 수 있었으나, 5 Hz 부근에서 출력이 감소함을 확인할 수 있다. 이는 시스템의 길이 증가로 인하여, 자석 상승 변위의 주기가 커짐에 따라 시간에 대한 자속의 변화량이 감소함에 따라 발생한다. 상대적으로 다양한 진동수에서의 안정적인 전력 공급 및 L-EMG의 휴대성을 위하여, 80 mm의 H를 선택하였다. 위의 parameter 실험들을 통하여 최적화를 완료하였고, Fig. 3f에서 확인할 수 있듯, 약 17 V의 전압, 1 mA의 전류, 그리고 12 mW의 전력을 출력 가능한 EMG가 성공적으로 제작되었다.

3D 프린팅 기술의 폐속조형법 기반 최적화된 설계 기법으로, 코일의 단선 두께 감소, 자속의 변화를 최대화함과 동시에 부피를 줄일 수 있는 회전체 등등의 기계요소의 추가 설계 및 신호처리 및 통신 회로의 집적화가 동시다발적으로 이루어진다면, 실제 웨어러블 에너지 하베스팅 소자로 활용하기 위한 소형화 가능성이 충분할 것으로 예상된다.

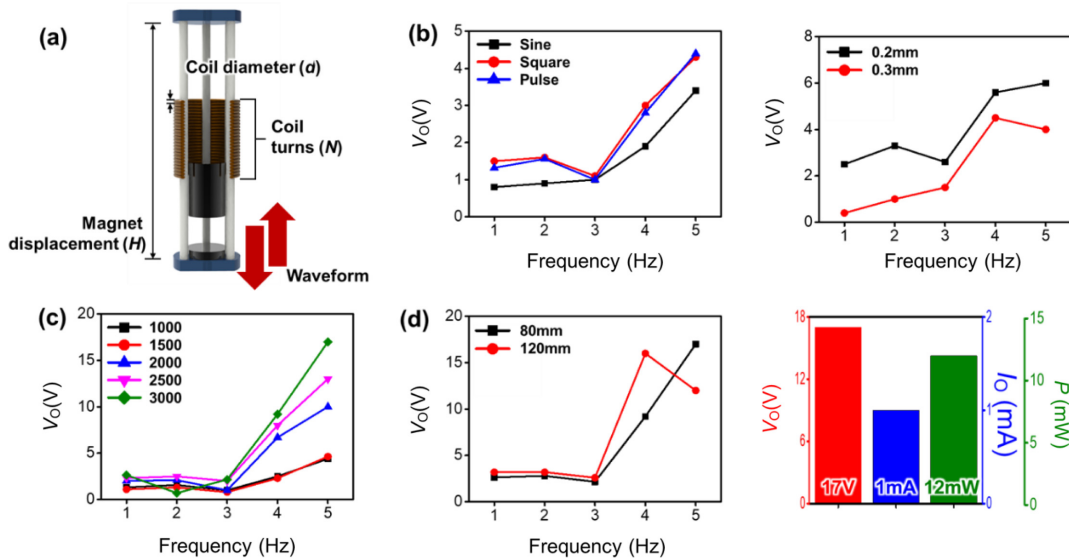


Fig. 3. (a) Parameters of the L-EMG. Comparative analysis of output performance depending on the (b) waveform, (c) d, (d) N, and (e) H. (f) The output from the optimized L-EMG.

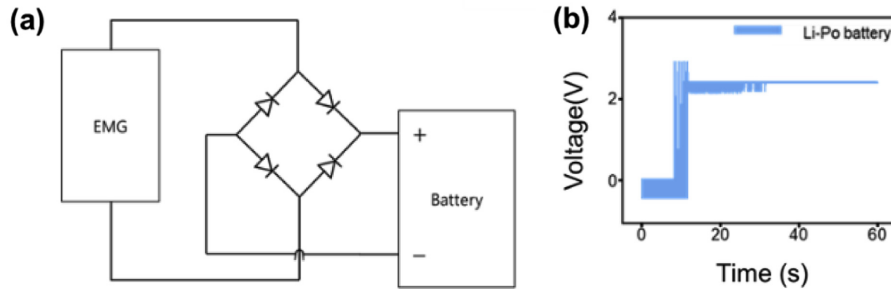


Fig. 4. (a) Circuit composition of the battery charging with the L-EMG. Charging process of the battery of the (b) 350 mAh.

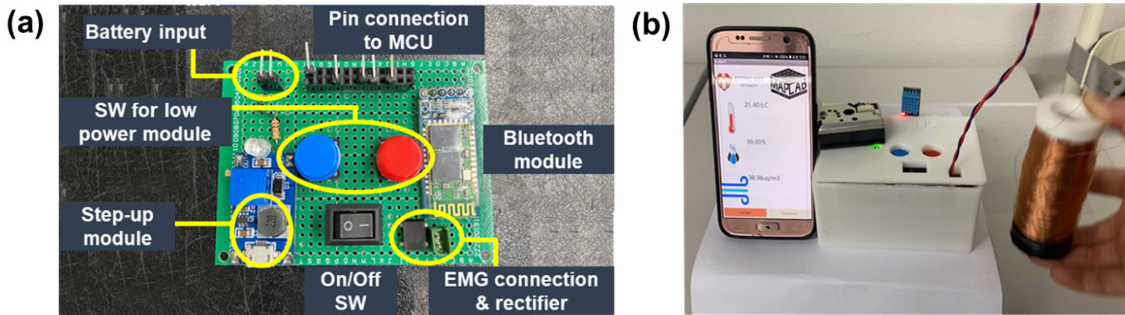


Fig. 5. (a) Sensor package composition and (b) the operation of the environmental monitoring system.

3-3. 사용자 주변 환경 모니터링 시스템 구성

환경 감지 시스템의 안정적인 구동을 위하여, L-EMG로부터 출력되는 전기 에너지의 저장 및 이의 안정적인 인가가 가능한 배터리를 선정하기 위한 실험이 진행되었다. L-EMG로부터 출력되는 교류형 전기에너지를 배터리에 충전하기 위해 정류기가 사용되었으며 구성된 회로의 개략도는 Fig. 4(a)와 같다. 기존에 널리 사용되고 있는 상용 리튬-폴리머 배터리를 대상으로 충전 실험이 진행되었으며, 일반적으로 배터리의 용량에 따라 충전에 필요한 필요전압 및 전류가 상이하다는 점을 기반으로 배터리 선정이 이루어졌다. 다양한 용량을 가지는 다수의 리튬-폴리머 배터리의 충전 실험 결과, 기 개발된 L-EMG를 이용하였을 때 충전용량 350 mAh 배터리의 경우 Fig. 4(b)에서 확인할 수 있듯이 L-EMG 가동 후 1분 이내에 안정적인 충전이 시작되었으나 충전용량 500 mAh 배터리는 충전이 이루어지지 않음을 확인할 수 있었다. 이를 기반으로 기 개발된 L-EMG를 이용한 환경 감지 시스템의 안정적인 가동을 위하여 350 mAh의 배터리를 선정하였다.

Fig. 5(a)는 L-EMG에서 출력되는 전력을 배터리를 통해 MCU로 인가하여 환경 감지 시스템을 안정적으로 구동하기 위해 개발된 모듈 패키지의 사진이다. 각 구성요소를 한 개의 소형 인쇄회로기판(PCB)에 집약하여 패키지화를 진행하였으며, 크게 MCU 모듈과 무선 통신 모듈(Bluetooth), 두가지로 구성 되어있다. MCU 모듈에서는 신호 계측 및 처리가 이루어지며, 주변의 온/습도 계측을 센서와 미세먼지 농도 계측을 위한 센서를 포함하고 있다. 무선 통신 모듈에서는 MCU에서 계측된 신호의 송신이 이루어진다. 배터리에서 출력되는 전력의 전압과 MCU의 안정적인 구동에 필요한 요구전압의 크기가 상이하여 배터리에 저장된 전력을 MCU 모듈에 안정적으로 인가하기 위한 승압 부스터가 사용되었다. 또한 전력 소모의 효율성 증대를 위해 저전력 모드가 구성되었으며 이와 관련한 코드 컴파일 이 이루어졌다.

환경 감지 시스템 사용자의 편리성 증대를 위해 MIT App Inventor를 기반으로 모바일 어플리케이션이 제작되었으며, 온/습도 및 미세먼지 계측 모듈의 작동에 따른 신호를 원격으로 수신하여 시각화된 데이터를 사용자에게 제공할 수 있는 플랫폼으로써 안정적인 구동이 가능함을 확인하였다. 기 개발된 L-EMG와 온/습도 및 미세먼지 계측 모듈 패키지, 그리고 모바일 어플리케이션을 이용하여 Fig. 5(b)와 같이 주변 환경 감지 시스템을 구성하였으며, 이를 통해 주변의 온/습도와 미세먼지 농도 데이터를 시간 및 공간의 제약없이 모니터링할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 인체에서 소산되는 생체역학적 에너지를 효과적으로 수확하기 위해 기구학적 설계 기반 소형 전자기 발전 소자를 개발했다. 소형 전자기 발전 소자는 고정형 자석과 부유형 자석의 기구학적 배치를 깨지기 쉬운 힘의 평형을 유도함으로써 낮은 진동수, 상대적으로 큰 진폭과 같은 역학적 특성을 지닌 신체 움직임을 효과적으로 수확할 수 있다. 또한, L-EMG의 최적 설계를 위해 선경과 코일의 감은 수에 대한 실험을 진행한 결과, 최종적으로 자석 부유형 전자기 발전 소자가 기존의 전자기 발전 소자에 비해 약 4배 이상의 출력 향상이 이루어졌다. 제안된 L-EMG를 통해, 생성된 전력을 저장하기 위한 최적 배터리 소자의 용량을 선정했다. 따라서, 최적화된 L-EMG와 배터리를 통해 안정적인 전력 공급 장치 시스템으로 통합했다. 통합화 된 전원 공급장치를 통해, 온/습도 및 미세먼지 농도 센서를 안정적으로 구동하여 주변 환경 감지에 대한 데이터를 계측 및 수집할 수 있었다. 또한 MCU의 전력 소모량을 대폭 줄이기 위해, 환경 모니터링을 하지 않을 시에 sleep & wakeup mode와 같은 저전력 모드를 활용하여 구동 시간을 극대화했다. 이와 같이 감지된 환경 데이터를 휴대폰 어플리케이션을 통해 사용자 친화적으

로 시각화함으로써 언제 어디서든 손쉽게 예측하고자 하는 주변 환경을 효과적으로 모니터링할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 제안된 입력 에너지원의 역학적 특성을 고려한 에너지 하베스팅 소자의 설계 개발 방식은 다양한 원격 환경 감지 모니터링을 위한 에너지 하베스팅 소자의 설계 가이드라인으로서 크게 기여할 것으로 기대된다. 더 나아가, 본 연구에서 에너지원으로 적용했던 생체역학적 에너지뿐만 아니라, 최근 친환경 에너지원으로 각광받고 있는 바람 에너지, 파력 에너지, 그리고 진동 에너지 등을 수확하여 에너지 자립형 모니터링 시스템으로 활용될 수 있는 역량을 기반으로 앞으로의 잠재성이 매우 높다.

## 감 사

이 논문은 2020년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

## References

- Laghari, A. A., et al., "A Review and State of Art of Internet of Things (IoT)," *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1-19(2021).
- Srivastava, M. and Kumar, R., *Smart Environmental Monitoring Based on IoT: Architecture, Issues, and Challenges*, in *Advances in Computational Intelligence and Communication Technology*. 2021, Springer. p. 349-358.
- Sunny, A. I., et al., "Low-Cost IoT-Based Sensor System: A Case Study on Harsh Environmental Monitoring," *Sensors*, **21**(1) 214(2021).
- Nie, Z., et al., "Improving High Rate Cycling Limitations of Thick Sintered Battery Electrodes by Mitigating Molecular Transport Limitations Through Modifying Electrode Microstructure and Electrolyte Conductivity," *Molecular Systems Design & Engineering*, **6**(9) 708-712(2021).
- Beeby, S. P., et al., "A Micro Electromagnetic Generator for Vibration Energy Harvesting," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **17**(7), 1257(2007).
- Cho, S., et al., "Universal Biomechanical Energy Harvesting from Joint Movements Using a Direction-switchable Triboelectric Nanogenerator," *Nano Energy*, **71**, 104584(2020).
- Fan, F.-R., Tian, Z.-Q. and Wang, Z. L., "Flexible Triboelectric Generator," *Nano energy*, **1**(2), 328-334(2012).
- Maharjan, P., et al., "A Fully Functional Universal Self-chargeable Power Module for Portable/wearable Electronics and Self-powered IoT Applications," *Advanced Energy Materials*, **10**(48), 2002782(2020).
- Wu, C., et al., "A Spring-based Resonance Coupling for Hugely Enhancing the Performance of Triboelectric Nanogenerators for

- Harvesting Low-frequency Vibration Energy," *Nano Energy*, **32**, 287-293(2017).
- Yong, S., et al., "Auto-Switching Self-Powered System for Efficient Broad-Band Wind Energy Harvesting Based on Dual-Rotation Shaft Triboelectric Nanogenerator," *Advanced Energy Materials*, 2101194(2021).
- Ali, T. and Khan, F. U., "A Silicone Based Piezoelectric and Electromagnetic Hybrid Vibration Energy Harvester," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **31**(5), 055003(2021).
- Huang, M., et al., "A Magnetic-Coupled Nonlinear Electromagnetic Generator with Both Wideband and High-Power Performance," *Micromachines*, **12**(8), 912(2021).
- Hou, C., et al., "A Rotational Pendulum Based Electromagnetic/triboelectric Hybrid-generator for Ultra-low-frequency Vibrations Aiming at Human Motion and Blue Energy Applications," *Nano Energy*, **63**, 103871(2019).
- Maharjan, P., et al., "A Fully Enclosed, 3D Printed, Hybridized Nanogenerator with Flexible Flux Concentrator for Harvesting Diverse Human Biomechanical Energy," *Nano Energy*, **53**, 213-224(2018).

## Authors

**Sumin Jang:** Ph.d candidate, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; jsm2962@khu.ac.kr

**Sumin Cho:** Ph.d candidate, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; tnals1404@khu.ac.kr

**Yoonsu Jung:** B.S. course, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; yoonsuj7@khu.ac.kr

**Jaehyoung Kim:** B.S. course, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; 2016100694@khu.ac.kr

**Hyeonsu Kim:** B.S. course, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; hs1011807@khu.ac.kr

**Dayeon Jang:** B.S. course, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; over7kinking@khu.ac.kr

**Yoonsang Ra:** Ph.d candidate, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; fkdbskd8745@khu.ac.kr

**Donghan Lee:** M.S. candidate, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; ktp7797@khu.ac.kr

**Moonwoo La:** Professor, School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology & Education, Cheonan, Korea; mla@koreatech.ac.kr

**Dongwhi Choi:** Professor, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; dongwhi.choi@khu.ac.kr