

실시간 헬스케어 모니터링의 독립 구동을 위한 접촉대전 발전과 전자기 발전 원리의 융합

조수민^{*‡} · 정윤수^{*‡} · 김현수^{*‡} · 박민석^{*} · 이동한^{*} · 감동익^{*} · 장순민^{*} · 라윤상^{*} · 차경제^{**} ·
 김형우^{**} · 서경덕^{***,†} · 최동휘^{*,†}

*경희대학교 기계공학과
 17104 경기도 용인시 덕영대로 1732
 **한국생산기술연구원 스마트제조기술연구그룹
 42994 대구광역시 달성군 테크노순환로 320
 ***원광대학교 기계설계공학과
 54538 전북 익산시 익산대로 460
 ****원광대학교 기계공학과
 54538 전북 익산시 익산대로 460

(2021년 9월 1일 접수, 2021년 9월 23일 수정본 접수, 2021년 10월 1일 채택)

Stand-alone Real-time Healthcare Monitoring Driven by Integration of Both Triboelectric and Electro-magnetic Effects

Sumin Cho^{*‡}, Yoonsu Joung^{*‡}, Hyeonsu Kim^{*‡}, Minseok Park^{*}, Donghan Lee^{*}, Dongik Kam^{*}, Sunmin Jang^{*},
 Yoonsang Ra^{*}, Kyoung Je Cha^{**}, Hyung Woo Kim^{***}, Kyoung Duck Seo^{****,†} and Dongwhi Choi^{*,†}

*Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deogyeong-daero, Yongin, Gyeonggi, 17104, Korea
 **Smart Manufacturing Technology R&D Group, KITECH, 320 Techno sunhwan-ro, Dalseong-gun, Daegu, 42994, Korea
 ***Department of Mechanical Design Engineering, Wonkwang University, 460 Iksan-daero, Iksan-si, Jeollabuk-do, 54538, Korea
 ****Department of Mechanical Engineering, Wonkwang University, 460 Iksan-daero, Iksan-si, Jeollabuk-do, 54538, Korea
 (Received 1 September 2021; Received in revised form 23 September 2021; Accepted 1 October 2021)

요 약

최근 COVID-19 팬데믹 등 다양한 이유로 인해 바이오 헬스케어 시장이 전세계적으로 활성화되고 있다. 그 중, 생체정보 측정 및 분석 기술은 앞으로의 기술적 혁신성과 사회경제적 파급효과를 불러일으킬 것으로 예측된다. 기존의 시스템은 생체 신호를 받아 신호 처리를 하는 과정에서 신호 송·수신부, 운영체제, 센서, 그리고 인터페이스를 구동하기 위한 대용량 배터리를 필수적으로 요구한다. 하지만, 배터리 용량의 한계가 인해 시·공간적인 기기 사용의 제한을 야기하며, 이는 사용자의 헬스케어 모니터링에 필요한 데이터의 단절에 대한 원인으로 작용할 수 있으므로 헬스케어 디바이스의 큰 걸림돌 중의 하나이다. 본 연구에서는 생체정보 측정 장치에 접촉대전 효과(Triboelectric effects)와 전자기유도 효과(Electro-magnetic effects)를 융합하여, 외부 전원을 요구하지 않는 독립 구동이 가능한 시스템을 구성하여 시·공간적으로 사용 제한이 없는 소형 생체정보 측정 모듈을 설계 및 검증했다. 특히, 다양한 헬스케어 모니터링 중 족압 계측을 통해 사용자의 보행 습관 등을 파악할 수 있는 무선 족압 계측 모니터링 시스템을 검증했다. 보행 시 발생하는 접촉·분리 움직임에서 접촉대전 효과를 이용한 효과적인 압력 센서와 압력에 따른 전기적 출력신호를 통해 족압 센서를 만들고, 축전기를 이용한 신호처리 회로를 통해 이의 동적 거동을 계측할 수 있다. 또한, 출력된 전기신호의 무선 송·수신용 전원으로 사용하기 위해 전자기 유도 효과를 이용하여 보행 시 생기는 생체역학적 에너지를 전기에너지로 수확했다. 따라서, 이번 연구는 사용자가 제한적인 배터리 용량 때문에 생기는 충전에 대한 불편함을 줄일 수 있고, 뿐만 아니라 데이터 단절에 대한 문제점을 극복할 수 있는 방법으로서 큰 잠재력을 보여줄 것을 시사한다.

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: dongwhi.choi@khu.ac.kr, kdseo85@wku.ac.kr

[‡]S. C., Y. J., and H. K. contributed equally to this work.

^{*}이 논문은 포항공과대학교 강인석 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

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.

Abstract – Recently, the bio-healthcare market is enlarging worldwide due to various reasons such as the COVID-19 pandemic. Among them, biometric measurement and analysis technology are expected to bring about future technological innovation and socio-economic ripple effect. Existing systems require a large-capacity battery to drive signal processing, wireless transmission part, and an operating system in the process. However, due to the limitation of the battery capacity, it causes a spatio-temporal limitation on the use of the device. This limitation can act as a cause for the disconnection of data required for the user's health care monitoring, so it is one of the major obstacles of the health care device. In this study, we report the concept of a standalone healthcare monitoring module, which is based on both triboelectric effects and electromagnetic effects, by converting biomechanical energy into suitable electric energy. The proposed system can be operated independently without an external power source. In particular, the wireless foot pressure measurement monitoring system, which is rationally designed triboelectric sensor (TES), can recognize the user's walking habits through foot pressure measurement. By applying the triboelectric effects to the contact-separation behavior that occurs during walking, an effective foot pressure sensor was made, the performance of the sensor was verified through an electrical output signal according to the pressure, and its dynamic behavior is measured through a signal processing circuit using a capacitor. In addition, the biomechanical energy dissipated during walking is harvested as electrical energy by using the electromagnetic induction effect to be used as a power source for wireless transmission and signal processing. Therefore, the proposed system has a great potential to reduce the inconvenience of charging caused by limited battery capacity and to overcome the problem of data disconnection.

Key words: Healthcare, Contact electrification, Electromagnetic generator, Standalone operation

1. 서 론

COVID-19 팬데믹으로 인해 전 세계적으로 상당히 많은 변화들이 일어나고 있다. 특히 건강을 위협하는 위험의 일상화가 진행되면서, 세계화에서 지역화로 트렌드의 변화가 일어나고 있는 중이다. 그 중, 단연 돋보이는 것은 ‘비대면 사회’로의 전환이다. COVID-19라는 전대미문의 사태로 공중 보건이 심각하게 위협받는 현재 온라인을 통한 원격 의료 등 온라인 도구에 대한 규제장벽이 완화될 것으로 예측되고 있다[1]. 최근 이러한 전염병을 대비하기 위해 의료시스템은 환자 관리에서 건강관리라는 측면으로 전환될 것으로 예측되고 있다. 이를 위해 특히 바이오 헬스 시장의 진단 키트, 모니터링 제품을 통한 실시간 생체정보 측정 및 분석 기술은 앞으로의 기술적 혁신성과 사회경제적 파급효과를 불러 일으킬 기술로 각광받고 있다. 실시간 생체정보 측정 및 분석 기술이란, 시간과 장소에 구애받지 않고 개인의 생체정보를 수집·분석하여 건강상태를 지속적으로 모니터링하는 기술이다. 따라서 언제 어디서나 실시간으로 자신의 건강상태를 모니터링하고, 건강관리 및 병원 연계 치료를 가능하게 한다. 이러한 기술을 적용시킨 헬스케어 디바이스는 의료기기 승인을 받은 웨어러블 기기로 심박수와 혈당량 등 최근 다양한 생체신호를 감지하여 측정함으로써 사용자의 건강정보를 제공할 수 있다. 기존 헬스케어 디바이스는 주로 심장 박동수, 활동량, 이동거리, 수면 측정 등이 주로 활용되고 있지만, 최근 압력 센서를 이용한 발의 족압을 측정하는 기술도 많이 연구되고 있다. 특히, 발은 이동을 위한 모든 운동에서 가장 기본으로 사용되는 부위로써, 인체의 모든 중량을 받쳐주고 소량의 충격흡수 기능을 담당한다. 뿐만 아니라, 이동하는 동안 인체의 발과 바닥 사이에는 반복적인 충격이 발생하고 이는 신체 피로, 부상 및 만성질환이 발생하는 원인으로 작용한다[2]. 따라서, 이러한 족압을 실시간으로 측정 및 모니터링 함으로써 사용자의 보행 특성 분석 및 운동 처방 등에 활용될 수 있다.

기존의 실시간 건강 관리 시스템은 생체 신호를 받아 신호 처리를 하는 과정에서 송·수신부, 운영체제, 센서, 인터페이스 등을 구동하기 위해 대용량의 배터리를 필수적으로 요구한다. 따라서, 이를 극복하기 위해 초저전력 기술을 사용하는 방향과 배터리의 대용량화 기술이 많이 연구되고 있다. 하지만 여전히 사용자는 배터리가 모

두 방전되었을 때, 충전을 해야 하는 불편함이 있을 수밖에 없었고 해당 시간 동안 생체 신호의 실시간 측정이 불가능하다는 사용시간의 한계라는 문제점이 존재한다.

따라서, 본 연구에서는 생체정보 측정 장치에 최근 전세계적으로 화두가 되고 있는 에너지 하베스팅 기술(Energy harvesting technologies)인 접촉대전 효과와 전자기 유도 효과를 활용하여 생체역학적 에너지를 전기에너지로 변환하여 외부 전원공급 없이 자가구동 가능한 독립구동형 실시간 족압 모니터링 모듈을 설계 및 프로토타입화 했다[3-6]. 각각의 발전 효과 특성에 기반하여, 접촉대전 효과(Triboelectric effects)를 통한 압력센서를 개발하고, 전자기유도 효과(Electromagnetic effects)를 통해 출력 신호를 처리해 줄 MCU (Micro controller unit)와 그리고 출력 신호 무선 송·수신용, 전원을 공급하는 시스템을 설계했다. 따라서, 전원 공급 없이 신체의 생체역학적 움직임을 수확하여 독립 구동 가능한 헬스케어 디바이스인, 족압 계측 모듈을 보여줌으로써 범용성에 있는 높은 가치를 기대한다.

2. 실 험

2-1. 실험 장치 및 재료

적층 제조방식 중 하나인 3D 프린터는 열가소성 수지, PLA 필라멘트를 이용하여 3D 모델링을 출력하는 방식으로 CUBICON사의 Style Plus 모델을 사용했다. 그 후 원활한 구동을 위해 서포터 지지대들을 제거하는 후처리 가공을 진행했다. 또한, 접촉대전 센서의 외곽 하우징을 포함한 지지대를 형성하기 위해, CO₂ 레이저 커팅기를 이용하여 아크릴 기판을 요구하는 크기로 정밀하게 제작했다. 제작된 접촉대전 압력센서, 전자기 유도 발전기는 RIGOL사의 오실로스코프를 통해 전기적 출력 성능을 검증했으며, 전자기유도 발전기에 수직 진동 가진기를 적용하여 진폭, 주기별 성능을 확인할 수 있었고 자석의 배치에 따른 전기적 출력 성능을 검증했다.

2-2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 압력 센서는 접촉대전 현상을 기반으로 하며, 연구의 주 목적인 압력을 효율적으로 측정하기 위해서 접촉대전 센서의 작동방식 중 Pressing/releasing 과정의 반복을 통해 전기 신호를 생산하는 수직 접촉/분리 모드를 이용하여 구성했다. 센서의 크기는

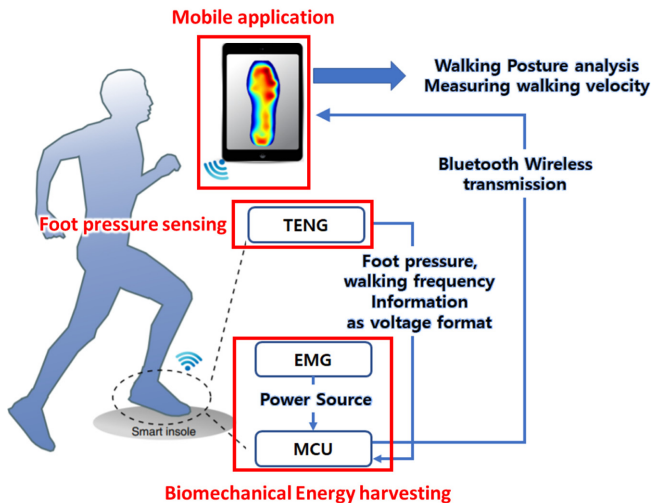


Fig. 1. Entire schematic diagram of the proposed stand-alone real-time healthcare monitoring module.

폭 30 mm, 길이 30 mm, 두께 10 mm의 직육면체 모양으로 제작했다. 또한, 외부 압력에 효과적으로 반응하기 위해 Si 베이스 Sylgard 184 elastomer base와 curing agent (경화제)를 10:1 비율로 혼합하여 PDMS (polydimethylsiloxane) 용액을 제조했다. 이후, 진공펌프를 사용하여 혼합할 때 생긴 용액 내의 기포를 모두 제거하여 품질을 향상시켰다. 이후, 기포를 모두 제거한 PDMS 용액을 미리 센서 크기로 제작된 Mold에 부어 60 °C 오븐에 약 5시간 정도 충분히 경화시켰다. 모든 출력물은 전기 출력 성능을 검증하기 전에 IPA (Isopropyl alcohol)을 이용하여 세척했다. 그리고 전극층으로 사용하기 위한 알루미늄 기판과, 접촉/분리층의 FEP 필름을 사용하여 압력센서를 제작했다. 전자기 유도 발전 장치는 최대한 무게를 가

볍게 하기 위해 알루미늄 중공축을 사용하여 자석의 움직임 경로를 유도했고, 원기동형 네오디뮴 자석의 크기는 지름 25 mm, 높이 25 mm의 크기를 지닌 자석을 사용했다. 또한, 수직 진동에 대해 효과적으로 반응하기 위해 스프링을 복원력으로 사용했으며, 스프링의 spring constant에 따른 출력값을 비교/분석하여 주기 별 효율적인 스프링을 사용했다. 뿐만 아니라, 움직이는 출력용 자석 아래에 척력을 발생시키도록 자석을 고정하여 합력(알짜 힘)이 0인 상태의 공중 부양 상태를 만들어 깨지기 쉬운 힘의 평형 상태를 의도적으로 만들었다. 이를 통해, 외부 수직 진동에 대해 효과적으로 반응하여 에너지를 변환할 수 있다. 최종적으로 Fig. 1에서 알 수 있듯이 신체에서 발생하는 생체역학적 에너지를 각각의 에너지 출력 경향에 적합한 원리를 사용하여 보행자의 족압 계측 및 무선 송신하여 사용자가 언제 어디서든 볼 수 있는 모바일 어플리케이션으로 보여줄 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 접촉대전 원리 기반 압력 센서 개발

제안된 족압 계측용 압력 센서는 접촉대전 현상을 기반으로 하며, 연구의 주 목적인 압력을 효과적으로 측정하기 위한 설계가 진행되었다. 특히, 최근 2012년 이후 전 세계적으로 제작용이성, 저렴한 가격, 고전압 저전류 전기적 출력 경향의 특징을 가진 접촉대전 효과는 자가발전형 압력센서로 사용하기에 많은 장점들을 갖고 있다. 이처럼 접촉대전 효과의 장점을 극대화하기 위해 압력의 Pressing & releasing의 반복적인 단계에서 지속성 있는 접촉/분리를 야기하기 위한 센서를 설계했다. Fig. 2a에서 볼 수 있듯이, 압력에 대한 변형으로 접촉/분리를 유도하기 위해 점탄성을 가지고 있는 Si 기반 고분자인 PDMS를 사용했으며, 전극층으로는 알루미늄 기판을 사용했다. 또한, 전극층과 접촉/분리하는 접촉층은 접촉대전 발전

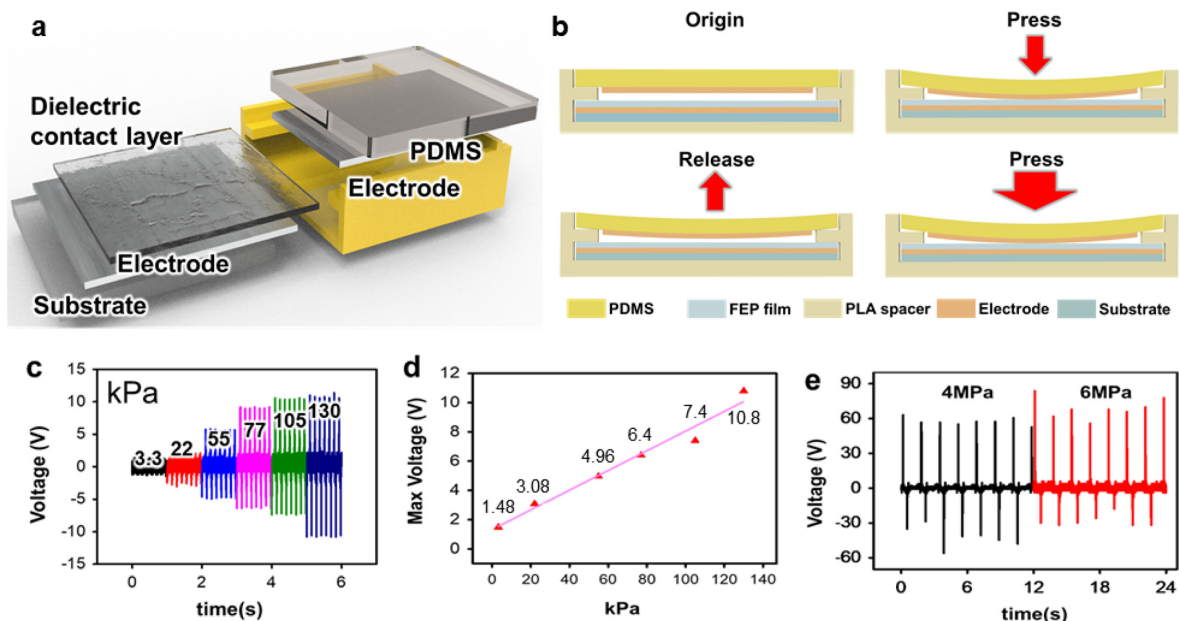


Fig. 2. a. 3D illustration of the triboelectric-based pressure sensor. b. Working principle of the proposed triboelectric sensor, which is based on the vertical contact/separation mode. c. The output voltage of triboelectric sensor under various magnitudes of the pressures. d. Linearity demonstration of the triboelectric-based designed pressure sensor. e. Output voltage graph of the pressure sensor at 4, 6 MPa.

기에서 주로 사용하는 FEP 고분자 필름을 사용하여 출력을 증진시켰으며, 이를 통해 Sensitivity를 향상시킬 수 있었다. 마지막으로 가장 아래 PMMA 기관으로 전체 구조를 고정시켜 줄 수 있도록 설계했다. 접촉층과 전극층 사이에는 Pressing & releasing 반복 시 접촉/분리할 수 있도록 작은 gap을 두었다.

상기 사용된 접촉대전 센서의 작동 원리는 Fig. 2b에 나타나 있듯이, 서로 다른 두 물질(FEP 고분자 필름, 알루미늄 기관)이 외부에서 가해진 압력에 의해 접촉하면, 접촉대전 현상에 의해 마찰되는 서로 다른 두 표면에 각각 양, 음전하가 대전된다. 그리고 압력이 제거되며 두 마찰 표면이 분리되면 정전기 유도 현상에 의해 전극을 통해 외부전선으로 전류가 흐르게 되면서 전기적 출력이 발생한다. 따라서 위와 같은 과정이 반복되면서 지속적인 교류 전류가 발생하게 된다. 이와 같은 접촉대전 발전 원리를 기반으로, Fig. 2c에서 볼 수 있듯이, 실제 신체의 움직임에서 발생하는 주파수(1~3 Hz) 중, 일반적인 움직임인 2 Hz에 해당하는 움직임을 설정하고 압력에 대한 출력 전압을 분석했다. 따라서 구해진 데이터들을 기반으로 추세선을 설정했을 때 입력 압력에 대한 전기적 출력이 선형적인 상관관계가 나왔으므로, 이는 곧 압력센서로서 작용될 수 있음을 보여준다. 더 나아가서, 실제 족압을 계측하기 위해서는 상대적으로 훨씬 큰 범위에서의 압력에 대한 전기적 출력값을 구해야 한다. 따라서 대표적으로 4, 6 MPa 압력에서의 출력값을 구했을 때, 최대 80 V까지의 출력값이 나오는 것을 확인했다. 따라서, 위 실험을 통해 성인의 몸무게(~100 kg)의 범위 내에서 제안된 접촉대전 센서가 정상적으로 작동될 수 있음을 확인했다.

3-2. 실시간 동적 압력 계측을 위한 회로 및 신호처리

Solar cell, 전자기 유도, 압전 원리 등 다양한 원리의 에너지 하베스팅 기술 중, 접촉대전 마찰대전기(Triboelectric nanogenerator) 원리는 다른 방법들에 비해서 상대적으로 고전압, 저전류의 특성을 가진

다. 특히, 위와 같은 고전압 출력 경향 덕분에 센서의 Sensitivity를 높이는 연구가 많이 이루어지고 있다. 하지만, MCU ADC (Analog-to-Digital Converter)의 Input limit voltage보다 높은 경우에는 이러한 장점이 치명적인 단점으로 작용할 수 있다. 따라서, 적정 전압 범위로 낮추어 주는 분압과정(Voltage dividing process)이 포함된 회로구성이 필수적이다. 흔히, 전압의 분배는 전류의 흐름이 직류(Direct current, DC), 교류(Alternative current, AC)인지에 따라 나뉜다. 직류의 경우, 전하의 흐름이 높은 전위에서 낮은 전위로 흐르기 때문에 저항(Resistor)으로 분압회로 구성을 이룬다. 교류의 경우 용량 리액턴스를 가진 커패시터(Capacitor)로 분압회로를 구성할 수 있다. 본 연구에서 사용되는 접촉대전 압력센서는 교류 신호를 출력하기 때문에 커패시터로 분압회로를 구성해야 하지만, 정류기(Rectifier)를 사용하면 교류 출력을 직류로 바꿀 수 있기 때문에 저항을 통한 분압 또한 가능하다.

일반적으로 접촉대전기의 출력경향은 서로 다른 두 물질의 접촉/분리 시 Peak-to-Peak 형태로 출력된다. Fig. 3a처럼 입력 교류 전압이 정류기를 통해 교류 형태의 전기적 출력 경향을 직류 형태로 바꾼다고 할지라도, 저항을 사용하면 Peak-to-Peak 형태가 그대로 출력되기 때문에 이는 동적 거동을 계측함에 있어서 매우 큰 걸림돌로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 이를 해결하기 위해, Fig. 3b와 같이, 커패시터의 직렬 연결 회로를 구성했다. 따라서 기존의 접촉대전 센서의 특성 상 측정할 수 없었던 동압(Dynamic pressure)을 측정할 수 있도록 했다[7]. Fig. 3c와 같이, 커패시터의 다양한 용량(22 pF, 4.7 nF, 0.1 μ F) 별 분압회로를 구성해 분압되는 정도를 계측해봤을 때, 커패시터의 용량이 커질수록 신호처리 된 출력값이 작아지는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 필요한 입력전압의 적정 범위를 위한 Signal processing에는 커패시터 용량 4.7 nF가 가장 적합하다고 할 수 있다.

접촉대전 센서의 실시간 동압 측정을 위해 센서, 분압회로, 그리고

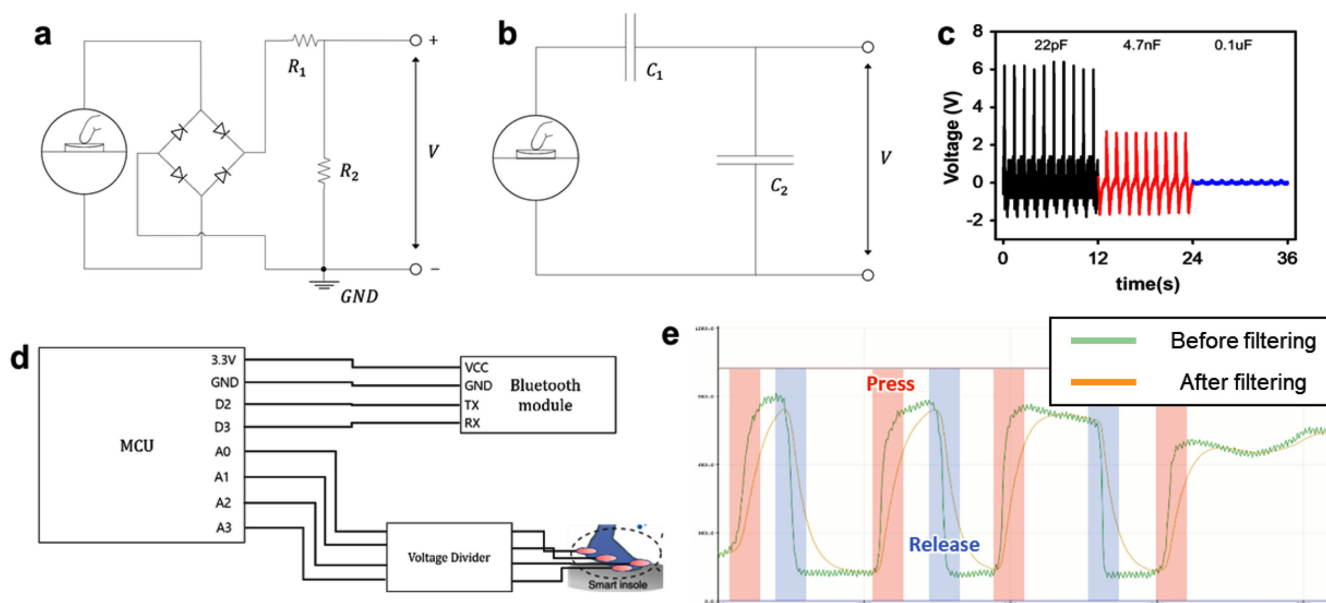


Fig. 3. a. Circuit diagram by using resistors and rectifiers for voltage dividing. b. Circuit diagram by using capacitors for voltage dividing at alternative current. c. A graph of the voltage divided output under different capacitor capacities (22 pF, 4.7 nF, 0.1 μ F). d. Circuit diagram for Bluetooth wireless transmission with MCU board. e. Real-time dynamic pressure measurement graph before and after low pass filter algorithm.

MCU를 연결한 후 압력의 반복적인 Pressing & releasing 실험을 진행했다. Fig. 3d는 전체적인 배선도이며, 본 연구에서 MCU는 Arduino UNO R3 보드를 사용했다. 접촉대전 압력센서의 출력 신호가 분압회로를 통해 Signal processing 되고, 해당 보드를 통해 신호처리 된 입력신호는 블루투스 모듈을 통해 모바일 기기로 전송되어 실시간으로 사용자에게 정보를 제공한다. 하지만, 단순 신호처리 된 입력신호를 사용할 시에는 데이터 거동이 거친 신호 양상을 보였고, 이는 압력 측정에 있어 정확도를 감소시킨다. 따라서, 저역통과필터(Low pass filter) 알고리즘을 이용하여 저장된 데이터 값과 현재 계측한 데이터 값을 보정한 후 사용자에게 높은 정확도로 계측된 정보를 제공했다. 따라서, Fig. 3e를 통해 필터 적용 전/후의 출력값 차이를 확인할 수 있다. 일정한 압력을 반복적으로 적용시켰을 때 실시간으로 동압 계측이 가능했으며, 압력을 인가하고 있으면 신호가 꾸준히 유지되어 순간적인 압력 변화도 감지할 수 있다.

3-3. 전자기 발전기를 통한 신호처리 및 무선 송신용 전원 공급

신호처리 및 블루투스 무선 송신을 위한 MCU 보드를 안정적으로 구동하기 위한 전력을 공급하기 위해, 생체역학적 에너지를 수확하는 전자기 발전기를 설계했다. 효과적인 에너지 수확을 위해, 먼저 생체 역학적 에너지의 특성에 대해 조사한 결과, 상대적으로 상하, 좌우 진동 움직임 기반 진동에너지가 지대했으며, 진폭이 크고 간헐적인 진동수, 높은 방향 자유도를 가지는 것을 알 수 있다. 특히, 진동 주파수는 약 1~3 Hz 대역을 가지는데 위와 같은 특징들은 상대적으로 진동에너지를 수확하기 어려운 환경이기 때문에, 이에 적합한 설계가 진행되어야 할 필요성이 있다. 이를 위해, 작은 진동수에서 민감하게 반응할 수 있고, 한번의 진동으로 다중 진동을 유발하여 에너지 수확량을 증가시키는 설계를 진행했다. Fig. 4a에서 알 수 있듯이, 자석이 움직이는 구간에 위치된 코일 구간을 지날 수 있도록 중앙 부분에 네오디뮴 자석을 부양시키고, 아래 기판에 척력 방향의 자석을 고정시킨다[8]. 이를 통해 중앙에 움직일 수 있는 자

석이 지지대 공간에 중력과 자기척력의 힘의 평형에 따라 수직으로 부양해 있다. 이처럼, 깨지기 쉬운 힘의 평형을 의도적으로 설계하여 외부 진동에 대해서 민감하게 반응할 수 있도록 설계했을 때, 그 유무에 따른 출력 차이는 Fig. 4b를 통해 확실히 알 수 있다. 입력 진동에너지는 50 mm의 진폭을 지니는 사각파를 Vibration machine을 통해 일정하게 가진하였고, 오실로스코프를 통해 출력성능을 확인해본 결과, 1~3 Hz에서 진동수가 커질수록 출력값이 커지는 경향이 있었지만, 아래 자석이 없는 경우에는(None-levitation) 출력값의 크기가 확연히 감소한 것을 알 수 있었다. 더 나아가서, 위쪽에 스프링 기판을 설치하여 시스템 구성요소간 충격을 방지한다. 이는 진폭이 큰 한번의 진동에 대해 진동수 증폭 효과를 이용할 수 있다.

앞서 제작한 전자기 발전기를 활용하여 보행 시, 땀걸음 시 발생하는 생체역학적 에너지를 수확하는 것을 확인하기 위해, 실제 웨어러블 장치로서 신체에 적용하여 오실로스코프를 이용해 출력 성능을 검증했다. Fig. 4c에서 확인할 수 있듯이, 땀걸음 시 더 많은 생체역학적 에너지를 수확하는 것을 알 수 있었다. 이를 통해, 신호처리 및 블루투스 무선 송신을 위한 전력공급으로 작은 용량의 Li-ion battery를 3.3 V까지 충전시켰다. 실제로 배터리가 채워졌는지 알기 위해서는 기존 배터리를 완전 방전시켜야 하기 때문에, 전기적 충/방전기를 이용하여 전지의 전압을 0 V로 만들었다. 이후, 전자기 발전기 또한 교류 타입 전류를 발생시키기 때문에 정류자를 연결하여 직류로 변환시켜 준 후, Li-ion Battery를 필요 용량만큼 손쉽게 충전시킬 수 있었다.

3-4. 실시간 족압 계측을 위한 어플리케이션 개발

본 연구에서 에너지를 효율적으로 사용하기 위해서는 절약형 시스템 구축을 위해 MCU의 소비전력을 감소시켜야 한다. 따라서, 내장 기능 중 저전력모드(Sleep mode)를 사용하여 소비전력을 최소화하였고, 이는 구동시간의 증가 결과로 이어졌다. 따라서, 사용자 친화적으로 저전력모드를 사용하기 위해 pushing button을 사용하

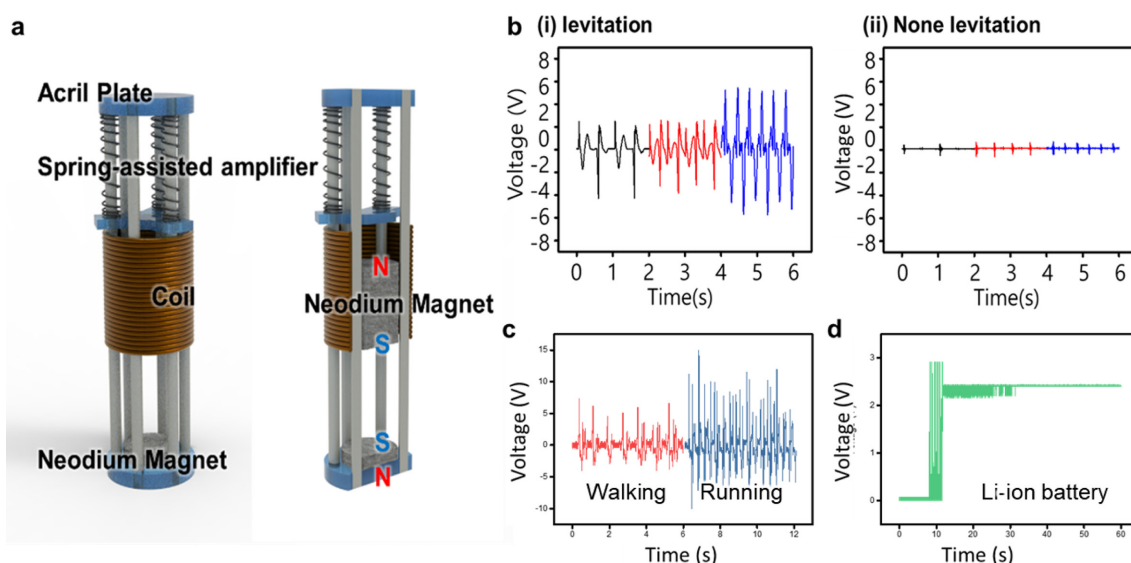


Fig. 4. a. Illustration of the rationally designed electromagnetic generator. b. The electrical output graph of vibration energy harvesting under different vibration frequencies of 1, 2, 3 Hz with (i) or without (ii) magnet fixed bottom substrate to induce the magnetic levitation of movable magnet. c. Electrical output performance comparison between walking motion and running motion. d. Li-ion Battery charging graph with the proposed electromagnetic generator.

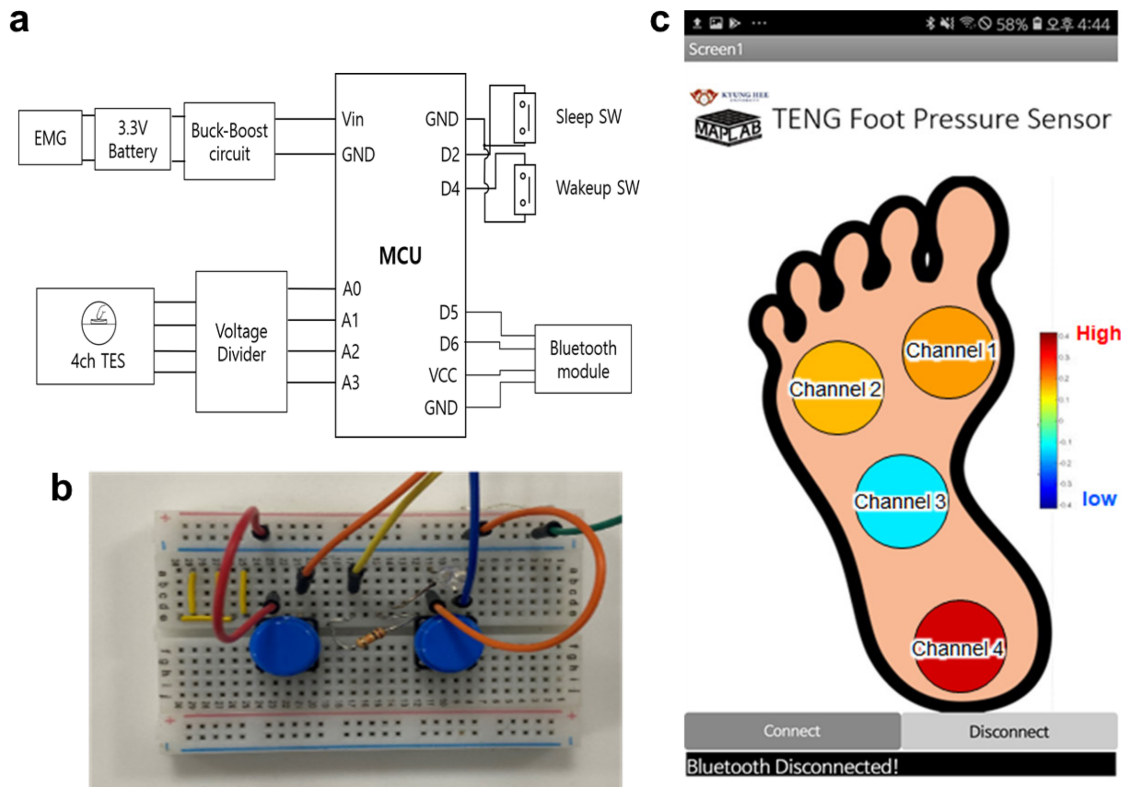


Fig. 5. a. The entire circuit diagram of the proposed module equipped with the triboelectric pressure sensor and electromagnetic generator. b. Photograph of the sleep mode for save-energy. c. Real-time foot pressure monitoring mobile application.

여 계측이 필요 없는 동작에 한해서 구동을 중단시킬 수 있으며, 이를 통해 전력이 가장 많이 소모되는 블루투스 페어링 단계를 생략할 수 있다. Pushing switch 중, Sleep switch를 구동하면 MCU에서 인터럽트(Interrupt)가 발생하여, 지정된 사용자 정의 함수를 수행한다. 사용자 정의 함수로는 소비전력이 높은 ADC off와, MCU의 기타 기능을 차단시키는 알고리즘을 구성했다. 또한, Wake up switch를 통해 인터럽트를 해제하여 ADC on과 같은 기타 기능의 구동을 재시동할 수 있게 했다. 따라서, 그 기능들이 모두 포함된 배선도를 Fig. 5a에 나타냈으며, Fig. 5b에서는 직접 사용한 Switch button으로 저전력모드 On/off 할 수 있게 했다. Fig. 5c를 보면, 실제로 제작된 접촉대전 압력센서와 전자기 발전기를 통한 실시간 족압 측정 모듈을 구동했다. 사용자의 편의를 위해 모바일 어플리케이션으로 제작하여 휴대폰으로 실시간 정보 제공이 가능했으며, 기존 경우에는 신체 대부분의 하중이 실리는 발 뒤꿈치에서 가장 큰 족압을 계측할 수 있었다. 또한, 발의 중심 부분인 중족골 부근에서는 실제로 많은 족압이 작용되지 않는 것을 확인할 수 있었다. 앞으로 제안된 외부 전원 독립형 헬스케어 모니터링의 발전이 지속적으로 이루어진다면, 제공된 바이오 헬스 데이터들을 기반으로 하여 보행습관이나 운동 수행 능력 증진 등의 매우 범용성 있게 활용될 잠재성이 뛰어난 시스템이다.

4. 결 론

본 연구에서는 인체에서 소산되는 생체역학적 에너지를 수확하여 실시간 족압 계측 모니터링 시스템으로 사용하기 위해 접촉대전 발

전원리, 전자기 발전원리를 적재적소에 활용하여 설계했다. 특히, 족압 측정을 위해 가해지는 힘에 따라 접촉 면적이 변화하면서 수직 접촉/분리 모드를 이용한 접촉대전 센서 구조물을 설계 및 제작했다. 다양한 압력 범위에서의 Sensitivity를 검증함으로써 높은 분해능의 압력 센서를 제작했다. 또한 보행자의 실시간 동적 압력 거동을 파악하기 위해 커패시터를 활용한 분압회로를 설계했다. 이는 접촉대전 센서의 전기적 출력 특성인 Peak-to-Peak 출력 형태를 가해지는 압력에 상관관계가 있는 출력형태로 전환하였고, MCU의 신호처리 알고리즘을 통해 정확하고 안정적인 족압 데이터를 측정할 수 있게 했다. 이후, 무선통신을 활용하기 위한 전원 역할로 인체에서 소산되는 생체역학적 에너지를 전기에너지로 변환하는 전자기 발전 장치를 설계했다. 효과적인 수확을 위해 자석을 공중부양 상태로 유도하여 깨지기 쉬운 힘의 평형상태를 만들어 줌으로써, 외부 진동에 민감하게 반응할 수 있었으며 스프링 시스템을 통해 진동 주파수 증폭 효과를 볼 수 있었다. 이 장치로 충전된 배터리를 활용하여 모바일 어플리케이션으로 실시간 확인을 가능케 했다.

비대면 사회로의 전환과 그에 따른 사용자의 바이오 헬스케어의 지속적인 데이터 수집을 위한 모니터링 시스템을 위한 에너지 절약형 족압 모니터링 시스템을 설계했다. 제안된 시스템은 대표적인 헬스케어 모니터링 중 하나인 족압 모니터링을 어플리케이션으로 보여줬지만, 접촉대전 센서는 족압 뿐만 아니라, 심박동수, 압력센서, 청각 센서 등으로 매우 활발히 연구가 이루어지고 있기 때문에 다방면으로 활용할 수 있는 잠재성을 나타낸다.

감 사

이 논문은 2020학년도 원광대학교 교비지원에 의해서 수행됨.

References

1. Köse, T., "Global Governance and Crisis Management in the Post COVID-19 World," *Reflections on the Pandemic in the Future of the World*, (2020).
2. Nigg, B., Hintzen, S. and Ferber, R., "Effect of An Unstable Shoe Construction on Lower Extremity Gait Characteristics," *Clinical Biomechanics*, **21**(1), 82-88(2006).
3. Beeby, S. P., et al., "A Micro Electromagnetic Generator for Vibration Energy Harvesting," *Journal of Micromechanics and microengineering*, **17**(7), 1257(2007).
4. Fan, F.-R., Tian, Z.-Q. and Wang, Z. L., "Flexible Triboelectric Generator," *Nano energy*, **1**(2), 328-334(2012).
5. Joseph, K., et al., "Design and Development of Micro-power Generating Device for Biomedical Applications of Lab-on-a-disc," *PLoS One*, **10**(9), e0136519(2015).
6. 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).
7. Wu, C., et al., "Keystroke Dynamics Enabled Authentication and Identification Using Triboelectric Nanogenerator Array," *Materials Today*, **21**(3), 216-222(2018).
8. 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).

Authors

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

Yoonsu Jung: undergraduate student, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; yoonsuj7@khu.ac.kr

Hyeonsu Kim: undergraduate student, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; hs1011807@khu.ac.kr

Minseok Park: undergraduate student, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; suny7154@khu.ac.kr

Donghan Lee: Master's course, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; ktp7797@khu.ac.kr

Dongik Kam: Master's course, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; kamdi012@khu.ac.kr

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

Yoonsang Ra: Ph.d candidate, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; fkdbstk8745@khu.ac.kr

Kyoung Je Cha: Senior Researcher, Smart Manufacturing Technology R&D Group, KITECH, Daegu, 42994, Korea; kjcha@kitech.re.kr

Hyung Woo Kim: Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Wonkwang University, 460 Iksan-daero, Iksan-si, Jeollabuk-do, 54538, Korea; kimhw1203@wku.ac.kr

Kyoung Duck Seo: Professor, Department of Mechanical Engineering, Wonkwang University, 460 Iksan-daero, Iksan-si, Jeollabuk-do, 54538, Korea; kdseo85@wku.ac.kr

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