

개인 단위의 친환경 에너지 하베스팅을 위한 압력 발전 신발 개발

이 현 승 · 김 승 현*

인천대학교 패션산업학과 조교수
국민대학교 의상디자인학과 부교수*

요 약

20세기 말부터 환경에 악영향을 미치는 화석연료 발전에 의존하지 않는 친환경적인 에너지 생산은 세계적인 화두가 되었으며, 현재는 일상에서 버려지는 압력, 진동 등의 에너지를 수집하는 에너지 재생 기술 개념인 에너지 하베스팅이 주목받고 있다. 본 연구에서는 인체 활동 시 발에 집중되는 압력을 활용하여 개인 단위의 에너지 재생을 가능하도록 하는 신발을 개발하고자 하였다. 인체의 하중이 집중되는 발에 착용되어 보행 시 단계적으로 발에 가해지는 압력을 전력 생산에 활용할 수 있는 압전 발전 시스템 및 해당 시스템을 수납하여 안정적으로 착용할 수 있도록 하는 신발 플랫폼 개발에 본 연구의 목적을 두었다. 이를 위해 보행 활동 시 발의 각 부위별로 가해지는 압력 변화에 관한 선행연구 및 압전 기술을 신발에 적용한 관련 선행연구사례, 관련 특허사례를 고찰하였다. 이를 토대로 사용자가 보행 혹은 주행 시 발과 지면의 접지 부위가 변화함을 고려하여 사용자의 발가락과 앞꿈치, 뒤꿈치 전반에 각기 크기가 다른 총 22개의 피에조 압전 소자를 복합 배치한 복층의 압전 인솔과 발전된 전력을 정류·저장하기 위한 배터리 모듈, 배터리에 저장된 전력량을 확인 가능하도록 하는 배터리 잔량 모니터링 회로, 마지막으로 압전 인솔과 배터리 모듈, 배터리 잔량 모니터링 회로를 통합적으로 수납하여 착용 가능하도록 하기 위한 신발 플랫폼을 개발하였다. 이후 실내 및 실외 환경에서 실제 착용 실험을 수행하여 개발된 프로토타입의 사용성을 파악하였다. 해당 실험 결과, 본 연구의 압력 발전 시스템은 연구에 참고한 기존 특허사례 4종에 비해 높은 발전 효율을 보임이 확인되었다. 전력 생성과 저장, 전력량 모니터링 시스템 또한 원활히 작동하였으며, 신발 플랫폼은 일상적인 보행과 주행 활동에 의해 파손되지 않는 내구성을 가지고 있음이 관측되었다. 본 연구는 제품 구조 디자인 및 기술 적용에 관한 기초자료 제시에 본 연구의 의의를 둔다.

주제어 : 재생 에너지, 에너지 하베스팅, 웨어러블 테크놀로지, 압력 발전

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 한국연구재단에서 부여한 과제번호 : 2022R1A5A7000765).

+교신저자: 김승현, kim_sunghyon@kookmin.ac.kr

접수일: 2022년 9월 14일, 수정논문접수일: 2022년 10월 5일, 게재확정일: 2022년 10월 24일

I. 서론

웰빙(well-being)과 LOHAS 등으로 대변되는 20세기 말부터 확산된 친인간, 친환경적인 제품 생산과 소비에 관한 사회적 인식은 친환경적인 전력 생산 및 재생 에너지에 대한 담론을 활성화하였다(Fischer et al., 2021). 환경에 악영향을 미치는 화석연료 발전 등의 수단 외에, 환경자원을 활용하는 친환경 에너지 생산, 즉 신재생 에너지(renewable energy)가 대안으로 제시되고 있다(Park, 2016; Park, 2018). 이에 따라 태양광, 풍력, 수력, 지열 등을 활용한 대규모 발전기술뿐만 아니라 개인의 일상생활 속에서 수집되지 못하고 버려지는 압력이나 진동 등의 물리적 에너지를 수집하기 위한 소규모 발전기술이 개발되었다. 에너지 하베스팅(energy harvesting)으로 정의되는 해당 기술은 소규모의 구조물이나 제품에 적용이 가능하여, 최근에는 솔라셀 등을 중심으로 개인이 사용하는 텐트나 메신저 백 등과 같이 상대적으로 평평한 면적이 넓고 유연성이 크게 요구되지 않는 일상 제품으로 적용되는 사례가 확산되고 있다(Lee, 2020; Park, 2018).

상기와 같이 친환경적 에너지 재생 개념을 강조하는 제품 시장이 조성되었음을 고려한다면(Go et al., 2010; Park, 2006; Park, 2011), 패션산업에서도 사회적·산업적 영역의 확장 측면에서 에너지 하베스팅 제품에 관한 연구를 활성화할 필요성이 있다. 패션제품은 일상에서 사용자의 신체에 가장 가까이 위치함과 동시에 장시간 사용된다. 따라서 일상생활에서 발생하는 인간의 운동에너지 혹은 주변 환경에너지를 전기로 변환하기에 용이한 에너지 하베스팅의 플랫폼으로서 역할이 가능할 수 있다. 패션제품을 통해 사용자가 일상생활 활동에서 손쉽게 전력을 생성하고 이용할 수 있다면, 현재의 에너지 이슈에 접근하기 위한 친환경적 에너지 생산 및 효율적인 에너지 사용에 관한 사회적 인식을 더욱 개선, 확산시킬 수 있을 것이다. 이는

곧 소형, 경량의 에너지 하베스팅 기술 개발과 혁신을 위한 동기부여가 될 수 있을 것이며, 궁극적으로 패션은 물론 다양한 제품 산업에서 지속가능성과 친환경성을 위한 에너지 하베스팅 제품을 다루는 시장이 형성에 긍정적인 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 현재 사회적, 경제적 이슈로서 논의가 활성화되었으며, 앞으로도 연구와 개발이 지속될 친환경적 에너지 생산 혹은 재생 기술을 적용한 패션제품 디자인 및 제작에 목적을 두었다. 인체에 착용되는 패션제품 및 착용 가능한 에너지 하베스팅 기술을 종합적으로 고려하여 제품의 디자인과 활용기술의 범위를 신발과 압력 발전 기술로 한정하였다.

형태가 정형적인 신발은 상대적으로 발전 및 충전을 위한 정류회로 및 소자, 배터리 등의 부품을 내장하기 용이할 수 있으며, 보행 시 체중 이동에 따른 압력이 집중됨에 따라 표면에 가해지는 압력을 전력으로 변환하는 피에조 압전 소자를 활용한 에너지 하베스팅 시스템을 적용하기에 적합하다. 또한, 일반적으로 피에조 압전 소자는 터빈 및 솔라셀 등의 기타 에너지 하베스팅 기술에 비해 극소화된 크기와 부피, 중량을 가짐에 따라, 신체에 착용되는 패션제품에 적용하기가 용이할 수 있으며, PZT 세라믹과 구리 기반의 피에조 압전 소자는 배치하는 방법에 따라 인체의 하중을 견딜 수 있는 내구성이 있다.

상기의 연구 목적에 따라 본 연구는 다음과 같은 단계로 수행되었다.

첫째, 신발을 활용한 에너지 하베스팅의 선행 사례를 고찰하여, 압력 발전 기술을 신발 플랫폼에 적용하기 위한 회로 디자인 및 기술적 경향을 파악한다.

둘째, 선행연구에 적용된 압전 소자의 배치 방법에 기초하여, 본 연구에서 활용할 피에조 소자를 활용한 실험물을 제작, 발전 효율을 실험한다.

이를 통해 선행 사례와 차별적인 피에조 압전 소자 배치 방법의 기준을 설정한다.

셋째, 설정된 개발 기준에 따라, 복층·복합 압전 발전 인솔 및 충전 시스템, 충전량 확인 시스템, 신발 플랫폼을 디자인, 제작한다.

넷째, 개발된 압전 발전 신발 프로토타입의 발전 효율 및 사용성을 파악하기 위한 착용 실험을 수행한다.

본 연구에서는 지속가능한 친환경 에너지 하베스팅에 있어 패전제품의 활용성을 제시하고자 하며, 이를 통해 지속가능성에 관한 담론에서 패전의 역할을 모색하는데 기여하고자 한다.

II. 압전 에너지 하베스팅 기술 및 신발 적용 사례 고찰

대중적으로 가장 친숙한 에너지 하베스팅 기술은 태양광 발전이라 할 수 있다. 태양광 발전은 솔라셀(solar-cell)을 통해 빛이라는 물리 자극을 화학적으로 전기 에너지로 변환하는 원리를 가진다(Lee, 2020). 솔라셀을 활용한 에너지 하베스팅은 시공간적 요인 및 날씨 등의 영향을 받는다. 특히 현대인이 대부분의 시간을 보내는 실내 환경에서는 발전 효율이 극히 낮아지는 기술적 한계점이 아직 존재한다. 한편, 압력을 활용하는 압전 에너지 하베스팅의 경우 소자의 표면에 가해지는 압력, 진동, 마찰과 같은 물리 작용을 화학적으로 전기 에너지로 변환하는 원리를 가진다. 따라서 시공간 및 날씨 요소로부터 자유로우며, 자연이나 도시환경에서 발생하는 압력 등의 물리 에너지뿐만 아니라 인체의 물리적 활동을 에너지 하베스팅에 활용 가능한 확장성이 있다(Cho et al., 2013; Park, 2016; Park, 2018). 따라서 통행량이 많은 도로나 공항 등의 실내 공간 바닥 내부에 벌크형 압전 소자를 배치하여 해당 공간 주변을 비추는 조명장치에 전력을

공급하거나, 인체의 압력을 받는 곳에 착용되어 일반적이거나 사라질 운동 에너지를 전력으로 전환하여 배터리에 저장하기 위한 목적의 연구가 지속되고 있다. 인체의 압력을 받는 사물이나 착용되는 제품에 적용 가능한 소형의 피에조 소자는 일반적으로 PZT 세라믹 박막을 구리 기저체(substrate)에 도포하여, 세라믹 표면에 가해지는 압력을 전기로 변환하는 기능을 가진다. 또한 표면에 가해지는 압력의 세기에 따라 구리와 세라믹의 접촉면에서 발생하는 전기 저항 변화의 차이를 활용하여 압력을 측정하기 위한 센서로서 활용될 수 있다(Cho et al., 2013; Meier et al., 2014; Quisppe & Gordillo, 2017). 이와 같은 메커니즘에 따라 인체의 운동 에너지를 전기로 변환하기 위해 신발을 활용한 유사 연구 사례를 살펴보면 다음과 같다.

Cho et al.(2013)은 신발의 아웃솔 뒤꿈치에 내장되는 한 개의 피에조 압전 소자와 브릿지 회로, MAX666 레귤레이터 소자로 구성된 시스템을 신발의 밑창(미드솔)에 내장하여 착용자의 걷는 동작을 에너지 하베스팅에 이용하기 위한 연구를 수행하였다. 해당 연구에서는 오실로 스코프를 활용하여 생성된 교류전류의 전압을 측정하여, 측정된 전력을 수식을 이용하여 계산하였으며, 산출된 최대 출력 가능 전력은 $56\mu\text{W}$ 로 나타났다. 해당 연구의 결과물의 출력 가능 전류량은 레귤레이터를 통해 제어된 5V의 전압과 최대 출력 가능 전력을 토대로 11.2mA로 역산이 가능하다. 그러나 해당 연구의 결과물의 경우, 시스템의 출력 전류가 출력 전압에 비례하여 생성 가능한지 여부에 관한 구체적인 정보가 명시되어 있지 않으며, 배터리 충전에 필수적인 과전류차단 안정 회로가 시스템 구성물에 포함되지 않았다. 이에 따라 일상에서의 사용성을 판단하기 어려운 한계성이 있다.

Quisppe and Gordillo(2017)의 연구에서는 5개의 피에조 압전 소자를 인솔의 앞코에 3개, 뒤꿈치에 2개씩 배치하여, 걷고 뛰는 동작별로 각 압전 소자

에서 생성되는 전력량을 측정하였다. 이를 통해 신발에 압전 소자를 배치함에 있어 발전에 효율적인 위치를 도출하였다. 해당 연구에 따르면 엄지 발가락 내측의 앞꿈치 부분과 가장 바깥쪽 뒤꿈치에 배치된 압전 소자의 발전량이 다른 위치에 배치된 소자들에 비하여 높은 것으로 측정되었다. 따라서 인솔 혹은 아웃솔에 피에조 압전 소자를 배치할 경우, 사이즈가 큰 대용량의 소자를 엄지 발가락 내측의 앞꿈치 부분 및 뒤꿈치 후방부에 배치한다면 높은 발전 효율을 기대할 수 있을 것이다.

Meier et al.(2014)은 신발 내부에 압력을 측정하기 위한 센서 시스템 및 신발 앞꿈치와 뒤꿈치에 각 1개의 피에조 압전 소자를 내장하여, 보행, 주행, 제자리 도약 동작 수행시 강한 압력이 가해지는 부위 및 압전 소자에서 생성되는 에너지량을 측정하였다. 실험 결과, 신발의 앞꿈치 부분에서는 보행 시 엄지발가락과 엄지발가락 안측에 중간 단계의 압력이 가해지며, 발의 중심부에는 약한 압력이, 신발의 뒤꿈치 부분에는 앞꿈치에 비해 강한 압력이 가해지는 것으로 나타났다. 또한 해당 실험 중 약 10-20보를 보행하는 동안 평균적으로 10~20 μ J의 에너지가 생성되는 것으로 측정되었다. Quispe and Gordillo(2017)의 사례와 Meier et al.(2014)의 사례를 종합적으로 살펴보았을 때, 신발을 플랫폼으로 한 에너지 하베스팅은 발의 앞꿈치와 뒤꿈치 모두에 피에조 압전 소자를 배치하는 것이 발전량 향상에 효율적이며, 대용량의 피에조 압전 소자를 엄지발가락 후방 및 뒤꿈치 바깥 측에 배치한다면 효율을 더욱 증대할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 해당 연구들 역시 Cho et al.(2013)의 사례와 마찬가지로 순간적으로 생성되는 전압과 전류, 배터리에 누적되는 발전량에 관한 구체적인 정보가 부족하여 현용 배터리를 충전하는데 충분한 사용성능을 가지는지 판단하기 어려운 한계점이 있다.

상기의 사례들은 공학적 관점에서 압전 소자를 신발의 인솔이나 아웃솔에 적용하여 보행으로 발생하는 발전 효율이나 압전 효율이 높은 발의 부위 파악에 초점을 두었다. 따라서 패션제품에 요구되는 세탁성을 고려한 플랫폼과 압전 시스템의 분해 결합이 가능한 인터택션 방안에 관한 연구 및 발전 효율과 심미성을 모두 고려한 플랫폼 및 시스템의 디자인 측면의 연구, 마지막으로 실제 개발된 압전 시스템의 일상에서의 활용성을 파악하기 위한 실외의 거칠고 불규칙한 노면에서의 발전 효율 파악에 관한 연구 내용은 부족하였다.

본 연구에서는 선행연구 사례를 참고하여, 압전 효율을 높일 수 있을 신발 내의 압전 효율을 증대할 수 있는 복합 피에조 압전 인솔 및 충전 회로를 수납하여 착용 가능하도록 하기 위한 신발 프로토타입을 제작하여 사용성을 확인하고자 한다.

III. 압력 발전 신발 프로토타입 제작

1. 신발 플랫폼 제작

프로토타입의 개발에 앞서, 국민대학교 기관생명윤리위원회의 IRB 규정에 따라 압전 에너지 하베스팅 시스템의 발전 효율 측정 및 신발 플랫폼의 내구성 실험을 위한 실험 인원 모집을 선행하여 신발 플랫폼의 규격을 설정하였다. 발전 효율 측정 및 신발의 내구성을 파악하기 위해서는 가능한 많은 신체활동을 수행하는 것이 이상적이나, 인간을 대상으로 실험을 기획함에 따라 실험자의 신체적 피로가 크지 않을 활동량의 설정이 요구되었다. 따라서 실외 실험의 경우, 재활운동학 석사학위 소지자 3인의 자문을 통해 실험 인원에게 지나친 신체적 피로를 주지 않으면서 신발의 내구성을 실험하기에 충분한 활동량을 확보할 수 있는 걸음걸이 수로 1000보를 설정하였다. 각 1000보로

구성된 걷기와 뛰기 실험 사이에 5분의 휴식 시간을 설정하여 실험자의 피로가 누적되지 않도록 실험을 기획하여 IRB 승인을 받아 실험자를 모집하였다(IRB 번호: KMU-202107-HR-273). 1000보를 걷고 뛰기에 지장이 없는 근골격계 및 심폐 관련 질환이 없는 성인으로 실험 대상을 한정하였으며, 단과대학 로비에 모집 문서를 게시하여 20대 중반의 성인 남성 1인을 선정하였다. 해당 인원의 신발 사이즈를 조사하여 신발 플랫폼과 압력 발전 인솔의 사이즈를 국내에서 280mm 사이즈로 통용되는 규격으로 설정하였다(Table 1), (Figure 1).

신발 플랫폼의 유형은 착용자의 운동 에너지를 전력으로 변환하는 기술 콘셉트에 따라 운동화로 활용이 가능한 스니커즈로 설정하였다. 신발의 형태는 발바닥으로 전달되는 에너지 변환뿐만 아니

라 신발 앞코가 보행 시 지면에 부딪혀 발생할 수 있는 압력을 수집하기 위해 발레 슈즈의 앞코 형상을 스니커즈 디자인에 응용하였다(Figure 1). 인체의 하중이 가장 크게 걸리는 위치를 절개하여 해당 부위에 재귀반사 원단을 배치였다. 또한 갑피와 아웃솔이 연결되는 경계선 역시 재귀반사 원단으로 파이프핑 처리하여 에너지 하베스팅이 이루어지는 위치를 디자인 요소의 하나로서 표현하고자 하였다(Figure 2).

여밌 구조는 발이 신발 내에 견고히 고정되어 압전 소자에 압력이 전달될 수 있도록 일반적인 아일렛 타공 구조에 비해, 보다 큰 마찰력이 생성될 수 있는 나일론 테이프로 제작된 고리에 스트랩을 끼워 조이는 구조를 적용하였다(Figure 3).

신발의 혀(tongue) 부분에는 충전된 배터리의 충

Table 1. The sizes of the shoe platform and its insole.

	Length		Width		Height	
	Shoe	Insole	Shoe	Insole	Shoe	Insole
Size (mm)	295	282	110	100	95	4

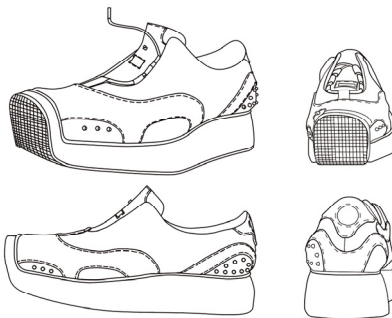


Figure 1. Three-dimensional flat sketch of this study's shoe platform.



Figure 2. The developed shoe platform (left side).



Figure 3. The fastening method of the platform.



Figure 4. The interface of the battery display on the shoe Tongue.

전량을 표시하는 스크린과 MCU, 시스템의 on/off 스위치가 배치되었다(Figure 4). 이는 신발의 형태와 구조 상, 착용자가 스크린을 눈으로 확인하기가 용이함과 동시에 착용자가 보행 시 발의 움직임에 따른 운동 부하를 가장 적게 받을 수 있는 위치이기 때문이다. 이를 통해 신발 플랫폼의 착용성 저하를 방지함과 동시에 에너지 하베스팅 시스템의 사용성을 증진하고자 하였다.

아웃솔은 EVA폼을 활용하여 일반적인 스니커즈에 비해 두꺼운 플랫폼 슈 형태로 제작하였다(Figure 5). 아웃솔 내부에는 피에조 소자가 장치된 인솔로부터 생성된 전력을 저장하는 배터리 및 충전, 정류 회로가 내장되어야 함에 따라, 신발 플랫폼 착용 시 느껴질 수 있는 이물감을 최소화함과 동시에 활동 시 아웃솔 내부 배터리 모듈에 가해질 충격을 완화하기 위한 조치이다. 아웃솔의 높이가 높음에 따라 발생할 수 있는 보행 시 불편함을 해소하고자 일반적으로는 1cm로 설정되는 토 스프링(toe spring)을 2.5cm로 설정, 제작하였다(Figure 5).



Figure 5. The height of top spring for ease of user's activities.

2. 압력 발전 피에조 인솔 디자인 · 제작

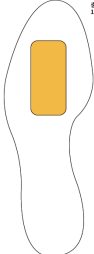



에너지 하베스팅 시스템에서 발전부를 담당하는 피에조 인솔 디자인을 위해, 신발 및 인솔의 형태로 발에 착용되는 압전 기술 메커니즘을 다룬 유사 연구 및 특허사례를 조사하였다. 그 결과 선정된 선행 특허사례 4종을 토대로, 피에조 압전 소

자 배치 위치 및 수량에 따라 생성되는 발전 효율 파악 실험을 위한 대체실험물을 제작하였으며, 각각의 발전 효율을 측정하였다. 각 선행 사례들의 특징점을 반영한 대체실험물 제작 시, 본 연구의 피에조 그리드 인솔 개발에 활용된 것과 동일한 PZT 세라믹과 구리 기저체 기반의 피에조 압전 소자 및 연결 방식을 적용하였다. 이를 통해 발전 소자의 차이에 따른 효율 변화 변수를 배제하고, 순수하게 압전 소자의 배치 위치 및 수량, 인솔 구조 측면의 디자인 방향성을 설정하고자 하였다. 이와 같은 조건에 따라 제작된 4종의 실험물을 착용하고 실내 환경에서 걷기, 뛰기 동작을 수행하여 측정된 순간 발전 전력은 다음의 <Table 2>와 같다.

<Table 2>의 실험물들은 모두 보행 시 강한 압력이 가해지는 발의 일부 부위에 피에조 압전 소자가 배치되었다. 본 연구에서는 발의 일부에 가해지는 압력뿐만 아니라, 걷는 동작 시 발의 각 부위에 순차적으로 가해지는 압력을 발전에 활용 가능하도록, 압전 인솔의 복합적인 피에조 그리드를 디자인하고자 하였다.

이에 따라 피에조 인솔은 인체의 걷고 뛰는 동작에 따른 발과 지면의 접지 부분과 면적의 변화, 압력에 관한 선행연구를 토대로 디자인 계획을 수립하였다(Figure 6), (Figure 7). 인체의 걷거나 뛰는 동작의 첫 단계에서는 가장 강한 압력이 뒷꿈치에 가해지며 동작 변화에 따라 압력을 받는 부위가 확산된 이후, 마지막 단계에서 첫 단계에 비해 약 하나 그에 준하는 압력이 앞꿈치와 발가락 부위에 가해진다(Jeong et al., 2019; Meier et al., 2014; Quispe & Gordillo, 2017). 따라서 피에조 소자의 배치 위치가 뒷꿈치와 앞꿈치뿐만 아니라 발가락과 발의 중심부에도 배치된다면, 보행 운동의 중간 단계에서 발생하는 압력을 수집하여 발전량을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 인솔의 최전방 발가락이 닿는 주위에 압전 소자가 입체적으로 배치된다면, 보행 운동의 마지막 단계에서 인솔의

Table 2. Experimentation results of the Korean patent cases.

		Korean patent case 01 (Korea Patent No. 1018360110000, 2018)	Korean patent case 02 (Korea Patent No. 1011416870000, 2012)	Korean patent case 03 (Korea Patent No. 1015132460000, 2015)	Korean patent case 04 (Korea Patent No. 1018690740000, 2018)
Piezo-grid design in each previous case					
Walking	V	0.002	0.061	0.061	0.057
	mA	0.0006	0.0184	0.0184	0.0172
Running	V	0.002	0.08	0.08	0.057
	mA	0.0006	0.0242	0.0242	0.0172

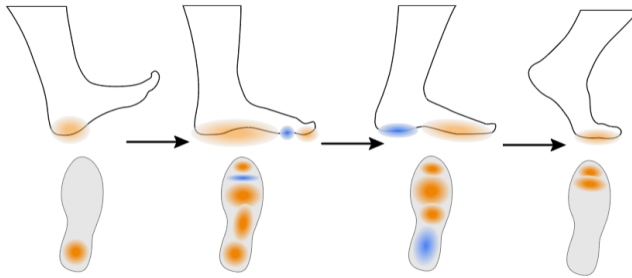


Figure 6. Pressure-weight change of feet during walking or running situations.
From Jeong et. al. (2019). p. 89.

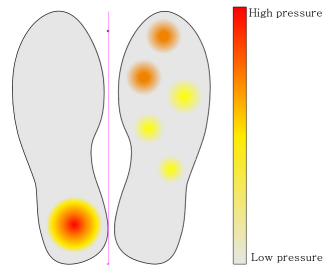


Figure 7. The intensity of pressure allocated to each parts of the feet.
From Meier et. al. (2014). p. 624.

최전방과 신발 앞코에 전달될 수 있는 부수적인 압력 수집이 가능할 것으로 기대된다.

인간의 보행 시 발의 접지 면적, 위치 변화를 고려하여, 한정된 크기의 인솔에 가능한 많은 수의 피에조 소자를 배치하기 위해, 그리드에 배치할 피에조 압전 소자의 크기를 대(37mm), 중(30mm), 소(12mm) 세 가지 사이즈로 설정하여 압전 인솔의 피에조 그리드를 디자인하였다(Figure 8). 또한 최대한 다수의 피에조 압전 소자를 배치하기 위해, 인솔을 두 겹으로 제작, 결합하여 발전 효율을 증대하고자 하였다. 각 피에조 소자들은 인솔의 착

용감 및 활동 시 장애 요소를 최소화하기 위해, 일반적인 전선을 활용하지 않고 은 분말이 함유된 전도성 실로 연결하였다. 배터리 충전 효율을 높이기 위해 복층의 인솔의 각 층에 배치되는 피에조 소자는 직렬 연결하여 전압을 증폭하였으며, 두 겹의 인솔은 병렬 연결하여 수집되는 전류량을 증폭하였다(Figure 9). 피에조 인솔과 아웃솔 내부의 배터리 회로는 핀소켓을 통해 분리·결합되도록 제작하여 신발의 세척이나 압전 인솔의 유지 보수가 필요할 때 손쉽게 신발에서 인솔을 탈거할 수 있도록 하였다.

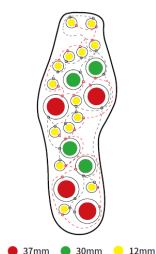


Figure 8. Interconnection path design of piezoelectric materials on insoles.



Figure 9. Developed double-layered piezo insole (left side).

3. 충전 회로 및 충전량 모니터링 회로 디자인 · 제작

인솔로부터 생성된 전력은 먼저 브릿지 회로(bridge circuit)로 송전되어 정류된 후 배터리로 이전되도록 배터리 모듈을 디자인하였다(Figure 10). 브릿지 회로는 네 개의 다이오드와 $220\ \mu\text{F}$ 규격의 캐패시터

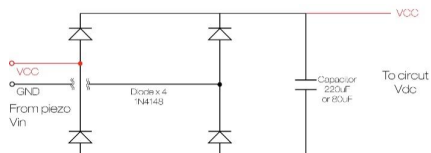


Figure 10. Diagram of the bridge circuit applied to the outsole of the shoe platform.

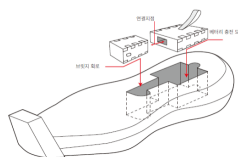


Figure 11. Diagram explaining the interconnection between the bridge circuit and battery module.

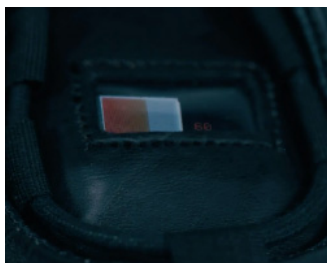


Figure 12. A photo indicating the screen displaying charging rate of battery.

```
// the setup routine runs once when you press reset:
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <Arduino_GFX.h>
#include <ESP8266.h>
#define SCREEN_WIDTH 128 // OLED display width, in pixels
#define SCREEN_HEIGHT 64 // OLED display height, in pixels
// Declaration for an SSD1306 display connected to I2C (SDA, SCL pins)
#define OLED_RESET -1 // Reset pin # (or -1 if sharing Arduino reset pin)
#define SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, Wire, OLED_RESET);

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  // Read the inputs on analog pin 0
  int sensorValue = analogRead(A0);
  // Convert the analog reading (which goes from 0 - 1023) to a voltage
  float voltage = (sensorValue/5.0) * (5000.0/1023.0);
  // Print out the value you read
  Serial.print("voltage: ");
  Serial.print(voltage);
  Serial.print("\n");
  Serial.print("current: 4i");
  Serial.print("mA");
  Serial.println();

  display.clearDisplay();
  display.setCursor(0, 0); // Set 20-based text
  display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
  display.setCursor(25, 0);
  display.println("voltage:");
  display.setCursor(10, 0);
  display.println(voltage);
  display.println("current:");
  display.setCursor(10, 20);
  display.println(current);
  display.println("mA");

  display.display(); // Show initial test
  delay(2000);
}

// Initialize serial communication at 9600 bits per second:
Serial.begin(9600);
// SSD1306_I2C_SWITCH_GPIO = generate display voltage from 1.3V internally
// If address begins (SSD1306_SWITCH_GPIO, 0x63) // Address (0x63 for 128x64)
Serial.println(F("SSD1306 allocation failed"));
// If not proceed, loop forever
display.display();
delay(2000); // Pause for 2 seconds

// Clear the buffer
display.clearDisplay();

// Draw a single pixel in white
display.drawPixel(10, 10, SSD1306_WHITE);
```

Figure 13. Arduino sketch code for the battery charging rate calculation and pixel graphic displaying.

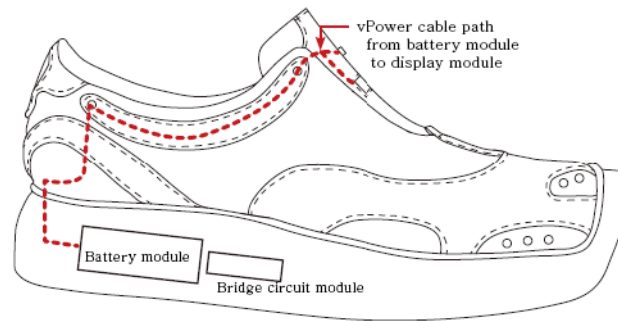


Figure 14. Power cable path connecting the battery module and the battery charging rate display module.

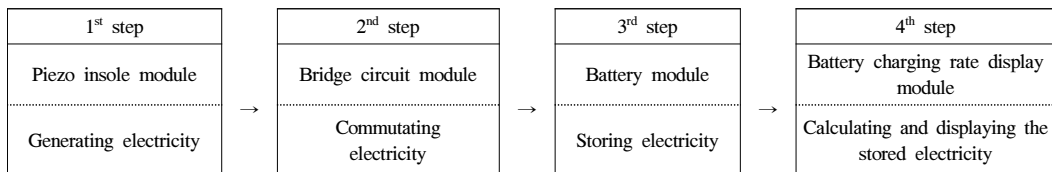


Figure 15. The flow of the generated electricity in this study's piezo-energy harvesting system

로는 작동 시 소량의 배터리 전력(15mAh)을 소모하여 충전량을 계산하고 디스플레이에 표시함에 따라, 사용자가 필요시에만 기능을 활성화하여 배터리에 저장된 전력을 아낄 수 있도록 전원 on/off 스위치를 적용하였다(Figure 5).

배터리 충전량 모니터링 회로 역시 편소켓이 장착된 전선이 신발 갑피의 겹감과 안감 사이의 통로를 경유하여 배터리 팩에 연결되도록 하여, 사용자가 손쉽게 모니터링 회로와 배터리 모듈을 분리·결합할 수 있도록 제작하였다(Figure 14).

마지막으로 상기의 에너지 하베스팅 시스템 구성요소 간의 전력 흐름을 도식화하면 다음의 <Figure 15>와 같다.

4. 프로토타입 발전 효율 측정

본 연구의 압력 발전 신발 시스템의 전력 생성 효율 실험은 실내외 환경에서 2회 수행되었다. 일반적으로 신발을 압전의 플랫폼으로 활용하기 위

한 대부분의 연구에서는 1인 혹은 2인의 실험자를 대상으로 실내 트레드밀에서 한정된 걸음 수 혹은 시간 동안 보행하여 생성되는 전력 수치를 측정하는 형태로 압전 시스템의 발전 효율을 검증하는 실험 경향을 보인다. 신발에 내장되는 압전 시스템의 회로 및 신발 플랫폼 자체의 내구성을 확인하기 위한 실험은 사례를 찾아보기 어려운 실정이다. 본 연구에서는 압전 시스템 및 이를 탑재하는 신발 플랫폼을 함께 개발하였음에 따라, 압전 시스템의 발전 효율 및 전반적인 프로토타입의 내구성 파악을 위한 실내외 실험을 계획하였다. 또한 승인된 IRB 규정을 준수하여 실험자는 실험 내용 및 실험 시 수반되는 위험성을 고지 받고, 이에 동의한 후 실험에 참여하였다.

실험 시 실험자의 움직임을 방해하지 않도록 별도로 제작된 한 쌍의 무선 전력측정 모듈과 Google Android OS 기반의 블루투스 시리얼 모니터링 애플리케이션(bluetooth terminal)을 활용하여 인체 활동 시 발생하는 전력을 측정, 기록하였다. 해당 무선

전력측정 모듈은 MCU(Arduino Nano)와 Bluetooth classic 모듈(HC-06), 브릿지 회로, 저항, 3.7V 배터리로 구성하였다(Figure 16).

전력측정 모듈의 제어소스는 저항을 통해 MCU로 입력되는 전압(V)과, 전압에 비례하여 발생하는 전류를 mA단위로 측정 후, 측정된 결과치를 블루투스를 통해 무선으로 스마트폰에 설치된 시리얼 모니터링 애플리케이션으로 전송하여 실시간으로 전력 생성량을 모니터링 가능하도록 작성하였다. 또한 전력측정 모듈의 수치적 정확도를 확보하기 위해, 공학 분야에서 전압, 전류 측정에 널리 사용되는 Mastech사의 MY64 멀티미터를 기준으로 전압, 전류 비교측정 실험을 수행하여 소스의 전력 계산식과 저항의 수치를 정교화하였다.

각 무선 전력측정 모듈은 실험자가 걷고 뛰는 동작 수행 시, 움직임을 방해하지 않도록 소형과 우치에 수납되어 발목 윗부분에 착용되도록 제작하였다(Figure 17).

실내 실험은 연구 기획 단계에서 압전 인솔의 피에조 그리드 디자인에 참고하였던 <Table 2>의 선행 특허사례와 비교하여 본 연구의 압전 시스템이 보다 향상된 순간 발전 효율을 나타낼 수 있는지 여부를 파악하기 위한 목적으로 수행되었다. 실내 실험은 실험자가 각 실험물을 착용하고 실내에서 20보를 기준으로 걷고 뛰는 동작을 수행하여 발생하는 순간 발전 전압, 전류를 측정하는 형식으로 수행되었다. 실험 시 측정된 전력 수치는 실험 후 각 동작별로 평균값을 구하여, 본 연구의 결과물과 선행 특허사례의 순간 발전량을 비교하였다. 그 결과, 동일한 피에조 압전 소자를 활용한다면, 본 연구의 다층 복합 압전 그리드가 기존 특허사례에 비해 높은 전력 생성 효율을 보이는 것을 확인할 수 있었다(Table 3).

실내 실험 종료 후, 지면이 고르지 않고 고저차가 있는 실외 환경에서 압전 인솔과 배터리 모듈, 신발 플랫폼의 발전 성능 및 내구성을 파악하기

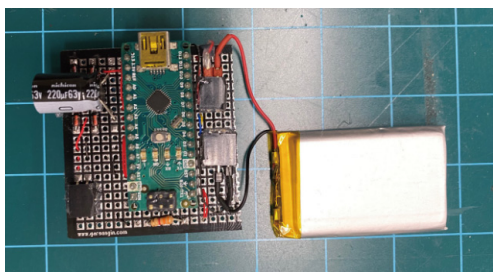


Figure 16. The developed wireless electricity measuring module with battery.



Figure 17. Ankle pouches for the measuring modules.

Table 3. The comparison of electricity generation by three actions for electricity generation between this study's insole and the previous studies' insoles.

This study's results		Case 1 (Korea Patent No. 1018360110000, 2018)	Case 2&3 (Korea Patent No. 1011416870000, 2012; Korea Patent No. 1015132460000, 2015)		Case 4 (Korea Patent No. 1018690740000, 2018)
Walking	V	0.083	0.002	0.061	0.057
	mA	0.0252	0.0006	0.0184	0.0172
Running	V	0.132	0.002	0.08	0.057
	mA	0.04	0.0006	0.0242	0.0172

Table 4. The result of the experiments on the electricity harvesting in outdoor environment.

Activity	Measured power sorts	V	mA
Walking	Piezo-grid (immediate)	0.078 (average)	0.0237 (average)
	Battery (accumulated)	1.564	0.4739
Running	Piezo-grid (immediate)	0.171 (average)	0.0518 (average)
	Battery (accumulated)	1.787	0.5413

위한 실외 실험을 수행하였다. 실외 실험은 코로나 19 상황을 고려하여 사람들의 통행량이 많지 않은 서울 성북구 국민대학교의 실외 시설에서 이루어졌다.

실외 실험에서는 해당 발전 시스템의 순간 발전량과 누적 발전량을 동시에 측정하기 위해 원발에는 전력측정 모듈을 압전 인술에 직접 연결하여 순간 발전 수치를 수집하였고, 오른발에는 전력측정 모듈을 배터리 모듈에 연결하여 배터리에 누적된 전력 수치를 수집하였다. 실외 실험에서는 누적되는 전력량을 측정함에 따라, 승인된 IRB 실험 계획에 따라 걷고 뛰는 동작을 1000보를 기준으로 수행하였다. 실험자의 피로 누적을 방지하기 위해 걷기 동작 1000보 수행 이후 실험자를 5분간 휴식하도록 한 뒤, 뛰기 1000보 동작을 수행하였으며, 실험 결과는 <Table 4>와 같다.

각 동작 별로 순간 및 누적 생성 전압과 전류를 토대로 전력(W)을 계산하면 다음과 같다.

첫째, 걷는 동작의 경우, 순간적으로는 매 동작 시 순간적으로 평균 $1.84 \mu W(0.078V, 0.0237mA)$ 의 전력이 생성되었고, 1000보를 걷는 12분 동안 $741.1 \mu W(1.564V, 0.4739mA)$ 의 전력이 누적되는 것으로 측정되었다.

둘째, 뛰는 동작의 경우, 순간적으로는 매 동작 시 순간적으로 평균 $8.85 \mu W(0.171V, 0.0518mA)$ 의 전력이 생성되었고, 1000보를 뛰는 7분 동안 $967.3 \mu W(1.787V, 0.5413mA)$ 의 전력이 누적되는 것으로 측정되었다.

순간적으로 생성되는 전력량만을 기준으로 보았을 때, 뛰는 동작이 걷는 동작에 비해 눈에 띄게

높은 발전 효율을 보인다. 그러나 누적된 전력량을 두고 본다면 뛰는 동작이 전반적으로 짧은 시간 내에 가장 높은 발전 효율을 보였으나, 걷는 동작 또한 1000보 정도의 걸을 수가 누적될 경우 뛰는 동작에 비해 크게 뒤떨어지지 않는 발전량을 보임을 파악할 수 있었다.

실내 실험 결과와 실외 실험 결과를 비교해 보았을 때, 지면이 고른 실내 공간의 순간 발전량이 실외에 비해 높았으나, 뛰기 동작의 경우 지면의 고저차가 존재하는 실외 공간에서의 순간 발전 효율이 높게 나타났다. 이는 고저차가 있는 지형에서 달리는 동작 수행 시, 걷는 동작에 비해 중력 가속도가 크게 실려 피에조 소자 전반에 가해지는 압력이 강해짐과 동시에, 신발의 앞코 부분에도 압력이 가해짐에 따라 부수적인 발전량이 추가됨에 따른 것으로 해석된다.

마지막으로 실내와 실외 2회에 실험을 수행하는 동안 해당 프로토타입의 발전 인술과 배터리 모듈, 배터리 충전량 모니터링 회로의 작동에 관련된 문제는 발견되지 않았다. 따라서 해당 프로토타입에 적용된 PZT세라믹과 구리 기저체 기반의 피에조 압력 발전 회로 및 EVA 폼 내부에 내장된 배터리 모듈 등은 일상 활동 시 사용하기에 큰 무리가 없을 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 현재 세계적인 화두 중 하나인 친환경적인 에너지 재생에 있어 패션의 기여 방안

을 모색하고자, 피에조 압전 소자를 활용한 에너지 하베스팅 신발을 개발하였다. 인체 활동 시 1차적으로 압력을 받는 신발의 인솔에 피에조 소자를 배치함에 있어, 발의 해부학적 구조 및 보행 동작 시 지면과 발의 접지 부위 변화를 다각적으로 고려하여 지면에 순차적으로 접지되는 발의 각 부위에 가해지는 압력을 발전에 활용할 수 있도록 피에조 압전 인솔을 디자인하였다. 이후 개발된 신발 프로토타입의 발전 효율과 내구성을 파악하기 위한 실내외 실험을 수행하였다. 실험 결과, 실내 실험에서는 인솔 개발 시 참고한 선행 특허사례에 비해 본 연구의 발전 시스템이 높은 발전량이 측정되었으며, 지면이 고르지 않고 고저차가 있는 실외 환경에서의 실험에서는 발전 시스템이 원활히 작동하기에 무리 없는 프로토타입의 작동성과 내구성이 확인되었다.

본 연구의 신발을 플랫폼으로 한 압전 기술의 활용성에 관한 발전은 다음과 같다.

첫째, 시간의 장단은 있었으나 걷고 뛰는 동작에 있어 움직임의 총량, 즉 걸음걸이 수가 같으면 발전되는 전력량이 유사함이 확인되었다. 이는 피에조 압전 기술을 신발에 적용하여 발전에 이용할 때, 운동 강도와 압력의 세기보다 운동 횟수, 즉 가해지는 압력의 빈도를 증가시키는 쪽이 사용자의 체력 소모 대비 발전 효율 상승에 유효할 수 있음을 의미한다. 따라서 운동 강도에 상관없이 걷는 동작의 빈도가 높은 서빙 직종에 종사하는 사용자나 가벼운 조깅, 트래킹을 위한 신발에 압전 기술을 적용한다면 효율적인 에너지 하베스팅이 가능할 것으로 사료된다.

둘째, 걷는 동작의 경우, 지면의 고저차가 없는 실내 복도 공간에서의 발전 효율이 지면의 고저차가 존재하는 실외 공간에 비해 높았으며, 달리는 동작의 경우 지면의 고저차가 존재하는 실외 지형에서 보다 높은 발전 효율이 측정되었다. 따라서 고저차가 거의 없고 일상적인 자세와 속도의 보행

활동이 이루어지는 일상화에는 본 연구의 압전 인솔과 같이 보행 동작 시 발의 각 부위와 지면의 접지 부위 변화에 대응할 수 있도록 피에조 압전 소자를 복합적으로 배치하는 것이 발전 효율 증대에 도움이 될 것으로 판단된다. 반면, 보행 및 주행 동작 시 발가락과 앞꿈치 부분으로 신체 균형을 잡게 되는 고경사 지형에서 업무를 수행하는 직업군을 위한 신발 혹은 등산용 아웃도어 신발 제품의 경우, 압력이 집중되는 아웃솔 혹은 인솔의 앞꿈치 부분에 대용량의 압전 소자를 집중 배치하고, 보행 시 접하지 않는 갑피의 허 주변부에 보조적인 압전 소자를 배치한다면 발전 효율이 증대될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 프로토타입의 발전 효율 및 내구성 검증을 위한 실외 실험이 1000보를 기준으로 한 걷기와 뛰기로 구성됨에 따라 상대적으로 신체 활동에 무리가 없는 젊은 연령의 남성이 실험자로 선정되어, 고연령층이나 저연령층을 대상으로 한 발전 효율 실험이 이루어지지 못한 점과, 에너지 하베스팅 시스템을 구성하는 각 부품이 완전히 친환경적인 소재로 대체되지 않았음에 따라, 소재적 측면에서 완전무결한 친환경성을 담보할 수 없었던 점이 연구의 한계점으로 작용하였다.

상기한 연구의 한계점에도 불구하고, 본 연구의 프로토타입에 적용된 피에조 압전 신발은 에너지 하베스팅을 위해 사용자가 별도의 디바이스를 소지하지 않아도 신발을 신고 활동함으로써 전력을 생성할 수 있는 점에서 사용의 간편성이 있다. 또한, 일상적인 보행 활동에서 발생하는 압력을 재생함에 따라, 풍력이나 태양광 기술을 활용한 에너지 하베스팅 디바이스와 달리 사용자가 바람이 심하거나 햇빛이 강한 특별한 상황이나 환경에 노출되지 않아도 에너지 재생이 가능하다. 따라서 호흡기나 피부가 민감하여 먼지가 섞인 강풍이나 자외선에 노출되지 않아야 하는 사용자도 일상에서 에너지 재생이 가능한 범용성이 있다.

비록 본 연구에 적용된 압전 에너지 하베스팅은 태양광을 활용하는 솔라셀이나 풍력을 이용하는 터빈 발전에 비해 발전량이 적은 단점이 있으나, 이는 피에조 소자의 복합 배치 방안에 관한 지속적인 연구 및 신소재 기술의 발전에 따라 극복될 수 있는 것으로 기대된다.

향후 본 연구결과를 토대로, 피에조 소자의 압전 효율 증대 및 안정적인 내장을 위한 아웃솔의 형태 및 구조, PZT 세라믹 기반의 피에조 소자뿐만 아니라 필름형 압전 물질을 내장하여 갑피에서도 발전 효과가 발생시킬 수 있을 신발의 갑피 구조에 관한 연구에 관한 연구가 후속될 예정이다.

마지막으로 본 연구의 과정 및 결과물은 지속 가능한 친환경 에너지 하베스팅 기술을 패션제품에 적용하기 위한 유사연구를 위한 기초 자료로서 활용될 수 있기를 기대하며, 여기에 연구의 의의를 둔다.

References

- Cho, H. O., Yoon, H. S., Hong, S. Y., Kim, Y. H., Kim, T. Y., Park, H. S., & Park, J. Y. (2013). Development of miniaturized piezoelectric energy harvesting system application to shoes insoles. *Proceeding of the Korean Institute of Electronical Engineers, Summer Conference, Korea*, 40-41.
- Choi, S. Y. (2015). Insole with heating element for shoes, *Korea Patent No. 1015132460000*. Daejeon: Korean Intellectual Property Office.
- Fischer, D., Reinermann, J.-L., Guilen Mandujano, G., DesRoches, C. T., Diddi, S., & Vergragt, P. J. (2021). Sustainable consumption communication: A review of an emerging field of research. *Journal of Cleaner Production*, 300(1), 126880. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126880
- Go, J. W., Lee, S. L., & Kim, M. J. (2010). Consumer's consciousness of the LOHAS consumption and the consumption of the LOHAS products. *Journal of Consumer Studies*, 21(4), 89-112.
- Jeong, S. Y., Hwang, W. S., Cho, J. Y., Jeong, J. C., Ahn, J. H., Kim, K. B., Hong, S. D., Song, G. J., Jeon, D. H., & Sung, T. H. (2019). Piezoelectric device operating as sensor and harvester to drive switching circuit in LED shoes. *Energy*, 177(15), 87-93. doi:10.1016/j.energy.2019.04.061
- Lee, E. Y. (2020). A study on the design of a wearable solar energy harvesting device based on outdoor activities. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 44(6), 1224-1239. doi:10.5850/JKSCT.2020.44.6.1224
- Lee, J. S., Jeong, C. W., Ko, H., & Lee, H. S. (2018). Shoes with charging function, *Korea Patent No. 1018360110000*. Daejeon: Korean Intellectual Property Office.
- Lee, S. Y., Baek, S. H., & Lim, W. S. (2012). Heating device using piezoelectric ceramics and insole of shoe with the same, *Korea Patent No. 1011416870000*. Daejeon: Korean Intellectual Property Office.
- Meier, R., Kelly, N., Almog, O., & Chiang, P. (2014, August). A piezoelectric energy-harvesting shoe system for podiatric sensing. Paper presented at the meeting of IEEE Xplore, Chicago, IL. doi:10.1109/EMBC.2014.6943668
- Park, B. I. (2016). A study on the application of plastic arts and industrial design using energy harvesting device in next generation: Focused on a case study of the novel solar cells and piezoelectric device. *Journal of Basic Design and Arts*, 17(3), 161-173. doi:10.5850/JKSCT.2020.44.6.1224
- Park, B. I. (2018). A study on the design of industrial products by vibration energy harvesting device and material. *The Treatise on The Plastic Media*, 21(1), 59-68.
- Park, H. S. (2006). Effect of 'well-being' perception on purchase of well-being fashion products. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textile*, 30(5), 711-721.
- Park, H. S. (2011). Purchases and satisfaction of fashion products among LOHAS consumer segments. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textile*, 35(5), 513-526. doi:10.5850/JKSCT.2011.35.5.513
- Peace Circulation Co. (2018). Smart shoes and positioning system using the same, *Korea Patent No. 1018690740000*. Daejeon: Korean Intellectual Property Office.
- Quispe, J. N. S., & Gordillo, A. C. (2017, October). Implementation of an energy harvesting system by piezoelectric elements exploiting the human footsteps. Paper presented at the meeting of IEEE URUCON, Montevideo, Uruguay. doi:10.1109/URUCON.2017.8171873

Development of Energy Harvesting Shoes Applying Piezoelectric Material for Individual and Eco-friendly Electricity Generation

Hyunseung Lee · Sunghyon Kim⁺

Assistant Professor, Dept. of Fashion Industry, Incheon National University

Associate Professor, Dept. of Fashion Design, Kookmin University⁺

Abstract

Since the late 20th century, technologies for sustainable energy creation that does not rely on fossil fuels have become a global research topic. Currently, the technological concept of energy harvesting, which collects abandoned energies such as pressure during daily life, has been paid attention to as renewable energy creation. This study aimed to develop the wearable pressure energy generation system using the pressure applied into the feet step by step during walking and the shoes platform equipped with the energy generation system to be worn on the user's feet stably. For the purpose, previous research on the partial pressure changes on the feet during stepwise walking motions, research cases applying pressure energy creation technologies into shoes, and the Korean patent cases related to the pressure energy generation were investigated. We developed the multi-layered piezoelectric insole applying 22 piezoelectric materials placed from the toe part to the heel part considering the partial pressure changes between the feet and the ground during walking, the battery module rectifying and storing the generated electricity, the power storage monitoring circuit to allow the user to check the quantity of the electricity, and the shoe platform integrating the whole components to be worn. After the prototype was completed, the testing on its usability were conducted twice in indoor and outdoor environments. As the results of the testing, energy harvesting system in this study showed higher performance of the power generation than the four previous cases of Korean patents. During the assessment, the power generation, storing and monitoring systems were appropriately operated and it was confirmed that the shoe platform also had the sufficient durability to endure the physical impacts during ordinary walking and running. This study is significant in that it provided the basic data of the technological application for wearable energy harvesting.

Key words : renewable energy, energy harvesting, wearable technology, pressure energy harvesting