J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 36, No. 3, pp. 292-297 May 2023
DOI: https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.3.13
ISSN 1226-7945(Print), 2288-3258(Online)

Early Stage Report : Undergraduate Research

마찰전기 셰이커: 전기 발생 마라카스 제작 및 특성평가

김혜준[1], 김현승[1,2], 정창규[1,2]

[1] 전북대학교 신소재공학부 전자재료공학전공
[2] 전북대학교 에너지저장변환공학과 대학원

Triboelectric Shaker: Fabrication and Characterization of Maracas-Type Generators

Hyejun Kim[1], Hyunseung Kim[1,2], and Chang Kyu Jeong[1,2]

[1] Major of Electronic Materials Engineering, Division of Advanced Materials Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

[2] Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

(Received January 31, 2023; Revised February 8, 2023; Accepted February 9, 2023)

Abstract: Triboelectric devices are attracting attention from researchers as self-powered electronic systems that can instantly convert mechanical input into electrical energy output. To improve triboelectric energy harvesting performance, increasing the number of contacts as well as the contact area has been carried out by numerous researchers. In this study, we design a shaker-type energy harvester which is called as maracas triboelectric generator (M-TEG), inspired by the structure of maracas, one of the musical percussion instruments. A tripod frame is inserted to the inside of a cylindrical case, which is a device with the electrodes of aluminum and copper. Then, the triboelectric energy harvesting characteristics between polypropylene (PP) balls and the electrodes are measured. The M-TEG with the frame generates the energy harvesting signals up to ~100 V and ~2.5 μA due to larger contact area and numbers, which enhances the voltage and current output by 250% and 610% compared to that without the frame, respectively. This study presents the feasibility of self-powered sensors and toys using improved triboelectric energy performance with a low-cost and simple manufacturing process in the interesting structure.

Keywords: Triboelectric generator, Energy harvesting, Shaker, Maracas, Toy

이차전지, 슈퍼커패시터 등 에너지 저장 소자에 자체적으로 에너지를 공급해 줄 수 있는, 소형 에너지원에 대한 관심이 증가되면서 관련 연구가 활발히 이루어지고 있다. 에너지 하베스팅(energy harvesting) 기술이란 우리 주변에서 버려지는 기계적 에너지, 소규모 열에너지 등을 수집하여 전기로 전환하는 기술을 일컫는다 [1-5]. 광의의 에너지 하베스팅 기술은 마찰전기(triboelectric), 압전전기(piezoelectric), 광전(photovoltaic), 열전(thermoelectric), 초전(pyroelectric) 효과 등 다양한 물리적 현상의 메커니즘을 이용하는 대부분의 에너지 소자 기술을 포함한다. 이 중, 협의의 에너지 하베스팅 기술로서 기계적 에너지를 전기 에너지로 전환하는 기술이 각광을 받고 있으며, 마찰대전(triboelectrification)을 이용한 에너지 하베스팅 소자는 2012년에 발명된 이래로, 일상 생활에서 사용할 수 있는 응용분야로 확장하기 위한 연구가 계속되고 있다 [6-10]. 마찰전기가 발생하는 원리는 거시적으로 다음과 같이 논할 수 있다. 두 물체가 기계적으로 접촉하면 두 가지 소

✉ **Chang Kyu Jeong; ckyu@jbnu.ac.kr**

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.
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.

재 사이의 어떤 물리/화학적 성질의 차이에 의해 전하(전자, 이온 또는 물질덩어리)의 재분배가 일어나고, 결론적으로 두 표면 사이에 전위차가 발생한다. 이때, 두 표면 사이의 빈 공간은 순간적으로 마치 유전체 커패시터(콘덴서)처럼 거동한다. 이 전위차를 보상하기 위해 두 전극 사이에 연결된 도선 또는 회로에서 전류가 흐르면서 전기 에너지를 만들게 된다 [11-14]. 마찰전기 기반의 에너지 하베스팅 소자는 높은 출력, 저비용, 쉬운 가공 등의 이유로 에너지 하베스팅 분야에서 각광받고 있고, 현재 사물 인터넷(Internet of Things, IoT) 장비 또는 센서들의 전원 공급원의 측면에서 많이 연구되고 있다 [15]. 마찰전기 에너지 하베스팅의 효율을 높이기 위한 변수로는 접촉면적 증가, 마찰대전열(triboelectric series) 차이가 큰 소재 선택 방법 등이 있다. 접촉면적 증가는 더 많은 전하의 이동을 가능케 하여 최종 마찰전기 에너지 하베스팅의 성능 향상을 야기한다. 소재 간의 전위차는 마찰대전열을 보면 알 수 있다. 마찰대전열이란 두 물질이 물리적으로 접촉되었을 때 양/음전하를 얻거나 잃는 경향을 보여주는 표로 양전하로 대전되는 물체는 양(positive), 음전하로 대전되는 물체는 음(negative)에 위치하여 실험에 따른 경험으로 제작되며, 여러 종류의 버전이 있다 [16-19]. 마찰대전열 상 두 소재가 멀리 떨어져 있을수록 소재 간 마찰이 일어났을 때 더 많은 전하가 이동하여 전위차가 커질 수 있다 [20-23].

본 연구에서는 악기 몸체를 진동하면 내부의 알갱이들이 몸체에 부딪혀 소리를 내는 마라카스라는 타악기 구조에서 아이디어를 얻어 마라카스 마찰대전 발전기(maracas triboelectric generator, M-TEG)를 제작하였다. 마라카스 구조는 접촉 면적은 물론 접촉횟수를 극대화할 수 있는 구조이므로 마찰전기 에너지 하베스팅 소자로 의미가 있다고 파악하였다. 또한 마라카스 마찰대전 발전기의 출력을 더욱 향상시키기 위해 몸통 내부의 접촉면적을 증가시킬 수 있는 프레임을 추가하여 프레임의 유무에 따른 출력 결과를 비교하였다. 향상된 에너지 하베스팅 출력을 위해 마찰대전열 차이가 큰 물질 중에서도 경제적이고 가공성이 우수한 소재 종류를 고려하여, 상대적으로 음전하 대전열 쪽에 위치한 폴리프로필렌(Polypropylene, PP)과 양전하 대전열 쪽에 위치한 알루미늄(aluminum, Al)과 구리(copper, Cu)를 마찰면 및 전극으로 선택하였다. 또한 폴리프로필렌은 고분자 중에서도 비중이 낮아 가볍고, 플라스틱을 재활용하여 값싸게 사용할 수 있으며, 기계적 특성과 내열성 역시 우수한 편이라 여러 장점이 있어서 선택하였다 [24].

그림 1(a)의 모식도에서 볼 수 있다시피, 제작한 마라카스 마찰대전 발전기의 전체적인 틀은 폴리프로필렌 몸통(case) 및 프레임, 전극 겸용 마찰표면으로 사용되는 구리 및 알루미늄 테이프로 되어 있다. 그 내부에 마찰대전체로 사용되는 여러 개의 작은 폴리프로필렌 구슬(직경 4.76 mm)들로 구성되어 있다. 보다 구체적인 제작 과정 및 측정 방법은 다음과 같다. 케이스의 안쪽에 구리 테이프와 알루미늄 테이프를 부착하고, 프레임의 윗면은 구리 테이프, 아랫면은 알루미늄 테이프를 부착하여 이중 전극으로 제작하였다. 이때 전극 테이프가 프레임의 통로를 막지 않으면서 각각 잘 연결되어 있도록 주의해야 한다. 프레임의 통로는 폴리프로필렌 구슬이 쉽게 통과하면서 마찰전기를 잘 일으킬 수 있도록 해야 하기 때문이다. 최종적으로 케이스와 프레임 전극 사이의 적절한 위치에 전도성 에폭시를 도포하여 각각의 전극을 형성하였다. 알루미늄 전극과 구리 전극은 각각 일종의 상부전극 및 하부전극 역할을 하는 것이며, 같은 소재로 형성해도 특성에는 큰 차이가 없으나, 제작 시 혼동을 피하기 위해서 다른 색상의 금속을 이용한 것이다. 케이스와 프레임 전극 사이의 저항을 측정해 보면

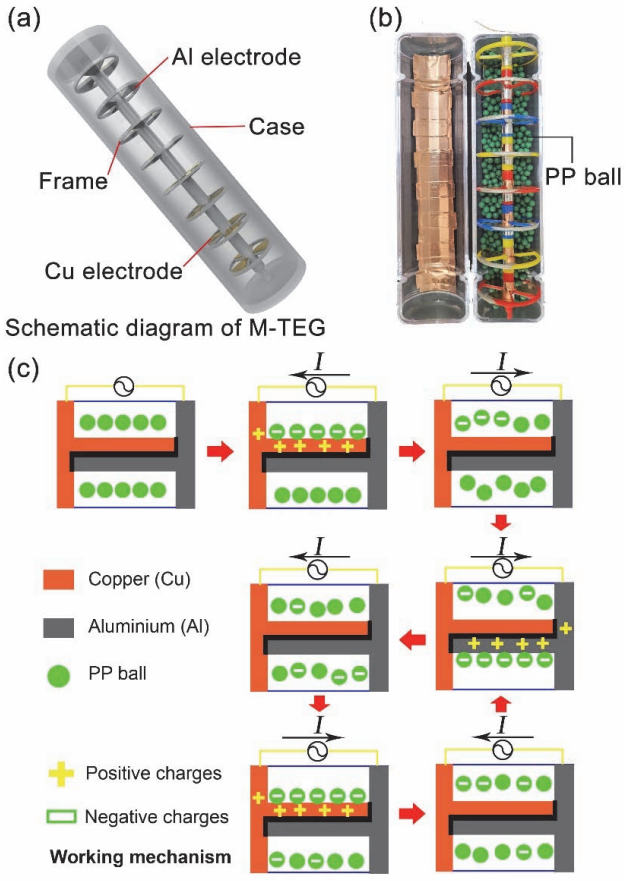

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the M-TEG, (b) photograph of the real M-TEG, and (c) illustration of the working mechanism of M-TEG.

~1 Ω 미만의 낮은 저항을 확인하여 상부전극 및 하부전극이 확실하게 형성되었음을 알 수 있었다. 이후 케이스 내부에 폴리프로필렌 구슬을 투입하였다. 마라카스 마찰대전 발전기를 흔들었을 때에 발생되는 마찰전기 신호를 외부 도선을 연결하여 전위계(electrometer, KEITHLEY 6514, USA)를 이용하여 측정하였다. 본 실험에서는 발전기를 일정한 주기로 흔들기 위해 메트로놈을 이용하였고, 마라카스 마찰대전 발전기를 수평으로 눕힌 상태에서 옆으로 20 cm씩 흔들어 측정을 진행하였다. 또한 내부 프레임의 유무, 투입된 폴리프로필렌 구슬의 개수, 발전기를 흔드는 주기에 대한 변수를 두고 개방 전압(open-circuit voltage, V_{oc})과 단락 전류(short-circuit current, I_{sc}) 측정을 진행하여 마찰전기 셰이커에서 에너지 하베스팅 효율이 가장 높게 나오는 조건을 찾아보았다.

실제 마라카스 마찰대전 발전기의 내부 사진이 그림 1(b)에 표현되어 있다. 프레임의 윗면은 구리 전극, 아랫면은 알루미늄 전극인 이중 전극을 사용하였다. 일정한 간격으로 빈 공간이 있는 프레임을 교차로 배열하여 폴리프로필렌 구슬들이 내부에서 흔들리고 움직일 때, 케이스의 바닥으로 바로 떨어지지 않고, 구슬들이 프레임의 각 층에서 부딪히는 충돌횟수가 증가될 수 있는 구조를 제작하였다. 그림 1(c)에서 마라카스 마찰대전 발전기의 구체적인 작동원리를 설명하였다. 마라카스 마찰대전 발전기를 흔들기 전에는 폴리프로필렌 구슬들과 전극들이 모두 전기적 중성 상태이다 [그림 1(c)(i)]. 마라카스 소자를 흔들면 폴리프로필렌 구슬들과 구리 전극(상부 전극으로 표기)의 마찰대전 특성 차이에 의해 폴리프로필렌 구슬은 음전하, 상부 전극은 양전하로 대전되며 이를 보상하기 위해 외부 회로에서 전류가 흐른다 [그림 1(c)(ii)]. 폴리프로필렌 구슬들이 구리 전극에서 떨어지는 순간에는 다시 전기적 중성 상태가 되기 위해 외부에서 전류가 역으로 흐른다 [그림 1(c)(iii)]. 다음 순간, 이번에는 폴리프로필렌 구슬들과 알루미늄 전극(하부 전극으로 표기)의 접촉으로 폴리프로필렌 구슬이 음전하, 하부 전극이 양전하로 대전되어 그림 1(c)(ii)와 같은 원리로 전류가 흐른다 [그림 1(c)(iv)]. 다시 폴리프로필렌 구슬들이 하부 전극에서 떨어진 후 전기적 중성 상태가 되기 위해 역으로 전류가 흐른다 [그림 1(c)(v)]. 이론적으로는 이와 같은 작동 원리가 반복되며 마라카스 마찰대전 발전기가 흔들리면서 전기 에너지를 만들어진다. 다만 실제로는 마라카스 마찰대전 발전기 내부에 폴리프로필렌 구슬들이 매우 많고 이들의 기계적인 접촉이 동시다발적으로 수없이 많이 일어나므로, 다양한 형태 및 수준의 마찰대전이 유도될 수 있다. 거시적으로 마라카스 구조가 수많은 기계적인 접촉 대전(contact electrification)을 만들어 낼 수 있어서 마찰전기 셰이커형 에너지 하베스팅 소자에 유리하다는 점이 이 실험의 핵심이라는 점을 다시 한 번 밝히는 바이다.

마라카스 마찰대전 발전기 내부에 프레임이 없을 경우

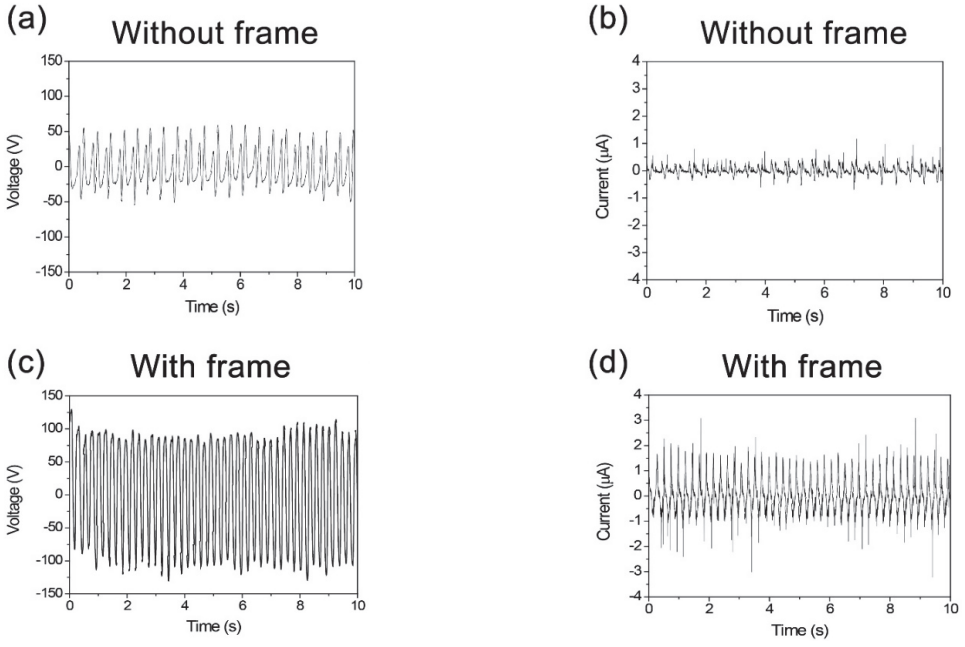

Fig. 2. (a,b) V_{oc} and I_{sc} of the M-TEG without frame under the frequency at 4.5 Hz and the number of 500 PP balls and (c,d) V_{oc} and I_{sc} of the M-TEG with frame under the frequency at 4.5 Hz and the number of 500 PP balls.

와 프레임을 추가하여 접촉면적 및 접촉횟수가 증가하는 경우에 각각 생성되는 에너지 하베스팅 출력 신호를 비교하였다. 그림 2는 프레임의 유무에 따른 출력 값의 특성을 보여준다. 폴리프로필렌 구슬은 500개를 집어넣고 흔드는 빈도는 4.5 Hz인 조건으로 실험을 진행하였다. 프레임이 없는 경우[그림 2(a)와 (b)]는 마라카스 마찰대전 발전기가 38.7 V의 전압과 0.40 μA의 전류를 생성한 반면, 내부에 프레임을 추가한 경우[그림 2(c)와 (d)]에는 97.9 V의 전압과 2.42 μA의 전류가 발생되었다. 즉 내부에 우리가 디자인한 프레임을 추가하면 전압은 약 250%, 전류는 약 610% 크게 증가하였다. 이는 내부에 해당 프레임이 장착되어 폴리프로필렌 구슬들과 전극이 맞닿는 면적과 접촉 충돌횟수가 증가되었기 때문이다. 또한, 그림 2(d)를 자세히 살펴보면, 전류 값의 양의 방향은 2 μA 정도 평균값을 보이고 있으나, 음의 방향으로는 -1.5 μA 정도 출력이 나타난다. 이러한 약간의 비대칭적 전류 신호 형태의 이유는 구리와 폴리프로필렌 사이의 마찰대전열 차이보다 알루미늄과 폴리프로필렌 사이의 그것이 약간 더 크기 때문으로 추측된다. 또한 프레임이 없는 경우 케이스 내부에 빈 공간이 많아 폴리프로필렌 구슬 간의 충돌횟수는 많은 반면, 구리 및 알루미늄 전극과 폴리프로필렌 구슬 간의 충돌빈도가 낮아, 그림 2(a)와 (b)와 같이 크기가 다른 2개 또는 다수의 신호가 비교적 불규칙하게 출력된다. 예를 들면, 그림 2(a)에서 보다시피 폴리프로필렌과 비교하여 알루미늄보다 마찰대전열 차이가 큰 구리 전극이 약 50 V 출력을 보이는 반면, 알루미늄 전극은 약 24 V인 작은 전압을 출력하여 크기가 다른 2개의 신호가 출력된다. 반면, 내부에 프레임이 장착된 경우 구리 전극과 알루미늄 전극에서 폴리프로필렌 구슬에 의한 동시다발적인 마찰전기가 발생하기 때문에, 그림 2(c), (d)와 같이 충분히 높은 전압 또는 전류 출력이 상대적으로 균일하게 발생된 것으로 추정된다.

그림 3(a)와 (b)는 마라카스 마찰대전 발전기 내부에 폴리프로필렌 구슬의 개수가 100, 300, 500, 700개일 때 각각 발생되는 전압 및 전류 측정 값을 나타낸다. 전압은 각각 39.2 V, 72.7 V, 97.9 V, 88.3 V가 발생되었으며, 전류는 각각 0.85 μA, 1.58 μA, 2.42 μA, 2.17 μA가 발전되었다. 전반적으로 폴리프로필렌 구슬의 개수가 많을수록 전극과의 충돌횟수가 증가되어 에너지 하베스팅 출력이 증가되는 경향을 보인다. 하지만 폴리프로필렌 구슬의 개수가 너무 많아지면 오히려 출력이 다소 감소하는 결과를 확인하였다. 이는 폴리프로필렌 구슬이 500개가 초과되어 너무 많아지면 폴리프로필렌 구슬 간의 공간적인 간섭이 심해져서, 구슬들이 전극에 충돌하는 횟수보다 구슬들이 서로 충돌하는 상황이 증가하는 이유 때문으로 예상된다. 즉 폴리프로필렌 구슬들 간의 접촉은 에너지 하베스팅 출력을 만들어 낼 수 없기 때문에 측정되는 출력 값이 다소 감

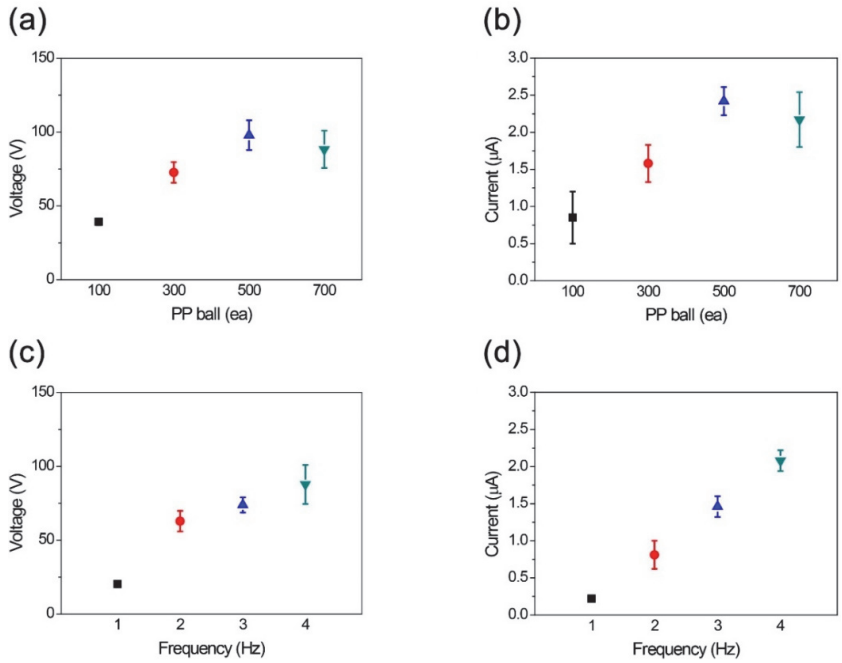

Fig. 3. (a, b) Comparison of V_{oc} and I_{sc} of the M-TEG with the frame structure under different numbers of PP balls at the same frequency of 4.5 Hz and (c, d) comparison of V_{oc} and I_{sc} of the M-TEG with the frame structure under different frequencies at the same number of 500 PP balls.

소하는 현상이 나타나는 것이다. 그림 3(c)와 (d)는 마라카스 마찰대전 발전기 소자를 흔드는 주기를 점진적으로 증가시키며 1~4 Hz 주기의 개방 전압 및 단락 전류를 측정하였다. 흔드는 주기를 증가할수록 출력 전압은 각각 20.3 V, 62.9 V, 73.9 V, 87.8 V로 증가하고, 전류도 0.22 μA, 0.81 μA, 1.46 μA, 2.08 μA로 증가하는 경향을 보였다. 이는 흔드는 빈도가 증가함에 따라 폴리프로필렌 구슬과 전극의 충돌횟수가 증가하기 때문에 마찰전기 발생이 높아지기 때문이다.

그림 4(a)는 외부 회로의 저항을 1 kΩ ~ 1 GΩ 범위에서 점진적으로 증가시키며 마라카스 마찰대전 발전기의 전압과 전류를 측정하였다. 옴(Ohm)의 법칙에 따라 연결된 저항이 증가함에 따라 전압은 상승하였고, 전류는 감소하는 경향을 보이고 있다. 각 저항에서의 출력 전력을 계산해 보면 그림 4(b)에서 보다시피 약 100 MΩ에서 최대 전력인 62.6 μW가 출력되는 것을 알 수 있다. 그림 4(c)는 마라카스 마찰대전 발전기를 이용하여 실제 발광다이오드(light-emitting diode, LED) 소자들을 구동한 결과를 보여주는 사진이다. 마라카스 마찰대전 발전기에서 생성되는 마찰전기는 일종의 교류 형태로 발생되기 때문에, 정류기를 사용하여 출력 극성을 한쪽으로만 합쳐서 LED를 작동시켰으며, 이때 직렬로 연결된 27개의 녹색 LED들이 충분히 작동할 수 있었다. 보다 전력을 잘 관리할 수 있는 진일보한 소자 시스템을 구축할 수 있다면 이 정도 출력을 이용하여 무선 센서, 계산기, 휴대폰 충전 등의 전자기기를 충분히 사용할 수 있을 것이다 [25].

에너지 하베스팅 기술 중 마찰전기 소자의 성능을 향상시키는 연구는 크게 소재 개발과 소자구조 개발로 나뉜다. 본 연구는 마라카스라는 타악기의 특수한 구조에 아이디어를 얻어, 마찰전기 에너지 하베스팅 소자의 구조 개발에 중점을 두고 실험을 진행하여 새로운 마찰대전 발전기 소자를 개발하고 효율을 높인 연구이다. 특수한 구조의 프레임을 내부에 추가하여 마라카스 마찰대전 발전기의 성능을 평가한 결과 97.9 V, 2.42 μA의 에너지 하베스팅 출력이 나왔고, 이는 내부 프레임이 없는 경우보다 전압은 2.5배, 전류는 6.1배로 증가한 결과이다. 교차로 제작된 내부 프레임이 마라카스 마찰대전 발전기의 출력 향상에 큰 기여를 했음을 알 수 있다. 이번에 개발한 마라카스 마찰대전 발전기는 크기가 작고 무게가 가벼우며 폐쇄 회로로 구성되어있어 따로 추가의 접지가 필요 없다는 장점이 있다. 가방 속에 넣거나, 간단히 손으로 흔들어서 휴대용으로 일상생활에서 활용이 가능한 마찰전기 에너지 하베스팅 소자

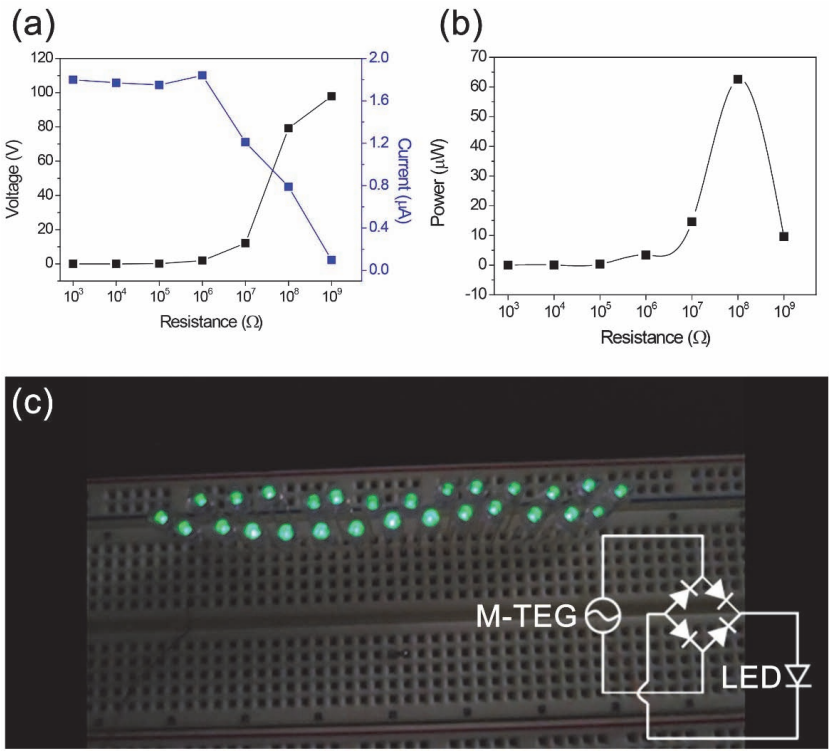

Fig. 4. (a) Output voltage and current of the M-TEG under various load resistances from 1 kΩ to 1 GΩ in the external circuit, (b) output power of the M-TEG under various load resistances from 1 kΩ to 1 GΩ in the external circuit, and (c) photographs of the commercial green LEDs connected to M-TEG [the 27 green LEDs turned on by the M-TEG (inset: brief circuit diagram)].

이다. 나아가 더욱 정교한 디자인을 접목하여 더욱 높은 수준의 마라카스 마찰대전 발전기 개발이 가능할 것이라 여겨진다. 이를 기반으로 하여 마라카스 마찰대전 발전기는 자가발전 손전등, 기계적 진동 센서, 보조 전원장치 등으로 활용할 수 있을 것이다. 또한 타악기들의 특수한 구조가 특별하면서도 효율적인 마찰대전 발전기를 개발하는 데 적용될 수 있다는 것을 제시하였다는 점도 이 연구의 중요한 의의이다.

ORCID

Chang Kyu Jeong https://orcid.org/0000-0001-5843-7609

감사의 글

본 연구는 2022년 과학기술정보통신부 재원으로 한국연구재단의 지원(2022R1A2C4002037, 2022R1A4A3032923)을 받아 수행된 결과입니다.

REFERENCES

[1] D. W. Kim, H. Kim, G. T. Hwang, S. B. Cho, S. H. Jeon, H. W. Kim, C. K. Jeong, S. Chun, and C. Pang, *ACS Energy Lett.*, **7**, 1820 (2022). [DOI: https://doi.org/10.1021/acsenergylett.2c00259]

[2] A. Harb, *Renewable Energy*, **36**, 2641 (2011). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.014]

[3] M. L. Ku, W. Li, Y. Chen, and K.J.R. Liu, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, **18**, 1384 (2015). [DOI: https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2497324]

[4] Y. Zhang, C. K. Jeong, J. Wang, X. Chen, K. H. Choi, L. Q. Chen, W. Chen, Q. Zhang, and Q. Wang, *Adv. Mater.*, **33**, 2103056 (2021). [DOI: https://doi.org/10.1002/adma.202103056]

[5] S. Kim, Y. Na, C. Nam, C. K. Jeong, K. T. Kim, and K. I. Park, *Nano Energy*, **103**, 107824 (2022). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107824]

[6] S. Jung, J. Oh, U. J. Yang, S. M. Lee, J. Lee, M. Jeong, Y. Cho, S. Kim, J. M. Baik, and C. Yang, *Nano Energy*, **77**, 105271 (2020). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105271]

[7] C. He, W. Zhu, B. Chen, L. Xu, T. Jiang, C. B. Han, G. Q. Gu, D. Li, and Z. L. Wang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 26126 (2017). [DOI: https://doi.org/10.1021/acsami.7b08526]

[8] F. R. Fan, Z. Q. Tian, and Z. L. Wang, *Nano Energy*, **1**, 328 (2012). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.01.004]

[9] J. Park, Y. W. Lim, S. Y. Cho, M. Byun, K. I. Park, H. E. Lee, S. D. Bu, K. T. Lee, Q. Wang, and C. K. Jeong, *Small*, **18**, 2104472 (2022). [DOI: https://doi.org/10.1002/smll.202104472]

[10] C. Sohn, J. J. Lee, K. Kim, and C. K. Jeong, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **11**, 055006 (2022). [DOI: https://doi.org/10.1149/2162-8777/ac6d79]

[11] C. Wu, A. C. Wang, W. Ding, H. Guo, and Z. L. Wang, *Adv. Energy Mater.*, **9**, 1802906 (2019). [DOI: https://doi.org/10.1002/aenm.201802906]

[12] S. Niu and Z. L. Wang, *Nano Energy*, **14**, 161 (2015). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.11.034]

[13] S. Pan and Z. Zhang, *Friction*, **7**, 2 (2019). [DOI: https://doi.org/10.1007/s40544-018-0217-7]

[14] E. C. Shin, J. H. Ko, H. K. Lyeo, and Y. H. Kim, *Phys. Rev. Research*, **4**, 023131 (2022). [DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.4.023131]

[15] X. Chen, C. Jiang, Y. Song, B. Shao, Y. Wu, Z. Song, T. Song, Y. Wang, and B. Sun, *Nano Energy*, **100**, 107495 (2022). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107495]

[16] H. Zou, Y. Zhang, L. Guo, P. Wang, X. He, G. Dai, H. Zheng, C. Chen, A. C. Wang, C. Xu, and Z. L. Wang, *Nat. Commun.*, **10**, 1427 (2019). [DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-019-09461-x]

[17] X. Zhang, L. Chen, Y. Jiang, W. Lim, and S. Soh, *Chem. Mater.*, **31**, 1473 (2019). [DOI: https://doi.org/10.1021/acs.Chemmater.8b04526]

[18] G. Khandelwal, N.P.M.J. Raj, and S. J. Kim, *Adv. Energy Mater.*, **11**, 2101170 (2021). [DOI: https://doi.org/10.1002/aenm.202101170]

[19] T.A.L. Burgo, F. Galembeck, and G. H. Pollack, *J. Electrostat.*, **80**, 30 (2016). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.elstat.2016.01.002]

[20] G. Zhu, C. Pan, W. Guo, C. Y. Chen, Y. Zhou, R. Yu, and Z. L. Wang, *Nano Lett.*, **12**, 4960 (2012). [DOI: https://doi.org/10.1021/nl302560k]

[21] J. Yang, J. Chen, Y. Yang, H. Zhang, W. Yang, P. Bai, Y. Su, and Z. L. Wang, *Adv. Energy Mater.*, **4**, 1301322 (2014). [DOI: https://doi.org/10.1002/aenm.201301322]

[22] G. Zhu, Z. H. Lin, Q. Jing, P. Bai, C. Pan, Y. Yang, Y. Zhou, and Z. L. Wang, *Nano Lett.*, **13**, 847 (2013). [DOI: https://doi.org/10.1021/nl4001053]

[23] X. Xiao, X. Zhang, S. Wang, H. Ouyang, P. Chen, L. Song, H. Yuan, Y. Ji, P. Wang, Z. Li, M. Xu, and Z. L. Wang, *Adv. Energy Mater.*, **9**, 1902460 (2019). [DOI: https://doi.org/10.1002/aenm.201902460]

[24] A. Alsabri, F. Tahir, and S. G. Al-Ghamdi, *Mater. Today: Proc.*, **56**, 2245 (2022). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.574]

[25] D. Jiang, H. Ouyang, B. Shi, Y. Zou, P. Tan, X. Qu, S. Chao, Y. Xi, C. Zhao, Y. Fan, and Z. Li, *InfoMat*, **2**, 1191 (2020). [DOI: https://doi.org/10.1002/inf2.12103]