


강자성-강유전성 복합체를 활용한 자기-기계-마찰전기 변환 발전소자

임예슬, 황건태 

부경대학교 재료공학전공

Magneto-Mechano-Triboelectric Generator Enabled by Ferromagnetic-Ferroelectric Composite

Yeseul Lim and Geon-Tae Hwang

Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

(Received October 28, 2023; Revised November 7, 2023; Accepted November 7, 2023)

Abstract: The Internet of Things (IoT) device is a key component for Industry 4.0, which is the network in homes, factories, buildings, and infrastructures to monitor and control the systems. To demonstrate the IoT network, batteries are widely utilized as power sources, and the batteries inevitably require repeated replacement due to their limited capacity. Magneto-mechano-electric (MME) generators are one of the candidate to develop self-powered IoT systems since MME generators can harvest electricity from stray alternating current (AC) magnetic fields arising from electric power cables. Herein, we report a magneto-mechano-triboelectric generator enabled by a ferromagnetic-ferroelectric composite. In the triboelectric nylon matrix, a ferromagnetic carbonyl iron powder (CIP) was introduced to induce magnetic force near the AC magnetic field for MME harvesting. Additionally, a ferroelectric ceramic powder was also added to the MME composite material to enhance the charge-trapping capability during triboelectric harvesting. The final ferromagnetic-ferroelectric composite-based MME triboelectric harvester can generate an open-circuit voltage and a short-circuit current of 110 V and 8 μ A, respectively, which were enough to turn on a light emitting diode (LED) and charge a capacitor. These results verify the feasibility of the MME triboelectric generator for not only harvesting electricity from an AC magnetic field but also for various self-powered IoT applications.

Keywords: Magneto-mechano-electric conversion, Triboelectric harvesting, Composite, Self-powered IoT

제4차 산업혁명은 의료, 환경, 산업, 공공안전 등의 사회 전반적인 분야에서 광범위한 자동화, 연결성 및 융합화를 추구하며 인류의 삶을 혁신적으로 풍요롭게 만드는 것을 목표로 하고 있다 [1]. 4차 산업혁명의 핵심기술 중 사물인터넷(internet of things, IoT)은 다양한 센서, 데이터 저장 및 무선 전송기술을 활용하여 건강 관리, 환경 모니터링, 산업 제조 및 안전분야에서 상호 연결된 자동화 시스템

을 구현하기 위해 정보를 수집, 분석하는 역할을 한다 [2]. 향후 전 세계적으로 광범위한 장소에 IoT 소자가 설치될 예정인데, 전원공급을 위해 일부 IoT 소자에는 배터리가 이용되고 있다 [3]. 하지만 배터리의 경우 제한적인 수명으로 주기적인 교체가 필요하고, IoT 소자의 배터리를 일일이 교체하기 위해서는 많은 노동력과 비용이 소모된다 [4]. 이러한 문제는 주변의 환경을 이용하여 스스로 전기를 생성하여 IoT 소자에 독립적으로 전원을 공급하는 에너지 하베스팅 기술을 이용하면 해결할 수 있다 [5].

에너지 하베스팅 기술은 우리 주변에서 흔히 존재하는 에너지인 빛, 열, 기계적 움직임, 자기장 등을 유용한 전기

✉ Geon-Tae Hwang; gthwang@pknu.ac.kr

Copyright ©2024 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.

에너지로 변환하는 친환경적이고 경제적인 방법이다 [6]. 이러한 에너지원은 광전효과, 열전효과, 압전효과, 마찰전기효과 등을 이용해 전기 에너지로 변환될 수 있다 [7]. 특히 자기-기계-전기변환(magneto-mechano-electric, MME) 발전기는 가정, 공장 및 국가기반 시설 등에 광범위하게 설치된 전기 케이블에서 발생하는 표유 자기장으로부터 전기 에너지를 지속적으로 발전할 수 있기 때문에 IoT 장치의 전원 공급원으로 관심을 받고 있다 [8]. 2016년 국내에서 압전 단결정, 자외 금속 캔틸레버 및 자석질량체를 활용한 고성능 MME 발전소자가 개발된 이후로 다양한 압전/자외 재료 및 캔틸레버 구조를 활용한 MME 발전소자가 제작되었고, 미세한 자기장을 이용해 전기 에너지를 생성하고 IoT 소자를 구동하는 것도 가능하였다 [9].

마찰전기 효과는 저렴한 재료를 활용하여 미세한 기계적 움직임을 고출력의 전기 에너지로 변환할 수 있기 때문에 MME 발전소자에 적용될 수 있다 [10]. 종류가 다른 두 물질이 기계적으로 접촉했을 때 서로의 물리, 화학적 성질의 차이로 인해 전하의 재분배가 일어나고, 두 물질의 표면 사이에 전위차가 발생한다 [11]. 이때 두 물질의 표면 사이는 빈 공간인데 순간적으로 유전체 커패시터(capacitor)와 같은 거동을 보여주며, 생성된 전위차를 보상하기 위해 두 물질의 전극에 연결된 도선 및 회로를 통해 전하가 이동하며 전기 에너지원으로 이용할 수 있다 [12]. 2019년에는 기존 캔틸레버 형태의 MME 발전소자에 널리 이용되던 압전 소재를 마찰전기 소재로 대체하였는데, 우수한 에너지 발전 특성을 보여주었다. 다만, 자석질량체가 부착된 캔틸레버 형태의 MME 발전소자는 부피가 크고 피로 파괴가 발생할 수 있는 금속기판을 이용하는 특성상 수명이 제한적인 특성이 있다 [13].

본 연구에서는 이러한 한계점을 극복하기 위해 무기 자성소재를 마찰전기 특성이 우수한 나일론 기지상에 분산시켜 유연한 특성의 MME 마찰전기 복합체를 제작하였다. 또한, 마찰대전 특성 향상을 위해 세라믹 유전물질을 복합체에 추가하여 MME 마찰전기 출력을 향상하였다. 무기 자성소재로 사용된 carbonyl iron powder (CIP)의 경우는 40 wt%, 세라믹 유전물질로 사용된 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (PZT)의 경우는 10 wt%로 함량을 설정하였으며, CIP와 PZT 첨가 유무에 따른 MME 마찰전기 출력 특성을 비교하였다. 제작된 마찰대전체의 유전상수는 나일론/CIP/PZT 복합체, 나일론/CIP 복합체, 순수 나일론 순으로 값이 높았다. 각 마찰대전체를 활용하여 1,000 Oe의 교류자기장 분위기에서 MME 발전을 통해 생성되는 개방전압 및 단락전류를 측정했을 때, 나일론은 두 경우 모두 출력을 얻지 못했으며, 나일론/CIP 복합체는 75 V, 2 μA , 나일론/CIP/PZT 복합

체는 110 V, 8 μA 의 출력이 발생하였다. 나일론에 CIP의 첨가로 인해 MME 마찰전기 발전이 가능해지고, PZT 첨가 시 유전상수의 증가와 함께 출력전압은 1.5배, 출력전류는 4배 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 제작된 MME 발전소자를 이용하여 LED를 구동하였고, 10 μF 용량의 커패시터를 400초 동안 충전하였다. LED의 밝기는 나일론/CIP/PZT 복합체의 경우가 나일론/CIP 복합체보다 더 밝았으며, 커패시터의 경우 나일론/CIP 복합체는 0.9 V까지 나일론/CIP/PZT 복합체는 1.1 V까지 충전했다. 이를 통해 본 연구에서 제작한 MME 마찰전기 발전소자로부터 전기 에너지를 생산할 수 있으며, 이를 전자기기 구동에 응용 가능한 것을 보여주었다.

그림 1(a)는 강자성-강유전성 복합체 시트의 제작공정 개략도이다. 본 연구에서 마찰대전체로 주 대전재료는 나일론과 테프론의 일종인 polyoxymethylene (PFA)이다. 나일론은 높은 내구성과 연성을 가지는 재료이며, 공정적으로 가공하기 쉽다는 장점이 있다. 마찰 대전체로서 나일론은 양의 마찰전기 재료인데, 이는 나일론을 마찰대전체로 사용할 경우 전자를 상대 물질에 내어주어 재료의 표면 자체가 양전하로 대전된다는 것을 의미한다. PFA는 나일론과 대응하는 음의 마찰전기 재료로, PFA의 구성 원자 중 플루오린(F)은 모든 원소들 중 두 번째로 전자 친화도가 높다 [14,15]. 실제로 고분자 사슬의 대부분을 차지하는 탄소의 경우 -123 kJ/mol의 전자친화도를 가지는 반면, 플루오린의 경우 -322 kJ/mol의 큰 전자 친화도를 가진다. 또한, 플루오린은 할로젠 원소에 해당하는데, 탄소 기반 고분자에 이를 도입할 경우 상대적으로 낮은 전기음성도를 가지는 탄소로부터 전자를 가져올 수 있고, 이로 인해 분극이 유도되어 극성을 가지게 된다. 할로젠 원소가 도입된 탄소 기반 고분자로는 테프론 외에도 polyvinyl chloride (PVC), polyvinylidene chloride (PVDC), polyvinylidene fluoride (PVDF) 등이 있으며, 이들은 음극 마찰대전체로 널리 사용되고 있다. 높은 마찰전기 출력을 얻기 위해서는 마찰대전체로 사용되는 재료가 전자친화도에서 큰 차이를 보여야 하는데, 나일론과 PFA는 마찰대전열(triboelectric series)에서 상대적으로 멀리 위치해 있기 때문에 두 물질이 마찰대전체로 사용될 경우 높은 마찰전기 출력을 기대할 수 있다 [16].

나일론을 MME 발전소자로 이용하기 위해서는 나일론에 강자성을 부여해야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 CIP를 나일론과 혼합해 강자성을 부여하여 외부 자기장 분위기에서 자기력을 발생하여 물리적인 변형을 유도하였다. CIP는 구형의 형상을 가지는 철 금속분말로 투자율과 포화 자속밀도가 높고 잔류자화가 작은 강자성 특성의 물질에

해당하며, 자성 전자재료로 널리 사용된다 [17-19]. 또한 뛰어난 자화 거동을 보이는데, 전자적으로부터 CIP에 자기장이 인가될 때 내부의 자기 구역이 외부 자기장과 동일한 방향으로 배열되어 자화된다. 이로 인해, CIP가 첨가된 마찰전기 복합체 시트의 외부에서 자기장이 가해질 경우 자기력으로 물리적 변형(굽힘)이 발생하여 복합체와 PFA 사이의 부착-탈착 동작이 일어난다 [20]. 마찰전기 발전 특성을 향상하기 위해서는 마찰대전체의 유전상수가 높을수록 유리한데, 이는 마찰대전체의 표면에 많은 전하가 유도되어 발전 성능이 향상되기 때문이다 [12]. 일반적인 나일론의 유전상수는 3~5 정도로 비교적 낮는데, 높은 유전상수를 가지는 재료를 혼합하여 이를 향상할 수 있다. PZT는 페로브스카이트(perovskite) 구조의 강유전 재료로서 나일론에 비해 매우 높은 유전상수를 가지고 있어, 나일론에 혼합할 경우 마찰대전 특성을 높일 수 있다 [21].

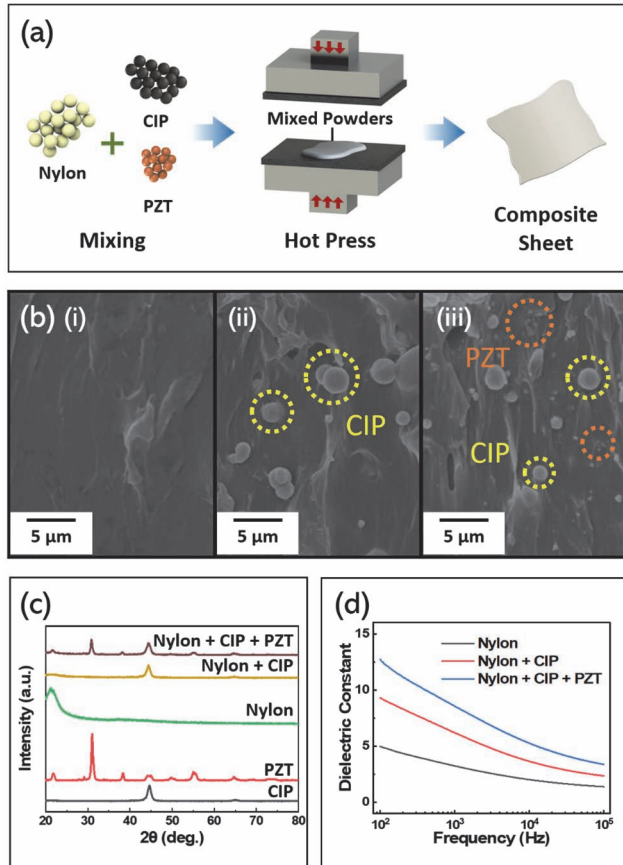


Fig. 1. (a) Schematic illustration for the fabrication procedure of MME composite sheet, (b) cross-sectional SEM images of the (i) Nylon sheet, (ii) Nylon/CIP composite sheet, (iii) Nylon/CIP/PZT composite sheet, (c) XRD pattern of raw powders and composite sheets, and (d) the graph of dielectric constant of composite sheets.

나일론(Sigma Aldrich, 미국)에 CIP (BASF, 독일) 및 PZT (한테크, 한국) 분말을 혼합하였을 때 MME 마찰전기 발전 출력을 확인하기 위해 세 물질의 혼합비를 3가지로 설정하여 강자성-강유전성 복합체 시트를 제작하였다(나일론:CIP:PZT=10:0:0, 6:4:0, 5:4:1 wt%). 혼합 분말 제조 시 나일론/CIP 혼합 분말 및 나일론/CIP/PZT 혼합 분말은 볼밀 공정으로 12시간 동안 고르게 혼합하였다. 열압착 공정을 이용하여 세 종류의 분말을 시트 형태로 제작하기 위해, 먼저 바코터를 이용하여 스테인리스 판 위에 각 분말을 균일한 두께로 펼쳐준다. 이후 분말 위에 상부 스테인리스판을 덮고 열압착 공정을 이용해 120°C 온도에서 0.6 ton의 압력을 가한다. 제작된 시트의 표면에 스퍼터링 장비를 이용하여 Au 전극을 증착하였고, 가로 2.5 cm, 세로 6 cm의 크기로 시트를 절단하였다. 그림 1(b)는 복합체 시트의 단면을 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)으로 촬영한 이미지이다. (i)은 나일론 시트, (ii)는 나일론/CIP 복합체 시트, (iii)는 나일론/CIP/PZT 복합체 시트의 단면 이미지로, 나일론 기상에 CIP 및 PZT 분말이 응집되지 않고 분산되어 있음을 확인할 수 있다. 이는 입자의 분산도에 따른 영향을 최소화하여 3가지 복합체 시트의 마찰전기 발전 성능을 동일한 조건에서 평가할 수 있음을 의미한다. 그림 1(c)는 시트 3가지와 CIP, PZT 분말의 X선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD) 결과이다. CIP, PZT 분말의 XRD 그래프에서는 전형적인 carbonyl iron과 PZT의 XRD 피크를 관찰할 수 있었으며, 나일론/CIP 복합체와 나일론/CIP/PZT 복합체의 XRD 패턴을 통해 강자성-강유전성 복합체에 나일론 및 CIP, PZT 성분이 검출됨을 확인할 수 있다. 그림 1(d)는 세 가지 복합체의 유전상수를 100~100 kHz의 주파수 범위에서 측정 한 그래프이다. 먼저 각 복합체 시트의 커패시턴스를 측정 한 후 유전상수를 구했는데, 커패시턴스와 재료의 유전율 간의 관계를 나타내는 식은 다음 식 (1)과 같다 [12].

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot A} \quad (1)$$

C는 커패시턴스, ε_0 는 진공의 유전율, ε 는 재료의 유전상수, A는 면적, d는 두께이다. 측정된 커패시턴스를 식 (1)에 대입하여 재료의 유전상수를 구할 수 있다. 그 결과, 나일론/CIP/PZT 복합체, 나일론/CIP 복합체, 나일론의 순으로 유전상수 값이 높은 것을 확인할 수 있었다. 나일론/CIP 복합체의 유전상수는 PZT를 첨가하여 더 증가하였는데, 이는 PZT의 우수한 강유전 특성에 의한 효과이다. 복합체에 강유전 재료가 함유되면 분극 특성이 향상되는데, 이로 인해 표면에 많은 양의 전하가 유도되고 이는 마

찰전기 발전소자의 높은 출력을 이끌어낸다 [12,22,23].

그림 2(a)는 마찰전기 복합체를 활용한 MME 에너지 발전기의 동작 원리를 구체적으로 설명한다. 그림 2(a)-i은 MME 마찰전기 발전소자의 구성을 보여주는데, 이는 강자성-강유전성 복합체 시트, PFA 필름, 두 재료 표면에 형성된 상부 전극 및 하부 전극, 외부의 회로와 전극을 이어주는 도선으로 이루어져 있다. 초기 상태[그림 2(a)-ii]에서

는 복합체 시트와 PFA가 접촉되어 있기 때문에 전기적으로 평형을 이룬다. 그림 2(a)-iii와 같이 전자석의 자기장에 의해 형성된 자기력으로 복합체 시트에 물리적인 변형이 발생하면, 복합체 시트와 PFA 필름이 탈착되고 두 물질의 접촉 면적이 변화한다. 이로 인해 복합체 시트와 PFA 사이의 전기적 평형이 깨지게 되는데, 이때 상부 전극과 하부 전극에는 보상 전하가 형성되고, 외부 전선을 통해 전류가 흐른다. 자기장이 인가되지 않을 때는 복합체 시트에 자기력이 사라져 다시 두 물질이 부착된다. 이때는 보상 전하가 점차적으로 사라지게 되고, 복합체 시트와 PFA가 완전히 부착되었을 때는 전기적 평형을 다시 이루게 되어 전류가 더 이상 흐르지 않게 된다. 이러한 과정을 반복하면서 MME 마찰전기 발전이 이루어진다 [24-27]. 그림 2(b)는 실험에 사용된 MME 마찰전기 발전소자와 전자석을 이용한 MME 하베스팅의 실제 모습이다. 마찰전기 소자 주변에는 전자석으로부터 자기장이 형성되고, 복합체에 포함된 CIP 분말에서 자기력이 발생하여 복합체 시트에 물리적인 변형이 발생한다. 이로 인해 강자성-강유전성 복합체 시트는 구부러지고, 이후 자기장이 제거되면 복합체 시트는 원상복구되는데, 교류 자기장을 인가하면 복합체 시트와 PFA 필름은 서로 주기적으로 탈착 및 부착하며 MME 마찰전기 발전이 진행된다.

MME 마찰전기 발전 특성을 평가하기 위해 전자석을 이용해 1.5 Hz, 1,000 Oe의 교류 자기장을 반복적으로 복합체 시트에 인가하였고, 이때 생성되는 전기 신호를 오실로스코프 및 멀티미터로 측정하였다. 그림 2(d), (e)는 나일론 시트와 두 가지 조성의 강자성-강유전성 복합체 시트에서 출력되는 개방전압 및 단락전류를 나타낸다. 순수 나일론 시트의 경우 자기장에 물리적으로 반응하지 않기 때문에 전기적 출력이 없을 것으로 예상하였는데, 측정 결과 나일론 시트에서는 출력신호가 나오지 않았고, 나일론/CIP 복합체 시트에서는 75 V, 나일론/CIP/PZT 복합체 시트에서는 110 V의 전압이 측정되었다. 또한 전류 출력의 경우 나일론 시트에서는 출력신호가 나오지 않았고, 나일론/CIP 복합체 시트에서는 2 μ A, 나일론/CIP/PZT 복합체 시트에서는 8 μ A의 전류가 측정되었다. 나일론/CIP 복합체 시트와 나일론/CIP/PZT 복합체 시트의 출력 전압을 비교하면, PZT 분말의 첨가에 따라 출력 전압은 약 1.5배, 전류는 약 4배 상승하였다. 나일론에 CIP 분말을 첨가하였을 때 자기력의 부여로 인해 MME 마찰전기 발전이 가능하였고, PZT 분말의 첨가에 따라 출력 전압, 전류의 증가를 확인할 수 있었다. 앞서 예상한 것처럼 PZT의 첨가로 인해 복합체 시트의 표면에 많은 양의 전하가 대전될 수 있고 마찰전기 발전 성능이 향상됨을 알 수 있었다.

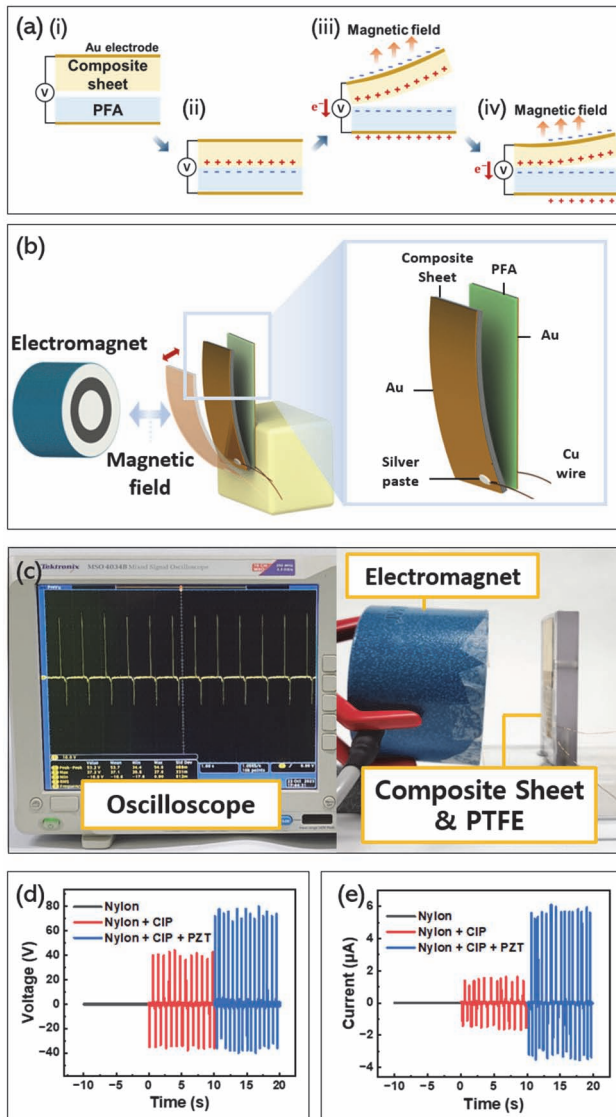


Fig. 2. (a) Illustration of the working mechanism of composite-based MME triboelectric generator, (b) schematic of the device structure and MME triboelectric harvesting under AC magnetic field, (c) photograph of the experimental setup used to characterize the electric output of the MME generator, (d) measured output voltage, and (e) current signals of the three different sheets.

MME 마찰전기 발전기를 실제 전자분야에 응용하기 위해서는 교류형태의 전기 에너지를 정류기를 이용해 직류형태로 변환해야 한다. 그림 3(a)-i는 전자분야 응용을 위한 MME 마찰전기 발전기, 정류기, 전자기기를 연결한 회로도이고, 3(a)-ii는 MME 마찰전기 발전기와 연결된 브레드보드(breadboard)에 정류기와 발광다이오드(light emitting diode, LED)를 장착한 모습, 3(a)-iii는 정류기와 커패시터를 장착한 모습이다. 이를 활용해 MME 마찰전기 발전기로부터 생성된 교류 형태의 전기 에너지를 정류하여 LED를 작동하고 커패시터를 충전하였다. 그림 3(b)는 MME 발전소자를 이용하여 LED를 구동한 모습을 보여준다. 나일론 시트의 경우 MME 에너지 발전이 이루어지지 않았기 때문에 LED가 켜지지 않았다. 반면 나일론/CIP 복합체 시트, 나일론/CIP/PZT 복합체 시트의 경우 LED를 작동시킬 수 있었는데, LED 구동 시 전기 에너지 출력이 더 우수한 나일론/CIP/PZT 복합체가 나일론/CIP 복합체보다 LED가 더 밝게 켜지는 것을 확인할 수 있었다. 그림 3(c)는 각 시트의 MME 발전출력을 이용한 커패시터 충전 곡선으로, 10 μF 용량의 커패시터를 400초 동안 충전하였다. 나일론 시트의 경우 에너지 출력이 없어 커패시터가 전혀 충전되지 않았고, 나일론/CIP 복합체 시트와 나일

론/CIP/PZT 복합체 시트는 400초 동안 각각 0.9 V, 1.1 V까지 충전되었다. 동일한 커패시터 충전 시간 동안 나일론/CIP/PZT 복합체가 나일론/CIP 복합체보다 높은 전압까지 충전되었는데, 이는 복합체에 PZT의 첨가로 높은 마찰전기 출력을 유도했기 때문이다. 이를 통해 본 연구에서 제작된 강자성-강유전성 복합체는 자기장을 활용하여 LED를 작동하고 커패시터를 충전할 수 있었기에, 전자분야로의 응용이 가능함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 자기장으로 인해 마찰전기 발전이 이루어지는 MME 마찰전기 발전소자를 제작하였다. 나일론과 PFA를 마찰대전체 소재로 선택하였는데, 높은 효율을 가지는 MME 마찰전기 발전소자를 제작하기 위한 목적으로 나일론에 무기 자성소재와 세라믹 강유전물질을 첨가하여 강자성-강유전성 복합체 시트를 제작하였다. 무기 자성소재인 CIP를 나일론에 도입하여 강자성-강유전성 복합체 시트를 제작하였는데, 이는 자기장 분위기에서 강자성 물질인 CIP가 자화되어 복합체 시트에 자기력을 부여하려는 목적이었으며, 이로 인해 자기장이 부여된 환경에서 마찰전기 발전이 이루어졌다. 또한 세라믹 강유전물질인 PZT를 복합체에 도입하였는데, 이로 인해 시트 표면의 전하 대전 능력이 향상되어 MME 마찰전기 발전 출력이 증가하였다. 이는 나일론/CIP 복합체와 나일론/CIP/PZT 복합체의 출력을 비교해 보았을 때 전압은 1.5배, 전류는 4배 증가한 실험 결과를 통해 확인할 수 있었다. 마지막으로 MME 발전소자를 이용해 LED를 구동할 수 있었으며 커패시터를 충전하였다. LED의 경우 나일론/CIP/PZT 복합체가 나일론/CIP 복합체보다 밝게 켜졌으며, 나일론 시트를 이용할 경우 출력이 없어 LED를 구동할 수 없었다. 커패시터 충전 시 나일론 시트를 통해서 커패시터를 충전할 수 없었으며, 동일한 시간 내에 나일론/CIP/PZT 복합체 시트가 나일론/CIP 복합체 시트보다 높은 전압까지 충전되는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 개발한 MME 강자성-강유전성 복합체는 마찰대전체로 사용하기에 크기가 작고 무게가 가벼우며, 제작 공정이 간편하다는 장점을 가지고 있다. 후속 연구를 통해 MME 마찰전기 발전기의 출력을 더욱더 향상한다면 무선 센서, 휴대용 전자기기 등 보다 다양한 전자기기에 발전소자를 적용할 수 있을 것으로 예상하며, 더 나아가 IoT 소자에 독립적으로 전원을 공급할 수 있는 시스템을 구현할 수 있을 것으로 예상된다 [13].

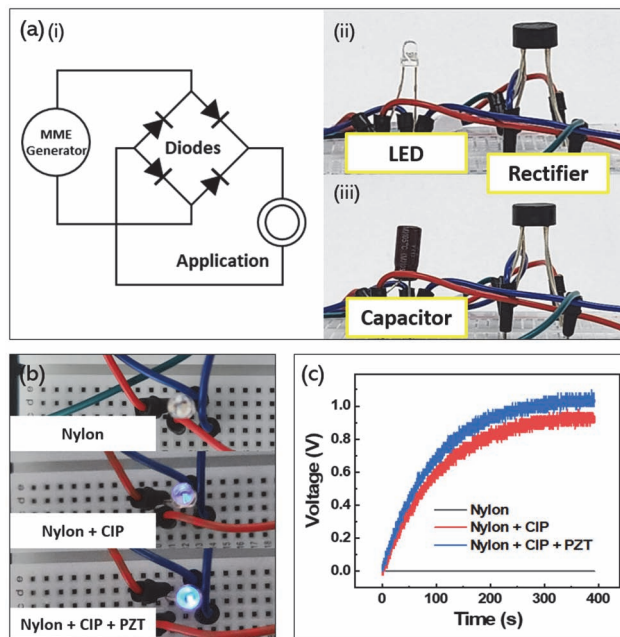


Fig. 3. (a) Circuit diagram of the electric rectifying and electronic application process, (i) photograph of the breadboard used for the connection of the LED (ii) and capacitor (iii), (b) lighting up of blue LED utilizing the three different sheets, and (c) charging curves for 10 μF capacitor while MME harvesting using the different sheets.

ORCID

Geon-Tae Hwang

<https://orcid.org/0000-0001-6151-3887>

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2022년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, *Future Gener. Comput. Syst.*, **29**, 1645 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- [2] R. Haight, W. Haensch, and D. Friedman, *Science*, **353**, 124 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.aag0476>
- [3] D. Miorandi, S. Sicari, F. De Pellegrini, and I. Chlamtac, *Ad Hoc Networks*, **10**, 1497 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.02.016>
- [4] M. S. Kwak, K. W. Lim, H. Y. Lee, M. Peddigari, J. Jang, C. K. Jeong, J. Ryu, W. H. Yoon, S. N. Yi, and G. T. Hwang, *Nanoscale*, **13**, 8418 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1039/D1NR01336J>
- [5] G. T. Hwang, V. Annapureddy, J. H. Han, D. J. Joe, C. Baek, D. Y. Park, D. H. Kim, J. H. Park, C. K. Jeong, K. I. Park, J. J. Choi, D. K. Kim, J. Ryu, and K. J. Lee, *Adv. Energy Mater.*, **6**, 1600237 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201600237>
- [6] A. Harb, *Renewable Energy*, **36**, 2641 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.014>
- [7] S. Priya and D. J. Inman, *Energy Harvesting Technologies* (Springer, New York, 2009) p. 4.
doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-76464-1>
- [8] H. Song, D. R. Patil, W. H. Yoon, K. H. Kim, C. Choi, J. H. Kim, G. T. Hwang, D. Y. Jeong, and J. Ryu, *Energy Environ. Sci.*, **13**, 4238 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1039/D0EE01574A>
- [9] J. Ryu, J. E. Kang, Y. Zhou, S. Y. Choi, W. H. Yoon, D. S. Park, J. J. Choi, B. D. Hahn, C. W. Ahn, J. W. Kim, Y. D. Kim, S. Priya, S. Y. Lee, S. Jeong, and D. Y. Jeong, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 2402 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1039/C5EE00414D>
- [10] H. Kim, H. Kim, and C. K. Jeong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 292 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.3.13>
- [11] C. M. Baek, M. W. Kim, J. W. Lee, H. A. Kim, J. Y. Jung, J. H. Yoon, H. I. Kim, Y. J. Park, G. H. Kim, S. H. Kim, S. H. Kim, J. M. Kim, H. S. Lee, J. W. Jang, M. G. Jeong, J. H. Choi, S. Y. Ha, S. Lee, H. S. Choi, and J. Ryu, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 639 (2022).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.6.15>
- [12] W. Seung, H. J. Yoon, T. Y. Kim, H. Ryu, J. Kim, J. H. Lee, J. H. Lee, S. Kim, Y. K. Park, Y. J. Park, and S. W. Kim, *Adv. Energy Mater.*, **7**, 1600988 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201600988>
- [13] K. W. Lim, M. Peddigari, C. H. Park, H. Y. Lee, Y. Min, J. W. Kim, C. W. Ahn, J. J. Choi, B. D. Hahn, J. H. Choi, D. S. Park, J. K. Hong, J. T. Yeom, W. H. Yoon, J. Ryu, S. N. Yi, and G. T. Hwang, *Energy Environ. Sci.*, **12**, 666 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1039/C8EE03008A>
- [14] A. Chen, C. Zhang, G. Zhu, and Z. L. Wang, *Adv. Sci.*, **7**, 2000186 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/advs.202000186>
- [15] Y. S. Choi and S. Kar-Narayan, *EcoMat*, **2**, e12063 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/eom2.12063>
- [16] R. Zhang and H. Olin, *EcoMat*, **2**, e12062 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/eom2.12062>
- [17] J. E. Japka, *JOM*, **40**, 18 (1988).
doi: <https://doi.org/10.1007/BF03258115>
- [18] P. Małecki, M. Królewicz, J. Krzak, J. Kaleta, and J. Piłowski, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **26**, 1899 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1177/1045389X15581522>
- [19] L. Chang, Y. Zhang, Y. Dong, Q. Li, A. He, C. Chang, and X. Wang, *SN Appl. Sci.*, **1**, 902 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0950-1>
- [20] N. L. Burhannuddin, N. A. Nordin, S. A. Mazlan, S.A.A. Aziz, N. Kuwano, S.K.M. Jamari, and Ubaidillah, *Sci. Rep.*, **11**, 868 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80539-z>
- [21] A. Wu, P. M. Vilarinho, I.M.M. Salvado, J. L. Baptista, C. M. de Jesus, and M. F. da Silva, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **19**, 1403 (1999).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(98\)00445-2](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(98)00445-2)
- [22] U. Sundar, S. Banerjee, and K. A. Cook-Chennault, *Acad. J. Polym. Sci.*, **1**, 555574 (2018).
doi: <https://doi.org/10.19080/AJOP.2018.01.555574>
- [23] J. Jachowicz, M. Garcia, and G. W. Surel, *Text. Res. J.*, **57**, 543 (1987).
doi: <https://doi.org/10.1177/004051758705700910>
- [24] 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>
- [25] Z. L. Wang, *Faraday Discuss.*, **176**, 447 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1039/C4FD00159A>
- [26] S. Wang, L. Lin, and Z. L. Wang, *Nano Lett.*, **12**, 6339 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1021/nl303573d>
- [27] 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>