



# 자기-기계-전기 변환소자를 이용한 에너지 하베스팅 기술

황건태<sup>1</sup> , 류정호<sup>2</sup>, 윤운하<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 부경대학교 재료공학과

<sup>2</sup> 영남대학교 신소재공학부

<sup>3</sup> 한국재료연구원 기능세라믹연구실

## Recent Progress in Magneto-Mechano-Electric Generators

Geon-Tae Hwang<sup>1</sup>, Jungho Ryu<sup>2</sup>, and Woon-Ha Yoon<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

<sup>2</sup> School of Materials Science & Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

<sup>3</sup> Department of Functional Ceramics, Korea Institute of Materials Science (KIMS), Changwon 51508, Korea

(Received July 26, 2021; Accepted August 2, 2021)

**Abstract:** The internet of things (IoT) technology is a key component for the advent of 4<sup>th</sup> industrial revolution, which is the network of home appliances, infrastructures, and vehicles to remotely investigate these systems. For the operation of compact IoT devices, batteries are widely used as electric power, and the limited lifetime of batteries inevitably leads to periodic replacement. Magneto-mechano-electric (MME) generators may be alternatives to batteries inside the IoT devices by converting stray magnetic field into electric energy, since we are always surrounded by ambient alternating current (AC) magnetic fields induced from electric power transmission lines everywhere. This article reviews the recent domestic research progress in high-performance MME generators and their application field for IoT and electronic devices.

**Keywords:** Magneto-mechano-electric, Magnetic field, Energy harvesting, Self-powered

### 1. 서론

제4차 산업혁명시대를 맞이하여 각종 사물에 무선센서를 부착하여 다양한 정보를 실시간으로 주고받는 IoT (internet of thing, 사물인터넷) 기술이 전 세계적으로 각광받고 있다 [1]. IoT 센서의 전원 공급을 위해 많은 경우 배터리가 연결되는데, 배터리의 에너지 저장용량 및 수명이 제한적이라 주기적으로 교체해야 한다 [2]. 하지만 향후

전 세계에 설치될 수십~수백억 개 IoT 센서의 배터리를 주기적으로 교체하기 위해서는 천문학적 인력과 비용이 소모되는 문제점이 발생하여, 자연환경 및 우리 주변에서 버려지는 에너지를 활용하여 스스로 전기 에너지를 생산하고 IoT 센서에 전원을 공급할 수 있는 다양한 에너지 하베스팅(energy harvesting) 기술이 각광받고 있다 [3,4].

에너지 하베스팅은 자연환경이나 인간의 활동범위 내에서 낭비되는 다양한 에너지를 이용하여 전기 에너지를 생산하는 기술로, 태양광을 이용한 태양전지, 바람을 이용하는 풍력발전, 기계적 에너지를 활용하는 압전/마찰전기발전, 폐열을 이용하는 열전발전 등이 있다 [5]. 각각의 방법은 주어진 응용환경에 따라 장단점을 가지고 있으며 상황에 맞추어 적합한 방법이 이용될 수 있다. 이 밖에도 버

✉ Geon-Tae Hwang; [gthwang@pknu.ac.kr](mailto:gthwang@pknu.ac.kr)

려지는 교류 자기장을 활용하여 전기 에너지를 발전하는 자기-기계-전기변환(magneto-mechano-electric, MME) 발전기술에 대한 연구도 이루어지고 있다 [6]. 발전소로부터 전력을 전송하는 전선은 사람의 발길이 닿는 건물 및 제반시설 등 거의 모든 곳에 존재하는데, 여기에는 50/60 Hz 교류형식의 전류가 지속적으로 흐르고 있다 [7]. 암페어의 법칙(Ampere's law)에서 널리 알려진 것처럼 전류가 흐르는 전선에서는 필연적으로 10 Oe (=1 mT) 이하의 미세한 교류 자기장이 발생하는데 이는 일반적으로 아무 쓸모가 없고 때로는 생체에 질병 및 부작용 등을 초래하여 해로운 것으로 간주되고 있다 [8]. 하지만 MME 발전기술을 활용하면 버려지는 미세 자기장은 쓸모 있는 전기 에너지 원으로써 바뀌어 IoT 센서 등에 전원을 공급할 수 있다. 일반적인 MME 발전을 위해서는 두 단계의 에너지 변환 과정이 필요한데, 먼저 교류 자기장을 기계적인 움직임으로 변환하는 자기-기계변환, 다음으로 기계적인 움직임을 전기 에너지로 변환하는 기계-전기변환으로 이루어져 있다 [9]. 자기-기계 변환의 경우 외부에서 가해지는 교류 자기장에 의해 탄성적인 변형이 발생하는 자왜재료(magnetostrictive material) 또는 자기력을 생성할 수 있는 자석을 활용하면 구현할 수 있다. 기계-전기 변환의 경우 압전재료(piezoelectric materials)와 마찰대전 재료(triboelectric material)를 이용해 구현할 수 있다 [8]. 압전 및 마찰대전 효과는 외부의 기계적 에너지(움직임)를 활용해 발전소자 내에서 전위차를 만들고 이를 통해 쌍극자와 보상 전하가 형성되며 전자가 이동하여 전류를 발생하는 현상에 기반한다 [10]. 이러한 재료들을 적절히 조합하여 복합체 형태로 제작하면 자기-기계 변환 및 기계-전기 변환을 동시에 수행할 수 있는 MME 발전소자의 제작이 가능하다.

MME 발전소자를 이용하여 IoT 소자 및 다양한 휴대용 전자장치를 구동하기 위해서는 MME 발전소자의 에너지 출력 향상이 필수적인데, 10 Oe 이하의 미세자기장 분위기에서 실효값(root mean square, RMS) 기준으로 1 mW 이상의 전력을 생성할 때 실제 응용 가능성을 높일 수 있다. 이를 위해 현재까지 압전재료, 마찰대전체, 자왜재료의 물성 향상 및 발전소자의 구조 개선 등의 연구가 다년간

진행되었고, 실제 IoT 소자 및 다양한 분야로의 응용 가능성에 대해 보여주었다. 본 리뷰에서는 고성능 MME 발전소자의 개발/응용에 관한 최근의 국내 연구동향 및 미래 전망에 대해 다루고자 한다.

## 2. 자왜-압전재료 복합체 기반의 MME 발전소자

MME 발전소자의 구현을 위해 가장 먼저 시도된 형태는 자왜재료 및 압전재료의 복합체 형태이다. 외부에서 자왜-압전 복합체로 인가되는 자기장은 자왜효과에 의해 자왜재료의 물리적인 변형을 유발하고, 이러한 기계적인 움직임은 자왜재료와 물리적으로 결합되어 있는 압전재료에 전달되어 압전효과에 의해 전기 에너지로 변환이 가능하다. 자왜-압전 MME 복합체 외부에서 특정 주파수를 가지고 있는 교류 자기장이 발생하면 이는 MME 복합체에 동일한 주파수의 교류 진동(변형)을 유발하고, 이는 주기적인 응력으로 작용하여 정압전 효과에 의해 교류 형태의 전기 에너지가 복합체로부터 생성된다.

### 2.1 압전 단결정을 활용한 MME 발전소자

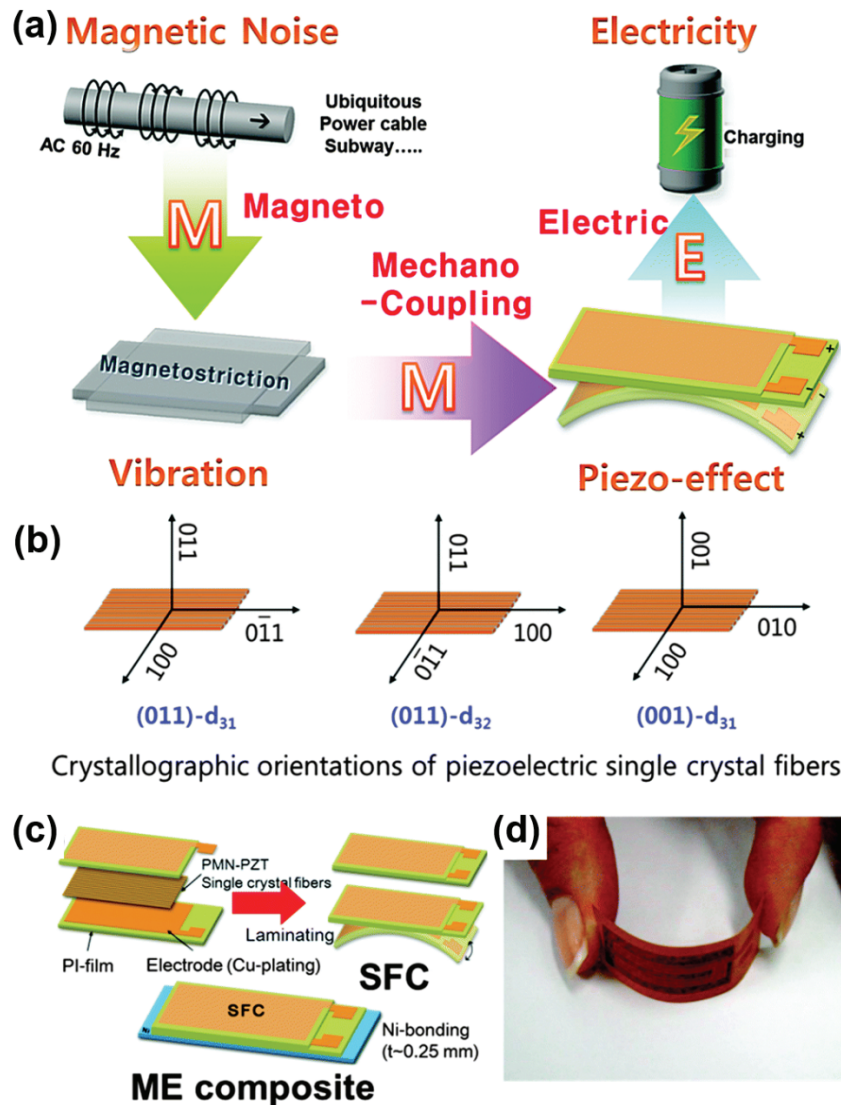
2015년 재료연구소에서는 고성능의 압전 단결정 물질인  $\text{Pb}(\text{M}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{PbZrO}_3$ - $\text{PbTiO}_3$  (PMN-PZT) 및 자왜재료인 Ni를 복합화 하여 MME 발전소자를 성공적으로 제작하였다 [6]. 압전 단결정 재료는 기존에 널리 쓰이던 세라믹 계열의 압전재료에 비해 결정학적 배향성이 우수하여 매우 높은 압전특성을 보유하고 있다. 예를 들어 세라믹  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  (PZT)-5H의 경우 압전상수인  $d_{33}$ 가 593 pC/N이지만 단결정 PMN-PZT의 경우 약 2,000 pC/N 이상을 가질 수 있기 때문에 에너지 발전소자 등으로 제작했을 때 우수한 에너지 출력 특성을 얻을 수 있다. 또한 압전 단결정은 가공하는 결정방향에 따라(또는 동작하는 압전모드에 따라) 압전상수의 향상을 유도할 수 있다. 압전 단결정을 이용하여 MME 발전소자를 제작할 때 일반적으로 자왜재료는 길이 방향의 변형을 일으키도록 제작되는



Fig. 1. The concept of magneto-mechano-electric conversion.

데, 자왜재료에서 응력을 제공받는 압전재료는 길이 방향의  $d_{31}$  모드로 작동하는 경우가 많다. 그림 2(b)처럼  $\langle 001 \rangle$  방향으로 압전 단결정이 가공된 경우  $d_{31}$ 모드의 압전상수는  $d_{32}$ 모드와 동일하지만,  $\langle 011 \rangle$  방향으로 가공된 경우  $d_{31}$  모드와  $d_{32}$ 모드에서는 결정학적 방향이 다르기 때문에 각각의 압전상수는 다른 값을 나타낸다(예시:  $d_{32}$ 모드에서의 압전상수는  $d_{31}$ 모드보다 약 3배 높은 압전상수를 가지고 있음). 이러한 특성을 활용하여 본 논문에서는 (011)배향된 PMN-PZT를  $d_{32}$ 모드로 동작시켜 MME 발전을 진행하여 높은 에너지 출력 특성 도출을 시도하였다. MME 발전소

자의 제작을 위해 단결정 PMN-PZT는 마이크로 파이버 (micro fiber) 형태로 가공 후 폴리머 물질에 의해 패키징 처리되어 복합화하였고, 이를 single crystal fiber composite (SFC)로 명명하였다. SFC는 자왜재료인 Ni 캔틸레버(cantilever) 박판에 부착되어 그림 2(c)처럼 MME 발전소자로 제작되었다. 단결정 PMN-PZT는 기본적으로 취성을 가지고 있지만, 길이가 긴 마이크로 파이버 형태로 제작이 되었기 때문에 그림 2(d)처럼 유연성이 부과되어 에너지 발전 과정에서 물리적으로 파괴되지 않고 장기간의 구동 신뢰성을 확보할 수 있었다.

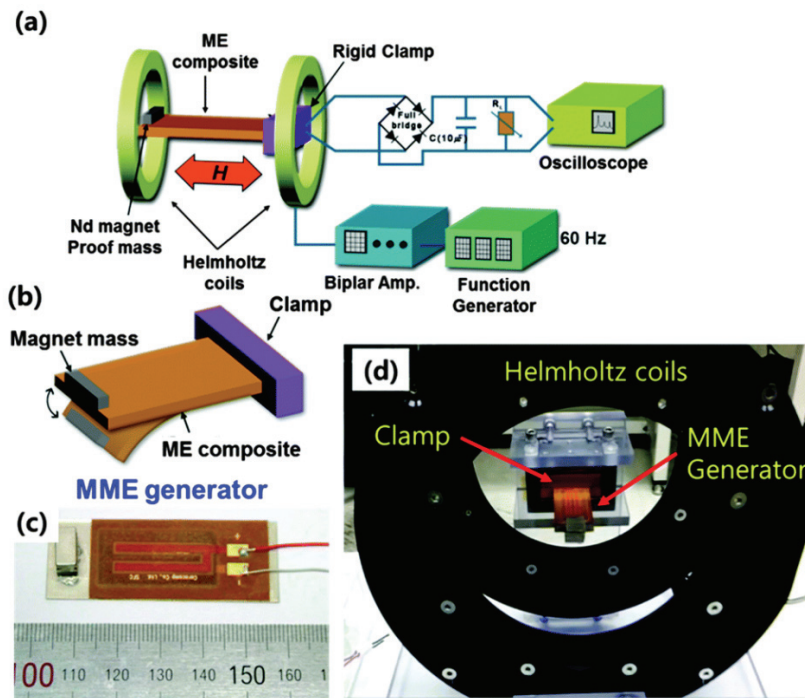


**Fig. 2.** (a) Sequential interactions of magneto-mechano-electric generation with magnetostriction and piezoelectric materials, (b) definition of crystallographic orientations of piezoelectric PMN-PZT micro fibers used in composite structure, (c) diagrams of fabrication process for the PMN-PZT SFC and the final structure of lamination composite, and (d) photo image of PMN-PZT SFC lamination [6].

그림 3(a)은 MME 에너지 발전특성 평가를 위한 측정 시스템의 모식도를 보여준다. MME 발전소자에 균일한 교류 자기장을 가해 주기 위해 교류 전류로 작동하는 헬름홀츠(Helmholtz) 코일이 이용되었으며, MME 발전소자에서 생성되는 전기 에너지는 오실로스코프를 이용해 측정되었다. 자왜-압전 복합체 구조에는 그림 3(b), (c)처럼 자석 질량체가 캔틸레버 구조체의 끝 부분에 부착되었다. 자석 질량체는 교류 자기장에 의해 자기력을 발생시켜 캔틸레버 구조체의 기계적 진동폭을 증가시켜 에너지 출력을 증가시키고, 캔틸레버에 부착된 위치 변화를 통해 공진 주파수를 세밀하게 조절하는 역할을 가지고 있다. 그림 3(d)는 헬름홀츠 코일 내부에 설치된 MME 발전소자의 모습을 보여 주고 있다. 결과적으로 헬름홀츠 코일에서 60 Hz, 5 Oe의 자기장을 MME 발전소자에 인가했을 때 peak-to-peak 기준으로 최대 34 V의 전압이 생성되었다. 하지만 에너지 출력이 수백  $\mu$ W 수준으로 비교적 낮아 다양한 IoT 기기들을 실시간으로 동작하는 데 어려움이 있었다. 하지만 (011) 면으로 배향된 압전 단결정을 사용하여 에너지 출력을 크게 향상시켰고, 캔틸레버 구조의 MME 발전소자 형태를 완성하여 이후의 연구에서도 널리 사용되는 구조로 자리를 잡았다.

## 2.2 자왜 재료의 결정방향 배향을 통한 MME 발전 성능 향상

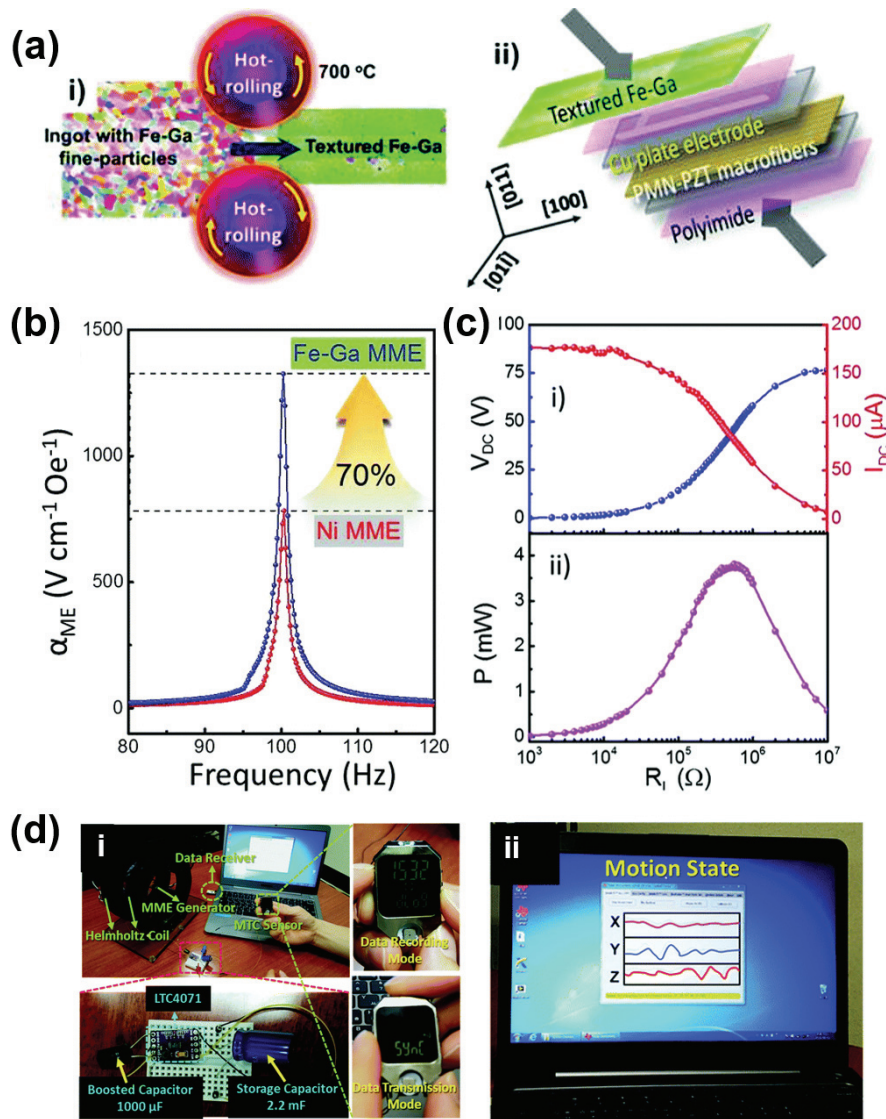
MME 복합체를 형성하는 압전재료 외에도 자왜재료의 특성을 향상하면 MME 발전 성능을 높일 수 있다. 2018년 영남대학교 연구팀은 자왜재료로 사용되는 Ga-Fe 금속합금의 배향제어를 통해 MME 발전소자의 성능을 획기적으로 향상시켰다 [11]. 기존에 자왜재료로 널리 쓰이던 Ni은 외부 자기장에 의해 변형되는 정도인 자왜특성이 낮은 편이라 MME 발전소자의 성능이 제한적인 단점이 있었다. Terfenol-D의 경우 우수한 자왜특성을 가지고 있는 것으로 널리 알려져 있지만, 수급이 불안정한 희토류인 Terbium이 첨가되고, 취성을 가지고 있어 MME 복합체의 재료로 이용하는 데 어려움이 있다. Galfenol로 알려진 Fe-Ga 이원 합금은 우수한 자왜특성을 보유하고 있고, 수급이 안정적인 재료들로 이루어져 있어 MME 발전소자에 이용하면 실용화에 큰 장점을 보일 수 있다. 특히 Galfenol을 열간 압연공정을 통해 캔틸레버의 길이 방향을 <100> 방향으로 배향하면 더욱더 우수한 자왜특성을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 그림 4(a)-i처럼 Fe-Ga 합금 주괴를 700°C의 온도에서 압연공정을 통해 얇고 길게 가공함으로



**Fig. 3.** (a) Schematic illustrations of magneto-mechano-electric generator testing set-up, (b) cantilever structured magneto-mechano-electric generator with magnet proof mass, (c) photo image of magneto-mechano-electric generator before clamping, and (d) photograph of testing setup with a Helmholtz coil and magneto-mechano-electric generator [6].

써 길이 방향이 <100>방향으로 우선 배향된 Galfenol을 제작하였다. 제작된 Galfenol을 electron backscatter diffraction (EBSD)을 통해 관찰했을 때 길이 방향이 <100>방향으로 비교적 배향이 잘 된 것을 알 수 있었고, 완성된 Galfenol을 일반적인 Ni과 자왜상수의 크기를 비교했을 때 약 4~5배 정도의 매우 높은 값을 가지고 있음을 확인하였다. MME 발전소자의 제작을 위해 <100>방향으로 배향된 Galfenol 캔틸레버 구조체에 압전 단결정 PMN-PZT SFC를 부착하여 MME 복합체를 그림 4(a)-ii와 같이 제작하였다. 자기장에 의해 MME 발전소자에서 생성되는

전압의 크기는 자기-전기 변환 계수( $\alpha_{ME}$ )로 표현이 가능한데, 이는 1 Oe의 단위 자기장에 의해 1 cm 두께의 압전체에서 발생하는 전압의 크기로 정의( $V/cm \cdot Oe$ )된다. Galfenol을 이용해 제작된 MME 발전소자의  $\alpha_{ME}$  값을 Ni을 이용해 제작하는 경우와 비교해 보았는데, Galfenol을 이용한 경우 1,330  $V/cm \cdot Oe$ 인 반면 Ni을 이용한 경우에는 781  $V/cm \cdot Oe$ 를 출력함으로써 약 70% 정도 향상된 전압발생 성능을 보여주었다. MME 발전소자에 Ni과 Galfenol을 각각 이용한 경우 7 Oe의 교류 자기장 분위기에서 발생된 peak-to-peak 전압도 Ni의 경우 94 V인 데



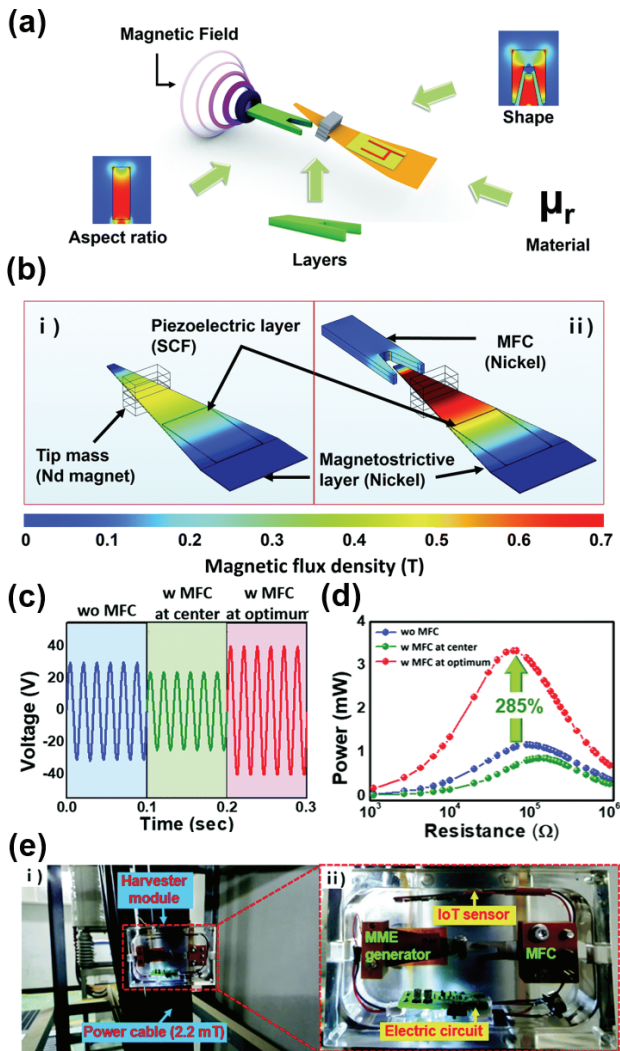
**Fig. 4.** (a) Fabrication process of textured Fe–Ga alloy and design of magneto-mechano-electric generator, (b) graph of the measured frequency resonance spectra of the induced ME voltage coefficient for Fe-Ga and Ni based magneto-mechano-electric generators, (c) rectified DC output voltage and DC output current and the DC output power at various external load resistances, and (d) photo images of the self-powered wireless smart watch system composed of a magneto-mechano-electric generator, power management circuit, smart watch, and monitoring computer [11].

반해, Galfenol의 경우 212 V가 출력되어 배향된 Galfenol이 월등히 우수한 값을 출력하였다. MME 발전소에서 출력되는 전기 에너지는 자왜 재료의 주기적인 수축과 이완에 의해 압전재료에서 교류 형태로 출력이 되는데, 이를 전자기기 등에 응용하기 위해서는 정류과정을 거쳐 직류 형태로 바꾸어야 한다. 그림 4(c)는 7 Oe의 교류 자기장에 의해 MME 발전소에서 생성되는 출력을 정류하고 여기에 다양한 크기의 외부저항을 연결하여 직류 전압, 직류 전류, 직류 전력을 측정된 결과이다. 그 결과 최대 76.5 V의 직류 전압, 178  $\mu$ A의 직류 전류, 3.86 mW의 직류 전력이 측정되었다. 또한 MME 발전소에서 생성된(정류되기 전) 교류 전력을 측정된 결과 4.6 mW를 보여주었는데, 이는 비교적 높은 에너지 값이라 다양한 IoT 기기들을 구동하는 데 이용할 수 있다. 최종적으로 MME 발전소에서 생성된 전기 에너지는 그림 4(d)와 같이 전력 변환 회로 및 에너지 저장용 슈퍼 커패시터(super capacitor)를 거쳐 스마트 손목시계(smart watch)에 전력을 공급하여 시간, 온도, 고도, 움직임 정보 등을 무선전송을 통해 컴퓨터로 전송하는 데 사용되었다. 본 연구는 MME 발전소의 에너지 출력 값을 수 mW 달성하여 전자분야에서의 사용범위를 크게 늘린 것에 의의가 있다.

### 2.3 자기장 렌즈 기술을 활용한 MME 발전 성능 향상

앞서 언급한 압전 및 자왜소재의 특성 향상을 통한 고성능 MME 발전소 개발 외에도 다양한 접근을 통해 성능을 향상시킬 수 있다. 2020년 영남대학교 연구진은 MME 발전과정에서 빛을 모아 주는 렌즈처럼 자기장을 모아 주는 자기장 집중 구조를 도입해 에너지 발전 성능을 향상시켰다 [12]. 압전-자왜소재 기반의 MME 발전소자의 성능은 압전소재의 압전특성, 자왜소재의 자왜특성, 자왜소재에서 생성된 응력의 압전소재로의 효과적 전달(계면 접촉층 관련 요소) 등에 의해 결정될 수 있는데, 이 밖의 접근으로는 MME 발전소자에 인가되는 자기장 및 자기선속밀도(magnetic flux density)의 크기를 키우는 것도 방법이다. 특히 MME 발전소자가 사용되는 다양한 환경에서의 여건상 전력을 전송하는 전선에서 발생하는 자기장의 크기 및 주파수는 고정되는 경우가 대부분인데, MME 발전소자에 인가되는 자기선속밀도를 증가시킬 수 있으면 캔틸레버의 자석 질량체에서 발생하는 자기력 및 자왜특성에 의한 변형 정도를 증가시켜 에너지 발전 성능 향상을 이끌어 낼 수 있다. 그림 5(a)에는 MME 발전소자에 인가되는 자기선속밀도를 증가시키기 위한 자기장 집중구조에 대한 개념이 나타나 있다. 투자율(permeability)은 어떠한 매질에 가해

지는 자기장 분위기에 대하여 얼마나 자화하는지를 나타내는 값이다. MME 발전소자는 일반적으로 공기 중에서 동작하는데, 공기의 상대 투자율은 약 1로 매우 낮은 편이다. 본 연구에서는 상대 투자율이 높은 물질을 MME 발전소자 주변에 배치하여 소자에 가해지는 자기선속밀도를 높이기 위해 최적의 물질선정, 형상설계, 두께파악 등에 대해 탐구를 진행하였다. 다양한 후보물질 중 상대 투자율이 약 600 정도로 높고, 쉽게 구할 수 있고, 형상가공 및 두께조절이 용이한 Ni을 자기장 집중구조 제작을 위한 물질로 선정하였다. 유한요소 해석을 이용해 최적의 형태를 가진 구조체를 설계하였는데, 그림 5(b)와 같이 자기장 집중구조체를 MME 발전소자의 캔틸레버 끝 부분에 위치시킨 경우와 집중 구조체가 없는 경우를 비교했을 때 MME 발전소자에 가해지는 자기선속밀도가 약 50% 정도가 높은 것을 파악하였다. 유한요소 해석을 통해 설계된 자기장 집중구조체를 Ni을 이용하여 제작을 진행하였고, MME 발전소자에 적용하여 그 효과를 살펴보았다. 집중 구조체가 없는 경우에는 8 Oe의 교류 자기장을 MME 소자에 가했을 때 출력되는 peak-to-peak 전압이 그림 5(c)에서 나타난 것처럼 약 46 V인 반면, 집중 구조체를 최적의 위치에 적용하면 80 V까지 증가하여, 약 74%의 출력전압 향상을 보여주었다. 그림 5(d)는 자기장 집중 구조의 적용 전후의 전력발생량을 비교한 것인데, 집중 구조체를 최적화하여 적용하였을 때 8 Oe의 교류 자기장 분위기에서 3.3 mW를 출력하였고, 이는 집중 구조 적용전의 1.2 mW에 비해 약 2.8배 큰 값이다. 이를 통해 MME 발전소자의 구성요소는 그대로 두더라도, 발전소자에 인가되는 자기선속밀도의 크기를 증가시키면 에너지 발전 성능이 비약적으로 향상되는 것을 확인하였다. 마지막으로 그림 5(e)와 같이 MME 발전소자, 자기장 집중 구조, 전력변환 회로, IoT 센서를 포함하는 모듈을 제작하였고, 이를 발전소의 전력전송 선로에 부착하여 자가발전형(self-powered) IoT 시스템을 구현해 보았다. 전력전송 선로의 표면에서는 60 Hz, 22 Oe의 비교적 큰 교류자기장이 감지되었으며, 여기에 MME 발전소자와 IoT 센서 모듈을 부착하였을 때 IoT 센서가 MME 발전으로 동작이 가능한지를 확인해 보았다. 전력 선로에 부착된 MME 발전소자는 자기장 집중 구조의 도움으로 최대 5.34 mW의 전력출력을 보여주었고, 이를 이용해 성공적으로 IoT 온/습도 센서를 작동시켜 실용화의 가능성을 보여주었다. 본 연구는 MME 발전소자의 구성요소 외적인 부분을 개선하는 것을 목표로 진행된 첫 번째 결과인데, 자기장 집중 구조체 도입이라는 간단한 방법을 통해 MME 발전 특성을 크게 향상시킬 수 있음을 보여주었다.



**Fig. 5.** (a) Illustration of optimizing the concentration of the magnetic flux density on the magneto-mechano-electric generator by tailoring the shape, aspect ratio, thickness, and material properties, (b) theoretical simulation results of the magnetic flux density distribution in the magnetostrictive layer of the magneto-mechano-electric generator with and without the magnetic concentration structure, (c) an open-circuit output voltage measured from the magneto-mechano-electric generator with and without magnetic concentration structure, (d) the recorded RMS output power of the magneto-mechano-electric generator with and without the magnetic concentration structure, and (e) photo image of the magneto-mechano-electric harvesting module with magnetic concentration structure near a power transmission line for operating the IoT temperature sensor [12].

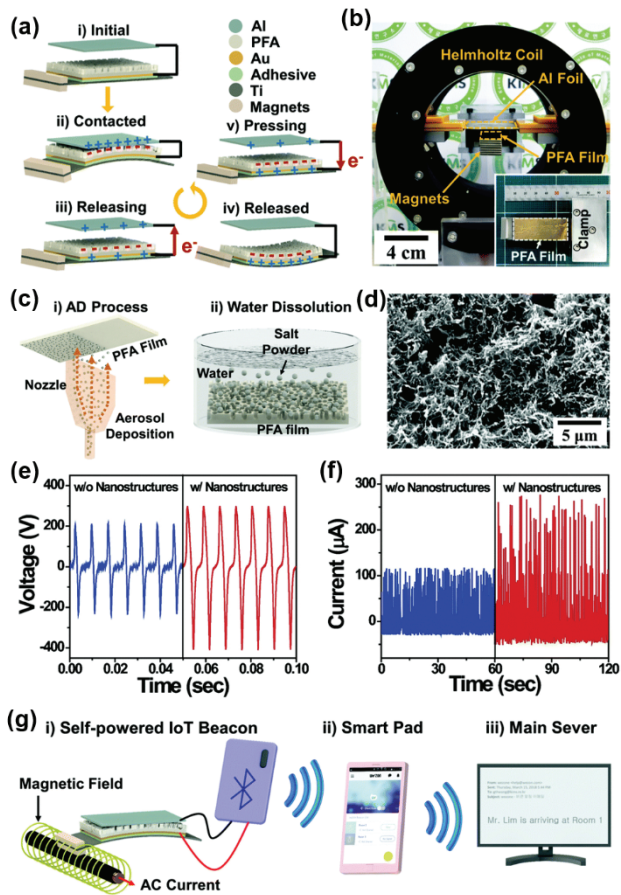
### 3. 마찰대전 물질 기반의 MME 발전소자

앞서 언급한 압전-자왜재료 복합체 기반의 MME 발전소

자는 비교적 오랜 기간 동안 연구가 진행되었고, 에너지 출력도 수 mW에 달해 다양한 IoT 소자를 구동하는데 큰 문제가 없었다. 하지만 복합체에 사용되는 압전 단결정 및 자왜재료의 제작 비용이 높아 실용화에 어려움으로 작용할 수 있다. 이에 제작비용을 획기적으로 낮추면서 고출력으로 작동 가능한 MME 발전소자의 개발 필요성이 있었는데, 대체 가능한 기술 중 하나가 정전기에 기반한 마찰전기 발전 방식이다. 정전기는 서로 다른 물질의 접촉면에서 발생하며, 생활/산업현장 및 자연에서도 흔히 발생하는 현상이다 [13]. 서로 다른 두 물질을 이용해 마찰이 용이한 구조를 형성하고 기계적 움직임에 의해 마찰을 일으킬 때 발생하는 정전기 효과를 이용한 에너지 소자를 마찰전기 발전 소자라고 한다 [14]. 이를 활용하면 외부에서 기계적인 움직임/진동이 가해질 때 두 마찰대전체의 거리 변화에 의해 전기 에너지 생성이 가능하다 [15]. 뒤에 소개하는 연구 결과들은 MME 변환과정에서 마찰대전 재료를 도입하여 자기장에 의한 전기 에너지 발전 및 여러 가지 응용사례에 관한 것들이다.

#### 3.1 표면적 향상을 통한 MME 마찰대전 발전소자의 출력 향상

2019년 재료연구소 연구진은 MME 발전소자에 마찰전기 발전 방식을 도입하여 고성능의 MME 발전소자를 개발하였다 [16]. 본 연구에서는 MME 발전소자에서 압전물질 대신 마찰대전체를 이용하고, 자왜재료 기반의 캔틸레버 대신 고탄성의 Ti를 캔틸레버로 활용하여 MME 발전을 가능하게 하였다. MME 마찰전기 발전소자의 구조와 외부 자기장에 의한 발전 과정은 그림 6(a)와 같다. 기본적인 구조는 Ti 기판에 테프론의 일종인 Perfluoroalkoxy (PFA)이 부착되어 있고, 외부 자기장에 의해 자석 질량체가 진동하고, 이러한 자기력의 힘으로 캔틸레버는 상하 변위를 유발할 때 PFA는 상부에 위치한 알루미늄에 부딪히며 마찰대전을 일으켜 전기 에너지 발전이 진행된다. i) 초기 상태에서는 외부에서 교류 자기장이 인가되고 캔틸레버에 부착된 자석에는 자기력에 의해 시계 및 반시계 방향의 돌림힘 (torque)이 번갈아 가며 발생한다. ii) 먼저 캔틸레버 구조체의 중심부분이 상승하면 PFA와 알루미늄은 접촉하고 마찰에 의해 PFA는 -로 알루미늄은 +로 대전된다. iii), iv) 캔틸레버 구조체의 중심 부분이 하강하면서 두 물질의 분리가 시작되고 정전기 유도 현상에 의해 두 마찰대전체의 전극에 보상전하가 축적되며 전하 균형이 맞을 때까지 외부 회로를 통해 전류가 흐른다. v) 캔틸레버 구조체의 중심 부분이 다시 상승하기 시작하면 전극에 축적되었던 보



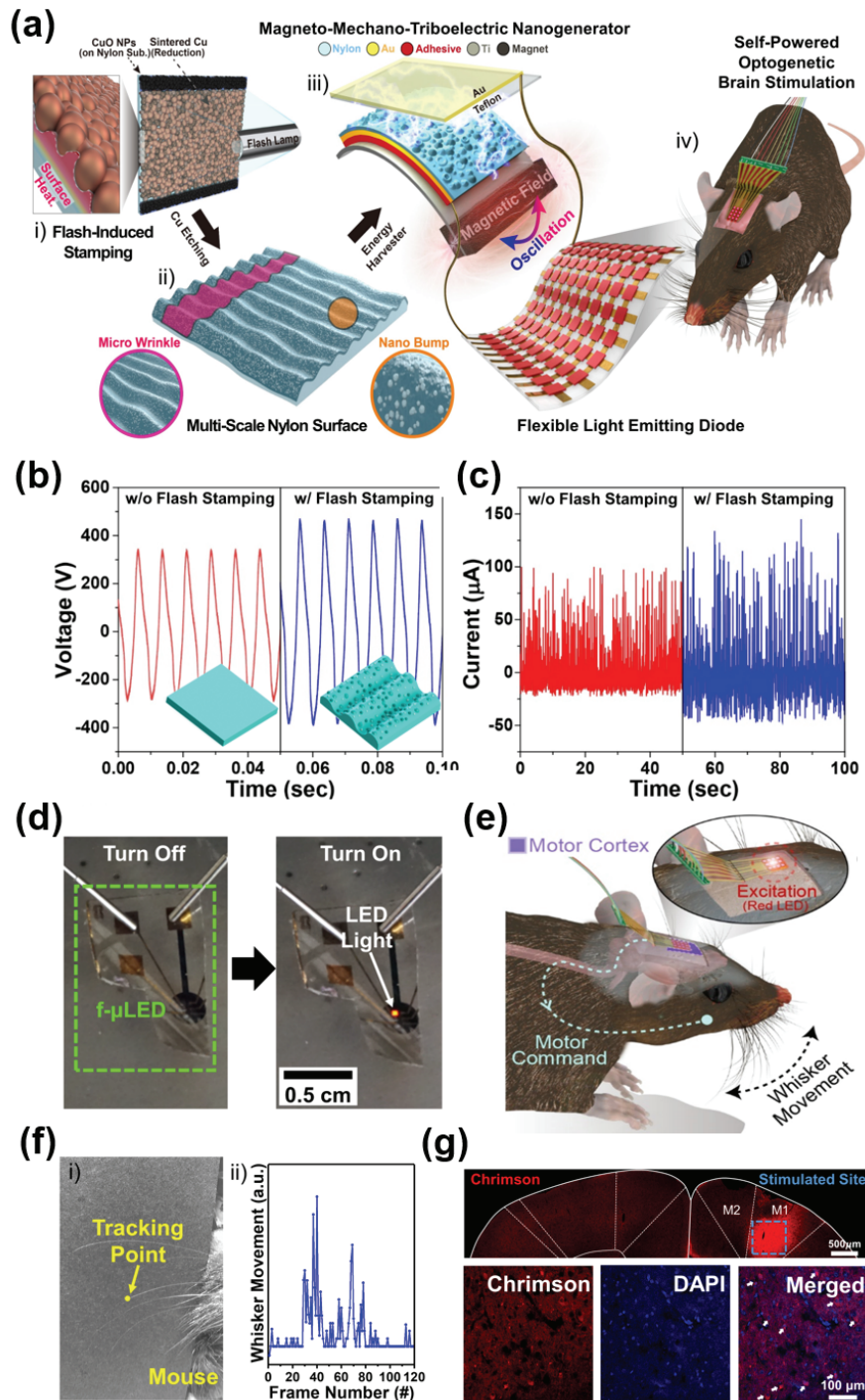
**Fig. 6.** (a) Schematic illustrations of the working mechanism of the magneto-mechano-triboelectric generator in an AC magnetic field, (b) photograph of the magneto-mechano-triboelectric generator system, (c) schematics of the fabrication process for the NaCl nano-particle modified triboelectric PFA film, (d) top view SEM image for the nano-structured PFA film, (e) the open-circuit output voltage values from the magneto-mechano-triboelectric generators with and without nanostructures, (f) the short-circuit output current values from the magneto-mechano-triboelectric generators with and without nanostructures, and (g) conceptual illustrations of the self-powered indoor wireless positioning system [16].

상전하가 점점 사라지며 처음과는 반대 방향의 전류가 외부 전극을 통해 흐르게 되며, 반복되는 상하진동 과정을 통해 두 전극 간에 지속적으로 교류 전기 에너지가 발생한다. 그림 6(b)에서는 교류 자기장 발생용 헬름홀츠 코일에 설치된 마찰대전체 기반 MME 발전소자의 모습이 나타나 있다. 마찰전기 발전소자의 출력을 향상하기 위해 가장 널리 쓰이는 방법 중 하나가 마찰대전체의 표면적을 늘리는 것이다. 서로 다른 두 물질이 마찰되었을 때 마찰대전에 의해 출력되는 전류는 물체 표면의 대전되는 전하량에 큰 영향

을 받는데, 마찰대전체의 표면적을 늘리면 대전되는 전하량이 증가되 전극에 축적되는 보상전하를 함께 증가시키고, 효과적으로 마찰전기 발전 에너지를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 그림 6(c)처럼 PFA 표면에 소금 나노 분말을 빠른 속도로 분사하여 구멍을 뚫으며 함몰되게 만들고, 물속에서 소금을 용해시켜 완전히 제거하는 공정을 도입하였다. 이를 통해 그림 6(d)와 같이 매우 복잡한 표면 나노 구조에 의한 넓은 표면적을 가지는 PFA 제작에 성공하였다. 70e의 교류 자기장 분위기에서, 나노 구조체가 PFA 표면에 있는 경우와 없는 경우의 MME 발전 성능을 비교해 보았는데, 그림 6(e), (f)처럼 나노 구조체가 있는 경우 708 V의 peak-to-peak 전압 및 277 μA의 최대 전류가 출력되었다. 나노 구조체가 없는 경우 448 V의 peak-to-peak 전압 및 118 μA의 최대 전류가 출력되었기에 나노 구조체가 있는 경우 에너지 발전 성능이 크게 향상된 것을 확인하였다. 최종적으로 나노 구조체가 형성된 마찰대전 MME 발전소자는 4.8 mW의 교류 전력을 발생하여 기존의 압전 단결정 기반의 MME 발전소자와 비슷한 에너지 출력을 보여주었다. 이러한 출력을 활용하여 IoT 기반의 위치 센서를 구동해 보았는데, MME 발전소자에서 생성된 전기 에너지를 공급받은 IoT 위치 센서는 위치 정보를 블루투스(Bluetooth) 통신으로 핸드폰에 전송하였고 지속적인 동작에 성공하였다. 본 연구는 저렴하면서 우수한 에너지 발전 성능을 가지는 마찰대전 물질을 성공적으로 MME 발전소자에 적용한 사례로, 향후 MME 발전장치의 실용화를 진행할 때 적용을 고려해 볼 만한 시도라고 할 수 있다.

### 3.2 MME 마찰대전 발전소자를 이용한 광유전 뇌자극

MME 발전소자의 가장 큰 응용범위는 전력을 전송하는 전선 주변에 부착되는 IoT 소자의 구동이지만, 이 밖에도 다양한 곳에 쓰일 수 있다. 심장박동기(cardiac pacemaker) 및 뇌심부자극기(deep brain stimulation)와 같은 생체 이식형 의료기기는 몸속에 이식되어 전기자극을 통해 부정맥 및 파킨슨병과 같은 질병의 증상을 치료하거나 완화하는데 이용된다 [17]. 외부와 물리적으로 단절되어 있는 생체 이식형 의료기기의 특성상 배터리를 이용해 전력을 공급받아 구동되는데, 배터리의 수명이 끝나면 주기적으로 배터리를 교체하기 위한 수술이 필요하다 [18]. 만약 사람의 몸속에서 전기 에너지를 만들어 생체이식형 의료기기의 배터리를 대체하거나 충전하면 이러한 불편함을 최소화할 수 있다. 앞서 서술했듯이 버려지는 자기장은 우리 생활 및 사회 전반에 걸쳐 흔히 존재하는데, 소형 MME 발전



**Fig. 7.** (a) Schematic illustration of the fabrication process for flash-enhanced magneto-mechano-triboelectric generator and its application for self-powered optogenetic stimulation, (b) the open-circuit output voltage signals with and without flash-enhanced magneto-mechano-triboelectric generators, (b) the short-circuit output current signals with and without flash-enhanced magneto-mechano-triboelectric generators, (d) a photo image of the flexible LED lighted up by the rectified signal of the magneto-mechano-triboelectric generator, (e) schematic illustration of experimental procedures for self-powered optogenetic brain stimulation, (f) i) Video tracking of the whisker movements of rat and ii) relative whisker movements *via* optogenetic stimulation with magneto-mechano-triboelectric operation, and (g) confocal fluorescent images of rat brain after self-powered optogenetic neuromodulation [19].

소자를 몸속에 이식하여 전기 에너지를 생성하고 생체 자극에 이용할 수 있으면 생체이식형 의료기기의 배터리와 관련된 문제점을 해결하는 데 큰 도움을 줄 수 있다. 그림 7(a)에서처럼 본 연구에서는 찰나의 극 단초(ms 영역) 플래시(flash) 광원을 이용해 마찰대전 물질의 표면적 향상을 진행하였고, 전기 에너지 출력이 향상된 MME 발전소자를 제작하였다 [19]. 다음으로 자기장 분위기에서 MME 발전으로 생성된 전기 에너지를 활용하여 유연한(flexible) light emitting diode (LED)를 발광하고, 쥐의 뇌를 광 유전학 신경조절(optogenetic neuromodulation) 기술로 부분 자극하는 자가발전형 광 유전 뇌자극 시스템을 구현하였다. 플래시 열처리 기술은 플래시 램프에서 발생하는 광 에너지를 활용한 극 단초의 열처리 방법으로, 목표재료의 표면적에 순간적인 빛을 인가하여 기판의 손상을 최소화하며 표면적 열처리를 할 수 있기 때문에 열에 취약한 플라스틱 필름에 고온 열처리를 진행할 수 있는 장점이 있다. MME 발전소자의 마찰대전 물질로는 나일론과 테프론을 이용하였는데, CuO 나노 분말을 나일론 표면에 도포한 뒤 플래시 열처리 공정을 이용해 CuO를 급속 가열하여 나일론 표면에 열적 변형을 유발함으로써 표면적을 늘렸다. 플래시 공정 이후의 표면 거칠기(roughness)는 이전보다 약 41배 증가하여 뚜렷한 표면적 향상 효과가 있음을 확인하였다. 그림 7(b), (c)처럼 7 Oe의 교류자기장을 마찰대전체 기반의 MME 발전소자에 인가할 때, 플래시 열처리 전 샘플에서 출력된 peak-to-peak 전압 및 최대전류는 638 V, 100 uA 수준인 데 반해, 플래시 열처리 이후에는 870 V, 145 uA로 각각 증가하였으며, 표면적 향상에 따른 MME 마찰전기 발전소자의 큰 출력 증가가 이루어졌음을 확인하였다. MME 발전소자의 실용화를 위해서는 생활 주변에서 사용되는 상시전원(220 V, 60 Hz) 환경에서 생성되는 미세 자기장을 이용한 에너지 생성이 가능해야 하는데, 본 연구에서는 전기 드라이어를 작동시킬 때 발생하는 교류 자기장을 활용하여 에너지 발전을 시도해 보았다. 제작된 플래시 열처리 MME 발전소자를 전기 드라이어의 전선 주변에 설치하였을 때 237 V의 peak-to-peak 전압과 33 uA의 최대전류가 발생되었고, 이를 이용해 그림 7(d)와 같이 유연 LED를 발광하는 데 성공하였다. 자가발전형 광유전 뇌자극 시스템을 구현하기 위해 그림 7(e)와 같이 유연 LED를 쥐의 뇌 M1 운동피질 영역에 삽입하였고, 전선 주변에서 발생하는 자기장 분위기에서 MME 발전소자에서 생성되는 전기 에너지를 이용해 유연 LED에 전기 에너지를 공급하였다. M1 운동피질 영역을 빛을 이용해 광 유전 자극하게 되면 쥐의 입 옆 근육의 수축을 유발하여 결과적으로 쥐의 수영이 움직이게 된다. 쥐의 뇌를 광유전 자

극하였을 때 발생하는 행동 변화를 관찰하기 위해 쥐의 수영을 동영상으로 촬영하였고, 이미지 트래킹 프로그램을 활용해 지속적인 움직임이 발생하는지 분석하였다. 전기 드라이어 전선에서 발생하는 3 Oe의 교류 자기장 분위기에서 MME 발전으로 생성된 전기 에너지를 유연 LED에 공급하였을 때 그림 7(f)와 같이 쥐의 수영이 뚜렷하게 움직인 것을 확인하였다. MME 발전소자를 이용한 자가발전형 광유전 뇌자극 실험이 완료된 후 뇌자극이 성공적으로 완료되었는지를 그림 7(g)와 같이 postmortem histological 맵핑 분석을 이용하여 확인하였다. 성공적으로 광유전 뇌자극이 이루어지면 Chromson과 4',6-diamidino-2-phenylindole (DAPI)라는 형광체가 신경 세포와 뇌조직에서 동시에 발현이 되는데, 이번 실험에서 자가발전 광유전 뇌자극 이후에 M1 영역에서 Chromson과 DAPI가 동시에 중첩되어 발현된 부분이 존재함으로써 성공적인 광유전 뇌자극이 성공적으로 일어났음을 확인하였다. 본 연구를 통해 기존에 널리 알려진 MME 발전소자의 응용범위인 IoT 시스템으로의 전력 공급 외에도 의료 분야에서도 MME 발전 기술이 쓰일 수 있는 가능성을 살펴보았다. 하지만 MME 발전소자가 작동할 때 꾸준히 진동하며 물리적인 움직임을 유발하고, 소자의 부피도 비교적 크기 때문에 생체에 적용하기에는 많은 문제점이 있다.

#### 4. MME 발전소자의 미래 전망

MME 변환을 이용한 에너지 발전이 가장 널리 쓰일 수 있는 분야는 발전소에서 생성된 전력의 송배전 분야이다. 송배전 관련 선로 및 시설들은 우리나라 전반에 걸쳐 매우 고르게 분포되어 있다. 예를 들어 765 kV 송전선로의 길이는 2020년 현재 약 552 km, 345 kV의 송전선로는 약 4,613 km, 전국의 변전소는 약 850개가 분포해 있다. 하지만 국내 송전 및 변전시설은 자연재해 및 결함 등으로 연간 약 100회 정도의 크고 작은 고장이 나며, 이를 유지/보수하기 위해서는 작업자가 고공에서 직접 육안으로 보며 작업을 진행하는 경우가 많아 낮은 작업효율과 안전에 관한 우려가 있다. 만약 MME 발전소자로 작동이 가능한 IoT 센서 시스템을 송배전 시설에 적용하여 전선 등의 손상 여부를 실시간 감지하여 무선으로 전송할 수 있으면 새로운 전력 설비 진단 및 감시 시스템으로 널리 쓰일 수 있을 것이다. 또한 송배전 전력선에는 일반적으로 매우 높은 전류가 흐르기 때문에 충분한 크기의 교류 자기장이 발생하여 MME 발전소자를 적용했을 때 에너지 발전량을 최대화할 수 있는 장점이 있다. IoT 센서를 이용해 송배전 시스템의

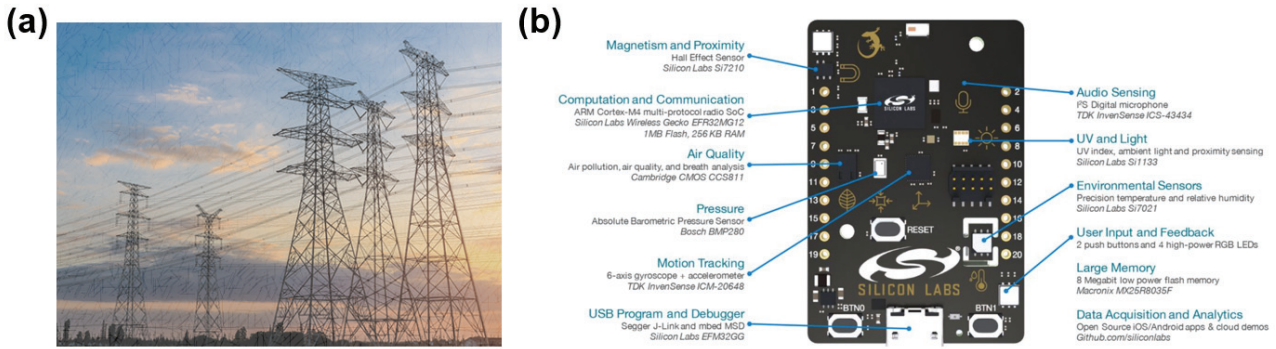


Fig. 8. (a) Photo image of power transmission line and (b) various sensing functions of IoT sensor [20].

건전성을 효과적으로 진단/감시하기 위해서는 다양한 기능을 가진 센서 모듈을 사용하는 것이 유리하다. 예를 들어 미국의 Silicon Labs사에서 출시한 Thunderboard Sense 2의 경우 그림 8(b)와 같이 온도, 광량, 자외선 지수, 기압, 소리 크기, 이산화탄소, 휘발성 유기화합물(VOCs), 자기장을 측정할 수 있는 다기능 센서인데, 하나의 센서로 다양한 주변 환경 정보를 측정할 수 있어 이를 송배전 시스템에 적용하면 다양한 정보에 대해 동시에 효과적으로 진단/감시가 가능해진다 [20]. 하지만 Thunderboard Sense 2의 동작을 위해 최소 10 mW 이상의 전력이 필요한데, 기존의 MME 발전소자를 이용한 구동은 에너지 출력의 부족으로 인해 어려운 상황이다. 이러한 이유 때문에 MME 발전소자의 에너지 출력을 수십 mW 수준으로 향상시키는 연구가 필요하다. 현재까지 에너지 발전소자의 출력을 향상하기 위한 다양한 시도가 있었는데, 대표적인 시도로는 여러 가지 에너지 하베스팅 원리를 한 소자에 적용하는 하이브리드(hybrid)화이다. 압전, 마찰전기, 열전, 태양광, 전자기 유도 등의 여러 가지 발전 방식 중 2가지 이상을 한 가지 소자에 적용하면 비교적 쉽게 에너지 출력량을 증가시킬 수 있다. 향후 이러한 MME 발전소자에 기존의 압전, 마찰전기 발전 외에도 다양한 발전원리를 추가하면 에너지 출력을 향상시키고 10 mW 이상의 전력 발생을 기대할 수 있을 것이다. 또한 MME 발전소자의 신뢰성 평가를 통해 장기 구동 시의 수명을 예측하고 다양한 환경에서 장시간 쓰일 수 있는 수준으로 개선하는 연구가 필요하다. 이러한 연구들이 추후 잘 이루어진다면 MME 발전소자를 이용하여 전력 송배전 과정에서의 진단/감시용 자가발전형 IoT 센싱 시스템 개발이 가능할 것으로 예상된다.

## 5. 결론

본 리뷰에서는 MME 발전소자의 개발 및 응용에 관한 국내외의 최신 연구 동향에 대해 살펴보았다. MME 발전소자는 주변에 흔하게 존재하는 미세 자기장을 이용해 수 mW 수준의 전기 에너지를 생성할 수 있고, 이를 활용해 IoT 소자에 전원을 공급하여 배터리의 수명과 관련된 문제를 줄일 수 있다. 현재까지 MME 발전소자의 성능을 높이기 위해 압전재료 및 자왜재료의 특성 개선, MME 발전소자 주변의 자기선속 밀도 향상이 이루어졌고, 압전재료를 대체하여 마찰대전 재료가 적용되기도 하였다. MME 발전소자는 IoT 관련 분야 외에도 의료분야에도 적절히 응용될 수 있음을 알 수 있었다. 특히 MME 발전소자의 가장 큰 응용처로는 전력 송배전 분야에서 송배전선의 건전성 모니터링 및 다양한 사고에 대한 실시간 감지인 것을 알아보았다. 향후 MME 발전소자의 지속적인 성능 개선 및 소형화를 이루고, 신뢰성 평가를 통해 장기구동 수명을 확보한 뒤 다양한 IoT 시스템과의 모듈화를 이루면 가정, 공장, 송배전 인프라, 지하시설 등 다양한 환경에 설치되어 자가발전형 무선 감지 시스템으로써 널리 응용이 가능할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2020년)에 의하여 연구되었음.

## ORCID

Geon-Tae Hwang

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

## 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] 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>]
- [4] P. Hosseinnzhad, S. Behnia, and S. Fathizadeh, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **22**, 257 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s42341-020-00228-6>]
- [5] A. Harb, *Renewable Energy*, **36**, 2641 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.014>]
- [6] 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>]
- [7] V. Annapureddy, M. Kim, H. Palneedi, H. Y. Lee, S. Y. Choi, W. H. Yoon, D. S. Park, J. J. Choi, B. D. Hahn, C. W. Ahn, J. W. Kim, D. Y. Jeong, and J. Ryu, *Adv. Energy Mater.*, **6**, 1601244 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201601244>]
- [8] V. Annapureddy, H. Y. Lee, W. H. Yoon, H. J. Woo, J. H. Lee, H. Palneedi, H. J. Kim, J. J. Choi, D. Y. Jeong, S. N. Yi, and J. Ryu, *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 093901 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4962047>]
- [9] R. Sriramdas, M. G. Kang, M. Meng, M. Kiani, J. Ryu, M. Sanghadasa, and S. Priya, *Adv. Energy Mater.*, **10**, 1903689 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201903689>]
- [10] T. Nayak, B. Swain, P. P. Nayak, and S. Bhuyan, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **22**, 250 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s42341-020-00227-7>]
- [11] V. Annapureddy, S. M. Na, G. T. Hwang, M. G. Kang, R. Sriramdas, H. Palneedi, W. H. Yoon, B. D. Hahn, J. W. Kim, C. W. Ahn, D. S. Park, J. J. Choi, D. Y. Jeong, A. B. Flatau, M. Peddigari, S. Priya, K. H. Kim, and J. Ryu, *Energy Environ. Sci.*, **11**, 818 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C7EE03429F>]
- [12] 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>]
- [13] 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>]
- [14] Z. L. Wang, T. Jiang, and L. Xu, *Nano Energy*, **39**, 9 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.06.035>]
- [15] 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>]
- [16] 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>]
- [17] G. D. Nelson, *Tex. Heart Inst. J.*, **20**, 12 (1993). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1540-8159.1982.tb02226.x>]
- [18] M. J. Wilhelm, C. Schmid, D. Hammel, S. Kerber, H. M. Loick, M. Herrmann, and H. H. Scheld, *Ann. Thorac. Surg.*, **64**, 1707 (1997). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0003-4975\(97\)00989-2](https://doi.org/10.1016/S0003-4975(97)00989-2)]
- [19] H. E. Lee, J. H. Park, D. Jang, J. H. Shin, T. H. Im, J. H. Lee, S. K. Hong, H. S. Wang, M. S. Kwak, M. Peddigari, C. K. Jeong, Y. Min, C. H. Park, J. J. Choi, J. Ryu, W. H. Yoon, D. Kim, K. J. Lee, and G. T. Hwang, *Nano Energy*, **75**, 104951 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104951>]
- [20] A. K. Kanál and T. Kováčsházy, *Proc. 2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC)* (IEEE, Krakow-Wieliczka, Poland, 2019) p. 1-5. [DOI: <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2019.8766006>]